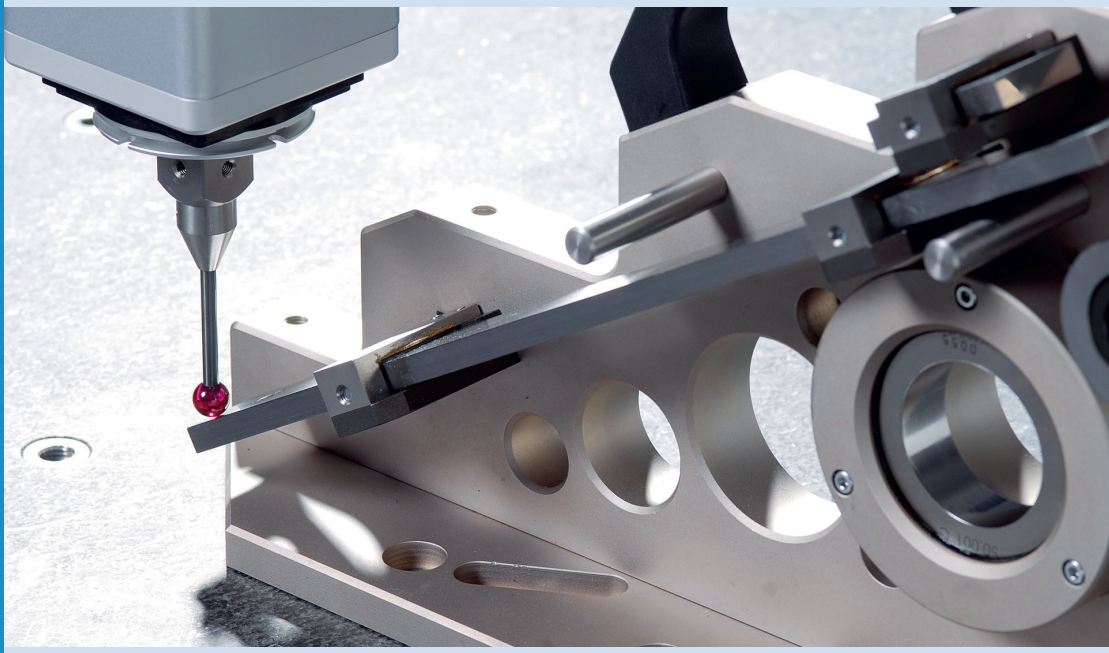
VDI VDE Mess- und Automatisierungstechnik

VDI-Berichte 2390



10. VDI-Fachtagung

Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen – Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2021

Der Weg zum sicheren Messen und Prüfen

Erfurt, 10. und 11. November 2021

Bildquelle: © Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

VDI-BERICHTE
Herausgeber:
VDI Wissensforum GmbH

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021
Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck.
Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560
ISBN 978-3-18-092390-1

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Inhalt

Vorwort 1
O. Schnelle-Werner, ZMK & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen
P. Jatzkowski, TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln

▶ Plenarvortrag

Digitalisierung für das Prüfprozessmanagement in der Fertigungsmesstechnik 3
D. Imkamp, Carl ZEISS Industrielle Messtechnik, Oberkochen

Teil I: Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen 2021

▶ Thermodynamische und chemische Messgrößen

Der absolute pH-Wert pH_{abs} und seine Messunsicherheit 13
F. Bastkowski, S. Seitz, Physikalisch-Technische Bundestanstalt (PTB), Braunschweig;
A. Heering, R. Born, S. Lainela, I. Leito, J. Nerut, J. Saame, University of Tartu, Tartu, Estland;
V. Radtke, Universität Freiburg, Freiburg;
D. Nagy, Z. S. Nagyne, L. Szucs, Government Office of the Capital City Budapest (BFKH), Budapest, Ungarn;
M. Rozikova, M. Vičarova, Czech Metrology Institute (CMI), Brno, Tschechien;
L. C. Deleebeeck, A. Snedden, DFM A/S, Horsholm, Denmark;
B. Anes, R. Bettencourt, M. F. Camoes, FCiencias.ID, Centro de Quimica Estrutural, Faculdade de Ciencias da Universidade de Lisboa (FCID), Lissabon, Portugal;
R. Quendera, L. F. Ribeiro, Instituto Portugues da Qualidade (IPQ), Lissabon, Portugal;
D. Stoica, Laboratoire de Metrologie et d'Essais (LNE), Paris, Frankreich;
T. Näykki, Suomen ymparistokeskus (SYKE), Helsinki, Finland;
L. Liv, E. Uysal, Turkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (Tubitak Ume), Gebze Yerleşkesi, Türkei

Messunsicherheitsbetrachtung für die Kalibrierung von keramischen Wärmestrom-sensoren 23
F. Bartz, S. Gehrmann, Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG, Weissach;
S. Marin, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Multiple und komplexe Mess- und Sensorsysteme

Quantifizierung von Redundanz in Sensorsystemen und die Beziehung zur Messunsicherheit 35
G. J. P . Kok, VSL B.V., Delft, Niederlande

Messunsicherheitsbestimmung bei der Datenfusion lokaler und globaler Messtechnik zur Sektionsmontage im Flugzeugbau 47
M. Huber, C. Nicksch, Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen University, Aachen;
R. H. Schmitt, Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT, Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen University, Aachen

Praxisorientierte, simulative Abschätzung von Unsicherheiten komplexer Messsysteme. 63
J. Degenhardt, G. Dai, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig;
R. Tutsch, Institut für Produktionsmesstechnik IPROM, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

Verknüpfung von Datensätzen mit unterschiedlicher Auflösung mittels parallelkinematischem Positioniersystem 75
S. Metzner, T. Hausotte, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Elektrische Messtechnik

Eignungsprüfung – wurde wirklich so kalibriert oder geprüft wie spezifiziert? – Beispiel: Prüfung von Elektrizitätszählern 87
C. Mester, J. Braun, Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Bern-Wabern, Schweiz

Messunsicherheiten von modalen Streuparametern. 97
K. Kuhlmann, F. Gellersen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig;
R. Pöhmerer, LEONI Kabel GmbH, Roth

Die Konformitätsbeurteilung von 5G-Basisstationen 111
F. Pythoud, Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Bern-Wabern, Schweiz

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Dimensionelle und mechanische Messgrößen

Unsicherheitsbetrachtungen zur Charakterisierung von Mikrokugeln auf Basis von AFM-Oberflächenscans 121
E. Oertel, E. Manske, Technische Universität Ilmenau

Messunsicherheitsbudgets in der Oberflächentechnik – Stufenhöhe, Schichtdicke, Eindringhärte, Haftfestigkeit 133
U. Beck, A. Hertwig, M. Griepentrog, S. Hielscher, T. Lange, M. Weise, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Digitalisierung in der Metrologie und aktuelle Ansätze in der Modellbildung

Nach der Neudefinition des Kilogramms: Darstellung kleiner Kräfte heute 147
T. Fröhlich, Technische Universität Ilmenau

Systematische Realisierung von Software zur Messunsicherheitsbestimmung am Beispiel der Virtuellen Planck-Waage 159
I. Poroskun, C. Rothleitner, D. Heißelmann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Virtuelle dimensionelle Röntgencomputertomografie für die numerische Messunsicherheitsbestimmung 169
T. Reuter, F. Wohlgemuth, T. Hausotte, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen

Modellbildung in der Messtechnik und ihre künftige Entwicklung 179
N. Schiering, O. Schnelle-Werner, ZMK & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen;
M. Heizmann, Institut für Industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT);
K.-D. Sommer, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

https://doi.org/10.51202/9783161023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Mechanische Messgrößen

Steifigkeitskalibrierung von Cantilevern: Rückführbares Messen der Kraft-Weg-Kennline . . . 189
O. Dannberg, T. Fröhlich, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Konformitätsnachweise

Quantitativer Ergebnis-Indikator zur Bewertung von Vergleichsmessungen – Vergleichsmessungen aus Sicht des Verbraucherschutzes auswerten 197
S. Friederici, S. Rudtsch, L. Bünger, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin

Dimensionelle Messgrößen

Frequenzkamm-gekoppelte Metrologielaser für den Einsatz in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen 209
U. Blumröder, R. Füßl, E. Manske, Technische Universität Ilmenau, Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau;
P. Köchert, J. Flügge, Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Precision Engineering Division, Braunschweig

Längenmessabweichung und Antastabweichung in dem sich verändernden technischen Umfeld der Koordinatenmesstechnik 223
D. Imkamp, Carl ZEISS Industrielle Messtechnik, Oberkochen;
A. Martin, HEXAGON Metrology GmbH, Wetzlar

Komplexe 3D-Scantrajektorien für die dimensionelle Computertomographie durch Verwendung eines Hexapoden 235
L. Butzhammer, T. Hausotte, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Plenarvortrag

Self-X Sensorsysteme: Robuste Informationspräsentation und -verarbeitung in adaptiver Architektur 247
A. König, Lehrstuhl Kognitive Integrierte Sensorsysteme, Technische Universität Kaiserslautern

https://doi.org/10.51202/9783161023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Teil II: Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2021

Anforderungen der 17025 in der Praxis

Erfahrungen in der Anwendung von Messunsicherheitsbudgets in akkreditierten Werkstoffprüflaboren entsprechend DIN EN ISO/IEC 17025:2018 253
S. Wieler, QUAISO GmbH, Marl;
H. Frenz, Westfälische Hochschule, Recklinghausen

Umsetzung der DIN ISO 17025 in Bezug auf die Prüfmittel in Herstellerlaboren (Automotive) – Anforderungen an Technische Dienste und Hersteller 265
F. Schneider, TÜV-Verband e.V., Berlin

Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung von Messunsicherheiten für die Prüfprozesseignung – Prüfprozesseignung vereinfacht aus Spezifikation und Vergleichpräzision bestimmen 269
E. Wiedenmann, Serious Enterprises, Aalen;
T. Schlüter, c.a.s. GmbH, Oberhausen

Der neue VDA Band 5: Anforderungen und Anwendung

VDA-Band 5 Mess- und Prüfprozesse – Innovationen und Verbesserungen der neuen, 3. Auflage 2021 281
M. Hoffmann, Cariad SE, Ingolstadt

Praxisgerechte Bestimmung der Messunsicherheit nach VDA 5 (3. Auflage) – Der neue VDA Band 5: Anforderungen und Anwendung 289
S. Conrad, Q-DAS GmbH, Weinheim

VDA Band 5 und ISO 22514-7:2021 „Eignung von Messprozessen“ 295
E. Dietrich, IconPro GmbH, Aachen

Schraubtechnik im Wandel – Neue Richtlinien und Aktivitäten des VDI/VDE GMA FA 3.63 bieten mehr Klarheit und Freiheiten für Anwender 305
S. Herbold, STAHLWILLE Eduard Wille GmbH & Co. KG, Wuppertal;
M. Fischer, SCS Concept Deutschland GmbH, Loiching/Kronwieden

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Planung von Prüfprozessen

Risikobasierte Ansatz zur Absicherung von Prüfprozessen in der Medizintechnik 317
M. M. Pfeiffer, Karl Storz SE & Co. KG, Tuttlingen

Festlegung von Prüffristen in der Praxis 329
R. Ernst, Ernst Quality Consulting, Stuttgart

Zukunft der Messtechnik

Dynamische Kraft- und Druckkalibrierung – Verfahren und Rückführung 341
C. Sander, A. Pejak, Testo Industrial Services GmbH, Kirchzarten

Das Digital Calibration Certificate (DCC) 349
S. Hackel, F. Härtig, T. Schrader, A. Scheibner, J. Loewe, B. Gloger, J. Jagieniak,
D. Hutzschenreuter, G. Söylev-Öktem, L. Doering, Physikalisch-Technische Bundesanstalt
(PTB) Braunschweig

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Posterbeiträge

Investigation of the measurement uncertainty in the 2D-instrument transfer function (ITF) characterization of areal surface topography measuring instruments 361
Z. Jiao, G. Dai, R. Tutsch, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

Prüf' ich noch – oder mess' ich schon? Ein Konzept für die Prüfunsicherheitsbestimmung von zerstörungsfreien Prüfsystemen 367
D. Kanzler, V. K. Rentala, Applied Validation of NDT, Berlin;
M. Bertovic, T. Heckel, M. Rosenthal, Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung, Berlin;
S. Keßler, R. Stolz, F. Dethof, Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg;
A. Jüngert, Materialprüfanstalt, Stuttgart;
J. Vrana, Vrana GmbH, Rimsting

„Remote-leaded" Annahmeprüfung für Koordinatenmessgeräte 373
D. Imkamp, R. Friedel, D. Smolik, V. Greifzu, Carl ZEISS Industrielle Messtechnik, Germany, Oberkochen;
S. Maruyama, Tokyo Seimitsu Co., LTD (ACCRETECH), Japan
S. Miyazaki, ASANUMAGIKEN Co., LTD, Japan

Erstellung des Messunsicherheitsbudgets eines Torsionsprüfstandes und dessen Eignungsuntersuchung als Basis der funktional-geometrischen Korrelation 381
S. Schiefer, Q-DAS GmbH, Chemnitz;
M. Gerlach, HS Mittweida;
J. Seewig, Technische Universität Kaiserslautern

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

INGENIEUR.de
TECHNIK - KARRIERE - NEWS

powered by VDI Verlag

Starten Sie durch – auf INGENIEUR.de!

Das TechnikKarriereNews-Portal für Ingenieure und IT-Ingenieure.

Was immer Sie für Ihre Karriere brauchen – Sie finden es auf ingenieur.de: Auf Sie zugeschnittene Infos und Services, Stellenangebote in der Jobbörse, Firmenprofile, Fachartikel, Gehaltstest, Bewerbungstipps, Newsletter und alles zu den VDI nachrichten Recruiting Tagen.

https://doi.org/10.51202/9783161023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

durch die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung, beispielsweise in einer Smart Factory im Kontext von Industrie 4.0, werden hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit der Mess- und Sensorsysteme gestellt. Sie ist die Grundlage für die Sicherheit von Maschinen und Anlagen. Daraus leitet sich der konsequente Einsatz und die ständige Weiterentwicklung von Methoden und Modellen für diese Sensorsysteme und ihre Messunsicherheit ab.

Besonders erwähnt sollen hier die in die Zukunft gerichteten und für die technologische Entwicklung wichtigen ausgewählten Themenschwerpunkte sein wie:

• Messunsicherheit bei der Datenfusion multipler Sensorsysteme

• Messunsicherheit virtueller Systeme, digitaler Zwillinge und digitaler Schatten

• Messunsicherheitsbewertung von One-Step-Traceability-Lösungen (Direkte Rückführung)

• u.a.

Die VDI Wissensforum GmbH führt bereits zum 10. Mal die Tagung „Messunsicherheit“ durch. Die **10. VDI-Fachtagung „Messunsicherheit und Prüfprozesse 2021“** findet, der Tradition folgend, in Thüringen in Erfurt statt.

Erstmalig ist 2021 die VDI Fachtagung **„Prüfprozesse in der industriellen Praxis“** komplett in das Programm der Tagung „Messunsicherheit“ integriert, um dem Interesse der industriellen Anwender von Messtechnik zusätzlichen Raum zu geben und den Expertenaustausch zu fördern.

Der vorliegende Tagungsband enthält die Manuskripte der Referenten/-innen, soweit sie zum Zeitpunkt der Drucklegung vorlagen. Die Tagungsleiter und die Mitglieder des Programmausschusses danken allen, die beim Gelingen der Veranstaltung mitgewirkt haben.

Wir freuen uns, Sie vom 10. - 11. November 2021 in Erfurt begrüßen zu dürfen und freuen uns auf interessante Vorträge und Gespräche mit den Teilnehmern/-innen.

Im Namen des Programmausschusses

Ihre Tagungsleiter
Dr.-Ing. Olaf Schnelle-Werner, Geschäftsführer,
ZMK & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen
(Messunsicherheit)

Dr.-Ing. Philipp Jatzkowski, Production Excellence,
TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln
(Prüfprozesse)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Digitalisierung für das Prüfprozessmanagement in der Fertigungsmesstechnik

Digitization for test process management in manufacturing metrology

Dr.-Ing. **Dietrich Imkamp**,
Carl ZEISS Industrielle Messtechnik, Oberkochen

Kurzfassung

Ausgehend von den Prozessen zur Produktprüfung mittels Messtechnik wird ein Bild zur horizontalen und vertikalen Integration von Prüfprozessen in den Auftragsabwicklungsprozess der industriellen Produktion entwickelt. Diese Bild bildet zusammen mit den Informationsmodellen für Prüfprozesse die Basis zur Digitalisierung dieser Prozesse. Zur Implementierung werden unterschiedliche Schnittstellen je nach Anwendungsbereich verwendet. Zwei aktuelle Entwicklungen im Bereich der Schnittstellen: OPC UA und Digitaler Kalibrierschein werden kurz vorgestellt.

1. Einleitung: Digitalisierung und Digitalisierung in der Messtechnik

Digitalisierung bezeichnet ursprünglich das Umwandeln analoger Werte in digitale Formate und ihre Verarbeitung oder Speicherung in einem digitalen System. In der Signalverarbeitung wird mit Digitalisierung der Übergang von analogen zu digitalen Signalen mittels Abtastung bezeichnet [1]. Dieses Prinzip wird bei vielen technischen Systemen in der Produktion genutzt. In der Fertigungsmesstechnik spielt die Digitalisierung schon lange eine bedeutende Rolle. Komplexe Messsysteme wie beispielsweise die Koordinatenmesstechnik wären ohne digitale Datenverarbeitung nie zur Anwendung gekommen [2].

Der Begriff der Digitalisierung wird zwischenzeitlich immer seltener im Sinne der zuvor beschriebenen, ursprünglichen Bedeutung verwendet, sondern vermehrt im Sinn des umfassenden Trends der Veränderung der industriellen Produktion durch den Einsatz digitaler Technik. Dabei findet er sehr vielfältige und teilweise widersprüchliche Anwendungen (z. B.: Automation, Veränderung von Geschäftsmodellen) [3]. In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt auf der Integration der Produktprüfung mittels Messtechnik in die digital unterstützten Prozesse der Produktion.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Fertigungsmesstechnik zur Produktprüfung in der industriellen Produktion

Für die Messtechnik in der so genannten diskreten Produktion, bei der abzählbare Einheiten (Stück) hergestellt werden [4], hat sich der Begriff der Fertigungsmesstechnik etabliert.

Wenn die Messtechnik zur Produktprüfung eingesetzt wird, werden quantifizierbare Merkmale des Produktes, wie beispielsweise Maße der geometrischen Produktspezifikation [5] oder quantifizierbare Werkstoffeigenschaften, wie die Härte [6], erfasst. Die mittels der Messtechnik erfassten Merkmalsausprägung sind Messwerte. Diese Messwerte werden unter Berücksichtigung der Messunsicherheit mit den spezifizierten Toleranzen des Merkmals verglichen, um zu prüfen, ob die Merkmalsausprägung in Form des Messwertes innerhalb oder außerhalb der festgelegten Toleranz liegt. Damit wird die Konformität des Merkmals geprüft [7].

3. Prüfprozessmanagement und digitale Integration

Der Prüfprozess umfasst die Prüfplanung, die Datenerfassung und die Auswertung [8]. Mit diesen drei Elementen wird der Ablauf der Produktprüfung beschrieben. Weiterhin gehört das Prüfmittelmanagement als unterstützendes Element zur Produktprüfung [9] (Bild 1).

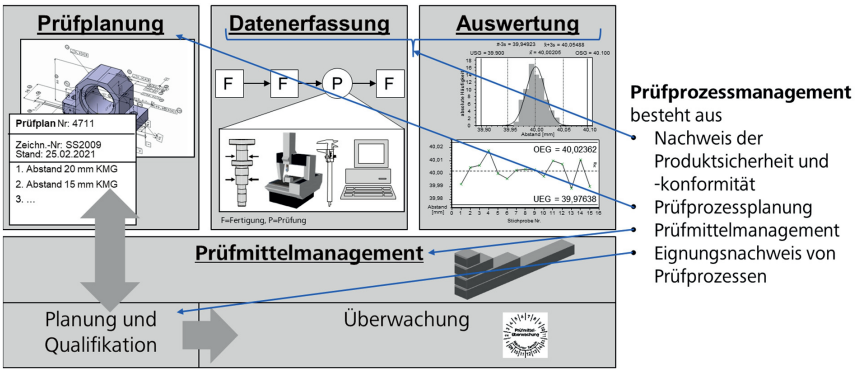


Bild 1: Organisation der Produktprüfung und Prüfprozessmanagement

Für die Organisation von Prüfprozessen wurde der übergreifende Begriff des Prüfprozessmanagements geschaffen. Darunter versteht man die Analyse, Auswahl, Implementierung und Validierung von Prüfprozessen sowohl unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, wie Anschaffungspreis, Instandhaltungskosten oder Platzverbrauch, als auch unter technischen

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Gesichtspunkten, wie EDV-Integrierbarkeit, Bedienkomplexität oder Messunsicherheit [10]. Diese Beschreibung schließt explizit unter den technischen Gesichtspunkten das Thema der digitalen Integration ein. Weitere Informationen zum Prüfprozessmanagement sind in der Richtlinienreihe VDI/VDE 2600 zusammengestellt [11].

Nach der neuen Ausgabe des VDA 5 [12] umfasst das Prüfprozessmanagement den Nachweis der Produktsicherheit und -konformität, die Prüfprozessplanung, das Prüfmittelmanagement und den Eignungsnachweis von Prüfprozessen. In Bild 1 werden diese Aufgaben den Elementen des Prüfprozesses zugeordnet. Die Prüfprozessplanung wird der Prüfplanung zugeordnet. Durch Datenerfassung und Auswertung wird der Nachweis von Produktsicherheit und -konformität erbracht. Unterstützend wirkt dazu das Prüfmittelmanagement, zu dem auch der Eignungsnachweis gehört.

4. Horizontale und vertikale Integration des Produktprüfungsprozesses

Die operative Umsetzung der Produktprüfung mittels Messtechnik erfolgt, wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt durch Prüfplanung beziehungsweise Prüfprozessplanung, Datenerfassung und Auswertung. Diese Schritte der messenden Prüfung werden in Bild 2 mit den Prozessschritten der Auftragsabwicklung, bestehend aus Entwicklung beziehungsweise Konstruktion, Arbeitsplanung und Fertigung gemäß [13] in Beziehung gesetzt und damit „horizontal“ integriert. Die Arbeitsvorbereitung definiert auf Basis der von Entwicklung und Konstruktion erzeugten Produktspezifikation den Arbeitsplan, der auch einen Prüfplan beinhaltet. Aus dem Arbeitsplan wird der Fertigungsauftrag zur Herstellung des Produktes abgeleitet. Der Prüfplan dient zur Ableitung des Prüfauftrags, der im Fall einer messenden Prüfung auch einen Messauftrag (Bild 3) beinhaltet wird. Nach den Festlegungen im Prüfplan beziehungsweise Messauftrag werden die Produktmerkmale erfasst und ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung dienen einerseits zur Konformitätsbewertung (Abschnitt 2) und andererseits zur Rückmeldung in vorgelagerte Bereiche. Durch die Rückmeldungen werden Regelkreise [14] zur Produktions- und Produktverbesserung realisiert.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

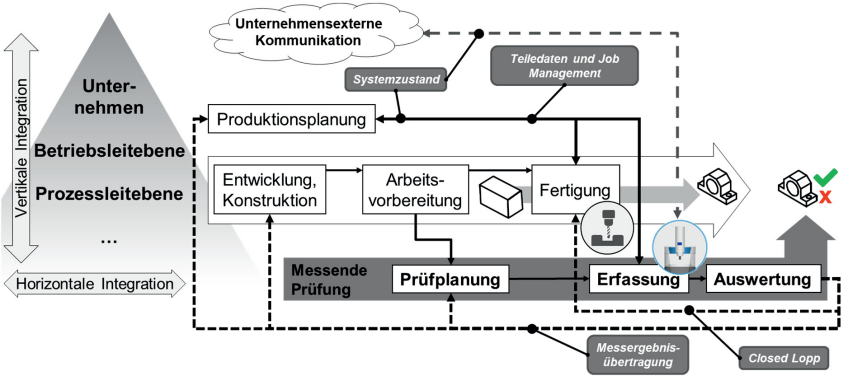


Bild 2: Horizontale und vertikale Integration der Produktprüfung in industriellen Produktionsprozess mit Use Cases (weiße, kursive Beschriftung) der OPC UA Companion Specification für Geometrische Messsysteme (Abschnitt 6) [15]

Als übergeordnete, steuernde Instanz dient die Produktionsplanung, die auch als Produktionsplanung und -steuerung [16] bezeichnet wird. Zur Strukturierung übergeordneter Instanzen und damit zur vertikalen Integration eignet sich die Automatisierungspyramide mit den nach DIN EN 62264 [17] definierten „Levels“ wie Betriebs- und Prozessleitebene. Neben der Automatisierungspyramide kann das Referenzarchitekturmodell „RAMI 4.0“ [18] zu Strukturierung verwendet werden.

5. Modelle für die Integration

Neben der Darstellung der Prüfprozesse und der damit verknüpften Kommunikation bildet die Definition der Kommunikationsinhalte das zweite Element für die Digitalisierung. Dazu wurden in [19] neben den zuvor beschriebenen Prozessen existierende Modelle vorwiegend in Form von Schnittstellenstandards analysiert. Dabei wurde herausgearbeitet, dass man bei den Kommunikationsinhalten zwischen Informationen zu den Messsystemen und Informationen zu den Messungen, die mit den Messsystemen im Rahmen von Messaufträgen durchgeführt werden, unterscheidet. Damit wurden zwei verknüpfte Modelle zur Beschreibung von Messaufträgen und Messsystemen entwickelt (Bild 3).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

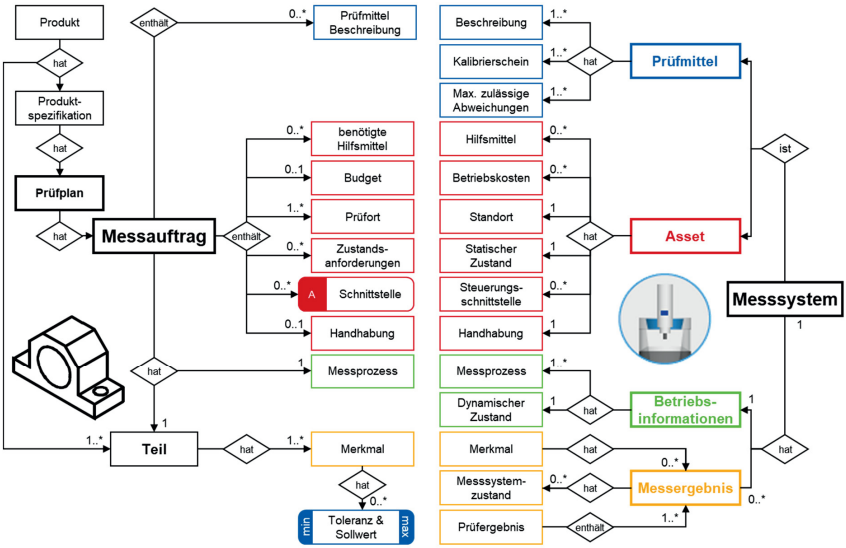


Bild 3: Modelle für die Integration [19]

Die Modelle sollen ein grundlegendes Verständnis für die bei Prüfprozessen mit Messtechnik zu verarbeitenden Informationen liefern, und den Ausgangspunkt für die Entwicklung unternehmens- oder anwendungsspezifischer Modelle bilden. Sie erheben keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und Vollständigkeit.

6. Aktuelle Standards zur Implementierung: OPC UA und DCC

Zur Implementierung der digitalen Integration von Prüfprozessen sind geeignete Schnittstellen erforderlich. In [19] findet sich dazu eine Übersicht mit dem Schwerpunkt auf der geometrischen Messtechnik. In diesem Abschnitt werden zwei aktuelle, in Entwicklung befindliche Standards kurz vorgestellt.

OPC (Object Linking and Embedding for Process Control) UA (Unified Architecture) ist ein Standard für den Datenaustausch in der Produktion mit einer plattformunabhängigen, service-orientierten Architektur. Die Grundlagen und die Kommunikationsbasis sind in der Normenserie IEC 62541 [20] definiert. Darüber hinaus liefert die Norm Grundlagen für die Definition von Informationsmodellen zur Standardisierung der Kommunikationsinhalte. Diese

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Informationsmodelle werden in so genannten Companion Specifications anwendungsbezogen definiert. Für Geometrischen Messsysteme (abgekürzt GPS) wird zurzeit eine solche Companion Specification entwickelt [15]. Dazu werden einzelne „Use Cases“ beschrieben, wie sie in Bild 2 gekennzeichnet sind, und die zugehörigen Informationsmodelle auf Basis dieser „Use Cases“ definiert.

Eine wesentliche Information zur einem Messsystem stellen Informationen zu seiner Kalibrierung dar. Ihre digitale Darstellung wird im digitalen Kalibrierschein (abgekürzt DCC = Digital Calibration Certificate) definiert. Diese Definition wurde unter der Leitung der PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Nationales Metrologie Institut (NMI) in Deutschland) in internationaler Zusammenarbeit mit verschiedenen NMIs entwickelt [21].

Die Definition verwendet als Basis eine ASCII-Datei im XML-Format (eXtensible Markup Language), mit dem Daten hierarchisch strukturiert werden können. Die Struktur des DCC besteht aus einem Abschnitt mit administrativen Daten (administrativeData in Bild 4) und einem Abschnitt mit den Messergebnissen (measurementResults in Bild 4). In beiden Abschnitten sind verpflichtende Mindestumfänge definiert (z. B. Angabe eines Messergebnisses beziehungsweise Kalibrierergebnisses). Zusätzliche Angaben können in weiteren nicht reglementierten Bereichen ergänzt werden [22]. Die Angabe des Messergebnisses erfolgt unter Berücksichtigung des so genannten D-SI (Digital System of Units) zur digitalen Darstellung von Messergebnissen [23].

Anhand dieser beiden in Entwicklung befindlichen Standardisierung lässt sich auch die Verknüpfung von Standards darstellen. So ist innerhalb der Companion Specification für GPS vorgesehen eine Information zum Nachweis über die Kalibrierung eines Messsystems zu übertragen. Diese Information ist eine Verknüpfung zu der Datei mit dem Kalibrierschein. Dabei kann es sich um eine Datei im Formt des DCC handeln.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

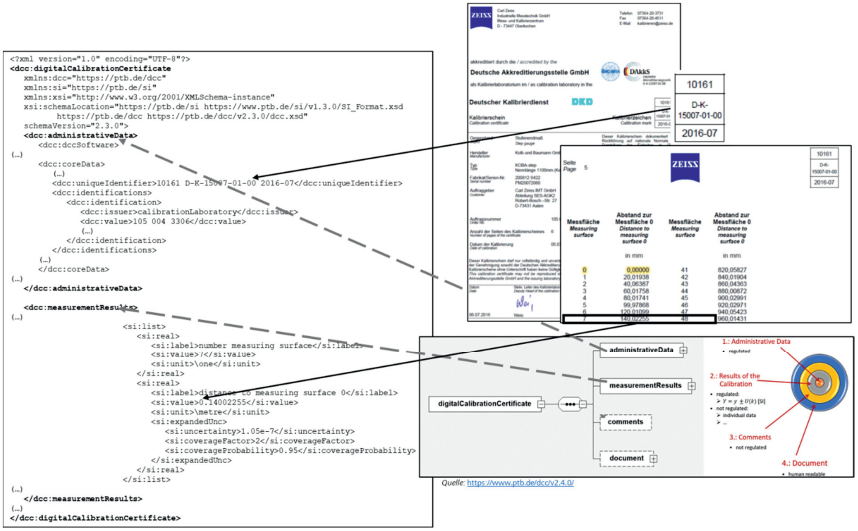


Bild 4: Digitaler und menschenlesbarer Kalibrierschein für ein Stufenendmaß

7. Zusammenfassung

Die Fertigungsmesstechnik als „Informationslieferant“ für Prüfprozesse in der Produktion ist geradezu prädestiniert für die Integration in die digitale Informationsverarbeitung der Produktion. Eine günstige Voraussetzung dazu ist auch die bereits existierende Verbreitung digitaler Datenverarbeitung in der Fertigungsmesstechnik.

Wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche digitale Integration der Fertigungsmesstechnik ist eine adäquate Beschreibung der Informationsflüsse und ihrer Inhalte. Die dargestellten Abläufe und Modelle können dafür eine Basis bilden. Die Implementierung wird verschiedene Standards nutzen und sie verknüpfen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur

[1] Beucher, O.: Signale und Systeme: Theorie, Simulation, Anwendung, Springer Vieweg; 2. Auflage, 2015.

[2] Imkamp, D., Tutsch, R.: Koordinatenmesstechnik, taktil und optisch – schon immer digital, in: tm - Technisches Messen, Band 86, Heft 9, Seiten 450–463, ISSN (Online) 2196-7113, ISSN (Print) 0171-8096, DOI: https://doi.org/10.1515/teme-2019-0064

[3] Imkamp, D., Schönberg, B.: Digitalisierung und Geometriemessung in der Produktion im Wandel der Zeit, Sächsisches Geometriesymposium, Chemnitz, 17. & 18. März 2020. (Internet, 14.08.2021: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-367750)

[4] Diskret versus Prozess, in: Computerwoche, IDS Business Media GmbH, München, 07.05.1999 (Internet, 14.08.2021: http://www.cowo.de/a/1082273)

[5] DIN EN ISO 14638 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Matrix Modell, 2015.

[6] VDI/VDE 2616 Härteprüfung, mehrere Blätter

[7] DIN EN ISO/IEC 17000 Konformitätsbewertung - Begriffe und allgemeine Grundlagen, 2020.

[8] Pfeifer, T., Schmitt, R.: Fertigungsmesstechnik, Oldenbourg Verlag, München 2010.

[9] Imkamp, D.: Qualitätsplanung und Qualitätsprüfung, Qualitätsprüfung im industriellen Produktionsprozess, in: Thomann H. J. (Herausgeber): Der Qualitätsmanagement-Berater - Prozessorientiertes Qualitätsmanagement in der betrieblichen Praxis, TÜV Rheinland Group, Köln, 1. Aktualisierung 2016 ISBN: 978-3-7406-0000-6.

[10] VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): Statusreport Prüfprozessmanagement, Übersicht über relevante technische Regeln, November 2015 (https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/pruefprozessmanagement-uebersicht-ueber-relevante-technische-regeln).

[11] VDI/VDE-Richtlinie 2600 Blatt 1 Prüfprozessmanagement - Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozessen Oktober 2013.

[12] VDA 5 Mess- und Prüfprozesse, Eignung, Planung und Management, 3. Auflage als Entwurf Oktober 2020, Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), Frankfurt/M.

[13] Pfeifer, T., Imkamp, D.: Koordinatenmesstechnik und CAx-Anwendungen in der Produktion – Grundlagen, Schnittstellen, Integration, Carl Hanser Verlag, München 2004.

[14] Schmitt, R., Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement – Strategien, Methoden, Techniken, Carl Hanser Verlag, München 2015.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[15] Imkamp, D., Heil, H. G.: Messtechnik goes Digital – Schnittstellen und Modelle für die digitale Produktion, QZ Qualität und Zuverlässigkeit, Carl Hanser Verlag, München Jg. 66 (2021), Nr. 5, S. 40-43.

[16] Schuh, G., Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1, Grundlagen der PPS, Springer Verlag, Berlin 2012.

[17] DIN EN 62264 Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie (IEC 62264-1:2013); Deutsche Fassung EN 62264-1:2013, 2014.

[18] DIN SPEC 91345 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0), 2016.

[19] VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): VDI Positionspapier: Fertigungsmesstechnik in der digitalen Produktion, VDI/VDE GMA, Düsseldorf, geplante Erscheinung Herbst 2021.

[20] IEC TR 62541 Part 1, 2 (OPC 10000-1, -2) und IEC 62541 Part 3-14 (OPC 10000-3 bis -14), OPC Unified Architecture, 2020.

[21] Hackel, S. G., Härtig, F., Hornig, J., Wiedenhöfer, T.: The Digital Calibration Certificate, in: Metrologie für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft (Metrology for the Digitalization of the Economy and Society) in: PTB-Mitteilungen. Band 127 (2017), Heft 4. ISSN 0030-834X, DOI: https://doi.org/10.7795/310.20170403

[22] Digitaler Kalibrierschein - v2.4.0 (Internet, 13.08.2021: https://www.ptb.de/dcc/v2.4.0/de/)

[23] Hutzschenreuter, D., et. al.: Digital System of Units (D-SI) Guide for the use of the metadata-format used in metrology for the easy-to-use, safe, harmonised and unambiguous digital transfer of metrological data, Physikalisch Technische Bundesanstalt: Braunschweig, November 2019, DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.3522631

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Der absolute pH-Wert pH_{abs} und seine Messunsicherheit

F. Bastkowski, **S. Seitz**, Physikalisch-Technische Bundestanstalt (PTB), Braunschweig;
A. Heering, **R. Born**, **S. Lainela**, I**. Leito**, J**. Nerut**, **J. Saame**, University of Tartu, Tartu, Estland;
V. Radtke, Universität Freiburg, Freiburg;
D. Nagy, **Z. S. Nagyne**, **L. Szucs**, Government Office of the Capital City Budapest (BFKH), Budapest, Ungarn;
M. Rozikova, **M. Vičarova**, Czech Metrology Institute (CMI), Brno, Tschechien;
L. C. Deleebeeck, A. Snedden, DFM A/S, Horsholm, Denmark;
B. Anes, **R. Bettencourt**, **M. F. Camoes**, FCiencias.ID, Centro de Quimica Estrutural, Faculdade de Ciencias da Universidade de Lisboa (FCID), Lissabon, Portugal;
R. Quendera, **L. F. Ribeiro**, Instituto Portugues da Qualidade (IPQ), Lissabon, Portugal;
D. Stoica, Laboratoire de Metrologie et d'Essais (LNE), Paris, Frankreich;
T. Näykki, Suomen ymparistokeskus (SYKE), Helsinki, Finland;
L. Liv, E**. Uysal**, Turkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (Tubitak Ume), Gebze Yerleşkesi, Türkei

Kurzfassung

Der pH-Wert ist eine wichtige Messgröße zur Überwachung oder Kontrolle vieler Prozesse, z.B. in der chemischen Industrie. pH-Messungen in verdünnten, rein wässrigen Lösungen sind seit nunmehr fast zwei Jahrzehnten metrologisch fundiert. Zwar existieren für einige andere Lösungsmittel pH-Skalen, jedoch war ein Vergleich von pH-Werten, die in unterschiedlichen Lösungsmitteln gemessen wurden, lange Zeit aufgrund praktischer Limitierungen, nicht möglich. Die Einführung der sog. Absolut-pH-Skala sowie die Verwendung moderner ionischer Flüssigkeiten als Salzbrücken ermöglichen nunmehr die Messung von pH-Werten in beliebigen Lösungsmitteln bezogen auf die bekannte wässrige pH-Skala. Die vorliegende Arbeit stellt Ergebnisse des europäischen metrologischen Forschungsprojektes „UnipHied" vor, dessen wesentliches Ziel es ist, das Konzept des absoluten pH-Werts metrologisch umzusetzen, d.h. die Vergleichbarkeit von Messergebnissen, die mit Hilfe differenzpotentiometrischer Messungen erhalten werden, durch eine Rückführung auf geeignete Normale sicherzustellen und ihnen angemessene

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Messunsicherheiten zuzuordnen. Dabei müssen insbesondere sog. Diffusionspotentiale quantifiziert und berücksichtigt werden. Zum anderen stellt die Kombination mehrerer Differenzpotentiometrie-Ergebnisse im Messunsicherheitsbudget eine Herausforderung dar.

1. Einführung

Der pH-Wert ist einer der wichtigsten physikochemischen Parameter. Seine Messung ist insbesondere in der Industrie aber auch Medizin von großer Bedeutung. Der pH-Wert nach seiner Definition als der negative dekadische Logarithmus der Protonenaktivität wird nach einem konventionellen Verfahren mit Hilfe einer Harned-Messung experimentell realisiert [1]. Allerdings ist dieses Verfahren auf rein wässrige Lösungen und Ionenstärken ≤ 0,1 mol/kg limitiert. Industriell sind aber vor allem auch pH-Messungen in nicht-wässrigen Systemen oder Lösungen hoher Ionenstärke interessant. Zwar existieren in der Literatur bereits pH-Skalen für verschiedene Lösungsmittel wie z.B. Ethanol oder Acetonitril, jedoch war lange Zeit ein Vergleich von pH-Werten, die auf unterschiedlichen Skalen gemessen wurden, nicht möglich. Die sog. Absolut-pH-Skala, welche bis in die 1950er Jahre zurückreicht, sollte eine Vereinheitlichung sämtlicher pH-Skalen ermöglichen [2]. Ihre experimentelle Realisierung war insbesondere aufgrund der an den Flüssigkeitsgrenzflächen auftretenden Diffusionspotentiale problematisch. Der Einsatz neuartiger ionischer Flüssigkeiten als Salzbrücken ermöglichen nun aber die Messungen von Absolut-pH-Werten mit moderater Messunsicherheit, welche für industrielle Anwendungen (insbesondere der Flüssigchromatographie) interessant ist [3].

Die Absolut-pH-Skala basiert auf einem theoretischen (praktisch nicht realisierbaren, aber berechenbaren) Referenzzustand der Protonen, nämlich 1 bar Protonengas bei 25 °C. Hierin ist dem Proton das chemische Potential 0 kJ/mol zugeordnet. Das chemische Potential wird durch Wechselwirkung des Protons mit Materie (z.B. durch Solvatation in einem Lösungsmittel) vermindert. Es lässt sich aus der Solvatationsenthalpie und dem pH-Wert auf der jeweiligen lösungsmittelspezifischen pH-Skala ableiten, für die es zum Teil Literaturwerte gibt. Der Absolut-pH-Wert ist letztlich definiert als der Quotient aus dem chemischen Potential und -RTln10 [4]. Auf diese Weise lassen sich für verschiedene Medien Absolut-pH-Werte erhalten, so dass pH-Werte in unterschiedlichen Lösungsmitteln miteinander verglichen werden können.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Für die Praxis ist ein Bezug zur wässrigen pH-Skala hilfreich durch Verwendung sog. $pH_{abs}^{H_2O}$-Werte, welche per Definition zahlenmäßig identisch mit den pH-Werten auf der wässrigen Skala sind [5]. Diese $pH_{abs}^{H_2O}$-Werte lassen sich durch Differenzpotentiometrie für jedes (auch nicht-wässrige System) messen. Das Differenzpotentiometrieverfahren ist ein sekundäres Messverfahren, bei dem das Potential zwischen zwei pH-sensitiven Elektroden gemessen wird, welche in eine Referenzpufferlösung sowie in die Messlösung eintauchen, wobei die Lösungen z.B. durch ein Diaphragma voneinander getrennt werden. Hierbei werden Referenzpufferlösung und nichtwässrige Messlösung durch eine ionische Flüssigkeit (IL) voneinander getrennt, welche die an den Flüssigkeits-Grenzflächen auftretenden Diffusionspotentiale minimiert [3]. Die ionische Flüssigkeit Triethylpentylammonium-bis(trifluormethansulfonyl)imid ($N_{2225}NTf_2$) hat sich in der Praxis als besonders gut geeignet erwiesen. Sie bewirkt eine fast vollständige Eliminierung der Diffusionspotentiale. Nach Radtke et al. hat ΔE_{LJ} einen Wert von 0 mV mit einer Standardmessunsicherheit von 6,3 mV für Grenzflächen zwischen verschiedenen Lösungsmitteln mit stark unterschiedenen Eigenschaften (z.B. Wasser, Acetonitril und N,N-Dimethylformamid).

Bei der Differenzpotentiometriemessung wird eine pH-Differenz zur Referenzpufferlösung gemessen, aus welcher schließlich der pH-Wert der Analytlösung bezogen auf die wässrige pH-Skala $pH_{abs}^{H_2O}$ berechnet wird.

Das Messkonzept findet im europäischen metrologischen Forschungsprojekt „UnipHied“ Anwendung, dessen wesentliches Ziel es ist, das Konzept des absoluten pH-Werts metrologisch umzusetzen, d.h. die Vergleichbarkeit von Messergebnissen, die mit Hilfe differenzpotentiometrischer Messungen erhalten werden, durch eine Rückführung auf geeignete Normale sicherzustellen und ihnen angemessene Messunsicherheiten zuzuordnen [6].

2. Experimenteller Teil

Der experimentelle Aufbau einer $pH_{abs}^{H_2O}$-Messung, wie sie im europäischen Forschungsprojekt UnipHied verwendet wurde, verdeutlicht Bild 1:

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

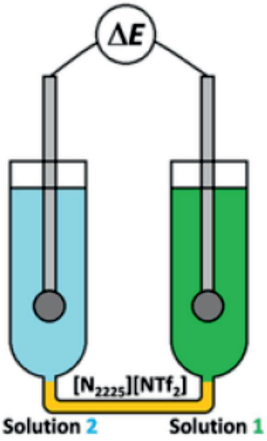


Bild 1: Schematischer Aufbau einer Differenzpotentiometrie-Messanordnung zur Bestimmung des $pH_{abs}^{H_2O}$-Wertes.

Nach vorheriger Kalibrierung der beiden pH-Elektroden (Bestimmung von Steilheit und Achsenabschnitt), wird mit Hilfe einer einzelnen Messung unter Verwendung der in Bild 1 gezeigten Messanordnung der $pH_{abs}^{H_2O}$-Wert einer unbekannten Probe bestimmt. Der $pH_{abs}^{H_2O}$-Wert der unbekannten Probe wird schließlich mit Hilfe von Gleichung 1 berechnet:

$$pH_{abs}^{H_2O}(S) = \frac{\Delta E_m - \Delta E_{LJ} - E_{KR} - k_R' T pH_{abs}^{H_2O}(S_{Ref}) + E_{KS}}{-k_S' T} \quad (1)$$

ΔE_m: Gemessenes Potential zwischen den beiden pH-Elektroden

ΔE_{LJ}: Restdiffusionspotential der Messanordnung

E_{KS}, E_{KR}: Achsenabschnitte der pH-Elektroden, die in die unbekannte Probe bzw. die Referenzlösung eintauchen

k_S', k_R': Steilheiten der pH-Elektroden pro Temperatur, die in die Probe bzw. die Referenzlösung eintauchen (sie werden durch Division der praktischen Steilheiten durch die Temperatur erhalten)

$pH_{abs}^{H_2O}(S_{Ref})$: pH-Wert der Referenzlösung

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Anstelle einer Einzelmessung ist es vorteilhaft, eine Vielzahl verschiedener Differenzpotentiometriemessungen durchzuführen, aus deren Ergebnissen ein zusammenhängendes Netzwerk (in der Literatur als „ladder“ (Leiter) bekannt) an pH-Werten gebildet wird. Diese Methode ermöglicht die Reduzierung von Inkonsistenzen in einem Datensatz aus mehreren pH-Differenzmessungen.
Zur Berechnung der jeweiligen pH-Differenzen der Leiter wird Gleichung 2, herangezogen, welche sich aus Gleichung 1 ableitet.

$$\Delta\widetilde{pH}_{abs}^{H_2O}(S_i, S_j) = \frac{\Delta E_m - \Delta E_{LJ} - E_{Ki} + E_{Kj}}{\mathrm{Tk}'} \quad (2)$$

Die Indizes i und j stehen für die jeweilige Messlösung. k´ als Konstante ohne Unsicherheit, steht für die konventionelle Nernststeigung der jeweiligen Temperatur.

Bei der Leitermethode ist es essenziell, dass die pH-Werte jedweder Lösung der Leiter über mindestens zwei verschiedene Wege von Messungen erhalten werden können. Zudem ist es besser, einen neuen Satz an Lösungen der Leiter hinzuzufügen, anstatt eine Messung mehrfach durchzuführen, da hierdurch ein überbestimmtes System entsteht [7].
Dieses Verfahren wurde erstmals von Suu et al. beschrieben und wird als „ladder method“ bezeichnet [5]. Bild 2 illustriert diese Methode:

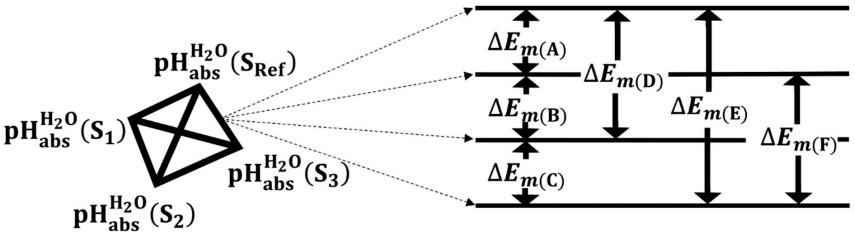


Bild 2: Veranschaulichung des als „ladder method“ bezeichneten Messkonzeptes

Das Kernkonzept der Leitermethode ist die Minimierung kleinster Fehlerquadrate. Eine oder mehrere Messlösungen werden dabei als Anker verwendet, d.h. deren pH-Werte bleiben beim Minimierungsprozess konstant. Solche Lösungen sind in der Regel kommerzielle, wässrige Standard-pH-Pufferlösungen. Die anderen pH-Werte der Leiter werden hingegen iterativ variiert, um die Differenzen aus erwarteten und experimentell ermittelten pH-

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Differenzen zu minimieren. Auf diese Weise wird ein konsistentes Netzwerk an zusammenhängenden pH-Werten (Leiter) erhalten.

Zur Berechnung der Unsicherheit einer $pH_{abs}^{H_2O}$-Messung bildet Gleichung 1 die Grundlage. Wird zur Bestimmung des $pH_{abs}^{H_2O}$-Wertes eine Einzelmessung herangezogen, so kann die Entstehung der Messunsicherheit mit Hilfe des folgenden Ursache-Wirkungs-Diagramms veranschaulicht werden (Bild 3):

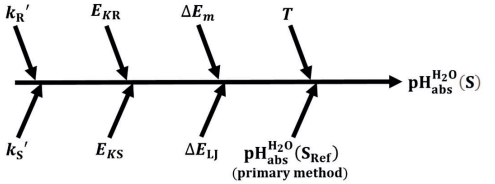


Bild 3: Ursache- und Wirkungsdiagramm der Unsicherheitsbeiträge zur Bestimmung des $pH_{abs}^{H_2O}$-Wertes aus einer einzelnen Differenzpotentiometrie-Messung

Werden hingegen – wie in Bild 2 bereits veranschaulicht - z.B. $pH_{abs}^{H_2O}$-Werte dreier unbekannter Lösungen durch insgesamt sechs Messungen unter Verwendung einer Ankerlösung und ein und desselben pH-Elektrodenpaares bestimmt, so ergibt sich das folgende, erweiterte Ursache-Wirkungs-Diagramm:

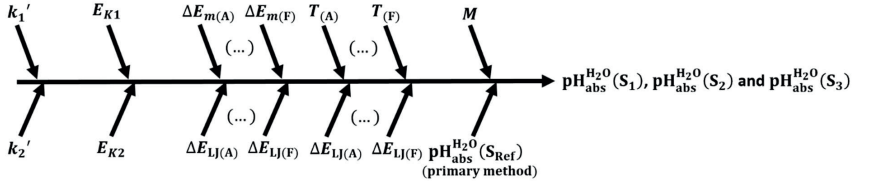


Bild 4: Ursache-Wirkungs-Diagramm der Unsicherheitsbeiträge zur Bestimmung der $pH_{abs}^{H_2O}$-Werte dreier unbekannter Lösungen aus sechs Differenzpotentiometrie-Messungen unter Verwendung einer Ankerlösung sowie ein und desselben Paares zweier pH-Elektroden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Neben den Einflussgrößen, die auch bei der Einzelmessung auftreten, trägt hier noch der Minimierungsprozess selbst zur Messunsicherheit bei. Die Auswertung erfolgte sowohl mit der klassichen „first-order Taylor series approximation“ - Methode (TSM) als auch mit der Monte-Carlo-Methode (MCM) für ein 95%-Überdeckungsintervall. Eine systematische Messunsicherheitsbetrachtung einer Leiter aus $pH_{abs}^{H_2O}$-Messungen wurde kürzlich publiziert [8]. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit werden im Folgenden diskutiert.

3. Ergebnisse und Diskusssion

Mit Hilfe der oben beschriebenen Leitermethode wurden sämtliche pH-Differenzen zwischen vier wässrigen Pufferlösungen mit den pH-Werten 2,00, 4,00, 7,00 und 10,00 gemessen. Alle Puffer besitzen eine Standardmessunsicherheit von 0,02. Bei der Studie diente abwechselnd je ein Puffer als Ankerlösung, die pH-Werte der übrigen drei Lösungen wurden durch Differenzpotentiometriemessungen und Minimierung der pH-Leiter bestimmt [8].
Die Messunsicherheiten der auf diese Weise erhaltenen $pH_{abs}^{H_2O}$-Werte wurden sowohl mit der MCM als auch der TSM ausgewertet. Dabei wurden auch Korrelationen zwischen den Eingangswerten berücksichtigt. Die mit MCM ermittelten Messunsicherheiten lagen zwischen 0,26 und 0,51, während die TSM Messunsicherheiten zwischen 0,32 und 0,58 ergab.

MCM:
Für die MCM gilt, dass je nach Qualität der Daten aus den Einzelmessungen, der Unsicherheitsbeitrag aus der Minimierung entweder vernachlässigbar klein ist oder den Hauptbeitrag darstellt (87%) [8].
Andere relevante Unsicherheitsbeiträge kommen von der Steilheit und dem Achsenabschnitt der Elektrode. Auch hier ist je nach Qualität der Daten und Größe der anderen Unsicherheitsbeiträge der Beitrag dieser Parameter entweder vernachlässigbar klein oder macht bis zu 50% der Gesamtmessunsicherheit aus.
Das Restdiffusionspotential trägt hingegen nur 0,1 – 20% zur Gesamtmessunsicherheit bei, wenn der Beitrag mit 6,3 mV angesetzt wird.

TSM:
Die TSM findet für den Minimierungsprozess lediglich einen Beitrag von 1,1% zur Gesamtmessunsicherheit. Steilheit und Achsenabschnitt der Elektrode tragen in etwa in

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gleichem Umfang zur Gesamtmessunsicherheit bei wie bei der MCM. Die Korrelation dieser Eingangsgrößen kann die Messunsicherheit entweder erhöhen oder erniedrigen. Das Restdiffusionspotential trägt in gleichem geringem Umfang zur Messunsicherheit bei wie bei der MCM.

4. Zusammenfassung

Die Anwendung des Absolut-pH-Konzeptes durch Differenzpotentiometriemessungen sowie der Minimierung der Differenzen der Einzelergebnisse lieferte an vier verschiedenen wässrigen pH-Pufferlösungen pH-Werte mit Messunsicherheiten zwischen 0,26 und 0,58. Die Messunsicherheiten wurden mit zwei verschiedenen Methoden, der Monte-Carlo-Methode (MCM) sowie der klassichen „first-order Taylor series approximation“ - Methode (TSM) ausgewertet. Beide Methoden lieferten annähernd gleiche Messunsicherheiten. Die Beiträge der Eingangsgrößen zur Gesamtmessunsicherheit waren bei beiden Methoden vergleichbar. Es konnte gezeigt werden, dass das Restdiffusionspotential für rein wässrige Lösungen einen geringen Beitrag zur Messunsicherheit liefert. Die Ergebnisse dieser Studie sind vielversprechend und liefern die Grundlage für eine zukünftige Analyse der hier beschriebenen Auswertemethoden an einem umfassenderen Datensatz.

5. Danksagung

Diese Arbeit wurde finanziert durch das EMPIR-Programm (Projekt 17-FUN09) und co-finanziert durch die teilnehmenden Länder sowie des Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union.

6. Literatur

[1] Buck, R. P., Rondinini, S., Covington, A. K., Baucke, F. G. K., Brett, C, M, A, Camoes, M. F., Milton, M. J. T., Mussini, T., Naumann, R., Pratt, K. W., Spitzer, P. and Wilson, G. S. (2002): Measurement of pH. Definition, Standards and Procedures (IUPAC Recommendations 2002).- Pure Appl. Chem., 74 (11), 2169-2200

[2] Mandel, M. A. (1955), A Generalization of the Concept of Acid-Strength and Acidity.- Nature, 176, 792

[3] Ermantraut, A., Radtke, V., Gebel, N., Himmel, D., Koslowski, T. and Leito, I (2018): The ideal ionic liquid salt bridge for direct determination of Gibbs Energies of transfer of single

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ions, part II: Evaluation of the role of ion solvation and ion mobilities.- Angew. Chemie Int. Ed., 57 (9), 2348–2352

[4] Himmel, D., Goll, S. K., Leito, I. and Krossing, I. (2010): A unified pH scale for all phases.- Angew. Chemie Int. Ed., 49 (38), 6885–6888

[5] Suu, A., Jalukse, L., Liigand, J., Kruve, A., Himmel, D., Krossing, I., Rosés, M., Leito, I. (2015): Unified pH values of liquid chromatography mobile phases.- Anal. Chem., 87, 2623–2630

[6] https://www.ppm.uni-freiburg.de/uniphied/project

[7] Heering, A., Stoica, D., Camões, F., Anes, B., Nagy, D., Nagyné Szilágyi, Z., Quendera, R., Ribeiro, L., Bastkowski, F., Born, R., Nerut, J., Saame, J., Lainela, S., Liv, L., Uysal, E., Roziková, M., Vičarová, M., Snedden, A., Deleebeeck, L., Radtke, V., Krossing, I., Leito, I. (2020): Symmetric Potentiometric Cells for the Measurement of Unified pH Values.- Symmetry. 12, 1150

[8] Bettencourt da Silva, R. J. N., Saame, J., Anes, B., Heering, A., Leito, I. Näykki, T., Stoica, D., Deleebeeck, L., Bastkowski, F., Snedden, A., Camões, M. F. (2021): Evaluation and validation of detailed and simplified models of the uncertainty of unified $pH_{abs}^{H_2O}$ measurements in aqueous solutions.- Analytica Chimica Acta 1182, 338923

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Messunsicherheitsbetrachtung für die Kalibrierung von keramischen Wärmestromsensoren

M.Sc. **Frederik Bartz**, Dipl.-Ing. (FH) **Stephan Gehrmann**,
Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG, Weissach;
Dr.-Ing. **Sebastian Marin**, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Kurzfassung

Der Beitrag zeigt die Bedeutung neuer thermischer Messverfahren für den Fahrzeugentwicklungsprozess im Bereich des Thermomanagements von Elektrofahrzeugen. Die Messung der Wärmestromdichte mit geeigneten Sensoren kann einen wichtigen Beitrag in der zukünftigen thermischen Abstimmung liefern. Hierfür werden neue keramische Wärmestromsensoren entwickelt, deren Grundprinzip erläutert wird. Für diese Wärmestromsensoren wird zudem eine geeignete Kalibriereinrichtung konstruiert. Das Funktionsprinzip dieser Kalibriereinrichtung sowie die messtechnischen Herausforderungen werden ebenfalls betrachtet. Abschließend werden sowohl wichtige Einflussfaktoren als auch grundlegende Messunsicherheitsbeiträge für den Wärmestromsensor und die Kalibriereinrichtung vorgestellt.

1. Einleitung

Die zunehmende Bedeutung der Elektromobilität erweitert die Anforderungen an die Messtechnik im Fahrzeugentwicklungsprozess. Durch die Integration von Komponenten mit geringem thermischen Arbeitsfenster wie der Hochvoltbatterie, Leistungselektronik und der E-Maschine, bekommt das zugehörige Thermomanagement einen höheren Stellenwert. Eine optimale Konditionierung der Batterie erfordert genauste messtechnische Kenntnisse über die vorherrschenden Temperaturen und Wärmetransportprozesse. Dabei ist vor allem der durch Wärmleitung hervorgerufene Wärmetransport zwischen der Batterie und dem Kühlsystem von Bedeutung. Die thermische und mechanische Kopplung erfolgt dabei allgemein durch die sogenannte Gap-Filler Schicht [1]. Im Rahmen des Energiemanagements sind kleine Temperaturdifferenzen (< 2 K) zu messen, die mit der Sensorik auch präzise erfasst werden müssen.

Die Messung der Temperaturen an der Unterseite der Batterie sowie der Oberseite des Kühlsystems mit Thermometern, wie zum Beispiel Thermoelementen oder Widerstandsthermometern, ist aufgrund der geometrischen Randbedingungen innerhalb der Batterie umständlich und teilweise nicht realisierbar. Gegenüber klassischen Temperaturmessverfahren bieten sich für die Quantifizierung von Temperaturdifferenzen bzw. den proportionalen Wärmeströmen, welche durch Wärmeleitung hervorgerufen werden, Wärmestromsensoren an. In diesem Beitrag

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

wird deshalb das Grundprinzip eines in Entwicklung befindlichen keramischen Wärmestromsensors vorgestellt. Ausgehend von der zu erwartenden geringen Temperaturdifferenz bzw. dem geringen Wärmestrom sind die entstehenden Messabweichungen zwischen einem Referenzwert und dem Anzeigewert präzise zu bestimmen. Grundlegende theoretische Beiträge zur Messunsicherheit des Wärmestromsensors werden in Abschnitt 3 aufgezeigt. Damit eine Messabweichung festgestellt werden kann, muss der Wärmestromsensor kalibriert werden. In Abschnitt 2.3 wird deshalb vorab das Konzept einer Einrichtung zur Kalibrierung des Wärmestromsensors vorgestellt. Die Herausforderung besteht darin, eine ausreichend kleine Temperaturdifferenz und damit kleine Wärmeströme in einem definierten Temperaturbereich reproduzierbar einzustellen. Der Referenzwert zur Kalibrierung der Wärmestromsensoren ist dabei ebenfalls unsicherheitsbehaftet, sodass auch für die Kalibriereinrichtung in Abschnitt 3 eine theoretische Betrachtung der Messunsicherheitsbeiträge folgt. Neben den Messunsicherheitsbeiträgen der einzelnen Komponenten gilt es vor allem, den Kontaktwiderstand zu quantifizieren. Dieser tritt unvermeidbar während des Kalibrierprozesses zwischen Sensor und Kalibriereinrichtung auf und beeinflusst maßgeblich die Güte der Kalibrierung [2]. Gewonnene Erkenntnisse aus numerischen Betrachtungen werden ebenso in Abschnitt 3 aufgezeigt.

2. Wärmestromsensor und Kalibriereinheit

Sowohl der keramische Wärmestromsensor als auch die Kalibriereinrichtung befinden sich gegenwärtig in der Entwicklung. Basis für die finale Fertigung des Wärmestromsensors und der Kalibriereinrichtung bilden numerische Berechnungen mit Optimierungsansätzen. Durch die durchgeführten numerischen Berechnungen ist es bereits vorab möglich, sowohl den Wärmestromsensor als auch die Kalibriereinrichtung zu optimieren. Auf diese Weise können sowohl geometrische als stoffliche Eigenschaften so ausgelegt werden, dass eine möglichst geringe Temperaturdifferenz sowie eine homogene Temperaturverteilung erreicht werden können. Nachfolgend werden die Funktionsprinzipe des Wärmestromsensors und der Kalibriereinrichtung sowie wichtige Erkenntnisse aus der Parameteroptimierung vorgestellt.

2.1 Wärmestromsensor

Für Wärmestromsensoren existieren unterschiedliche Messprinzipe. Üblicherweise wird die Temperaturdifferenz mittels einer Thermokette, bestehend aus einzelnen Thermoelementen oder geschichteten Dünnfilmmesswiderständen ermittelt [3]. Weitere Messprinzipe werden u.a. in [3] vorgestellt. Durch die Messung der Temperaturdifferenz kann die Wärmestromdichte

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$\dot{q}$ in Wm^{-2} ermittelt werden. Hierfür wird das Fourier'sche Gesetz der Wärmeleitung für den geometrisch eindimensionalen Fall betrachtet [4].

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A}{h} \cdot \Delta T \rightarrow \dot{q} = \frac{\lambda}{h} \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Der in Entwicklung befindliche Wärmestromsensor verwendet das Messprinzip der Thermokette. Dabei werden einzelne Thermopaare so verschaltet, dass diese eine elektrische Reihenschaltung bilden und parallel zur abfallenden Temperaturdifferenz liegen. Die spätere Empfindlichkeit des Wärmestromsensors hängt von der Anzahl der verwendeten Thermopaare, der Materialpaarung des Thermopaares sowie den thermischen Widerständen ab. Zur Bestimmung der Wärmestromdichte sind nach Gl. 2.1 neben der Kenntnis der Temperaturdifferenz die Höhe und die Wärmeleitfähigkeit des Wärmestromsensors entscheidend. Die Wärmeleitfähigkeit muss dabei möglichst mit der Wärmeleitfähigkeit des Messobjekts (Gap-Filler Schicht, z.B. zwischen Batterie und Kühlstruktur) übereinstimmen, da sonst erhebliche Messabweichungen durch unterschiedliche thermische Widerstände hervorgerufen werden. Mit heutigen Gap-Filler Materialien wird eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 3$ Wm^{-1}K^{-1} erreicht, damit ergibt sich für die Auslegung des Wärmestromsensors ein wichtiger Zielwert [5].

Die technologische Umsetzung des Wärmestromsensors erfolgt im LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) Verfahren mit Dickschichtpasten und keramischem Trägermaterial. Dies ermöglicht die Herstellung feiner Strukturen und kleiner Maßstäbe, sodass eine Nutzung für den Entwicklungsprozess von Hochvoltbatterien möglich wird. Der grundlegende schematische Aufbau ist in Abbildung 1 links dargestellt. Durch die Abbildung wird nochmals die elektrische Reihen- und thermische Parallelschaltung der Thermokette deutlich. Für die Thermokette wird die Materialpaarung Gold-Platin (Au-Pt) verwendet. Durch Untersuchungen von Gierth [6] konnte bereits die Machbarkeit von Thermoelementen im Dickschichtverfahren mit unterschiedlich Materialpaarungen gezeigt werden.

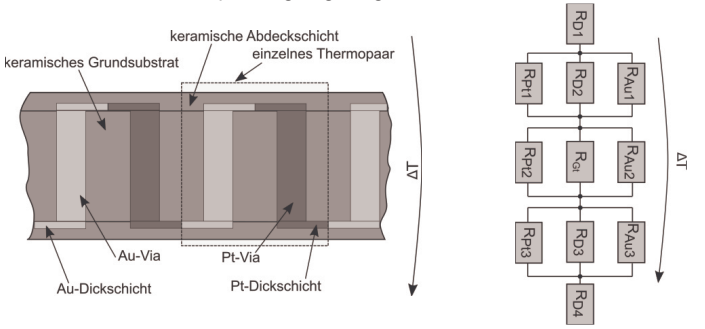


Abbildung 1: Aufbau Wärmestromsensor (li.) und thermisches Ersatzschaltbild (re.)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Thermopaare werden in Form von Vias in das keramische Grundsubstrat eingebracht und anschließend über gedruckte Dickschicht-Leiterbahnen verbunden. Innerhalb definierter Fertigungsvorgaben wird die Auslegung des Wärmestromsensors hinsichtlich der Gesamt-Wärmeleitfähigkeit λ_{ges} optimiert. Im weiteren Vorgehen wird dann die Empfindlichkeit S_{WSS} des Sensors berechnet. Für beide Ansätze wird die elektrisch-thermische Analogie genutzt. Diese ermöglicht das Aufstellen von Ersatzschaltbildern und die Berechnung der beiden Größen Wärmeleitfähigkeit und Empfindlichkeit. [2],[7]

Das Ersatzschaltbild wird für ein einzelnes Thermopaar einschließlich der umgebenden Keramik aufgestellt, vgl. Abbildung 1 (li.), sodass sich das in Abbildung 1 rechts dargestellte Ersatzschaltbild ergibt. In diesem sind die einzelnen thermische Widerstände aufgeschlüsselt, welche sich in entsprechende Reihen- oder Parallelschaltungen gliedern. Die thermischen Widerstände R_{Di} beschreiben die Anteile der keramischen Abdeckschicht. Die beiden Widerstände R_{Aui} und R_{Pti} beschreiben jeweils die Anteile der beiden Thermoschenkel. Das keramische Grundsubstrat wird durch den Widerstand R_{Gt} zusammengefasst. Dabei berechnet sich der thermische Widerstand R_{th} allgemein wie folgt [7]:

$$R_{th} = \frac{h_i}{A_i \cdot \lambda_i} \quad (2.2)$$

Der thermische Widerstand ergibt sich demnach aus der Höhe h_i und der Fläche A_i des jeweiligen Volumenelements sowie der Wärmeleitfähigkeit λ_i des zugehörigen Werkstoffs. Die Modellgleichung für das in Abbildung 1 (re.) dargestellte Ersatzschaltbild ist in Gl. 2.3 formuliert.

$$R_{ges} = R_{D1} + (R_{Au1} \parallel R_{D2} \parallel R_{Pt1}) + (R_{Au2} \parallel R_{Gt} \parallel R_{Pt2}) + (R_{Au3} \parallel R_{D3} \parallel R_{Pt3}) + R_{D4} \quad (2.3)$$

Die Wärmeleitfähigkeit der Keramiken ist bekannt und wird für die spätere Berechnung zunächst als konstant angenommen [8]. Für die verwendeten Au und Pt Dickschichtpasten steht eine thermische Charakterisierung noch aus. Hier werden für die Optimierungsansätze zu Beginn Schätzwerte verwendet.

2.2 Optimierungsergebnisse - Wärmestromsensor

Durch Simulationen, die mit Hilfe von Optimierungsansätzen bestimmte Zielgrößen in Abhängigkeit definierter Eingangsparameter berechnen, wird die Gesamt-Wärmeleitfähigkeit des Wärmestromsensors bestimmt. Als Eingangsgrößen dienen die geometrischen Randbedingungen aus [8] und die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bestandteile des Sensors, welche zunächst als Schätzwert mit definierter Ober- und Untergrenze berücksichtigt werden. Ziel ist es, die Wärmeleitfähigkeit des Sensors auf eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 3$ $Wm^{-1}K^{-1}$, wie

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

im späteren Messort (Gap-Filler Schicht) einzustellen. Die Berechnungen sind mit *optiSLang 2021 R1* durchgeführt worden. In der nachfolgenden Abbildung 2 wird der Zusammenhang zwischen den beiden wichtigsten Einflussfaktoren dargestellt. Dabei lässt sich die Gesamt-Wärmelitfähigkeit λ_{ges} durch die zwei dominierenden Paramterer Via Durchmesser d_{via} und die Höhe der Abdeckschicht h_{dec} beschreiben. Um eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit zu erreichen, muss der Durchmesser der metallischen Vias (Thermoschenkel) minimiert werden. Grund für die Reduzierung des Durchmessers ist die anteilig hohe Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Thermopaares Gold-Platin. Die Höhe der keramischen Abdeckschicht gilt es zu maximieren. Neben der Absenkung der Wärmeleitfähigkeit wird so die Homogenisierung der Temperaturverteilung an der Sensoroberfläche erreicht. Des Weiteren bewirkt auch die Änderung der Via Höhe als auch der Abstand der gedruckten Leiterbahnen eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit. Die Optimeriung ergibt eine minimale Gesamt-Wärmeleitfähigekeit von $\lambda_{ges} \approx$ 5 Wm^{-1}K^{-1}. Die angstrebte Wärmeleitfähigkeit von $\lambda =$ 3 Wm^{-1}K^{-1}, welche der Wärmeleitfähigkeit der Gap-Filler Schicht entspricht, kann mit den gegebenen Randbedingungen und Materialsystem nicht erreicht werden. Hierfür wird zukünftig an einem neuen Materialsystem geforscht werden, sofern sich auf dem bestehenden Materialsystem Gold-Platin ein Wärmestromsensor technologisch realisieren lässt.

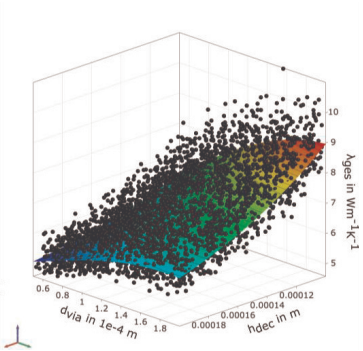


Abbildung 2: Antwortfläche zwischen Via-Durchmesser d_{via}, Deckschichthöhe h_{dec} und der Gesamt-Wärmeleitfähigkeit λ_{aes}

2.3 Kalibriereinrichtung

Die Kalibriereinrichtung für Wärmestromsensoren wird zusammen mit der TU Ilmenau, Fachgebiet Prozessmesstechnik, entwickelt und aufgebaut. Gegenüber herkömmlichen Kalibrieranlagen, welche üblicherweise auf die Guarded-hot-plate-Methode setzen, vgl. [9], werden für diese Anlage Erfahrungen einer existierenden Kalibriereinrichtung eingebracht. Die

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Kalibrierung wird benötigt, um Abweichungen der Kennlinie des Wärmestromsensors gegenüber einer rückführbaren Referenzgröße zu bestimmen. Die Kalibrierung des Wärmestromsensors erfolgt durch eine bekannte Temperaturdifferenz, welche an den Oberflächen des Wärmestromsensors aufgeprägt werden. Die beidseitig anliegende Oberflächentemperatur wird durch Extrapolation bestimmt [2]. Hierfür werden in zwei Ausgleichsblöcken, die sich ober- und unterhalb des Sensors befinden, je drei Thermometer eingebracht, siehe Abbildung 3. Die räumliche Position der Thermometer ist bekannt, sodass durch eine quadratische Funktion der axiale Temperaturverlauf und damit die Oberflächentemperatur beschrieben werden kann. In den Veröffentlichungen [10], [11] sind das Messprinzip und die bereits existierende Kalibrieranlage für Wärmestromsensoren sowohl durch numerische Berechnungen als auch experimentelle Untersuchungen charakterisiert worden.

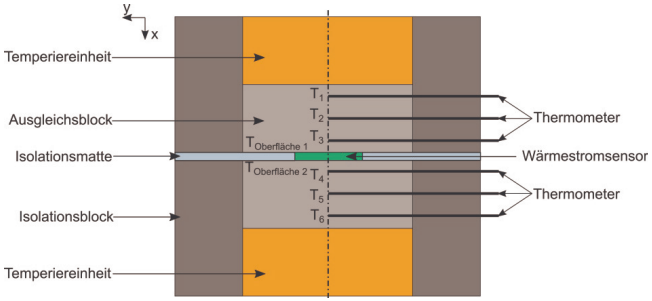


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Kalibrieranlage

Gegenüber dem aktuellen Stand gilt es die in Entwicklung befindliche Kalibriereinheit weiter zu optimieren. Grund hierfür sind die Anforderungen, welche sich aus dem Einsatzgebiet des Wärmestromsensors ergeben. Der einzustellende Temperaturbereich wird gegenüber [2] und [11] angepasst, sodass ein Temperaturbereich von ϑ_{min} = -30 °C bis ϑ_{max} = 60 °C erreicht werden kann. Hierfür erfolgt die Temperierung der Ausgleichsblöcke durch Temperierblöcke, in denen jeweils drei Heizstäbe und ein Kühlkreislauf mit einem Wasser-Glykol-Gemisch integriert sind. Um einen kleineren Messunsicherheitsbeitrag zu erreichen, werden die in [2] eingesetzten Thermoelemente zur Extrapolation der beiden Oberflächentemperaturen durch Pt100 Widerstandsthermometer ersetzt.

Die größte Herausforderung ergibt sich durch die geringe Temperaturdifferenz, welche am Wärmestromsensor für den Kalibrierprozess anliegen muss. Diese muss für die Kalibrierung mindestens um eine Größenordnung kleiner sein als jene Temperaturdifferenz, die später im Versuch erwartet wird. Daraus folgt, dass zwischen der Ober- und Unterseite mindestens eine

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Temperaturdifferenz von $\Delta T = 200$ mK erreicht werden muss. Besonders wichtig ist für die Bestimmung der Oberflächentemperaturen der axiale Temperaturverlauf in den Ausgleichsblöcken (s. Abb. 3) und die radiale Temperaturverteilung an der Oberfläche. Mit Hilfe von numerischen Berechnungen konnten die geometrischen und stofflichen Eigenschaften entsprechend optimiert werden. In den nachfolgenden Abbildungen 4 und 5 sind der axiale und radiale Temperaturverlauf dargestellt.

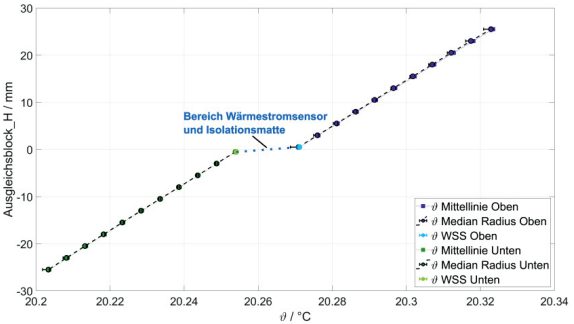


Abbildung 4: Axialer Temperaturverlauf in den Ausgleichsblöcken [12]

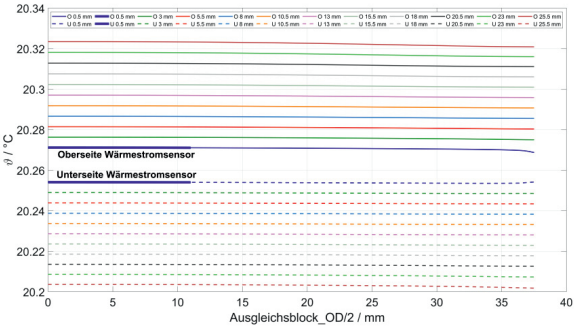


Abbildung 5: Radialer Temperaturverlauf in den Ausgleichsblöcken [12]

Die Temperaturverläufe in Abbildung 4 verdeutlichen, dass durch die Optimierung der Kalibriereinrichtung die geforderte Temperaturdifferenz von $\Delta T = 200$ mK realisierbar ist. In den numerischen Berechnungen ergibt sich eine Temperaturdifferenz von $\Delta T \approx 20$ mK zwischen der Ober- und Unterseite des Wärmestromsensors. Die in Abb. 5 dargestellte radiale Temperaturverteilung in den Ausgleichsblöcken zeigt, dass über die Sensoroberfläche die Temperaturverteilung homogen ist und erst zum äußeren Rand der Ausgleichblöcke abfällt. Die durch

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Optimierungsansätze berechnete Temperaturdifferenz stellt einen idealen Referenzwert zur Kalibrierung der Wärmestromsensoren dar. In der späteren Anwendung ist auch der Referenzwert mit einer Unsicherheit anzugeben. Auf verschiedene theoretische Messunsicherheitsbeiträge wird sowohl für den Wärmestromsensor als auch die Kalibriereinrichtung im nachfolgenden Abschnitt 3 eingegangen.

3 Einflussfaktoren und Beiträge zur Messunsicherheit

Für den späteren Kalibrierprozess müssen die unterschiedlichen Messunsicherheitsbeiträge aufgeschlüsselt und bestimmt bzw. geschätzt werden. Im Folgenden sollen die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit erläutert werden. Dabei wird sowohl auf Faktoren eingegangen, welche auf die einzelnen Komponenten wirken, als auch auf jene Faktoren, die das gesamte System beeinflussen.

Die Messunsicherheitsbeiträge des Wärmestromsensors resultieren vor allem aus den geometrischen und stofflichen Eigenschaften. Die Höhe des Sensors ist mit einem geeigneten Messverfahren zu bestimmen. Die Messunsicherheit des Verfahrens ist zu berücksichtigen, da die Höhe, über welche die Temperaturdifferenz abfällt, zur Berechnung des Wärmestroms benötigt wird. Gleiches gilt für die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bestandteile des Wärmestromsensors. Auch diese sind experimentell zu charakterisieren, Grund hierfür ist die Abhängigkeit des Wärmestroms von der Wärmeleitfähigkeit. Da beide Größen von der Temperatur abhängen, ist der entsprechende Einfluss an unterschiedlichen Stützpunkten zu ermitteln. Bedingt durch das verwendete Messprinzip der Thermokette ergeben sich weiter Messunsicherheitsbeiträge für die Messung der Temperaturdifferenz, welche üblicherweise bei der Messung von elektrischen Spannungen eines Thermoelements auftreten. Die entsprechenden Beiträge lassen sich, wie in Gleichung 3.1 dargestellt, in Anlehnung an [2] aufschlüsseln.

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{Mess} + \frac{u(U_{Mess})}{S_{WSS}} + \delta(\Delta\vartheta)_{Kal} + \delta(\Delta\vartheta)_{Drift} + \delta(\Delta\vartheta)_{Stab} + \delta(\Delta\vartheta)_{TS} \qquad (3.1)$$

Die ermittelte Temperaturdifferenz ergibt sich aus der gemessenen Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{Mess}$ und den entsprechenden Beiträgen. Zusammen mit der Empfindlichkeit S_{WSS} lässt sich aus der gemessenen Spannung U_{Mess} die gemessene Temperaturdifferenz bestimmen. Zusammen mit dem Quotienten aus Wärmeleitfähigkeit und Höhe lässt sich anschließend die Wärmestromdichte bestimmen. Die gemessene Spannung ist mit einer Unsicherheit $u(U_{Mess})$ behaftet. Die Unsicherheit richtet sich dabei nach dem später ausgewählten

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Spannungsmessgerät. Grundsätzlich sind Messunsicherheitsbeiträge wie die Kalibrierung und die Auflösung des Messgeräts zu berücksichtigen. Des Weiteren sind Einflüsse der Umgebungstemperatur zu berücksichtigen, sofern diese vom Kalibrierschein des Messgeräts abweichen. Die weiteren Beiträge für die Temperaturdifferenz ergeben sich aus der Kalibrierung der Kennlinie des Wärmestromsensors ($\delta(\Delta\vartheta)_{Kal}$) und der Drift der Kennlinie des Sensors $\delta(\Delta\vartheta)_{Drift}$, welche die Änderung der Kennlinie über ein zeitliches Intervall beschreibt. Mit dem Beitrag $\delta(\Delta\vartheta)_{Stab}$ wird die zeitliche Abweichung der Messbedingungen berücksichtigt. Sofern an Materialübergängen ein Temperaturgradient anliegt, sind parasitäre Thermospannungen zu beachten, da zusätzliche elektrische Spannungen im Messsignal hervorrufen werden. Die entsprechenden Anteile werden mit dem Messunsicherheitsbeitrag $\delta(\Delta\vartheta)_{TS}$ zusammengefasst.

Die Messunsicherheit der Kalibriereinrichtung bezieht sich auf die beiden extrapolierten Oberflächentemperaturen. Da der Aufbau symmetrisch ist (s. Abb. 3), ist die Betrachtung einer Seite ausreichend. Die wichtigsten Messunsicherheitsbeiträge resultieren aus dem Polynom zur Extrapolation der Oberflächentemperatur. Hierfür wird nach [7] ein Polynom zweiten Grades (Gl. 3.2) zu Grunde gelegt. Dabei ist h der Abstand des Thermometers von der Unter- / Oberseite.

$$\vartheta(h) = a_2 h^2 + a_1 h + a_0 \qquad (3.2)$$

Die Berechnung der Oberflächentemperatur erfolgt aus dem absoluten Glied a_0, welches sich wie folgt berechnen lässt. Für die Betrachtung der Messunsicherheit geht somit nur a_0 ein. [2], [7]

$$a_0 = \frac{h_2 h_3 \vartheta_1}{(h_1 - h_2)(h_1 - h_3)} + \frac{h_1 h_3 \vartheta_2}{(h_2 - h_1)(h_2 - h_3)} + \frac{h_1 h_2 \vartheta_3}{(h_3 - h_1)(h_3 - h_2)} \qquad (3.3)$$

Anhand der Gleichung 3.3 ist zu erkennen, dass sowohl alle drei gemessenen Temperaturen als auch die zugehörigen Höhen im Ausgleichsblock in die Unsicherheit eingehen. Die kombinierte Unsicherheit $u(a_0)$ lässt sich dann allgemein wie folgt ausdrücken.

$$u(a_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} \left(\frac{\partial a_0}{\partial h_i} u(h_i)\right)^2 + \sum_{j=1}^{3} \left(\frac{\partial a_0}{\partial \vartheta_j} u(\vartheta_j)\right)^2} \qquad (3.4)$$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Messung der einzelnen Temperaturen, erfolgt wie Abschnitt 2.3 beschrieben, durch Pt100 Widerstandsthermometer. Die entstehenden Messabweichungen der einzelnen Widerstandthermometer können wie folgt formuliert werden und beinhalten Beiträge, die üblicherweise bei der Messung mit Pt100 Thermometern auftreten. [2]

$$\vartheta = \vartheta_{Mess} + \delta\vartheta_{el-Mess} + \delta\vartheta_{Kal} + \Delta\vartheta_{Drift} + \delta\vartheta_{Stab} + \delta\vartheta_{Eew} + \delta\vartheta_{wAbl} + \delta\vartheta_{Vert} \qquad (3.5)$$

Die Messung der Temperatur ϑ_{Mess} erfolgt im späteren Anwendungsfall mit einem Multimeter, sodass Abweichungen durch die Geräteunsicherheit berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich sind Faktoren zu beachten, wie sie bereits für die Gleichung 3.1 beschrieben worden sind. Die Unsicherheit der Kennlinie des Thermometers ($\delta\vartheta_{Kal}$) durch eine entsprechende Kalibrierung ist ebenfalls zu bestimmen. Die Vorgehensweise hierfür kann der DKD-Richtlinie R5-6 entnommen werden. Die beiden Abweichungen hervorgerufen durch die Drift und die zeitliche Stabilität der Messbedingungen wurden bereits in Gl. 3.1 beschrieben und unterscheiden sich an dieser Stelle nicht. Für Widerstandsthermometer ergeben sich zusätzliche Abweichungen durch die Eigenerwärmung des Messwiderstands $\delta\vartheta_{Eew}$ und den Wärmeableitungsfehler $\delta\vartheta_{wAbl}$. Dieser kann jedoch nach [7] vernachlässigt werden, da durch die optimierte Geometrie der Ausgleichsblöcke ein Verhältnis von Durchmesser der Thermometer zu Einbaulänge größer 15 erreicht wird. Des Weiteren ist die Temperaturverteilung und die damit gemessene Temperatur durch die Widerstandsthermometer in Bezug auf abweichende Positionen im Ausgleichsblock mit einzubeziehen. Der entsprechende Beitrag zur Messunsicherheit wird durch $\delta\vartheta_{Vert}$ berücksichtigt.

Die zuvor genannten Einflüsse auf die Messunsicherheit beschreiben vorwiegend die beiden einzelnen Komponenten Wärmestromsensor und Kalibriereinrichtung. Durch die spätere Einbausituation des Sensors in der Einrichtung entsteht jedoch ein Einflussfaktor, der sich auf das Gesamtsystem auswirkt. Durch die Kontaktierung der Sensoroberflächen mit der Kalibrieranlage entstehen thermische Kontaktwiderstände, welche nicht zu vernachlässigen sind. Der unbekannte Einfluss des Kontaktwiderstands kann durch Simulationen oder spätere empirische Untersuchungen geschätzt werden. Durch Berechnungen mit *COMSOL Multiphysics 5.6* können erste Abschätzungen hinsichtlich des Einflusses getroffen werden. In den Berechnungen wurde eine Sensitivitätsanalyse mit Füllstoffen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Die Korrelation der Wärmeleitfähigkeit in der Kontaktfläche (*Luft_lambda)* zur erreichbaren Temperaturdifferenz wird in Abbildung 6 erläutert. Um einen geringen thermischen Kontaktwiderstand zu erreichen, gilt es die Wärmeleitfähigkeit mit geeigneten Füllstoffen wie zum

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Beispiel einer Wärmeleitpaste zu maximieren. Mit einer zunehmenden Wärmeleitfähigkeit lässt sich eine minimale Temperaturdifferenz von $\Delta\vartheta_{WSS} =$ 20 mK erreichen. Aus weiteren Berechnungen geht hervor, dass sich der Einfluss des thermischen Kontaktwiderstands reduzieren lässt, wenn die Oberflächenrauigkeit der beiden Kontaktflächen minimiert wird. Zudem gilt es die Anpresskraft zu maximieren, um den Luftspalt zwischen den Oberflächen von Sensor und Ausgleichsblock zu minimieren. Der finale Einfluss des Kontaktwiderstands wird durch empirische Untersuchungen am realen Kalibrieraufbau abgeschätzt.

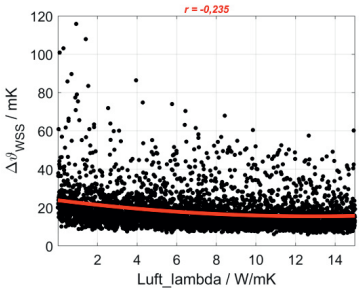


Abbildung 6: Korrelation zwischen $\Delta\vartheta_{WSS}$ und Wärmeleitfähigkeit Luft_lambda in $Wm^{-1}K^{-1}$ [12]

4. Zusammenfassung

Für zukünftige messtechnische Anwendungsfelder im Bereich des Thermomanagements von Hochvoltbatterien befinden sich neuartige keramische Wärmestromsensoren und eine Kalibriereinrichtung in Entwicklung. Das grundlegende Messprinzip sowie das Konzept des Wärmestromsensors und der Kalibriereinrichtung sind vorgestellt worden. Durch numerische Berechnungen mit Optimierungsansätzen konnten bereits geometrische Verhältnisse verbessert werden. Die unterschiedlichen Optimierungsergebnisse zeigen eine geometrische Auslegung, die die geforderte Temperaturdifferenz bei gleichzeitig homogener Temperaturverteilung ermöglicht. Des Weiteren wurde ein neuer Ansatz für die Temperierung der Ausgleichblöcke umgesetzt, sodass auch Temperaturen bis $\vartheta =$ -30 °C erreicht werden können. Außerdem sind bereits grundlegende Messunsicherheitsbeiträge betrachtet worden. Die Temperaturen an den Oberflächen des Sensors werden durch rechnerische Extrapolation aus drei Temperaturmessstellen bestimmt. Für dieses Verfahren sind die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge aufgeschlüsselt worden. Abschließend wurde der Einfluss des thermischen Kontaktwiderstand betrachtet. Faktoren, die bei späteren Messungen entscheidenden Einfluss nehmen, sind so bereits analysiert worden. Im weiteren Forschungsvorhaben gilt es die gewonnenen Erkenntnisse am realen Aufbau zu validieren.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literaturangaben

[1] Jouhara, H., Serey, N. u.a.: Investigation, development and experimental analyses of a heat pipe based battery thermal management system. International Journal of Thermofluids 1-2 (2020) 100004, 2019

[2] Hohmann, M.: Realisierung eines Blockkalibrators mit Wärmestromsensoren und integrierten Fixpunktzellen., TU Ilmenau, Dissertation, 2016

[3] Childs, P. R. N., Greenwood, J. R. und Long, C. A.: Heat flux measurement techniques. S. 655–677. Bd. 213, Nr. 7, In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part Mechanical Engineering Science,1999.

[4] Baehr, H. D. und Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. 826 S., 9.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.

[5] Frauenhofer, M., Gormanns, M., u.a.: Optimierte Wärmeableitung aus Energiespeichern für Serien-Elektrofahrzeuge. S. 38-43, adhäsion KLEBEN & DICHTEN: 5-6/2020: 2192-8681; Wiesbaden

[6] Gierth P., u.a: Novel thermocouples for automotive applications., S. 43-49, Journal of Sensors and System Systems, 2018.

[7] Bernhard, F.: Handbuch der technischen Temperaturmessung. 1631 S., 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.

[8] Public Material- und Designrules for Working Group Microsystems, LTCC and HTCC, Firmenschrift, Fraunhofer-Institut IKTS, Dresden, 2017.

[9] Arpino, F., Dell'Isola M., Ficco G., Fernicola V.: Design of a Calibration System for Heat Flux Meters. 32(11–12):2727–2734, 2011.

[10] Marin, S., Hohmann, M., Fröhlich, T.: System Simulation of a Calibration Bench for Heat Flux Sensors based on a FEM-Model optimized by means of parameter calibration. 12. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage, 2015.

[11] Hohmann, M., Breitkreutz, P., Schalles M., u. Fröhlich, T.: Calibration of heat flux sensors with small heat fluxes. 58th Ilmenau Scientific Colloquium, Ilmenau, 2014.

[12] Marin, S., Ackermann, V. u. Augustin, S.: Konzeption und Konstruktion eines Kalibrierplatzes für Wärmestromsensoren. Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Forschungsbericht. 2021

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Quantifizierung von Redundanz in Sensorsystemen und die Beziehung zur Messunsicherheit

Quantification of Redundancy in Sensor Systems and the relationship with measurement uncertainty

Dipl.-Ing. **Gertjan J. P. Kok**, VSL B.V., Delft, Niederlande

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird das Konzept von Redundanz aus metrologischer Sicht betrachtet. Metrologische Redundanz wird auf metrologische Weise quantifiziert mittels verschiedener Metriken. Dies geschieht mittels der Messunsicherheit der Messgröße. Die Begriffe und Metriken werden erläutert mittels verschiedener Beispiele. Zusätzlich werden andere Ergebnisse des EMPIR Met4FoF Forschungsprojekts kurz erwähnt.

Abstract (optional)

In this contribution the concept of redundancy is studied from a metrological perspective. Metrological redundancy is quantified in a metrological way by means of different metrics. This is done by means of the measurement uncertainty of the measurand. The concepts and metrics are illustrated by means of various examples. In addition, some other results of the Met4FoF research project are briefly presented.

1. Einleitung

Redundanz hat verschiedene Bedeutungen und verschiedene Anwendungen. In der Metrologie spielt die Messunsicherheit eine sehr große Rolle. Daher ist es naheliegend zu versuchen, Redundanz mit Messunsicherheit zu verknüpfen. In diesem Beitrag wird betrachtet, wie Redundanz aus metrologischer Sicht interpretiert werden kann und was die Beziehung zur Messunsicherheit sein könnte.

2. Redundanz in der Metrologie

Es gibt viele Weisen wie man Redundanz betrachten und definieren kann. In physikalischen Systemen kann man Geräte oder Teilsysteme unterscheiden, wobei die Teilsysteme dieselbe Funktion kontinuierlich parallel ausführen (heiße Redundanz), oder einander bei Bedarf sehr schnell ersetzen können (kalte Redundanz) [1].

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In Informations- und Kommunikationssystemen kann man betrachten, auf wie vielen verschiedenen Orte dieselbe Information abgespeichert ist, oder wie viele unabhängige Pfade es gibt zwischen zwei Knoten in einem Netzwerk. In der Informationstheorie kann man auch die Redundanz auf dem Niveau der Kodierung von Information in Bitfolgen betrachten [2].
In der Metrologie gibt es keine eindeutige Definition und Verwendung des Begriffes Redundanz. In diesem Beitrag wird metrologische Redundanz definiert als die Eigenschaft, dass es verschiedene, unabhängige Weisen gibt, um den Wert der Messgrösse *Y* aus einer Menge von Sensordaten ***X*** zu bestimmen.

3. Quantifizierung von metrologischer Redundanz

Wie bei der Definition von Redundanz gibt es auch bei der Quantifizierung von Redundanz verschiedene Wahlmöglichkeiten. Wir werden zuerst Metriken definieren, die die Messgrösse *Y* in die Definition einbezieht, wie in der Definition der metrologischen Redundanz. Danach werden wir Metriken betrachten, die ausschließlich von den Sensordaten ***X*** abhängen. In diesem Zusammenhang werden wir von Sensorreplikation sprechen.

3.1 Redundanz mit Beziehung zur Messgröße *Y*

Ein möglicher Ansatz für ein Sensorsystem bestehend aus *n* Sensoren ist die Festlegung einer gewünschten Messunsicherheit u_w für die Messgröße *Y* des Sensorsystems und dann zu berechnen, wie viele Sensoren *m* man höchstens weglassen kann, ohne dass die Unsicherheit *u*(*Y*) größer als u_w wird. Die Redundanz des Systems $\mathrm{RedExces}(u_w)$ ist dann gleich *m* Sensoren. In formellem Sinn kann man schreiben:

$$m = \mathrm{RedExces}(u_w) = \max\{k \mid \forall \boldsymbol{W}: |\boldsymbol{W}| = k \longrightarrow \max_{s \in \boldsymbol{S}} u(Y(s, \boldsymbol{X}/\boldsymbol{W})) \leq u_w\}$$

wobei ***X*** die gesamte Menge der Sensoren ist, ***W*** die Menge der Sensoren die herausgenommen wird und *S* die Menge der Stellen an welchen die Messunsicherheit *u*(*Y*(,)) ausgewertet werden soll. Die Messunsicherheit *u*(*Y*(*s*, ***X***/***W***)) hängt ab von der Stelle *s* und von der Menge der benutzten Sensoren ***X*** / ***W.***

Dual dazu kann man betrachten, um wie viel die Messunsicherheit steigt, wenn Sensoren weggenommen werden oder ausfallen. Die maximale Zunahme der Unsicherheit $\mathrm{RedUnc}(m)$, wenn *m* beliebige Sensoren weggenommen werden, kann man schreiben als

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\mathrm{RedUnc}(m) = \max_{|\boldsymbol{W}|=m,\ s\in S} \Big(u\big(Y(s,\boldsymbol{X}/\boldsymbol{W})\big) - u\big(Y(s,\boldsymbol{X})\big) \Big).$$

Diese Formeln sind relativ einfach hinzuschreiben und haben eine klare Interpretation. In der Praxis ist es allerdings nicht immer einfach sie auszuwerten, da nicht immer klar ist wie die Funktion $(s,\boldsymbol{X},\boldsymbol{W}) \mapsto u(Y(s,\boldsymbol{X}/\boldsymbol{W}))$ ausgewertet werden kann. Auch kann das Auswerten des Maximumoperators für moderate Werte von *k* bzw. *m* und der totalen Menge der Sensoren rechnerisch sehr aufwändig sein; vor allem wenn eine klare Symmetrie im Netzwerk fehlt. Die Redundanzmetriken $\mathrm{RedExces}(u_{\mathrm{erw}})$ und $\mathrm{RedUnc}(m)$ hängen klarerweise davon ab, was man mit dem Netz messen will, denn *Y* und das Modell *Y*(*X*) spielen eine große Rolle. Dies ist nicht der Fall bei der Sensorreplikation, welche im nächsten Abschnitt betrachtet wird.

3.2 Sensorreplikation

Die von den Sensoren registrierte Datenmenge $\boldsymbol{X}$ kann für sich alleine betrachtet werden, ohne Bezug zur Messgröße *Y*. Wenn sich die Werte eines Sensors aus den Werten von einem oder mehreren anderen Sensoren herleiten lassen (bis auf Messrauschen), dann liegt eine ‚Sensorreplikation' vor. Wenn es Sensorreplikation gibt, dann gibt es oft auch metrologische Redundanz für die Messgrösse *Y*. Die Ausnahme ist, wenn Sensorreplikation vorhanden ist in einer Teilmenge von Sensoren, die nicht relevant ist zur Bestimmung der Messgröße *Y*. Umgekehrt gibt es auch nicht immer Sensorreplikation, wenn es Redundanz gibt. Zum Beispiel betrachten wir ein einfaches Netzwerk mit zwei Temperatursensoren T_1 und T_2 mit Unsicherheit $u(T_1) = u(T_2) = 0.1$ °C. Wir nehmen an, dass die Differenz $T_2 - T_1$ zwischen 0.3 °C und 0.7 °C schwankt. Es gibt daher keine Sensorreplikation. Wenn die Messgröße *Y* die mittlere Umgebungstemperatur T_m mit gewünschter Unsicherheit $u(T_m) = 1.0$ °C ist, dann reicht eine der zwei Sensoren aus. Das Netzwerk ist also redundant im Hinblick auf *Y*, obwohl es keine Sensorreplikation gibt. Allerdings, wenn die Messgröße die Temperaturdifferenz mit gewünschter Unsicherheit von 0.3 °C ist, dann gibt es keine Redundanz.

Wenn die Zeitstempel aller Sensoren synchronisiert sind und die Sensordaten in einer Matrix *X'*, angeordnet werden können, dann kann die lineare Sensorreplikation ausgedrückt werden mittels des Ranges[1] der Matrix *X'*.

$$\mathrm{ReplRank}(\boldsymbol{X}) = \mathrm{rank}(X')$$

[1] Der Rang rank(*A*) einer Matrix *A* ist gleich die maximale Anzahl linear unabhängiger Spalten von *A*.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Um unabhängig von Messrauschen zu sein, können die Daten vorher skaliert und gerundet werden. Wenn die Matrix *X'* vollen Rang hat, kann man die Konditionszahl[2] betrachten, um zu bestimmen, wie nahe die Sensordaten an der linearen Sensorreplikation sind:

$$\mathrm{ReplCond}(\boldsymbol{X}) = \mathrm{cond}(X')$$

Ein Wert von $\mathrm{ReplCond}(\boldsymbol{X})$ nahe 1 bedeutet, dass die Werte orthogonal sind (‚in hohem Maße unabhängig'), ein großer Wert von $\mathrm{ReplCond}(\boldsymbol{X})$ bedeutet, dass die Sensoren nahezu linear abhängig sind und dass es somit beinahe eine Sensorreplikation gibt.

Sensorreplikation kann aber auch mittels nicht-linearer Verbände stattfinden, z. B. wenn die Werte eines Sensors proportional zum Quadrat der Werte eines anderen Sensors sind, oder wenn die Werte eines Sensors gleich dem Integral der Werte eines anderen Sensors sind.

Einige weitere Beispiele von Metriken und Anwendungen im Kontext von Redundanz sind in [3] dargestellt.

4. Beispiele

In diesem Abschnitt werden sowohl einige simulierte wie auch realistische Beispiele aus industriellen Umgebungen präsentiert.

4.1 Redundanzquantifizierung

Im ersten Netzwerk nehmen wir an, dass es *n* unabhängige Temperatursensoren T_i gibt, jeder mit Unsicherheit $u(T_i) = \sigma$, also $\boldsymbol{X} = \{T_1, \ldots, T_n\}$. Die Messgröße *Y* ist die mittlere Netzwerktemperatur, berechnet als Mittelwert der verwendeten Sensoren. Wenn alle *n* Sensoren verwendet werden, gilt $u(Y(\boldsymbol{X})) = \sigma/\sqrt{n}$. Wenn eine Menge $\boldsymbol{W}$ von *m* Sensoren herausgenommen werden und also nur *n* – *m* Sensoren benutzt werden, gilt $u(Y(\boldsymbol{X}/\boldsymbol{W}) = \sigma/\sqrt{n-m}$. Da das Neztwerk in diesem Fall eine große Symmetrie zwischen den Sensoren besitzt und es daher keinen Unterscheid macht, welche *m* Sensoren herausgenommen werden, kann die Metrik $\mathrm{RedUnc}(m)$ leicht errechnet werden:

[2] Die Konditionsnummer cond(*A*) einer Matrix *A* ist gleich $||A||\cdot||A^{-1}||$ für eine gegebene Matrixnorm ||.||.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\mathrm{RedUnc}(m) = \frac{\sigma}{\sqrt{n-m}-\sqrt{n}}$$

Für den Fall σ = 0.1 °C und n = 5 ist $\mathrm{RedUnc}(m)$ dargestellt in Bild 1.

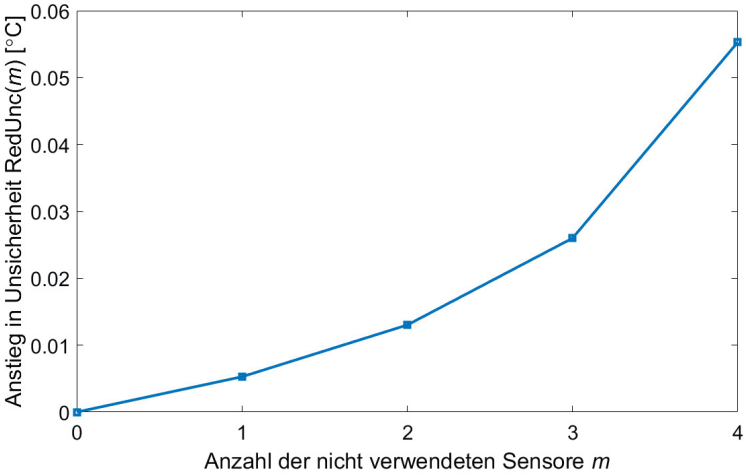


Bild 1: Quantifizierung der Redundanz im Beispielnetzwerk mittels RedUnc(m). Die Unsicherheit eines einzelnen Sensors beträgt 0.1 °C.

4.2 Sensorreplikation

In der industrienahen Testumgebung STRATH werden Metallkörper erhitzt und anschließend mittels pulsierender Hämmer in die gewünschte Form gebracht [4]. Beispielmessdaten sind verfügbar in [5]. Mehr als 60 Sensor-Outputs werden registriert. Zwei davon sind die Geschwindigkeit (Speed) und die Position einer Achse, wie dargestellt in Bild 2. Wenn man das Geschindigkeitssignal integriert und die Position davon abzieht, sind die Residuen klein im Vergleich zu einem Grenzwert. Dies ist demnach ein Beispiel für eine nicht-lineare Sensorreplikation im Datensatz und eine wahrscheinliche Quelle von Redundanz (abhängig von der Messgröße).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

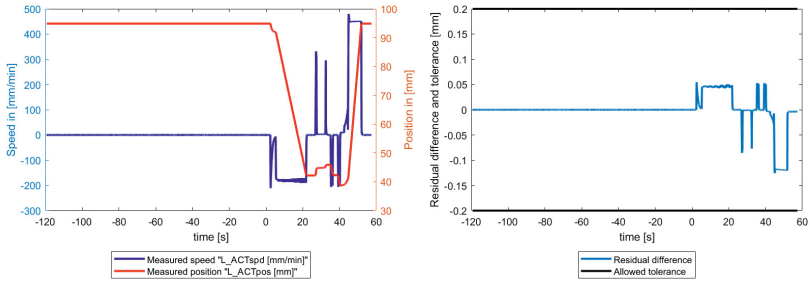


Bild 2: Linke Seite: Geschwindigkeits- (speed) und Positionssignal einer Achse. Rechte Seite: Residuen nach Integration des Geschwindigkeitssignal und Abzug der Position.

4.3 Sensornetzwerkentwurf

In der SPEA Testumgebung [6] hat die Italienische Firma SPEA eine Maschine gebaut, mit der 196 MEMS-Temperatursensoren gleichzeitig automatisiert kalibriert werden können. Die lokale Referenztemperatur in der Maschine wird an 64 Stellen gemessen wie dargestellt im Bild 3.

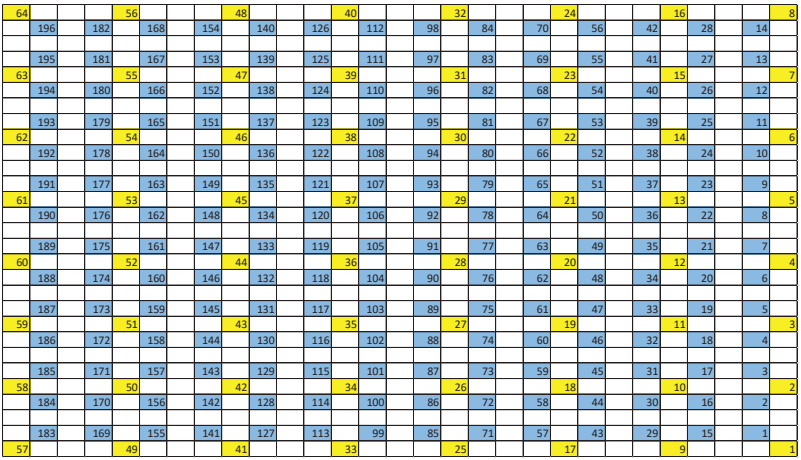


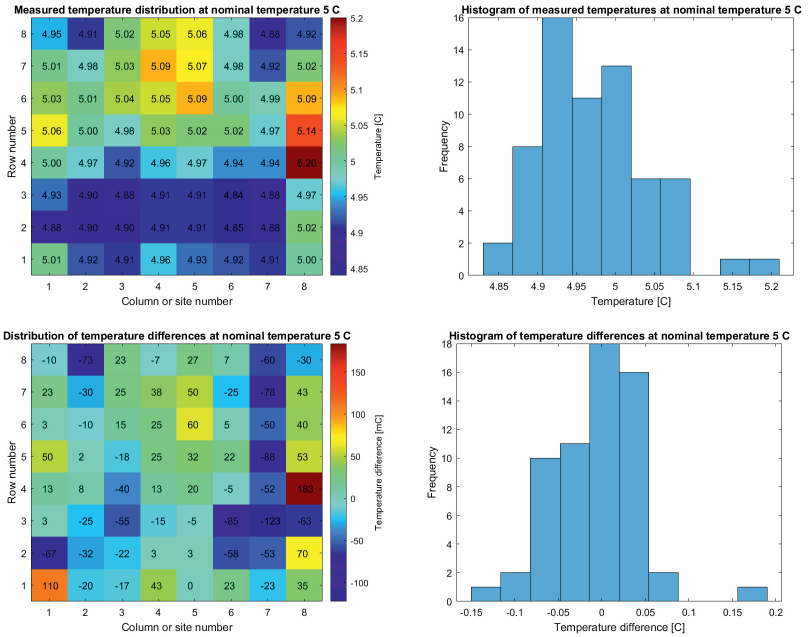
Bild 3: Sensorplatzierung im Inneren der SPEA Maschine. Gelb markiert sind die 64 Referenzsensoren. Blau markiert sind die 196 Temperatursensoren, die kalibriert werden.

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

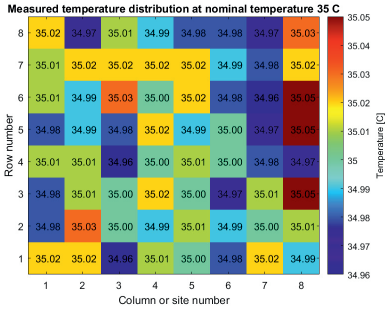
SPEA hat drei Datensätze zur Verfügung gestellt, jeweils einer für die nominalen Temperaturen von 5, 35 und 80 °C. Die gewünschte Unsicherheit ist $u_w = 0.1$ ℃ an jeder Stelle der zu kalibrierenden Temperatursensoren. Im Falle von 35 °C sind nicht alle Sensoren notwendig und gibt es eine Redundanz in diesem System. Bei 5 und 80 °C gibt es allerdings lokal größere Temperaturunterschiede. Da man auf Grund dieser einzelnen Datensätze nicht ausschließen kann, dass diese Differenzen an beliebigen Stelle in der Maschine stattfinden können, gibt es insgesamt keine Redundanz:

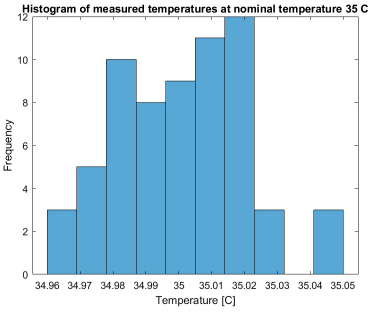
$$\mathrm{RedExces}(u_w = 0.1\,℃) = 0 \text{ Sensoren.}$$

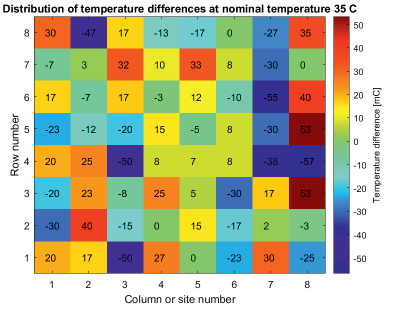
In diesem Beispiel sehen wir einen neuen Aspekt von Redundanz: Die Daten können für eine bestimmten Situation redundant sein (wenn die Temperatur circa 35 °C ist), aber die Redundanz ist nicht vorhanden für andere Situationen. Insgesamt beurteilen wir das Netzwerk dann als nicht metrologisch redundant. Im Bild 4 werden die 64 gemessenen Referenztemperaturen gezeigt und die Verteilung der Temperaturen mittels eines Vergleichs jeder Temperatur mit seinen 2 zu 4 direkten Nachbarn.

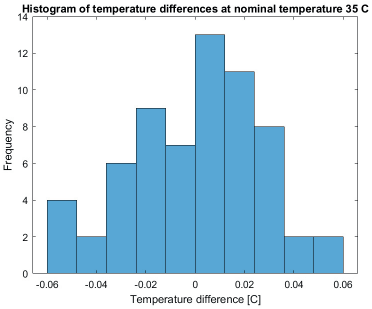


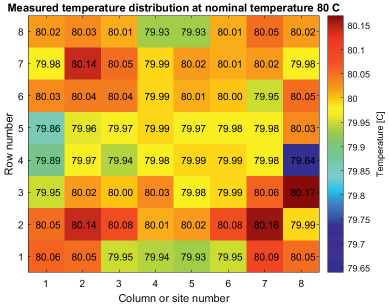
https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

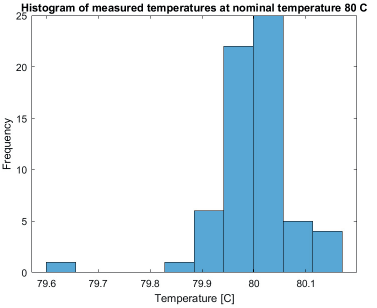












https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

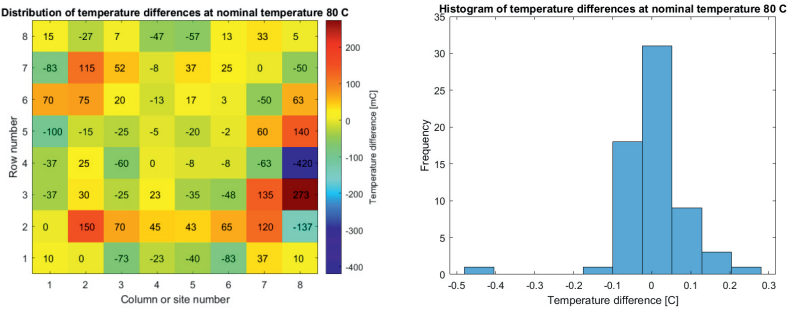


Bild 4: Temperaturverteilung und Verteilung der Temperaturdifferenzen für die nominalen Temperaturen von 5, 35 und 80 °C. Die Temperaturdifferenz ist berechnet worden durch Abziehen der mittleren Temperatur von den 4 (innerer Teil), 3 (Seiten) bzw. 2 (Ecken) Nachbarstellen. Die Histogramme an der rechten Seite basieren auf den Daten der linken Seite. Die Temperaturmessung für 80 °C in Reihe (row) 4, Spalte (column) 8 dürfte fehlerhaft sein, da sie viel niedriger ist als die sonstigen Temperaturen.

5. Diskussion

Die Begriffe, Metriken und sonstige Betrachtungen in diesem Beitrag bilden nicht die definitive Lösung von allem was mit metrologischer Redundanz zu tun hat, aber können nichtsdestotrotz in bestimmten Fällen von Nutzen sein. Bei der Analyse oder Entwurf von einem Netzwerk können sie verwendet werden, um verschiedene Optionen zu vergleichen. Wenn es eine konkrete Anforderung gibt, z. B. $\mathrm{RedExces}(0.1\,°\mathrm{C}) = 2$, kann für einen Entwurf bestimmt werden, ob er die Bedingung erfüllt oder nicht. Wenn eine Kostenfunktion definiert ist, die aussagt wie hoch die Kosten (in Euro oder in einer beliebigen Einheit (‚Strafpunkte')) für eine gegebene Redundanzfunktion $\mathrm{RedExces}(u_{\mathrm{erw}})$ oder $\mathrm{RedUnc}(m)$ sind und wenn die Kosten pro Sensor auch bekannt sind, dann kann ein Optimierungsproblem formuliert und das kostenoptimale Netzwerk bestimmt werden (bezüglich des Modells).

Im europäischen Forschungsprojekt ‚Metrology for the Factory of the Future' (Met4FoF) [7] sind verschiedene Problemstellungen bei der Behandlung von Sensornetzen betrachtet worden. In [8] wird betrachtet wie man redundante Daten metrologisch konsistent kombinieren kann im Hinblick auf die Messunsicherheit. Ein anderes Projektergebnis ist die Entwicklung eines Algorithmus um Messrauschen und Jitter von Sensorsignalen zu entfernen, das verwendet werden kann vor der zeitlichen Synchronisation von Sensorsignalen mit nicht-

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

synchronisierten Zeitstempeln [9]. Als Beispiel und Hilfe wie verschiedene Schritte in der Daten- und Informationsverarbeitung in einem industriellen Szenario stattfinden können, ist im Projekt ein Open-Source Agentenframework entwickelt worden [10]. Die Agenten müssen sich dabei nicht auf demselben Rechner befinden und können verteilt, z. B. in einer Fabrik, zusammenarbeiten um die Sensordaten in nützliche Informationen umzusetzen. Auf der Webseite des Projektes befinden sich Referenzen zu verschiedenen Tutorials wie auch Verweise auf den Quellcode [7].

8. Über VSL and Anerkennung

VSL is das Niederländische nationale Metrologieinstitut. VSL verwaltet die nationalen Messstandards, bietet Kalibrations- und Beratungsdienste und Referenzmaterialen für die Industrie und betreibt Forschung in nationalen und internationalen Projekten. Die Arbeit in diesem Beitrag wurde unterstützt durch Forschungsgelder vom EMPIR-Programm im Rahmen des Forschungsprojekts „Metrology for the Factory of the Future“ (Met4FoF). Das EMPIR-Programm wird kofinanziert von den teilnehmenden Staaten und vom Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogram der Europäischen Union.

9. Literaturangabe

[1] Wikipedia, Redundanz in der Technik, https://de.wikipedia.org/wiki/Redundanz_(Technik)

[2] Wikipedia, Redundanz in der Informationstheorie, https://de.wikipedia.org/wiki/Redundanz_(Informationstheorie)

[3] G. Kok, P. Harris “Quantifying Metrological Redundancy in an Industry 4.0 Environment”, 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, pp. 464-468, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138235.

[4] Testumgebung STRATH bei der Universität von Strathclyde, Glasgow (UK), https://www.ptb.de/empir2018/fileadmin/documents/empir/Met4FoF/Documents/AFRC_TESTBED.pdf

[5] Christos Tachtatzis, Gordon Gourlay, Ivan Andonovic, & Omer Panni. (2019). Sensor data set radial forging at AFRC testbed v2 (1.0) [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.3405265

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[6] Testumgebung SPEA, https://www.ptb.de/empir2018/de/met4fof/information-communication/blog/detail-view/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=13&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=f47a890ea864fa24603143f50ae09ac1

[7] Forschungsprojekt ‚Metrology for the Factory of the Future' (Met4FoF), 2018 – 2021, www.met4fof.eu

[8] G. Kok, P. Harris, "Uncertainty Evaluation for Metrologically Redundant Industrial Sensor Networks", 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, pp. 84-88, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138297.

[9] K. Jagan, L. Wright and P. Harris, "A Bayesian approach to account for timing effects in industrial sensor networks," 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, 2020, pp. 89-94, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138266.

[10] Bang X. Yong, A. Brintrup, "Multi Agent System for Machine Learning Under Uncertainty in Cyber Physical Manufacturing System", 9th Workshop on Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, 2019

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Messunsicherheitsbestimmung bei der Datenfusion lokaler und globaler Messtechnik zur Sektionsmontage im Flugzeugbau

Meike Huber, **Christoph Nicksch**,
Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen University, Aachen;
Prof. Dr.-Ing. **Robert H. Schmitt**,
Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT,
Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen University, Aachen

Kurzfassung

Die Flugzeugendmontage erfolgt aktuell in starren, flugzeugspezifischen Montagelinien. Um flexible Montageprozesse zu ermöglichen, wird eine kontinuierliche Verfügbarkeit fabrikweiter Positionsdaten benötigt. Eine Herausforderung hierbei ist die Verknüpfung großvolumiger, „globaler" Messtechnik und hochpräziser, „lokaler" Messtechnik. Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Fusion lokaler und globaler Messdaten sowie die Messunsicherheitsbestimmung für fusionierte Positionsdaten. Zur Datenfusion werden die lokalen Sensoren zu einem Basismesssystem referenziert, das den gesamten Montagebereich abdeckt. Die Zusammenhänge zwischen lokalem und dem Referenz-Koordinatensystem des Basismesssystems werden mithilfe homogener Transformationsmatrizen beschrieben. Mittels Kalman-Filter werden die transformierten Messdaten im Anschluss zu einem gemeinsamen Vektor, welcher Informationen zur Position und Ausrichtung der Sektionen enthält, fusioniert. Weiter wird über die Angabe der Kovarianzmatrix eine GUM-konforme Aussage über die Messunsicherheit der fusionierten Sensordaten getroffen. Das Verfahren wird anhand eines Demonstrators, der die wesentlichen Aspekte der Sektionsmontage abdeckt, validiert. Das Ergebnis ist ein validiertes Verfahren zur Datenfusion lokaler und globaler Messtechnik sowie zur Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit für den fusionierten Wert.

Aktuelle Herausforderungen in der Flugzeugendmontage

Innerhalb der Flugzeugendmontage werden große Strukturbauteile, wie beispielweise Rumpfteile (sog. Sektionen) und Flügel zueinander ausgerichtet und gefügt [1]. Für ein funktionsfähiges Flugzeug müssen aus aerodynamischer Sicht äußere Prüfmerkmale auf der Außenhaut des Flugzeugs betrachtet werden. [2] Für die Montage des Interieurs (Kabinenausstattung) hat die planare Ausrichtung des Fußbodens, der vormontiert mit der Sektion geliefert wird, eine besondere Bedeutung, da er als Referenz für andere Baugruppen verwendet wird. In aktuellen Prozessen werden die Messungen der Prüfmerkmale sequentiell

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

über mehrere Iterationen manuell durchgeführt, in denen entweder äußere oder innere Prüfmerkmale gemessen werden. Dies führt zu einem hohen zeitlichen Aufwand bei der mittels Linearaktoren durchgeführten manuellen Regelung in die Montageposition der Sektionen. Um eine aufwandsärmere Prüfung der Sektionsmontage zu gewährleisten, müssen daher sowohl die äußeren Prüfmerkmale (i.d.R. Referenzpunkte) als auch die inneren Prüfmerkmale (Orientierung der Fußbodensegmente der einzelnen Rumpfsektionen) messtechnisch simultan erfasst und für automatisierte Positionsregelungen berücksichtigt werden. Der Trend von vorrichtungsbasierten Montagelinien zu mobilen und automatisierten Handhabungsprozessen in der Flugzeugendmontage stellt eine weitere Herausforderung dar [3 bis 5]. Mit der Umsetzung mobiler und automatisierter Handhabungslösungen geht ein steigender Bedarf an Positionsdaten einher, um Navigation und Lokalisierung mobiler Einheiten zu ermöglichen [6]. Beide Herausforderungen können am Beispiel der Sektionsmontage illustriert werden, die, wie in Bild 1 dargestellt, bereits bei

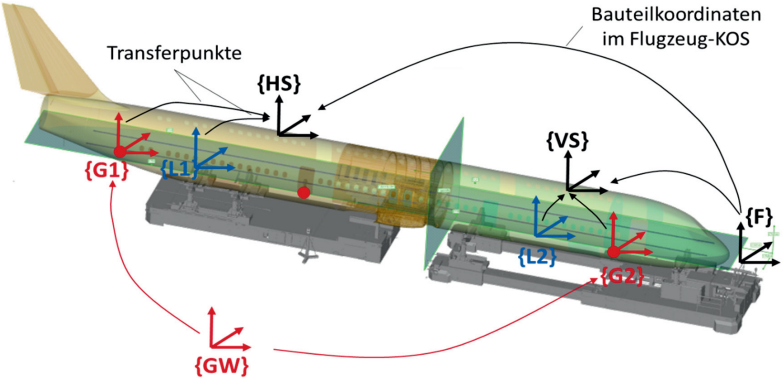


Bild 1: Relevante Koordinatensysteme zur Umsetzung einer mobilen Sektionsmontage

Flugzeugherstellern Anwendung findet und im Folgenden kurz beschrieben wird [7].

Bild 1 zeigt die zu fügenden Sektionen sowie die messtechnisch – auf Basis einzelner Referenzpunkte – zu erfassenden Bauteil-Koordinatensysteme (HS – hintere Rumpfsektion, VS – vordere Rumpfsektion). Die einzelnen Rumpfsektionen können über äußere Referenzpunkte mittels großvolumiger Messtechnik (z.B. mittels Indoor-GPS, oder Laser Tracker) in ihrer Position und Orientierung vollständig erfasst werden. Die Koordinatensysteme (KOS) „G1“ und „G2“ stellen KOS dar, die über globale Messungen einzelner Referenzpunkte des Basismesssystems erfasst werden. Daneben führen Sensoren im Flugzeuginnern sog.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

lokale Messungen durch, um zu prüfen, ob der Fußboden planar ausgerichtet ist. Diese Messungen werden in den KOS der Sensoren erfasst (KOS „L1“ und „L2“).
Um Entscheidungen auf Basis der heterogenen Messdaten zur Regelung in die Montagepositionen der Sektionen treffen zu können, müssen die Positionsdaten globaler und lokaler Messtechnik fusioniert werden. Ziel der Forschungsarbeit ist es daher, ein Verfahren zur Sensorfusion zu entwickeln, das die genannten Herausforderungen löst, indem Montageabweichungen basierend auf den heterogenen Messdaten ermittelt und gleichzeitig prozesskritische sowie sensorspezifische Messunsicherheiten berücksichtigt werden.

Das Konzept des Globalen Referenzsystems

Die Bereitstellung globaler und lokaler Messdaten über den gesamten Montagebereich ist Voraussetzung für die erfolgreiche Regelung des Montageprozesses. Hierzu wurde das Konzept des Globalen Referenzsystems (GRS) entwickelt. GRS stellen analog zum terrestrischen „Global Positioning System“ (GPS) Informationen über die Position und Orientierung (Pose) von Empfängern in einem KOS zur Verfügung. [8, 9] Im Kontext der Montage wird auf diese Weise ein gemeinsames KOS als Bezugssystem für alle in der Montage beteiligten Einheiten geschaffen, die für die Ausführung ihrer Aufgabe Positionsdaten erfordern. Voraussetzung dafür ist ein sogenanntes Basismesssystem, welches den globalen Bezug für lokale Sensorik in unterschiedlichen Arbeitsbereichen der Montage bildet. Über diesen Ansatz können Prozesse sowohl global über den gesamten Montagebereich als auch lokal für spezifische Messungen innerhalb einzelner Montageprozesse überwacht und gesteuert werden. Konkret bedeutet dies, dass Objekte in der Montage in ihrer aktuellen Position und Orientierung im Raum zeitlich erfasst werden können [8].
Ein GRS benötigt Messsysteme zur Bereitstellung von Messwerten in großem Volumen. Die fabrikweite Bereitstellung der Messinformationen wird unter den Begriffen „light-controlled factory“ und „light-based factory“ für optisches Messsysteme bereits diskutiert, ist jedoch bisher nicht vollumfänglich umgesetzt [2, 10]. Der Trend geht allgemein dazu, Sensorinformationen innerhalb der Fabrik als Service zur Verfügung zu stellen um damit die Verfügbarkeit der Daten zu verbessen, um sie beispielsweise für Lokalisierungs- oder Navigationsaufgaben automatisierter Systeme zu nutzen. [11]. Insbesondere die fabrikweite Informationsbereitstellung in Form von Messdaten ist aktuell in der industriellen Praxis noch nicht etabliert. [2, 12] Aktuell existiert eine große Anzahl unterschiedlicher Verfahren zur Aufnahme von Positionen, Orientierungen, Oberflächen, etc. angepasst an die jeweilige Aufgabenstellung [13]. Der etablierte Begriff *Large Scale Metrology* (LSM) [14] umfasst eine Klasse von optischen Messsystemen, die speziell an die Anforderungen der Montage von sehr

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

großen oder nur schwer zu handhabenden Werkstücken (>1m3) angepasst sind [15 bis 17]. Die Anforderungen an die Messsysteme bestehen darin, Messvolumina in der Größe der Montageumgebung abzudecken und die geometrische Pose (Position und Orientierung) mit einer geringen Messunsicherheit (<1mm) zu bestimmen. [11, 18] Während LSM-Systeme sich daher als Basismesssystem innerhalb eines GRS eignen, ergänzen lokale Sensoren das GRS, um spezifische Messungen wie z.B. die planare Orientierung von Fußbodensegmenten innerhalb des Flugzeugrumpfes zu erfassen.

Fusion lokaler und globaler Messtechnik im GRS

Um die Nutzung eines GRS in der Praxis zu ermöglichen, muss ein Konzept zur Datenfusion heterogener Messsysteme entwickelt werden. Im konkreten Fall der Sektionsmontage im Flugzeugbau liegen Messdaten verschiedener lokaler und globaler Messsysteme vor [2]. Das Ziel der Datenfusion ist es, die Messdaten aller Messsysteme in ein gemeinsames Referenz-KOS zu überführen und mittels gezielter Transformationen vergleichbar zu machen, um das GRS zur gezielten Regelung des Montageprozesses nutzen zu können [19].

Um die Überführung in ein gemeinsames KOS zu ermöglichen, muss im ersten Schritt ein übergeordnetes Referenz-KOS definiert werden. Dieses Referenz-KOS dient dazu, die aufgenommenen Messdaten in Relation zu der gesamten Montageumgebung darzustellen. Da die gesamte Montageumgebung aufgrund ihrer Ausdehnung lediglich durch die globale Messtechnik erfasst werden kann, werden in der LSM Systeme für die Referenzierung eingesetzt. [2] Eingebettet in das Referenz-KOS sind weitere KOS für die zu montierenden Bauteile. Wie oben beschrieben, bedeutet dies für die Sektionsmontage bedeutet, dass für die beiden zu montierenden Flugzeug-Sektionen eigene KOS definiert werden [2]. Sowohl für die lokale, als auch für die globalen Sensoren werden ebenfalls eigene Sensor-KOS definiert. Es kann angenommen werden, dass die Sensor-KOS spezifisch auf die einzelnen Sektionen ausgelegt sind, d. h., dass bei dem lokalen und globalen Messsystem zwischen den Daten für die einzelnen Sektionen differenziert werden kann. [2]

Für die Umsetzung der Datenfusion werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Lage der KOS des lokalen und globalen Messsystems in Bezug auf das jeweilige Bauteil-KOS ist bekannt. So kann beispielshaft die Position einzelner Sensoren innerhalb einer Sektion angegeben werden.
- Die Lage der KOS des globalen Messsystems in Bezug auf das Referenz-KOS ist bekannt. Somit können die Messwerte des globalen Messsystems innerhalb jeder einzelnen Sektion mit dem Referenz-KOS in Bezug gesetzt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Mit Hilfe dieser Annahmen können die Messdaten der lokalen und globalen Sensoren in das gemeinsame Referenz-KOS überführt und vergleichbar gemacht werden.

Zur Überführung der heterogenen Messdaten in ein gemeinsames KOS können affine Transformationen genutzt werden: Sei $\boldsymbol{p}$ ein Punkt im KOS K_1, so lässt sich $\boldsymbol{p}$ mithilfe einer Rotation $\boldsymbol{R}$ und einer Translation $\boldsymbol{t}$ in einen Punkt $\boldsymbol{p}'$ im KOS K_2 transformieren. Diese Transformation lässt sich geschlossen als Abbildung darstellen [20, 21]:

$$A: K_1 \to K_2, \boldsymbol{p} \mapsto \boldsymbol{p}' \coloneqq \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{p} + \boldsymbol{t}$$

Die hier beschriebene affine Transformation A ist nicht umkehrbar, lässt sich jedoch durch eine Umformulierung als (umkehrbare) homogene affine Transformation $\tilde{A}$ darstellen [22]:

$$\tilde{A}: \widetilde{K_1} \to \widetilde{K_2}, \begin{pmatrix} \boldsymbol{p} \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} \boldsymbol{p}' \\ 1 \end{pmatrix} \coloneqq \begin{pmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{o^T} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \boldsymbol{p} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Hierbei ist $\boldsymbol{o^T}$ der (transformierte) Ursprung des KOS K_1.

Zur Referenzierung der heterogenen Messsysteme auf das Referenz-KOS werden die oben beschriebenen homogenen affinen Transformationen genutzt. Zur Beschreibung der affinen Transformationen werden die folgenden Bezeichnungen für die einzelnen KOS verwendet:

- {GW}: Referenz-KOS
- {HS} bzw. {VS}: Bauteil-KOS der hinteren (feststehenden) bzw. vorderen (beweglichen) Sektion
- {G1} bzw. {G2}: KOS der globalen Messsysteme in Bezug auf die hintere (feststehende) bzw. vordere (bewegliche) Sektion
- {L1} bzw. {L2}: KOS der lokalen Messsysteme in Bezug auf die hintere (feststehende) bzw. vordere (bewegliche) Sektion

Mit Hilfe der obenstehenden Annahmen kann davon ausgegangen werden, dass folgende homogene affine Transformationen bestimmt werden können:

- Die Lage der KOS des lokalen und globalen Messsystems kann mit dem jeweiligen Bauteil-KOS in Bezug gesetzt werden:

$\tilde{A}_{HKi}: \widetilde{\{\mathrm{HS}\}} \to \widetilde{\{\mathrm{Ki}\}}$, $Ki \in \{G1, L1\}$, bzw. $\tilde{A}_{VKj}: \widetilde{\{\mathrm{VS}\}} \to \widetilde{\{\mathrm{Ki}\}}$, $Kj \in \{G2, L2\}$

- Die Lage der KOS des globalen Messsystems kann mit dem Referenz-KOS in Bezug gesetzt werden:

$\tilde{A}_{\mathrm{GG1}}: \widetilde{\{\mathrm{GW}\}} \to \widetilde{\{\mathrm{G1}\}}$ bzw. $\tilde{A}_{\mathrm{GG2}}: \widetilde{\{\mathrm{GW}\}} \to \widetilde{\{\mathrm{G2}\}}$

Da die homogenen affinen Transformationen umkehrbar und sogar bijektiv sind, ist die inverse Abbildung für alle oben beschriebenen Transformationen definiert. Durch die Invertierung der homogenen affinen Transformationen ist der umgekehrte Zusammenhang zwischen den

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

verschiedenen KOS ebenfalls eindeutig bestimmt. Für die Transformation der Ergebnisse der globalen Messsysteme in Bezug auf das Referenz-KOS reicht es daher aus, die Abbildungen $\tilde{A}_{\mathrm{GG1}}$ und $\tilde{A}_{\mathrm{GG2}}$ zu invertieren:

$\tilde{A}_{\mathrm{GG1}}^{-1}\colon \widetilde{\{\mathrm{G1}\}} \rightarrow \widetilde{\{\mathrm{GW}\}}$ bzw. $\tilde{A}_{\mathrm{GG2}}^{-1}\colon \widetilde{\{\mathrm{G2}\}} \rightarrow \widetilde{\{\mathrm{GW}\}}$

Zur Darstellung der lokalen Messsysteme innerhalb des Referenz-KOS wird eine Verkettung verschiedener Transformationen benötigt. Somit kann für jede Sektion ein Bezug zwischen den Messwerten der lokalen Messsysteme und des Referenz-KOS hergestellt werden. Es gilt:

$\tilde{A}_{\mathrm{GG1}}^{-1} \circ \tilde{A}_{HG1} \circ \tilde{A}_{HL1}^{-1}\colon \widetilde{\{\mathrm{L1}\}} \rightarrow \widetilde{\{\mathrm{GW}\}}$ bzw. $\tilde{A}_{\mathrm{GG2}}^{-1} \circ \tilde{A}_{VG2} \circ \tilde{A}_{VL2}^{-1}\colon \widetilde{\{\mathrm{L2}\}} \rightarrow \widetilde{\{\mathrm{GW}\}}$

Das Ergebnis der Umkehrung und Verkettung der homogenen affinen Transformationen sind die Angaben der einzelnen globalen und lokalen Messsysteme vereinheitlicht als Angaben im Referenz-KOS. Durch die Referenzierung auf ein gemeinsames KOS ist es möglich, die Messergebnisse zu vergleichen.

Um eine quantitative Aussage auf Basis der transformierten Messwerte treffen zu können, ist es notwendig, die Messdaten zu einem einzelnen quantitativen Wert zu fusionieren. Die Notwendigkeit ergibt sich daraus, dass für die verschiedenen Informationen hinsichtlich Lage und Ausrichtung der Sektionen Messwerte von den unterschiedlichen heterogenen Messsystemen vorliegen. So kann es bspw. sein, dass für. für die Lage in y-Richtung (bezogen auf das Referenz-KOS) verschiedene Informationen von lokalen und globalen Sensoren, teils mit unterschiedlichen Messunsicherheiten, bereitgestellt werden. Ein typischer Ansatz zur Messdatenfusion ist die Verwendung von Kalman-Filtern [19, 23, 24]. Kalman-Filter dienen zur Schätzung eines Zustands aus (mehreren) gegebenen Messdaten. Die gegebenen Messdaten werden anhand ihrer (als bekannt angenommenen) Einzel-Unsicherheiten gewichtet und zu einem Gesamt-Messwert fusioniert. Im konkreten Fall der Sektionsmontage erhält man so eine Schätzung der Lage und Ausrichtung der Sektion in Abhängigkeit von den Angaben des globalen und lokalen Messsystems. [19]

Grundlage für die Nutzung von Kalman-Filtern ist die Annahme, dass der Zustand $\boldsymbol{x}_k \in \mathbb{R}^n$ zum Zeitpunkt $k \in \mathbb{N}$ aus dem vorherigen Zustand $\boldsymbol{x}_{k-1}$ zum Zeitpunkt $k-1 \in \mathbb{N}_0$ hervorgeht. Vereinfachend wird angenommen, dass der Zusammenhang zwischen den beiden Zuständen mit Hilfe eines (rekursiven) linearen Zustandraummodells beschrieben werden kann:

$$\boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{F}_{k-1}\boldsymbol{x}_{k-1} + \boldsymbol{B}_{k-1}\boldsymbol{u}_{k-1} + \boldsymbol{w}_k$$

Hierbei beschreibt $\boldsymbol{F}_{k-1} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ den Übergang zwischen den beiden Zuständen, $\boldsymbol{u}_{k-1} \in \mathbb{R}^l$ ist die auf das System wirkende Störung und $\boldsymbol{B}_{k-1} \in \mathbb{R}^{n\times l}$ deren Dynamik. Das Prozessrauschen wird durch $\boldsymbol{w}_k \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{Q}_k)$, $\boldsymbol{Q}_k \in \mathbb{R}^{n\times n}$, ausgedrückt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Weiter wird angenommen, dass der wahre Zustand $\boldsymbol{x}_k$ zum Zeitpunkt $k \in \mathbb{N}$ durch die Messung $\boldsymbol{z}_k \in \mathbb{R}^m$ beobachtet wird und zwischen dem wahren Zustand und der Beobachtung ebenfalls ein linearer Zusammenhang besteht:

$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{v}_k$$

Hierbei ist $\boldsymbol{H}_k \in \mathbb{R}^{m \times n}$ die Beobachtungsmatrix und $\boldsymbol{v}_k \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{R}_k)$, $\boldsymbol{R}_k \in \mathbb{R}^{m \times m}$, ist die Messunsicherheit. Es wird angenommen, dass Prozess- und Messrauschen jeweils normalverteilte Zufallsvektoren sind, die stochastisch unabhängig voneinander sind.

Das Ziel ist die Schätzung des Zustands $\boldsymbol{x}_k$ und der Kovarianzmatrix $\boldsymbol{P}_k$ aus den gegebenen Messdaten $\boldsymbol{z}_k$ und dem bekannten Messrauschen $\boldsymbol{v}_k$. Hierzu wird ein iterativer, rekursiver Algorithmus genutzt. Zur Initialisierung wird häufig der Zustand $\boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{0}$ mit Kovarianzmatrix $\boldsymbol{P}_0 = diag(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ genutzt, wobei $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ a priori Schätzungen für die Streuung der einzelnen Einträge in $\boldsymbol{x}_0$ sind. In jedem Zeitschritt $k \in \mathbb{N}$ werden bei Anwendung des Kalman-Filters zwei Operationen durchgeführt: eine Vorhersage und eine Korrektur.

Bei der Vorhersage wird der aktuelle Zustand auf Basis des vorangegangenen Zustands bestimmt:

$$\boldsymbol{x}_{k|k-1} = \boldsymbol{F}_{k-1} \boldsymbol{x}_{k-1} + \boldsymbol{B}_{k-1} \boldsymbol{u}_{k-1}$$

Zudem kann die Kovarianzmatrix wie folgt abgeschätzt werden:

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1} = \boldsymbol{F}_{k-1} \boldsymbol{P}_{k-1} \boldsymbol{F}_{k-1}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{k-1}$$

Für die Korrektur der Vorhersage des Zustands und der Kovarianzmatrix werden die aufgenommenen Messdaten herangezogen. Es gilt für die Korrektur des Zustands:

$$\boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{x}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_k \big(\boldsymbol{z}_k - \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{x}_{k|k-1}\big),$$

wobei für die sog. Kalman-Gain-Matrix $\boldsymbol{K}_k$ der folgende Zusammenhang gilt:

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{k|k-1} \boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} \big(\boldsymbol{H}_k \boldsymbol{P}_{k|k-1} \boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_k\big)^{-1}$$

Weiter gilt für die Korrektur der Kovarianzmatrix folgender Zusammenhang:

$$\boldsymbol{P}_k = (\mathbf{I} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{H}_k) \boldsymbol{P}_{k|k-1}$$

Im Falle der Fusion von lokalen und globalen Messsystemen zur Sektionsmontage im Flugzeugbau ist der zu schätzende Zustand $\boldsymbol{x}_k$ gegeben durch die Lage und Ausrichtung im dreidimensionalen Raum. Der Zustand $\boldsymbol{x}_k$ kann demnach als sechsdimensionale Pose $\boldsymbol{x}_k = \big(x, y, z, r_z, r_y, r_x\big)^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^6$ angegeben werden. Hierbei sei insbesondere die Angabe $z \in \mathbb{R}$ als Koordinate zu verstehen, nicht zu verwechseln mit dem Vektor der Messwerte $\boldsymbol{z}_k \in \mathbb{R}^m$.

Vereinfachend wird angenommen, dass ein statischer Prozess betrachtet wird, die Sensordatenfusion also für feststehende Sektionen und nicht für einen dynamischen Prozess geschehen soll. Somit ergibt sich für die Matrizen $\boldsymbol{F}_k = \mathbf{I}$ und $\boldsymbol{B}_k = \boldsymbol{0}$ und die Vorhersageschritte vereinfachen sich wie folgt:

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\boldsymbol{x}_{k|k-1} = \boldsymbol{x}_{k-1}$$

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1} = \boldsymbol{P}_{k-1} + \boldsymbol{Q}_{k-1}$$

Die Messungen der lokalen und globalen Sensoren werden in Form eines Vektors dargestellt:

$$\boldsymbol{z}_k = \left(\boldsymbol{z}_{global}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{z}_{lokal}^{\mathrm{T}}\right)^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^m$$

Hierbei beschreibt $\boldsymbol{z}_{global,k} \in \mathbb{R}^{m_1}$ den Teilvektor, welcher die Messwerte des globalen Messsystems enthält und $\boldsymbol{z}_{lokal,k} \in \mathbb{R}^{m_2}$ den Teilvektor, welche die Messwerte des lokalen Messsystems enthält. Über die oben beschriebenen als bekannt angenommenen Zusammenhänge der einzelnen KOS der Messsysteme und der Montageumgebung kann die Matrix $\boldsymbol{H}_k$ ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Informationen kann die Nutzung des Kalman-Filters zur Messdatenfusion innerhalb des GRS geschehen. Somit können die Messdaten der einzelnen heterogenen Messsysteme zu einer gemeinsamen Angabe von Lage und Ausrichtung der Flugzeugsektionen fusioniert werden.

Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit im GRS

Neben der Messdatenfusion kann der Kalman-Filter zur Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit genutzt werden. Gemäß GUM ergibt sich die folgende Messunsicherheit für den Schätzer des Zustands $\boldsymbol{x}_k$, d. h. den Wert, der sich nach der Datenfusion der Messdaten $\boldsymbol{z}_k$ ergibt:

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{x}_k} = \boldsymbol{C}_k \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{z}_k} \boldsymbol{C}_k^T$$

Hierbei ist $\boldsymbol{C}_k$ die Sensitivitätsmatrix, welche sich aus der Jacobimatrix des Modells der Datenfusion ergibt und $\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{Z}_k}$ ist die Kovarianzmatrix, welche die Unsicherheiten beider Messsysteme beinhaltet. Das Ergebnis ist die Angabe der kombinierten Messunsicherheit im GRS. Man kann herleiten, dass dieser Zusammenhang für die Schätzung der Matrix $\boldsymbol{P}_k$ nach dem Korrekturschritt, erfüllt ist. [19] Insofern kann die Unsicherheit des fusionierten Wertes GUM-konform über die Matrix $\boldsymbol{P}_k$ angegeben werden und ist demnach ein direktes Ergebnis der Datenfusion mittels Kalman-Filter [19, 24].

Validierung des Konzepts zur Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit an einem Demonstrator

Das oben beschriebene Konzept zur Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit zeigt, dass die Fusion lokaler und globaler Sensordaten in der Flugzeugmontage theoretisch möglich ist. Um zu überprüfen, ob das entwickelte Konzept auch für die praktische Anwendung geeignet ist, wurde am Fraunhofer IFF (Magdeburg) ein Demonstrator entwickelt, anhand dessen das Verfahren validiert wird.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Der Demonstrator wurde so konstruiert, dass er die wesentlichen Merkmale der Flugzeugendmontage, konkret der Rumpfmontage, repräsentieren kann: Das Rahmengestell aus Aluminiumprofilen besteht zwei Sektionen, welche ineinander verschachtelt und über Aktoren miteinander verbunden sind. Die äußere, größere Sektion ist starr und repräsentiert die hintere, feststehende Flugzeugsektion in der Rumpfmontage. Die innenliegende, kleinere Sektion des Demonstrators repräsentiert die vordere, bewegliche Flugzeugsektion, welche mit Hilfe der Aktoren an der größeren, starren Sektion ausgerichtet werden soll.
Zur Realisierung eines GRS wurden lokale und globale Sensoren an dem Demonstrator angebracht. Die lokale Sensorik setzt sich auf Neigungs- und Fluchtungssensoren zusammen, welche direkt am Bauteil angebracht sind. Als globales Messsystem wurde zur Validierung ein Laser Tracker verwendet. Sowohl die globale, als auch die lokale Messtechnik wurde an der starren und der beweglichen Sektion angebracht. In Bild 2 ist der Aufbau des Demonstrators mit den verwendeten Sensoren dargestellt.

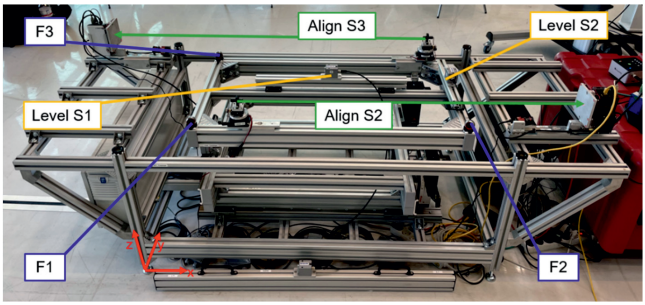


Bild 2: Demonstrator zur Validierung des Konzepts zur Messdatenfusion und Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit. Messpunkte des globalen Messsystems: F1, F2, F3 (blau). Neigungssensoren: Level S1 und Level S2 (gelb). Fluchtungssensoren: Align S2 und Align S3 (grün).

Anhand von Bild 2 wird die Lage der Sensoren sowie die Lage und Ausrichtung der einzelnen KOS ersichtlich. Das Referenz-KOS {GW} sowie das KOS der feststehenden Sektion {HS} und das Koordinatensystem des globalen Messsystems an der feststehenden Sektion {G1} liegen am Standfuß des Demonstrators, vorne links (rot markiert) Das KOS der beweglichen Sektion {VS} und das Koordinatensystem des globalen Messsystems an der beweglichen Sektion {G2} ist definiert durch F1 bis F3 sowie dem Vektor, welcher Senkrecht zu den Verbindungsvektoren $\overrightarrow{F_1F_2}$ und $\overrightarrow{F_1F_3}$ steht. Der Ursprung von {G2} liegt im Punkt F1. Für die jeweiligen KOS der Messsysteme wurden die Positionen in Relation zu {GW} bestimmt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Mit dem in Bild 2 dargestellten Demonstrator und den entsprechenden Sensoren ist es möglich, eine sechsdimensionale Pose $\boldsymbol{x}_k = \left(x, y, z, r_z, r_y, r_x\right)^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^6$ abzuschätzen, welche die Lage der einzelnen Bauteile zueinander beschreibt. Die Lage der Bauteile wird anhand der sog. Montageabweichung im Punkt F1 gemessen, d. h. der Abweichung der tatsächlichen Position des Punktes bzw. der Ausrichtung im Punkt F1 zu dem Soll-Wert, welcher für die Montage der beiden Sektionen erreicht werden muss. Zur Ermittlung dieser Montageabweichung wurden im Vorfeld Referenz-Messungen mit einem Laser Tracker durchgeführt. Die Zuordnung der einzelnen Sensoren zu den einzelnen Einträgen des Vektors $\boldsymbol{x}_k$ ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zuordnung der bereitgestellten Informationen lokaler und globaler Messtechnik in Bezug auf den Zustand am Beispiel des Demonstrators. X: die Messtechnik liefert direkte Informationen zu dem entsprechenden Wert des Zustands. (X): die Messtechnik liefert indirekt Informationen zu dem entsprechenden Wert des Zustands

Zustand $\boldsymbol{x}_k$	Laser Tracker F1, F2, F3	Neigungssensoren Level S1 und S2	Fluchtungssensoren Align S2 und S3
x	X		
y	X		X
z	X		X
r_z	(X)		(X)
r_y	(X)	X	(X)
r_x	(X)	X	

Wie in Tabelle 1 dargestellt, können einige Informationen hinsichtlich Lage und Ausrichtung der beweglichen Sektion implizit aus den Messdaten abgeleitet werden (markiert mit einem „(X)“). Deutlich wird dies anhand der mithilfe des Laser Trackers aufgenommenen Messdaten. Der Laser Tracker liefert Informationen zu F1, F2 und F3 in Form von dreidimensionalen Punkte im Kartesischen Koordinatensystem. Kombiniert man jedoch die drei Positionen F1 bis F3, so kann anhand der Richtungsvektoren zwischen den Messpunkten implizit die Rotation, bspw. relativ zum Referenz-KOS, bestimmt werden. Analog erhält man mit Hilfe der Fluchtungssensoren Align S2 und S3 ebenfalls implizit Informationen über die Rotation der beweglichen Sektion.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zur Anwendung des entwickelten Verfahrens wurden die oben beschriebenen Schritte zur Transformation in ein gemeinsames KOS durchgeführt. Hierzu wurden zunächst die Messdaten der globalen und lokalen Sensoren in das Referenz-KOS überführt. Da {GW}, {HS} und {G1} sowie {VS} und {G2} zusammenfallen, und außerdem die Lage der KOS der lokalen Sensoren in Bezug auf das Referenz-KOS {GW} bekannt ist, vereinfacht sich die Referenzierung: Zur Bestimmung der Lage und Position der beweglichen Sektion ist es daher ausreichend, die Koordinatensysteme der globalen und lokalen Sensoren an der beweglichen Sektion in {GW} zu überführen. Hierfür reicht jeweils eine einfache homogene affine Transformation aus. Für die Sensordatenfusion wurde, wie beschrieben, ein Kalman-Filter genutzt. Für jeden Eintrag der Pose $\boldsymbol{x}_k$ werden hierbei die in Tabelle 1 aufgeführten Sensordaten fusioniert. So wurden beispielsweise für die Montageabweichung in y-Richtung die Messdaten des Laser Trackers für die Positionen F1, F2 und F3 bzw. die Abweichung von den zuvor gemessenen Referenzwerten, sowie die Messdaten der Fluchtungssensoren Align S2 und S3 herangezogen. Es ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Messdaten und Unsicherheiten für die einzelnen Sensoren:

Tabelle 2: Montageabweichung in y-Richtung der beweglichen Sektion

Sensor, ggf. Messpunkt	Laser Tracker, F1	Laser Tracker, F2	Laser Tracker, F3	Align S2	Align S3
Messwert	8,195 mm	6,788 mm	-0,247	-3 mm	0 mm
Unsicherheit	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,05 mm

Das Resultat der Datenfusion der ermittelten Werte für die Montageabweichung in y-Richtung ist beispielhaft für die in Bild 3 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

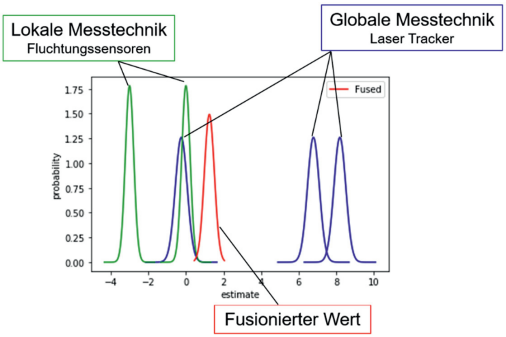


Bild 3: Sensordatenfusion am Beispiel der Montageabweichung in y-Richtung.

Bild 3 zeigt die Messdaten der einzelnen lokalen und globalen Sensoren mit ihrer Unsicherheit, sowie den fusionierten Wert mit der entsprechenden kombinierten Messunsicherheit. Aufgrund der Lage und Streuung des fusionierten Wertes scheint die Datenfusion auf den ersten Blick erfolgreich gewesen zu sein: Für die gegebenen Messdaten ergibt sich für die Montageabweichung in y-Richtung ein fusionierter Wert von 1,248 mm und eine fusionierte Messunsicherheit von ca. 0,0714 mm. Somit liegt das Ergebnis des fusionierten Messwertes und der kombinierten Messunsicherheit innerhalb des minimalen und maximalen Wertes der lokalen und globalen Sensoren. Aufgrund der geringeren Messunsicherheit scheinen die Daten des lokalen Messsystems einen größeren Einfluss auf den fusionierten Wert zu haben, da hier die Differenz zwischen Messwert und fusioniertem Wert geringer ist, als bspw. bei den Messungen des globalen Messsystems für F1 und F2. Zur Validierung der Ergebnisse wurden Wiederholmessungen mit Hilfe eines Laser Trackers durchgeführt. Diese bestätigen die Angabe des fusionierten Wertes.

Da sich für die anderen Angaben innerhalb des Zustandsvektors $\boldsymbol{x}_k$ ähnliche Beobachtungen ergeben, wird die Datenfusion als erfolgreich angesehen. Es wurde demnach gezeigt, dass die Fusion lokaler und globaler Messdaten zu einer gemeinsamen Angabe von Position und Orientierung innerhalb eines GRS und einer kombinierten Messunsicherheit prinzipiell möglich ist. Der auf Basis des GRS zur Verfügung stehende, messunsicherheitsbehaftete und fusionierte Wert der Montageabweichung kann auf unterschiedliche Weise zu einer optimierten Montage im Flugzeugbau beitragen: Zum einen kann das Flugzeug ganzheitlich bezogen auf innen- und außenliegende Prüfmerkmale betrachtet werden, was das Verständnis für die vorliegende Bauteilqualität erhöht. Zum andern können Stellgrößen zur Kompensation von Montageabweichungen auf Basis der Wechselwirkungen innerer und äußerer Prüfmerkmale berechnet und somit auf zeitaufwendige Iterationen verzichtet werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zusammenfassung und Ausblick

Der aktuelle Wandel in der Luftfahrtindustrie - von vorrichtungsbasierten zu mobilen und automatisierten Handhabungsprozessen innerhalb der Montage – erfordert die Verknüpfung heterogener Messtechnik, um prozessrelevante Messgrößen fabrikweit zu erfassen. Bislang erfolgt die Interpretation der heterogenen Messwerte in Hinblick auf das Montageszenario durch Experten. Eine gebündelte, quantitative Aussage über die Position und Ausrichtung einzelner zu montierender Bauteile kann jedoch nicht getroffen werden. Das Ziel ist es daher, die verschiedenen Messsysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften zu nutzen, um einen Gesamtüberblick über das Montageszenario zu erhalten. Hierbei besteht die Herausforderung, dass die Angaben der Messsysteme heterogen und damit nicht direkt vergleichbar sind. Einen Ansatz zur Lösung der Herausforderung bietet die Einführung eines globalen Referenzsystems und die Sensordatenfusion der verschiedenen, heterogenen Messsysteme. In dieser Forschungsarbeit wurde exemplarisch für die Flugzeugrumpfmontage ein Verfahren zur Fusion lokaler und globaler Messdaten vorgestellt, welches eine quantitative Aussage über die Position und Orientierung der zu fügenden Rumpfsektionen erlaubt. Diese Aussage wird benötigt, um eine Regelung innerhalb des Montageprozesses zu ermöglichen. Über einzelne Prüfmerkmale werden zur Beschreibung von Position und Orientierung der KOS der Rumpfsektionen definiert und zum Referenz-KOS referenziert. Mittels homogener affiner Transformationsmatrizen werden die Messdaten verschieden Messsysteme in das Referenz-KOS transformiert. Die transformierten Messdaten werden anschließend mit Hilfe eines Kalman-Filters gebündelt und zu einer sechsdimensionalen Pose, welche Position und Orientierung der Rumpfsektionen beschreibt, fusioniert. Weiter ergibt sich aus der Fusion der Messdaten eine GUM-konforme Aussage über die kombinierte Messunsicherheit.

Das Verfahren wurde mithilfe eines Demonstrators validiert, der an den realen Aufbau der Rumpfmontage angelehnt ist. Anhand des Demonstrators wurde gezeigt, dass die Sensordatenfusion und Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit mit Hilfe der homogenen affinen Transformationen und des Kalman-Filters möglich ist. Es kann hiermit eine Montageabweichung ermittelt werden, die alle im Prozess inbegriffenen Messsysteme zu einem Zeitpunkt berücksichtigt. Hieraus resultiert eine ganzheitliche Betrachtungsweise, die Potenzial für zeiteffiziente und datenbasierte Anwenderentscheidungen zur Kompensation von Montageabweichungen schafft.

Noch zu erforschen ist, inwieweit das Verfahren auch in einer realen Montageumgebung, anstelle des Demonstrators, anwendbar ist. Der Demonstrator stellt mit seinem Aufbau eine idealisierte Montageumgebung dar, umfasst jedoch, im Vergleich zu einer realen

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Montageaufgabe im Flugzeugbau, deutlich kleinere Dimensionen. Zudem bestehen bei dem genutzten Demonstrator stets Sichtverbindungen zwischen dem globalen Messsystem und nahezu allen Punkten des Demonstrators. Dies ist bei der Sektionsmontage jedoch nicht der Fall. Weiter wäre zu erarbeiten, welche Ergebnisse das Verfahren bei einer Nutzung anderer lokaler Messsysteme, wie bspw. eines Indoor-GPS, liefert.

Eine andere mögliche Erweiterung des entwickelten Verfahrens wäre die Integration einer Regelung, abhängig von den aufgenommenen und fusionierten Messwerten. Die aufgenommenen Sensordaten und die zugehörige Messunsicherheit könnten hierbei genutzt werden, um den gesamten Montageprozess zu automatisieren und abhängig von den Messergebnissen zu steuern. Bis zur finalen Integration in den Montageprozess sind demnach noch einige Herausforderungen zu bewältigen.

Danksagung

Die Arbeit ist im Rahmen des BMWi-Forschungsprojekts „iVeSPA – Integrierte Verifikation, Sensoren und Positionierung in der Flugzeugfertigung“ (LUFO V3-2018-2022 / FKZ: 20x1708G) entstanden. Besonderer Dank gilt dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF in Magdeburg, welches für die Entwicklung und Bereitstellung des Demonstrators zur Validierung des hier vorgestellten Verfahrens zuständig war.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literaturverzeichnis

[1] Müller, R., Esser, M., Mbarek, T., Biyiklioglu, N. u. Quinders, S.: Development of Modular Low Cost Automation Systems for Aircraft Assembly. Aerospace Technology Conference and Exposition. SAE International 2011

[2] Nicksch, C., Kluge-Wilkes, A., Huber, M. u. Schmitt, R. H.: Global Reference System for factory-wide integration of metrology enabling flexible automation in aeroplane assembly – requirements, concept and suitable technologies. Procedia Manufacturing 52 (2020), S. 89–94

[3] Boeing: A Futuristic View Of The 777 Fuselage Build, 2014. http://www.boeing.com/features/2014/07/bca-777-fuselage-07-14-14.page, abgerufen am: 22.12.2020

[4] Briegleb, V.: Roboter im Flugzeugbau: Airbus automatisiert A320-Produktion, 2019. https://www.heise.de/newsticker/meldung/Roboter-im-Flugzeugbau-Airbus-automatisiert-A320-Produktion-4544052.html, abgerufen am: 03.09.2021

[5] Tyrrell, M.: Machining a future, 2020. https://www.aero-mag.com/amrc-machining-boeing-sheffield-220120/, abgerufen am: 25.02.2021

[6] Montavon, B., Peterek, M. u. Schmitt, R.: Communication Architecture for Multiple Distributed Large Volume Metrology Systems. International Symposium on Systems Engineering 2017 (2017)

[7] Airbus Commercial Aircraft: Airbus eröffnet neue A320-Strukturmontagelinie in Hamburg, 2019. https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/de/2019/10/airbus-inaugurates-new-a320-structure-assembly-line-in-hamburg.html, abgerufen am: 17.09.2021

[8] Demeester, F., Dresselhaus, M.: Referenzsysteme für wandlungsfähige Produktion. In: AWK Aachener Wekzeugmaschinen-Kolloquium 2011, S. 449–477

[9] International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation u. IPIN: 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2011). Guimaraes, Portugal, 21 - 23 September 2011. Piscataway, NJ: IEEE 2011

[10] Muelaner, J. E. u. Maropoulos, P. G.: Large Volume Metrology Technologies for the Light Controlled Factory. Procedia CIRP 25 (2014), S. 169–176

[11] Schmitt, R. H. u. Voigtmann, C.: Sensorinformationen als Dienst – Baustein der vernetzten Produktion. tm - Technisches Messen 84 (2017) 5, S. 296–309

[12] Mutilba, U., Gomez-Acedo, E., Kortaberria, G., Olarra, A. u. Yagüe-Fabra, J. A.: Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review. Sensors (Basel, Switzerland) 17 (2017) 7, S. 1605

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[13] Cuypers, W., van Gestel, N., Voet, A., Kruth, J.-P., Mingneau, J. u. Bleys, P.: Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology. Optics and Lasers in Engineering 47 (2009) 3-4, S. 292–300

[14] Schmitt, R. H., Peterek, M., Morse, E., Knapp, W., Galetto, M., Härtig, F., Goch, G., Hughes, B., Forbes, A. u. Estler, W. T.: Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. CIRP Annals 65 (2016) 2, S. 643–665

[15] Estler, W. T., Edmundson, K. L., Peggs, G. N. u. Parker, D. H.: Large-Scale Metrology – An Update. CIRP Annals 51 (2002) 2, S. 587–609

[16] Peggs, G. N., Maropoulos, P. G., Hughes, E. B., Forbes, A. B., Robson, S., Ziebart, M. u. Muralikrishnan, B.: Recent developments in large-scale dimensional metrology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 223 (2009) 6, S. 571–595

[17] Franceschini, F.: Distributed large-scale dimensional metrology. New insights. SpringerLink : Bücher. London: Springer 2011

[18] Schmitt, R., Corves, B., Loosen, P., Brecher, C., Jeschke, S., Kimmelmann, W., Hüsing, M., Stollenwerk, J., Bertelsmeier, F., Detert, T., Haag, S., Hoffmann, M., Holters, M., Kurtenbach, S., Permin, E., Prochnau, M., Storm, C. K. u. Janßen, M.: Cognition-Enhanced, Self-optimizing Assembly Systems. In: Brecher, C. u. Özdemir, D. (Hrsg.): Integrative production technology. Theory and applications. Cham, Switzerland: Springer 2017, S. 877–990

[19] Durrant-Whyte, H. u. Henderson, T. C.: Multisensor Data Fusion. In: Siciliano, B. u. Khatib, O. (Hrsg.): Springer Handbook of Robotics. Cham: Springer International Publishing 2016, S. 867–896

[20] Liu, H. u. Fang, Y.: Direct 3D coordinate transformation based on the affine invariance of barycentric coordinates. Journal of Spatial Science 66 (2021) 3, S. 425–444

[21] Andrei, O.: 3D affine coordinate transformations, 2017+0100

[22] Bloomenthal, J. u. Rokne, J.: Homogeneous coordinates. The Visual Computer 11 (1994) 1, S. 15–26

[23] Gan, Q. u. Harris, C. J.: Comparison of two measurement fusion methods for Kalman-filter-based multisensor data fusion. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 37 (2001) 1, S. 273–279

[24] Khaleghi, B., Khamis, A., Karray, F. O. u. Razavi, S. N.: Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art. Information Fusion 14 (2013) 1, S. 28–44

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Praxisorientierte, simulative Abschätzung von Unsicherheiten komplexer Messsysteme

J. Degenhardt, Dr.-Ing. **G. Dai**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig;
Prof. Dr.-Ing **R. Tutsch**,
Institut für Produktionsmesstechnik IPROM, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

Kurzfassung

Die Monte-Carlo Methode (MCM) ist das Verfahren der Wahl, um Unsicherheiten von Messsystemen abzuschätzen, die sich nicht als Funktionsgleichung, sondern nur als Algorithmus modellieren lassen. Ein Nachteil der MCM ist, dass diese i.d.R. eine große Zahl an Simulationen benötigt. Für zeitaufwändig zu simulierende Messsysteme kann dies praktisch eine erhebliche Hürde sein. Hier wird eine alternative Vorgehensweise zur MCM vorgestellt, die durch separates und systematisches Simulieren der Einflussgrößen einer Messung und durch die Verwendung der Faltung zur Kombination der Simulationsergebnisse eine erhebliche Zeitreduktion erzielen kann.

Abstract

The Monte-Carlo Method (MCM) is the technique of choice for estimating uncertainties of measurement systems that cannot be modeled as a Function Equation, but only as an algorithm. A disadvantage of the MCM is that it usually requires a large number of simulations. For measuring systems with computational intensive simulations this can result in an overall long simulation time, which is practically a considerable hurdle. An alternative approach to the MCM is presented here, which can achieve a significant time reduction by separately and systematically simulating the influence quantities of a measurement and by using convolution to combine the simulation results.

1. Einleitung

Der Abschätzung der Messunsicherheit (MU) kommt eine große Bedeutung bei der Angabe eines vollständigen Messergebnisses zu. Gleichzeitig ist aber mit der Abschätzung der MU ein erheblicher Aufwand verbunden vor allem bei komplexen Messsystemen. Die Komplexität eines Systems kann sich durch verschiedene Eigenschaften ausdrücken. Im hier vorliegenden

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Fall ist speziell die Komplexität bei der Modellierung von Messsystemen von Bedeutung. Für die Abschätzung einer MU spielt die Modellierung eines Systems eine wichtige Rolle, da nach dem „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ [1] (engl.: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) (GUM) das Modell einer Messung genutzt wird, um die Unsicherheiten der Einflussgrößen (EG) einer Messung zur Unsicherheit der Messgröße fortzupflanzen. Bei einfachen Messystemen kann oft eine Modellierung in Form einer Funktionsgleichung vorgenommen werden und die Fortpflanzung der Unsicherheiten der EG kann mit dem „Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz“ (UFG) durchgeführt werden [1]. Bei komplexen Systemen hingegen lässt sich das Verhalten oft nicht mit einer Funktionsgleichung abbilden, sodass diese häufig mit Algorithmen modelliert werden. Für die Fortpflanzung der Unsicherheiten der EG lässt sich das UFG dann häufig nicht mehr einsetzten, sodass dann auf die Monte-Carlo Methode (MCM) zurückgegriffen wird [2]. Dabei wird eine große Zahl an Simulationen durchgeführt (ca. $10^{4\text{-}6}$), bei denen die Werte der EG zufällig entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (engl.: Probability Density Function) (PDF) variiert werden. Mit der MCM können die Unsicherheiten von EG komplexer Systeme sehr genau fortgepflanzt werden, jedoch kann dem praktisch ein sehr großer Rechenaufwand gegenüberstehen. Benötigt eine einzelne Simulation des Messprozesses aufgrund dessen komplexer Modellierung eine Minute oder mehr, steigt der Zeitaufwand für die MCM schnell in den Bereich von Monaten und mehr, was praktisch inakzeptabel ist. Hier wird eine Alternativmethode zur MCM vorgestellt, mit der eine MU in deutlich reduzierter Zeit simulativ abgeschätzt werden kann. Vor allem für Fälle in denen die Rechenzeit für eine Simulation aufgrund einzelner EG groß ist, führt die Methode zu einer erheblichen Reduktion der Simulationszeit. Dafür wird auf einige Näherungen des UFG zurückgegriffen, sodass die aufgezeigte Methode einen Zwischenweg der MCM und des UFG darstellt. Damit kann die vorgestellte Methode praktische Vorteile des UFG und der MCM kombinieren, sodass z.B. die relativen Beiträge der EG zur MU und die PDF der Messgröße abgeschätzt werden können.

2. Lösungsansatz

Die Idee des hier vorgestellten Ansatzes zur simulativen Abschätzung von Unsicherheiten, der im Weiteren auch als SSF (in Anlehnung an „Systematische Simulation“ und „Faltung“) abgekürzt wird, basiert drauf, dass die PDF zeitaufwändig zu simulierender EG, oder aller EG, wenn die Simulationen unabhängig von den EG zeitaufwändig sind, einzeln fortgepflanzt werden und die fortgepflanzten PDF mittels Faltung zur PDF der Messgröße kombiniert werden. Dabei kommen einige Effekte zum Tragen, die eine Reduktion der Simulationszeit im Vergleich zur MCM ermöglichen. Bei der MCM werden viele Kombinationen von Zufallswerten

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

aus den PDF der EG gebildet und in das Modell der Messung eingesetzt. Damit wird gleichzeitig die Fortpflanzung und Kombination der PDF der EG durchgeführt. Die große Zahl an Simulationen wird dabei hauptsächlich für das Kombinieren der PDF der EG benötigt. Soll mit einer Reihe von Simulationen lediglich die PDF einer EG fortgepflanzt werden, wie es hier vorgeschlagen wird, kann dies mit einer deutlich reduzierten Zahl an Simulationen geschehen. Für jede einzeln fortgepflanzte EG kann eine individuelle Anzahl an Simulationen in Abhängigkeit des mit ihr verbundenen Zeitaufwands festgelegt werden. Werden alle Einflussgrößen separat fortgepflanzt, wird also komplett auf die MCM verzichtet, kann eine Reduktion der insgesamt durchgeführten Simulationen und damit auch der Simulationszeit erreicht werden. Wird der Zeitaufwand für die Simulationen von einer oder mehreren EG dominiert, reicht es aus, nur diese separat fortzupflanzen und die Anzahl an Simulationen für diese Größen zu reduzieren. Die verbleibenden EG können weiterhin mit der MCM fortgepflanzt werden. Dabei wird zwar nicht die Gesamtzahl der Simulationen reduziert, jedoch aber die Anzahl an zeitaufwändigen Simulationen und damit die Gesamtsimulationszeit.

Beim separaten Fortpflanzen der PDF der EG stellt sich die Frage, wie dies einerseits mit möglichst wenig Simulationen, andererseits aber hinreichend genau durchgeführt werden kann. Um die PDF einer EG möglichst sauber mit Simulationen fortpflanzen zu können, bietet es sich an, nicht wie bei der MCM ein zufälliges Sampling der PDF der EG durchzuführen, sondern eine systematische Stichprobe der PDF zu verwenden. Damit lassen sich stochastische Schwankungen der Ergebnisse wie bei der MCM vermeiden, wo das zufällige Erzeugen der Stichproben für das Kombinieren der PDF mehrerer EG benötigt wird. Zum Erzeugen der systematischen Stichprobe wird zunächst aus den PDF der EG jeweils deren inverse kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion berechnet (engl. Inverse Cumulative Distribution Function) (ICDF). Durch Einsetzen von äquidistanten Wahrscheinlichkeiten P_n (Gleichung 1) in die ICDF lässt sich dann die systematische Stichprobe erzeugen. Der Parameter N in Gleichung 1 gibt dabei die Anzahl an Simulationen an, die für die jeweilige EG durchgeführt werden sollen. Der Parameter o (z.B. 10^{-4}) ist ein Offset der auszuwertenden P_n von 0 und 1, der für PDF ohne endliche Grenzen (z.B. Normalverteilungen) verhindert, dass die ICDF nicht endliche Werte liefert. Für PDF mit endlichen Grenzen (z.B. Rechteckverteilung) kann $o = 0$ gesetzt werden.

$$P_{n=1:N} = o + \frac{n-1}{N-1} * (1 - 2 * o) \quad (1)$$

Die systematischen Stichproben an Werten für die EG werden separat in das Modell der Messung eingesetzt und die Einflüsse der EG auf die Messgröße werden simuliert. Für jede separat fortgepflanzte EG muss aus den simulierten Werten der Messgröße die fortgepflanzte PDF der EG für die Faltung rekonstruiert werden. Dies kann z.B. durch Fitten einer geeigneten

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Verteilungsfunktion oder durch Einsatz eines Kerndichteschätzers geschehen [3]. In den Beispielen die in Abschnitt 3 vorgestellt werden, werden die PDF der fortgepflanzten EG mit einer stückweise linearen Verteilung rekonstruiert. Die dafür verwendete Vorgehensweise nutzt den Abstand aufeinanderfolgender, systematisch fortgepflanzter Werte, um lokal die Wahrscheinlichkeitsdichte der PDF abzuschätzen. Die genaue Vorgehensweise ist als Matlab-Code in Bild 1 zu sehen.

```
[x,~,ix] = unique(X); %Sortiert Elemente x in X aufsteigend
Haeufigkeit=accumarray(ix,1).'; %Häufigkeit von x in X
PDF=zeros(1,numel(x)); %Initialisiere PDF
for i=numel(x)-1 %Berechne Elementde der PDF
    Dichte=(Haeufigkeit(i)+Haeufigkeit(i+1))/(x(i+1)-x(i));
    PDF(i)=PDF(i)+Dichte;
    PDF(i+1)=Dichte;
end
PDF(1)=PDF(1)*2;
PDF(end)=PDF(end)*2;
Flaeche=0; %Initialisierung der Fläche der PDF
for i=1:numel(x)-1 %Berechne Fläche der PDF
    Abstand=x(i+1)-x(i);
    Flaeche=Flaeche+(PDF(i)+PDF(i+1))*Abstand*0.5;
end
PDF=PDF/Flaeche; %Normiere Fläche der PDF zu 1
```

Bild 1: Rekonstruktion einer PDF aus den fortgepflanzten Werten einer Einflussgröße.

Die Kombination der rekonstruierten PDF der einzeln fortgepflanzten EG und ggf. der mit der MCM fortgepflanzten EG kann mit der mathematischen Operation der Faltung durchgeführt werden [4]. Die Faltung berechnet aus den PDF zweier (unabhängiger) Zufallsgrößen die PDF der Summe der beiden Größen. Da für die Unsicherheitsabschätzung nicht die Summe der fortgepflanzten EG, sondern die Summe der von den EG verursachten Messabweichungen von Bedeutung ist, muss von den fortgepflanzten PDF ein Referenzwert der Messgröße subtrahiert werden, der aus einer Simulation ohne Berücksichtigung der EG gewonnen wird. Die so erhaltenen Abweichungs-PDF können gefaltet und zum Referenzwert der Messgröße addiert werden, um die PDF der Messgröße zu erhalten.

3. Validierung

An einem einfachen Beispiel wird nun die Vorgehensweise der SSF validiert, indem die SSF mit der MCM und dem UFG verglichen wird. Als Beispiel wird die fiktive Messung der Länge einer Seite eines quaderförmigen Werkstücks mit einem Messschieber verwendet (Bild 2). Bei der Messung wird die Seitenlänge zunächst als 99,85 mm gemessen, nach der Messung soll nun aber noch die Fläche der Oberseite des Werkstücks mit der zugehörigen Unsicherheit

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ermittelt werden. Die für die Fläche benötigte zweite Seitenlänge sei gleich lang wie die erste Seite plus jedoch möglicher Fertigungsabweichungen. Als weitere Einflussgrößen auf die Fläche werden das Rauschen des Messchiebers und der Abbefehler bei der Messung der Seitenlänge berücksichtigt. Der Abbefehler tritt auf, wenn der Maßstab des Messchiebers nicht mit den Antastpunkten des Messschiebers am Werkstück zusammenfällt und ein Kippspiel des beweglichen Arms des Messchieber vorhanden ist (Bild 2) [5]. Damit spaltet sich der Abbefehler in zwei EG auf, den Abstand des Antastpunktes am Werkstück vom Maßstab des Messschiebers und das Kippspiel des Messschiebers. Die fiktiven EG sowie deren verwendete Formelzeichen und Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Weitere EG werden für die Unsicherheit hier nicht berücksichtigt. Das Modell der Flächenmessung, welches einfach als Funktionsgleichung aufgestellt ist, ist in Gleichung 2 dargestellt.

$$A = (l_M + \sin\alpha * l_A) * (l_M + \sin\alpha * l_A + l_F) \quad (2)$$

Tabelle 1: Einflussgrößen der Messschiebermessung

EG	Formel-zeichen	Verteilung	Verteilungsparameter	Anzahl Simulationen
Verrauschter Messwert	l_M	Normal	μ=99,85 mm σ=0,015 mm	500
Fertigungsabweichung	l_F	Rechteck	μ=0 mm Breite=0,1 mm	50
Abbelänge	l_A	Dreieck	μ=30 mm Breite=40 mm	500
Abbewinkel	α	Rechteck	μ=1/30° Breite=2/30°	50

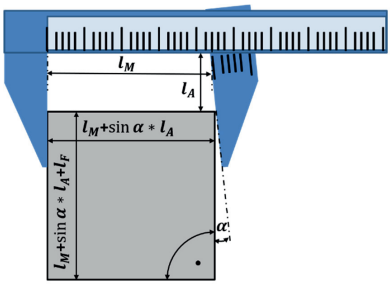


Bild 2: Schematische Darstellung der Messung einer Länge mit einem Messchieber.

Zum Vergleich der drei Methoden wird die Standardunsicherheit der Fläche und jeweils das probabilistische symmetrische und kürzeste 95% Überdeckungsintervall berechnet. Die MCM wird dabei mit 10 Millionen Simulationen als Referenzmethode verwendet, da sie die genaueste Methode ist und bei dem einfachen Modell der Messung in wenigen Sekunden durchgeführt werden kann. Für das UFG werden wie im GUM beschrieben die partiellen

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ableitungen der Fläche nach den EG gebildet, das Modell der Messung wird also durch eine Taylor-Reihe erster Ordnung approximiert. Da beim Einsatz des UFG die PDF der MU nicht ermittelt wird, ist die Angabe von Überdeckungsintervallen für diese Methode nicht direkt möglich. Um dennoch Überdeckungsintervalle angeben zu können, wird auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes angenommen, dass die MU normalverteilt sei, ohne zunächst genauer zu prüfen, ob die dafür geltenden Voraussetzungen erfüllt sind. Die hier vorgeschlagene Methode wird, wie in Abschnitt 2 vorgestellt, durchgeführt. Dabei werden in diesem Beispiel alle EG separat fortgepflanzt. Für die EG die bei der Fortpflanzung einer anderen EG nicht variiert werden, wird in diesem Beispiel der Erwartungswert der jeweiligen EG in das Modell der Messung eingesetzt. Als Referenzwert für die Berechnung der durch die EG hervorgerufenen Abweichungen wird dann der Erwartungswert der Messgröße verwendet, der aus dem Modell berechnet wird, wenn für alle EG der Erwartungswert eingesetzt wird.

Vergleicht man die Ergebnisse der drei Methoden in Tabelle 2, so fällt zunächst auf, dass alle Methoden den gleichen Erwartungswert für die Fläche liefern. Erste Unterschiede der Methoden werden bei den berechneten Standardunsicherheiten sichtbar. Sowohl das UFG als auch die SSF schätzen diese mit dem gleichen etwas zu niedrigen Wert ab. Der Grund für diese Abweichungen zur MCM ist, dass sowohl das UFG als auch die SSF beim separaten Fortpflanzen der EG keine Effekte berücksichtigen, bei denen die Unsicherheit einer EG die Fortpflanzung einer anderen EG beeinflusst. Vergleicht man die berechneten Überdeckungsintervalle, lässt sich nicht erkennen, dass die SFF dem UFG überlegen ist, bei welchem die PDF der Messgröße nicht abgeschätzt wird. In Bild 3 ist jedoch erkennbar, dass die SSF eine besser übereinstimmende PDF zur MCM ermittelt, als es mit dem UFG und der (nicht ganz gültigen) Annahme einer Normalverteilung für die Unsicherheit der Fläche der Fall ist.

Tabelle 2: Durch die drei Methoden abgeschätzte Unsicherheit der Messschiebermessung

Methode	Erwartungs-wert / mm²	Standardunsich-erheit / mm²	Grenzen symme-trisches 95% Über-deckungsintervall	Grenzen kürzestes 95% Überdeck-ungsintervall
Monte-Carlo	9973,51	3,98	9966,14 - 9981,35	9965,90 - 9981,08
UFG	9973,51	3,94	9965,79 - 9981,23	9965,79 - 9981,23
SSF	9973,51	3,94	9965,99 - 9981,02	9966,00 - 9981,02

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

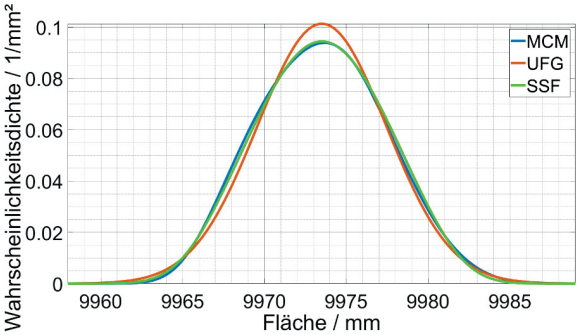


Bild 3: Mit den drei Methoden abgeschätzte PDF der Fläche des Werkstücks.

4. Anwendung

Als Beispiel für eine echte Anwendung der SSF wird die Unsicherheit der projizierten Flächenfunktion (PFF) eines Mikroindenters [6] ermittelt, die mit einem Rasterkraftmikroskop [7] (RKM) gemessen wird. Bei der Messung tastet das RKM in einem Scanprozess mit einer wenigen Nanometer kleinen Spitze die Topographie des Indenters ab, um ein Messbild zu erzeugen, in dem jedes Pixel die lokale Höhe des Indenters enthält. Das Messbild deckt in diesem Beispiel einen Bereich von 8*8 µm mit 1000*1000 Pixeln ab. Die PPF, die die vertikal projizierte Oberfläche des Indenters in Abhängigkeit dessen Höhe angibt, kann aus dem Messbild durch Zählen der Pixel in festen Höhenintervallen (hier 0,5 nm) ermittelt werden.

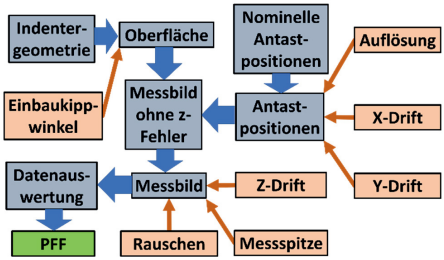


Bild 4: Blockmodell der RKM Messung eines Indenters. Die blauen Blöcke stellen Schritte der Simulation dar, die durchgeführt werden müssen, während die orangen Blöcke die EG enthalten, die unabhängig voneinander in den Simulationen berücksichtigt werden können.

Eine Modellierung dieses Messprozesses mit einer Funktionsgleichung ist aufgrund des Bildentstehungsprozesses der Messung, der komplexen Messgröße und dem Zählalgorithmus

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

in der Datenauswertung nicht möglich, vor allem wenn die Unsicherheitsuntersuchung auf der gemessenen Topographie des Indenters basieren soll. Bild 4 zeigt das Blockmodell der Messung, dessen Blöcke softwaretechnisch realisiert wurden und für die Simulation des Messprozesses verwendet werden. Mit diesem Modell und einer Referenztopographie des Indenters können Messbilder simuliert werden, aus denen PPF mit Einfluss der EG abgeleitet werden. Als Referenztopographie wird die gemessene Topographie des Indenters verwendet, die jedoch vorher mit einem Gaussfilter geglättet wurde, um Rauscheinflüsse zu reduzieren. Die simulierten PPF werden anschließend von der PPF der Referenztopographie subtrahiert, um für alle EG die Verteilung der Abweichungen abzuschätzen, die sie erzeugen. Die PDF der Gesamtabweichungen aller EG wird dann durch Faltung der einzelnen PDF der Abweichungen ermittelt. Der Erwartungswert dieser Abweichungsverteilung wird von der gemessenen PPF subtrahiert, um den systematischen Fehler der gemessenen PPF zu korrigieren. Die Unsicherheit der PPF kann anschließend aus der PDF der Gesamtabweichungen ermittelt werden.

Tabelle 3: Einflussgrößen der RKM-Messung

EG	Beschreibung	Verteilung (alles Rechteckverteilungen)	Anzahl Simulationen	Simulationszeit
Rauschen	Weißes Rauschen	σ von 0,2 - 0,3 nm	5000	~3 h
Drift (x, y, z)	Linear	x, y und z jeweils -20 - 20 nm in 11 Schritten pro Achse	1331 (11*11*11)	~1,2 h
Messspitze	Sphärisch	Radius 2 - 20 nm	19	~28,5 h
Auflösung	Regelmäßiges Abtastgitter	Systematische Verschiebung des Gitters in x und y 0-8 nm	1024	~1,9 h
Einbaukippwinkel	Winkel des Indenterhalters im RKM	0-1,5° Kippung bei Richtungen von 0 - 360° in 77.75° Schritten	5000	~10,5 h

Die Einflussgrößen der gemessenen PFF sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die Messung der Indentertopographie wurde mit dem metrologischen AFM der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt [8] durchgeführt. Bei diesem sind Einflüsse des Scanners wie Nichtlinearitäten oder Übersprechen der Messachsen vernachlässigbar, weshalb diese für die Unsicherheitsuntersuchung nicht berücksichtigt werden. Da bei der durchgeführten Untersuchung der relative Unsicherheitsbeitrag der einzelnen EG von Interesse war, wurden alle EG einzeln fortgepflanzt. Wie in Tabelle 3 gesehen werden kann, liegt der Hauptzeitaufwand der Simulationen jedoch hauptsächlich bei der Berücksichtigung des Einflusses der Messspitze. Die Form der Messspitze führt zu einer Verbreiterung der

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Strukturen im Messbild, was mit einer Dilatation simuliert werden kann [9]. Hier wurde auf eine flexible Realisierung der Dilatation zurückgegriffen, bei der Radien für die Messspitze, die kleiner als der Antastabstand der Messpunkte von etwa 8 nm sind, gut berücksichtigt werden können. Da die gewählte Realisierung jedoch sehr zeitaufwändig ist, wurde nicht auf die MCM für die Unsicherheitsabschätzung zurückgegriffen wurde, sondern auf die SFF.

Bild 5 zeigt Ergebnisse der durchgeführten Unsicherheitsuntersuchung. In Bild 5a sind die simulierten, relativen Standardunsicherheiten der fortgepflanzten EG und der Messgröße als Funktion der Höhe des Indenters dargestellt. Dank des separaten Fortpflanzens der einzelnen EG ist es, anders als mit der MCM, möglich, diese Information zu erhalten. In Bild 5b sind beispielhaft die Abweichungs-PDF für die Messspitze, das Rauschen und den Kippwinkel des Indenters sowie die gefaltete Gesamtabweichungs-PDF der Indenterfläche für eine Höhe von 100 nm dargestellt. Auch wenn die Abweichungs-PDF der EG durch das komplexe Verhalten des Messmodells und die stückweise lineare Rekonstruktion der fortgepflanzten PDF etwas verrauscht sind, ist die Gesamtabweichungs-PDF durch den Glättungseffekt der Faltung frei von Rauscheinflüssen. In Abbildung 5b lassen sich gut systematische Abweichungen erkennen, die durch die EG hervorgerufen werden. So besitzt z.B. die Messspitze einen relativ großen systematischen Einfluss auf die PPF (Erwartungswert der PDF der Abweichung ≠ 0), der auch in der PDF der Gesamtabweichungen zu sehen ist. Auch lässt sich bei genauem Hinschauen die starke Asymmetrie des Kippwinkeleinflusses in der PDF der Gesamtabweichung erkennen.

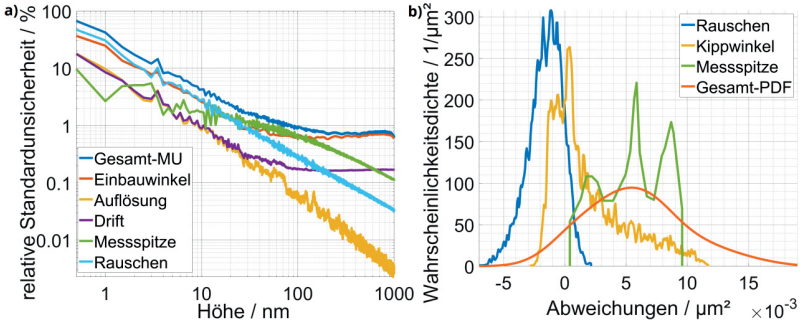


Bild 5: Ergebnisse der Unsicherheitsschätzung der SSF für die RKM-Messung. a) Relative Standardunsicherheiten der Fläche des Indenters und der einzelnen EG in Abhängigkeit der Höhe des Indenters. b) Unsicherheitsverteilung der gefalteten Abweichungen und der Abweichungen die durch das Rauschen, den Kippwinkel und die Messspitze für die Fläche des Indenters in 100 nm Höhe hervorgerufen werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die benötigte Zeit für die Durchführung aller Simulationen der Unsicherheitsuntersuchung betrug etwa 45,1 Stunden. Wäre die MCM für die Unsicherheitsuntersuchung eingesetzt worden, hätte die erwartete Simulationszeit auf dem gleichen Rechner etwa 1,7 Jahre für 10000 Simulationen betragen. Dieses Beispiel zeigt eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit und die Möglichkeiten, die sich mit der SSF ergeben.

5. Diskussion

Der hier vorgestellte Ansatz zur simulativen Abschätzung von Unsicherheiten besitzt eine Reihe von Vorteilen durch das separate Simulieren des Einflusses von EG, aber auch einige Nachteile. Der hauptsächliche Nachteil beim separaten Fortpflanzen der PDF der EG ist, dass implizit die Vereinfachung gemacht wird, dass die Wirkung der EG auf die Messgröße unabhängig von den Variationen der anderen EG ist. Dies ist nicht zwangsläufig der Fall und kann folglich zu Ungenauigkeiten in der abgeschätzten Messunsicherheit führen. Diese Abweichungen können z.B. in Bild 3 erkannt werden, wo die Ergebnisse der MCM leicht von der SSF abweichen. Andererseits ist diese Näherung, die auch beim UFG gemacht wird, in vielen Fällen hinnehmbar. Ein weiterer Nachteil des separaten Fortpflanzens der EG ist, dass sich damit nicht direkt Korrelationen der EG berücksichtigen lassen. Beide Nachteile lassen sich jedoch umgehen, wenn die betroffenen EG mit der MCM fortgepflanzt werden, die sich mit dem Ansatz der SSF kombinieren lässt. Leider ist dies nur dann sinnvoll möglich, wenn dadurch der Zeitaufwand der Simulationen nicht wieder einen realistisch angemessenen Zeitrahmen überschreitet. Im Zweifelsfall ist es jedoch besser einige Vereinfachungen vorzunehmen um eine Unsicherheit abzuschätzen, als statt dessen aus zeitlichen Gründen auf eine Unsicherheitsabschätzung zu verzichten.

Die Vorteile des vorgestellten Ansatzes sind vielfältig und sollten dessen Nachteile vor allem für rechenintensive Modelle aufgrund der Reduktion der Simulationszeit im Vergleich zur MCM aufwiegen. Ein Vorteil des Ansatzes, der speziell für die gezielte Reduktion der MU nützlich ist, ist, dass für die separat fortgepflanzten EG der relative Beitrag zur Gesamtunsicherheit abgeschätzt werden kann. Dadurch können wie beim klassischen GUM die EG identifiziert werden, die die Gesamtunsicherheit dominieren. Ein eindrucksvolles Beispiel dafür wurde mit der RKM-Messung gegeben, wo mit der SSF beurteilt werden kann, welche EG die Unsicherheit der gemessenen Fläche eines Indenters in Abhängigkeit dessen Höhe dominiert. Auch lassen sich systematische Anteile der fortgepflanzten EG mit der SSF erkennen und korrigieren. Des Weiteren ist mit dem vorgestellten Ansatz die Angabe von Überdeckungsintervallen für die Messgröße möglich, da die PDF der Messgröße abgeschätzt wird. Durch das Verwenden der Faltung zur Kombination der fortgepflanzten

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Unsicherheitsbeiträge lassen sich Unsicherheitsbudgets zudem nachträglich um weitere EG erweitern, ohne alle Simulationen erneut durchführen zu müssen. Nichtlinearitäten in der Fortpflanzung der einzelnen EG werden durch den Ansatz berücksichtigt, was in Bild 5b erkannt werden kann, wo sich die mit der SSF fortgepflanzten PDF deutlich von Rechteckverteilungen unterscheiden, die die Eingangsverteilungen der EG bilden. Zu guter Letzt ist die SSF kompatibel mit dem GUM und lässt sich problemlos in dessen Ablauf einbinden. Wenn die entsprechenden Vereinfachungen der SFF bezüglich des Messmodells erfüllt sind und ausreichend Simulationen zum Fortpflanzen der EG verwendet werden, liefert die SFF übereinstimmende Unsicherheiten mit dem UFG und der MCM.

6. Zusammenfassung

Es wurde eine Methode vorgestellt, die im Vergleich zur Monte-Carlo Methode durch separates und systematisches Simulieren der Einflüsse einer Messung und durch Faltung der simuliert-fortgepflanzten Verteilungen in deutlich reduzierter Zeit die Abschätzung von Unsicherheiten ermöglicht, wenn der Zeitaufwand für einzelne Simulationen groß ist. Die vorgestellte Methode besitzt viele für die Praxis nützliche Vorteile, wie die Identifikation der relativen Beiträge der Einflussgrößen zur Gesamtunsicherheit, die Abschätzung der PDF der Messunsicherheit, die die Angabe von Überdeckungsintervallen ermöglicht, das Erkennen von systematischen Abweichungen der Messwerte, die bei der Fortpflanzung der einzelnen Einflussgrößen auftreten können, und die Möglichkeit einzelne Einflussgrößen zu updaten oder neue Einflussgrößen der Messung zu berücksichtigen, ohne alle Simulationen wiederholen zu müssen.

Die Methode setzt für das separate Simulieren von Einflüssen voraus, dass die Einflüsse einer Messung unabhängig voneinander sind und sich gegenseitig in ihrer Wirkung auf die Messgröße nicht signifikant beeinflussen. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, kann die vorgestellte Methode, die kompatibel mit dem „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ ist, für einfach zu simulierende Einflüsse mit der Monte-Carlo Methode kombiniert werden, um für diese Einflüsse gegenseitige Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Als ein mögliches Anwendungsbeispiel der Methode wurde das bildgebende Messverfahren der Rasterkraftmikroskopie vorgestellt, bei dem für einzelne Einflussgrößen mitunter aufwändig Messbilder zu simulieren sind und die Methode die benötigte Simulationszeit zur Unsicherheitsabschätzung erheblich reduzieren kann.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Danksagung

Johannes Degenhardt bedankt sich herzlich für die Unterstützung durch die Braunschweig International Graduate School of Metrology B-IGSM.

Literatur

[1] ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 Messunsicherheit - Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich.

[2] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method, First edition 2008

[3] Hernandez, H.: Comparison of Methods for the Reconstruction of Probability Density Functions from Data Samples, ForsChem Research Reports, 12 2018.

[4] Rossi, G. B. et al.: Computer aided evaluation of measurement uncertainty by convolution of probability distributions, 2003.

[5] Zhang, G. X.: A study on the Abbe principle and Abbe error, CIRP annals, 38 (1) 1989. S.525-528.

[6] ISO 14577-2:2015 Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 2: Verification and calibration of testing machines

[7] Binnig, G. et al.: Atomic force microscope, Physical review letters, 56 (9) 1986. S.930.

[8] Dai, G. et al.: A metrological large range atomic force microscope with improved performance, Review of Scientific Instruments, 80 (4) 2009. S.043702.

[9] Villarrubia, J. S.: Algorithms for scanned probe microscope image simulation, surface reconstruction, and tip estimation, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 102 (4) 1997. S.425.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Verknüpfung von Datensätzen mit unterschiedlicher Auflösung mittels parallelkinematischem Positioniersystem

Sebastian Metzner, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. **Tino Hausotte**,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Kurzfassung

Die Messung von Werkstücken und deren Funktionselemente mit angepasster Auflösung unterschiedlicher Sensoren erfordert die Registrierung dieser Sensoren in einem einheitlichen Koordinatensystem. Vor allem bei Verwendung von Streifenlichtprojektionssystemen mit nur einer Kamera entfällt die Möglichkeit zur Nutzung von passiven Triangulationsprinzipien unter Nutzung von Referenzpunkten. Für die Datenzusammenführung und zur möglichst flexiblen Positionierung des Werkstückes kommt daher ein Hexapod als Positioniersystem zum Einsatz. In der vorliegenden Arbeit werden drei Ansätze vorgestellt, unter Nutzung der Kamera des Streifenlichtprojektionssystems eine Registrierung mittels 2D-Kalibriermuster vorzunehmen. Problematisch sind dabei die sehr kleinen Messbereiche der Sensoren sowie die teils schlechte Druckqualität der Muster. Zudem werden Auswertungen zu der Positioniergenauigkeit des Hexapod vorgestellt, um die exakte Positionierung des Werkstückes nach der einmaligen Kalibrierung zu bewerten.

Abstract

The measurement of workpieces and their functional elements with adapted resolution and different sensors requires the registration of sensors in a uniform coordinate system. Especially when using fringe projection techniques with only one camera, the possibility of using passive triangulation principles with reference points is omitted. Therefore, a hexapod was used as a positioning system for data merging and for positioning the workpiece as flexibly as possible. In the present work, three approaches are presented to perform registration by means of 2D calibration patterns using the camera of the strip light projection system. Problematic are the very small measuring ranges of the sensors as well as the partly bad print quality of the patterns. In addition, evaluations of the positioning accuracy of the Hexapod are presented in order to assess the exact positioning of the workpiece after the one-time calibration.

1. Einleitung

Die Blechmassivumformung als neuartiges Fertigungsverfahren stellt auch die Messtechnik vor neue Herausforderungen. Durch die sich stark unterscheidenden Form- und Funktions-

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

elemente wie Mitnehmer, Aussparungen und Verzahnungen sind unterschiedliche Anforderungen an die Messtechnik gestellt. Vor allem optische Systeme kommen mit den unterschiedlichen Oberflächenreflexionen und Geometrieelementen schnell an ihre Grenzen.
Für eine holistische Messung des gesamten Bauteiles mit ortsangepassten Auflösungen und eine taktzeitgerechte Messung ist die Fusion von Datensätzen aus verschiedenen Streifenlichtprojektionssystemen sinnvoll. Durch die stark variierenden Arbeitsabstände und Messvolumen, ist eine Positionierung des Bauteils innerhalb dieser Messbereiche notwendig. Für die notwendige Flexibilität kommt daher ein parallelkinematisches Positioniersystem zum Einsatz, um möglichst viele Freiheitsgrade zur Werkstückpositionierung zu erhalten. In der vorliegenden Arbeit wird eine 2D-Registrierungsmethode mit unterschiedlichen Ansätzen zur Punktregistrierung aufgezeigt sowie die Bestimmung der Positioniergenauigkeit des Positioniersystems vorgestellt.

2. Registrierverfahren der Streifenlichtprojektionssensoren im Weltkoordinatensystem

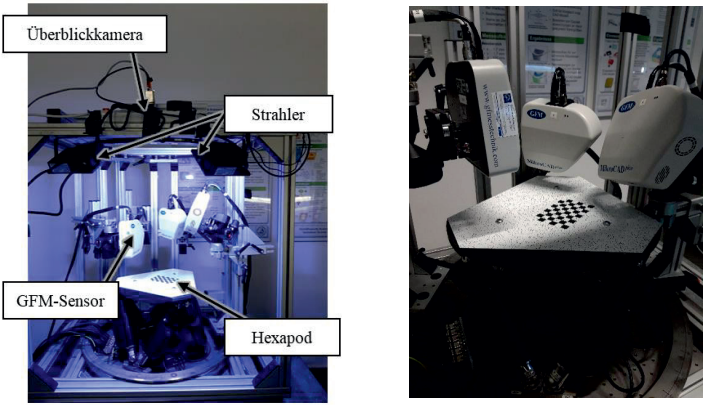
Für die Messung der Demonstratorbauteile kommt ein entwickelter Messaufbau zum Einsatz, welcher aus mindestens drei Streifenlichtprojektionssystemen, einer Überblickkamera sowie Strahlern und einem Hexapod besteht. Die Registrierung der Sensoren im Weltkoordinatensystem erfolgt über ein neuartiges Muster, welches zum einen ein in der optischen Kalibrierung übliches Schachbrettmuster sowie auch ein zufälliges Punktemuster im Aufnahmebereich der Streifenlichtprojektionssensoren enthält. Bild 1 zeigt den Messaufbau mit der Überblickkamera, dem Hexapod als Positioniersystem sowie die GFM-Sensoren der Firma LMI Technology GmbH (ehemals GFMesstechnik GmbH), welche in einem einheitlichen Koordinatensystem registriert werden sollen (a). In der rechten Abbildung ist das auf dem Hexapod aufgebrachte Muster zu erkennen (b).
Um das erstellte Punktmuster verwenden zu können, müssen zunächst die Koordinaten der zufällig aufgebrachten Punkte bestimmt werden. Die Kalibrierung und Registrierung der Sensoren und Kameras gliedert sich in zwei Schritte:

Kalibrierung des Punktmusters mit Hilfe eines Übersichtssensors

In einem ersten Schritt werden die Schnittpunkte des Schachbrettmusters mit dem Messsystem VideoCheck IP 250 gemessen. Das Messsystem hat eine Längenmessabweichung nach ISO 10360-2 von MPE E1: 1,4 µm + L/250 µm/mm (L in mm). Mit den genauen

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Schnittpositionen der Quadrate des Schachbrettmusters ist es möglich, eine Kamerakalibrierung der Überblickkamera durchzuführen, um die intrinsischen und extrinsischen Parameter dieser Kamera zu berechnen.



(a) (b)

Bild 1: Messsystem bestehend aus Überblickkamera, Hexapod, Strahlern zur Beleuchtung der Messszene sowie den GFM-Sensoren (a), auf den Hexapod aufgebrachtes Schachbrettmuster mit den GFM-Sensoren (b).

Das Muster wird zwischen den einzelnen Aufnahmen der Kalibrierung zufällig innerhalb der Verfahrgrenzen des Hexapods und im Messbereich der Kamera positioniert. Zusätzlich zu den zufälligen Bewegungen in den einzelnen Verfahrrichtungen werden zufällige Winkel um die jeweiligen Achsen angefahren, um eine möglichst präzise Kalibrierung zu erreichen. Die Auswertung der Kalibrierung erfolgt anschließend mit dem Ansatz von Zhang als Lochkameramodell [1]. Nach der Kalibrierung der Kamera werden die zufälligen Punkte aus einem rektifizierten Bild extrahiert. Die Bewertung der Qualität der Punktekoordinaten im Hinblick auf die Positionsgenauigkeit wird zum einen durch den Restfehler (RMSE) der aufgenommenen Bilder mit Gleichung 1 bestimmt.

$$RMSE = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{m} \sqrt{\left(X_i' - X_1\right)^2 + \left(Y_i' - Y_1\right)^2} \quad (1)$$

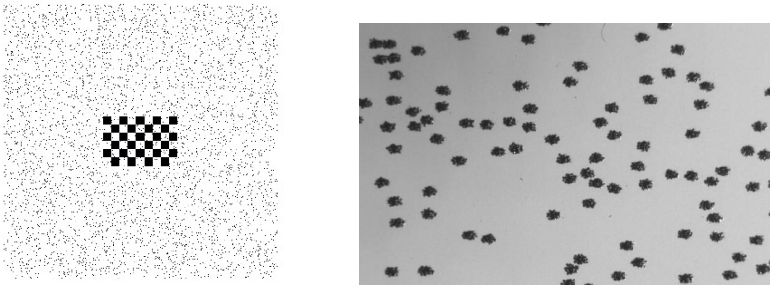
Zudem wird der Abstand einzelner ausgewählter Punkte zu ausgewählten, ebenfalls mit dem VideoCheck IP 250 gemessenen Punkten, berechnet. Eine umfängliche Kalibrierung aller

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zufälligen Punkte durch das Messgerät ist durch die große Anzahl und das manuelle Verfahren des Musters unter dem Messgerät nicht möglich.

Registrierung der GFM-Sensoren im Weltkoordinatensystem

Im zweiten Schritt wird die Registrierung der kleinen Sensoren mit dem Kalibriermuster durchgeführt. Für die Registrierung werden nur die Kameras der Sensoren ohne Streifenlichtprojektoren verwendet. Der Messbereich wird mit zusätzlichem blauem Licht der angebrachten Strahler beleuchtet. Durch ein Bewegen des Musters innerhalb des Aufnahmebereichs der Sensoren ist eine Kalibrierung wie auch schon bei der Überblickkamera möglich. Die Bewegungsmöglichkeiten müssen durch den sehr kleinen Messbereich erheblich eingeschränkt werden. Die zuvor gespeicherten Punkte in kartesischen Koordinaten werden nun nach der Erkennung der Punkte bzw. der Auswahl und Verfolgung von Punkten für die Kamerakalibrierung verwendet. Problematisch ist der sehr kleine Messbereich und die geringe Auflösung der Kamera des Sensors MikroCAD 0,3. Bild 2 zeigt das generierte Kalibriermuster mit dem Schachbrettmuster, das in der Mitte des Kalibriermusters platziert ist (a). Die zufällig aufgebrachten Punkte sind ebenfalls zu sehen. Die Radien der zufälligen Punkte wurden vorgegeben. Sich überlappende oder zu nahe aneinander liegende Punkte wurden bei der Erstellung des Musters entfernt. Es wird daher auch von einem Pseudo-zufälligem Punktemuster gesprochen. Die rechte Abbildung zeigt den Aufnahmeausschnitt des MikroCAD 1,0-Sensors von dem generierten Punktemuster (b). Man erkennt die unsaubere Druckqualität des Musters mit den verzerrten und unstetigen Randbereichen.



(a) (b)

Bild 2: Kalibriermuster mit Schachbrettmuster und pseudo-zufällig erstelltes Muster ohne Punktüberlappungen und mit Mindestpunktabstand (a), Bildausschnitt des Punktemusters der Kamera MikroCAD 1,0 mit den unsauber gedruckten zufälligen Punkten (b)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ansätze zur Bestimmung von Punktetracking und Registrierung

Durch den sehr kleinen Messbereich der Sensoren mit 4,4 mm x 2,8 mm x 1 mm und 12,4 mm x 7,9 mm x 4,4 mm mit einer Auflösung von 0,3 µm und 1 µm sind Punkte grundsätzlich für die Registrierung besser geeignet als Quadrate oder Linien. Das Erkennen von Schnittpunkten von Schachbrettmustern ist bei solchen Messbereichen nicht in ausreichender Genauigkeit möglich. Limitierend ist hier die Druckqualität des Musters mit unscharfen Kanten. Bei Punkten ist die Druckqualität in einem gewissen Rahmen nicht entscheidend, da hier meist der Mittelpunkt durch Einpassungen oder Transformationen bestimmt wird. Für die Registrierung der Punkte wurden drei unterschiedliche Ansätze verfolgt: Herkömmliche Ellipsenfinder durch Auswertung zusammenhängender Dunkelbereiche und vorgegebenem Schwellwert des Verhältnisses zwischen Länge und Breite der Dunkelbereiche, Feature-Tracking durch den SURF-Algorithmus sowie die Hough-Transformation zur Mittelpunktbestimmung mit anschließendem „Nearest-Neighbour-Ansatz“ zur Bestimmung der korrespondierenden Punktepaare. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Vorgehensweisen beschrieben.

Punkteerkennung und Registrierung mittels Ellipsenfinder

In dem ersten Ansatz werden durch einen Ellipsenfinder zunächst mit dem Ansatz nach Haralick [2] die Punkte gelabelt. Das damit entstandene logische Bild mit *n* Labeln wird über die MATLAB-Funktion „regionprops“ mit den Orientierungen, den Zentralpunkten sowie der Länge der Haupt- und Nebenachse jeder der Label bestimmt. Die Ellipsen werden dann über die maximalen und minimalen Längen der Achsen gefiltert. Diese Größen entstehen aus der Bildgröße und müssen vor allem bei dem Sensor MikroCAD 0,3 nochmals manuell angepasst werden. Diese werden anschließend nach dem bekannten RANSAC-Algorithmus registriert [3]. Problematisch ist dabei, dass die gefundenen und zugeordneten Punkte sich in der Anzahl zu den gefundenen Punkten der weiteren Kalibrierbilder unterscheiden. Für eine Kalibrierung ist jedoch eine gleichbleibende Anzahl mit den jeweils identischen bzw. homologen Punkten über alle Kalibrierbilder erforderlich. Für die Kalibrierung sind durch die Bewegung des Hexapods und das dadurch erreichte Ausblenden von Randpunkten bei der Bewegung deutlich mehr Punkte als üblicherweise bei Schachbrettmustern erforderlich, um nach Abzug aller nicht durchgehend erkannten Punkte trotzdem eine Kalibrierung durchführen zu können. Um die Ellipsenfindung etwas zu stabilisieren, wurden Algorithmen wie die Flat-Field-Korrektur angewendet, um Fehler durch Abschattungen der weiteren Sensoren im Kalibrierbild zu reduzieren. Nachfolgende Grafik zeigt die errechneten Ellipsen mit Kennzeichnung des Mittelpunktes (rot). Die Punkte im linken oberen Bereich sind entweder zu groß durch die

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Überlappung mehrerer Punkte oder die Ränder der Punkte sind nicht stetig genug. Auf eine Darstellung der Zwischenergebnisse wird hier aus Platzgründen verzichtet.

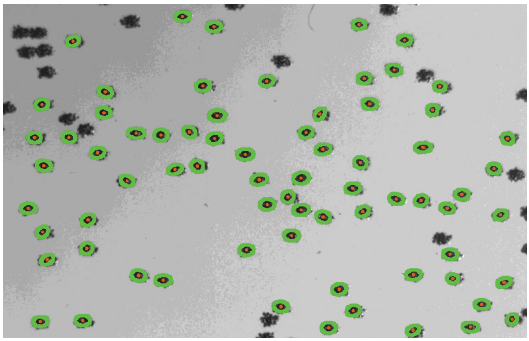


Bild 3: Durch den Ellipsenfinder erkannte Punkte (grün umrandet) der Kamerabilder des Sensors MikroCAD 1,0.

Surf-Features zu unabhängig von den Punkten erkannten Features

Durch die sehr kleinen Punkte im Messbereich des Sensors MikroCAD 0,3 und vor allem durch die in diesem Bereich meist schlechte Druckqualität der zufälligen Punkte in einem Bereich von wenigen Pixeln, gibt es eine weitere Möglichkeit Punkte oder Merkmale der einzelnen Bilder zuzuordnen. Bei diesem Ansatz wurden Merkmale unabhängig von dem Punktemuster aufgrund der teils sehr verzerrten und verpixelten Punkte untersucht. Dazu wurden Merkmale nach dem Ansatz von Bay et al. [4] extrahiert. Der Ansatz nutzt Integralbilder, um eine möglichst schnelle Auswahl der Merkmale zu erreichen.

$$I_S(x) = \sum_{i=0}^{i \le x} \sum_{j=0}^{j \le y} I(i,j) \tag{2}$$

Der Deskriptor basiert auf Summen on Haar-Wavelet-Komponenten und nutzt die Laplace-basierte Indizierungsstrategie. Dieser Ansatz unter der Verwendung der Bildintensitätsmuster im Vergleich zu histogrammbasierten Ansätzen ist dabei deutlich robuster in diesem Anwendungsfall. Das erste Bild der Kalibrierbildserie wird dabei als Referenzbild verwendet, um die Merkmale zu diesem Bild zu registrieren und die gleichen Referenzmerkmale über den gesamten Bilderstapel zu nutzen. Die Ergebnisse zeigen nach der Filterung der Ausreißer auch eine ausreichend große Anzahl an Merkmalen, für die eine Kalibrierung möglich erscheint. Nachfolgende Grafik zeigt die erkannten Features mit den registrierten Features von zwei Beispielbildern. Die einzelnen noch sichtbaren Ausreißer werden vor der Kalibrierung

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

durch einen Vergleich aller Translationsvektoren entfernt. Wie beschrieben ist die Anzahl der Punkte zwar ausreichend, durch die sehr ähnlichen Transformationen der Features in die identische Richtung ohne Bewegung der Vektoren innerhalb des Bildes sind diese aber zu ähnlich, um eine Kamerakalibrierung durchzuführen.

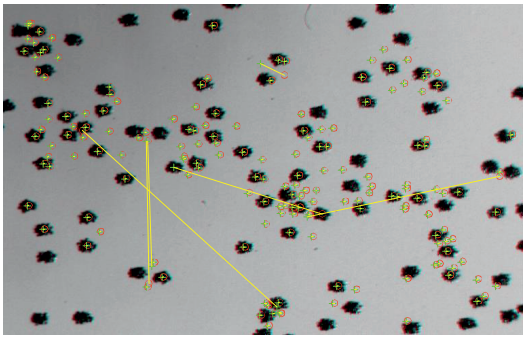


Bild 4: Übereinandergelegte Bilder mit den erkannten Features in den beiden Bildern. Die Vektoren zeigen die vermeintlich korrespondierenden Punkte.

Hough-Transformation

Der dritte Ansatz nutzt die Hough-Transformation zur Mittelpunktbestimmung und einen angepassten Ansatz zur Registrierung der Punkte zwischen den einzelnen Bildern. Zunächst werden die Bilder wieder einer Flat-Field-Korrektur unterzogen. Auch das Labeln nach Haralick [2] wird wie schon bei der Ellipsenerkennung durchgeführt. Die eigentliche Kreisberechnung folgt in drei Schritten:

Zunächst werden Pixel mit hohem Gradienten als primäre Pixel verwendet und sekundäre Pixel in einem definierten Abstand herum in einem Muster um das primäre Pixel gebildet. Der Mittelpunkt wird dann anschließend dort bestimmt, in dem sich die sekundären Pixel häufen. Die Radien um die Primärpixel sind in einem zuvor festgelegten Array hinterlegt. Die eigentlichen Radien der Punkte werden dann im Anschluss mit dem besten Ergebnis des Mittelpunktes zu den primären Pixeln mit dem höchsten Gradienten bestimmt. Bild 5 zeigt die gefundenen Punkte des Musters nach der Binärisierung des Bildes. Die durch den Druck teils sehr verzerrten Punkte werden dabei nicht alle erkannt.

Für die Registrierung werden die Koordinaten der gefundenen Mittelpunkte des Kalibrierbildes mit den Koordinaten der Kalibrierung aus der Überblickkamera verglichen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

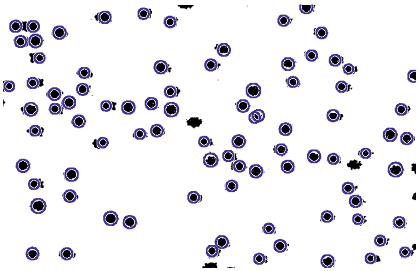


Bild 5: Durch die Hough-Transformation erkannten Punkte nach Durchführung der Methode zur Binärisierung nach Haralick [2]

Dabei wird der Punkt in der Mitte des aufgenommenen Bildes (Koordinaten mit dem geringsten Abstand zum Bildmittelpunkt) mit dem Teilausschnitt des Gesamtmusters verwendet und die 7 bzw. 15 nächstgelegenen Nachbarn je nach Sensor bestimmt. Zudem wird ein Ausschnitt aus dem Gesamtpunktemuster gebildet. Dazu werden einzeln alle Punkte des Punktemusters durchlaufen und jeweils die nächsten Nachbarn gesucht und gespeichert. Das aufgenommene Muster und die Teilausschnitte des Gesamtmusters werden im Anschluss mit dem Ansatz nach Myronenko [5] registriert. Die Registrierung vergleicht zwei Punktewolken miteinander und berechnet den RMSE. Der Ausgabewert dieser Funktion ist zudem eine Transformationsmatrix, die die Abweichung zwischen den gleichen Punkten zueinander angibt. Bei Punkten mit dem geringsten Restfehler wird davon ausgegangen, dass die Punkte richtig registriert sind. Dieses Vorgehen ist sehr rechenintensiv, da alle Punkte des Punktemusters als Mittelpunkt fungieren und registriert werden müssen. Allerdings kann dabei im Vergleich zum ersten Registrierungsansatz eine größere Anzahl an übereinstimmenden Punkten gefunden werden, wodurch eine robustere Kalibrierung möglich wird.
Im Vergleich der drei Methoden liefert wie beschrieben Variante 1 zu wenig übereinstimmende Punkte über den gesamten Bilderstapel, wodurch eine Kalibrierung nicht möglich ist. Variante 2 liefert ebenfalls kein Ergebnis, da wie beschrieben die Transformationsunterschiede der erkannten Features zu ähnlich sind. Variante 3 liefert als einzige Methode ein Kalibrierergebnis, ist jedoch mit einer durchschnittlichen Rechenzeit von ca. 30 Minuten sehr zeitaufwendig. Der Restfehler der Kalibrierung aus Variante 3 liegt bei 20,2 Pixel.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Bestimmung der Positioniergenauigkeit des Hexapod

In vorherigen Arbeiten [6] wurde bereits die Positioniergenauigkeit des verwendeten Hexapods mittels Zweistrahlinterferometer validiert. Man konnte dabei einen Anstieg der Abweichung mit zunehmendem Abstand zur Hexapod-Nullposition feststellen. Durch die Verwendung eines taktilen Koordinatenmessgerätes und von vier Rubinkugeln, welche auf dem Hexapod montiert sind, kann die Positioniergenauigkeit im dreidimensionalen Raum bestimmt werden. Dazu wird der Hexapod zunächst in den drei translatorischen Richtungen bewegt. Daraus lässt sich im Mittel eine Ausrichtung R_K im globalen Koordinatensystem bestimmen. Durch eine ausschließliche Rotation des Hexapods um die Mittelachse des Hexapods ist es zudem möglich, den Rotationsmittelpunkt zu bestimmen. Bei 4 Messungen für jede Drehbewegung kann dies über das deutlich überbestimmte Gleichungssystems gelöst werden:

$$P_i = (R_K \cdot R_x \cdot \mathrm{inv}(R_K) \cdot [R_K * T_i]) + T_{Hxp} \quad (3)$$

Die Variablen sind dabei P_i = Koordinaten der gemessenen Kugel im Weltkoordinatensystem, R_k = Rotationsmatrix des Hexapods, R_x = bekannte Drehung um x im lokalen Koordinatensystem des Hexapods, T_i = unbekannte Translation der Kugel *i* im lokalen Koordinatensystem des Hexapods und T_{hxp} = unbekannte Translation des Drehpunkts im Weltkoordinatensystem. Weitere untersuchte Ansätze nach Arun [7] und Eggert [8] zur Bestimmung der Transformation zwischen den gemessenen Punkten kommen durch die ausbleibende Unterscheidung zwischen mehreren Rotationsmöglichkeiten des Hexapods zu sehr ungenauen Ergebnissen und werden daher nicht weiterverfolgt. Bild 6 zeigt den Messaufbau mit den vier aufgeschraubten Rubinkugeln und dem UPMC-Koordinatenmessgerät.

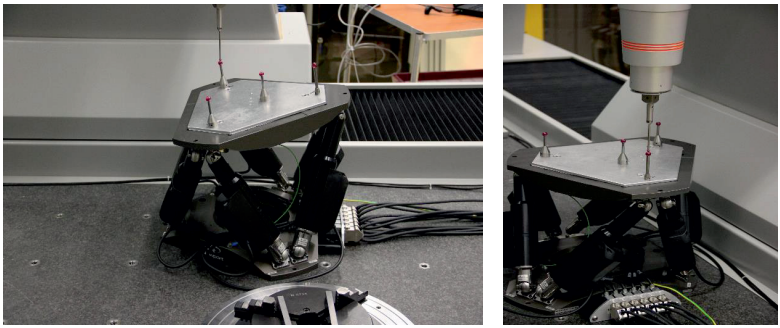
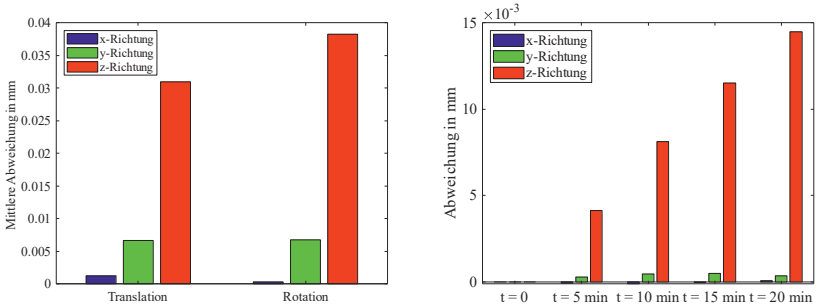


Bild 6: Hexapod auf dem taktilen Koordinatenmessgerät UPMC 1200 mit Referenzmarkerkugeln zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit.

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Das Koordinatenmessgerät UPMC hat eine Abweichungsgrenze E1 = 0,9 µm +L/500 µm/m, Abweichungsgrenze E3 = 1,5 µm + L/300 µm/m und eine maximal zulässige Antastabweichung nach ISO 10360-2 von 1,5 µm. Die Auflösung der linearen Messsysteme der Achsen beträgt 0,08 µm. Die Gleichung wird mittels drei Drehungen um x, y und z bestimmt.

Die Ergebnisse der absoluten Abweichung zwischen ausschließlicher Rotationsbewegung und Translationsbewegung sind in Bild 7 (a) dargestellt.



(a) (b)

Bild 7: Mittlere Abweichung des Mittelpunktes des Drehzentrums im Vergleich zu Messung 1 unterschieden nach Bewegung translatorisch und rotatorisch (a), Drehzentrumsverschiebung in den Raumrichtungen nach Einschalten des Hexapods (b)

In Bild 7 (b) ist die Drehzentrumsverschiebung des Hexapods nach dem Einschalten dargestellt. Durch die Erwärmung der Achsen nach dem Lösen der Feststellbremsen längen sich die Achsen mit zunehmender Zeit. Dadurch entstehen Abweichungen von 15 µm vor allem in z-Richtung, da die Achsen vornehmlich in dieser Richtung montiert sind.

Die Gesamtabweichungen mit der euklidischen Distanz und Bewegungspositionsabhängigkeit sind in Bild 8 dargestellt. Die Bewegungen 1-11 sind ausschließliche translatorische Bewegungen. Die Bewegungen ab Position 12 sind ausschließlich rotatorisch. Die Abweichungen zwischen den beiden Verfahrmodi (ausschließliche Rotation und ausschließliche Translation) sind durch die unterschiedlichen Verfahrgrenzen begründet. Durch die sehr kleinen Bewegungen in rein rotatorischer Richtung von maximal 15° um eine Achse und in Kombination von deutlich unter 10° können hier nur kleinere Abweichungen auftreten. Im Vergleich dazu sind Verfahrwege in rein translatorischer Richtung von bis zu 40 mm in ausschließlich einer Richtung möglich. Die Abweichungen sind dadurch umso größer.

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

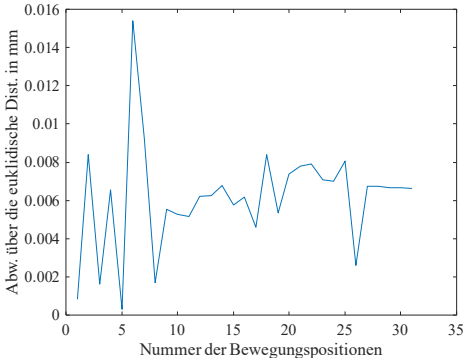


Bild 8: Mittlere Abweichung des Mittelpunktes des Drehzentrums im Vergleich zu Messung 1 unterschieden nach Bewegung in ausschließlich translatorischer (1-11) und rotatorischer (12 -32) Richtung

4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Ansatz vorgestellt, welcher eine Registrierung von Sensoren in einem einheitlichen Koordinatensystem zulässt. Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um Streifenlichtprojektionssensoren MikroCAD 1,0 und MikroCAD 0,3. Die integrierten Kameras lassen eine Kalibrierung und durch die extrinsisch berechneten Parameter eine Berechnung der Position des Sensors in einem einheitlichen Koordinatensystem zu. Das angepasste Punktemuster erlaubt zum einen eine Kalibrierung der Überblickkamera des Messaufbaus, zum anderen eine Kalibrierung des zufälligen Punktemusters. Durch das verwendete Punktemuster ist auch eine Registrierung mit sehr kleinen Messbereichen möglich. Die vorgestellten unterschiedlichen Varianten sind jedoch nicht alle geeignet, um eine sinnvolle Kalibrierung durchzuführen. Ausschließlich Variante 3 lässt eine Kalibrierung mit den verwendeten Punktemustern und Positionen innerhalb der Verfahrgrenzen des Hexapods zu.

Durch die Auswertung der Positioniergenauigkeit des Hexapods konnte herausgefunden werden, das vor allem eine Aufwärmphase des Hexapods notwendig ist und zudem eine positionsabhängige Abweichung auftritt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Literaturverzeichnis

[1] Zhang Z.: *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, 2000,

[2] Haralick R. M., Linda G. S.: *Computer and Robot Vision*. Addison-Wesley, Vol 1, 1992

[3] Zuliani M., Kenney C., Manjunath B. S.: *The multiRANSAC algorithm and its application to detect planar homographies.* IEEE International Conference on Image Processing III-153, 2005

[4] Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.: *SURF: Speeded Up Robust Features.* Computer Vision and Image Understanding (CVIU), Vol. 110, No. 3, pp., 2008

[5] Myronenko, A., Song X.: *Point Set Registration: Coherent Point Drift.* Proceedings of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI). Vol. 32, No. 12, 2010

[6] Metzner S., Knippen W., Hausotte T.: *Interferometrische Messung der Positioniergenauigkeit und Verkippung einer Hexapod-Positioniereinheit.* 23. Umformtechnisches Kolloquium Hannover In: Behrens B (Hrsg.): Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Umformtechnik, Hannover, 2020

[7] Arun K. S., Huang T. S., Blostein S. D.: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* PAMI-9, 1987.

[8] Eggert D. W., Lorusso A., Fisher R. B.: *Machine Vision and Applications*. 9, 1997

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Eignungsprüfung – wurde wirklich so kalibriert oder geprüft wie spezifiziert?

Beispiel: Prüfung von Elektrizitätszählern

Proficiency testing – was the calibration or the testing really carried out according to the specifications?

Example: Testing of electricity meters

Dr. **Christian Mester**, Dipl.-Ing. **Jonathan Braun**,
Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Bern-Wabern, Schweiz

Kurzfassung

Ein Vertrag über die Erbringung von Dienstleistungen wird nur dann zur Zufriedenheit beider Parteien ausgeführt werden können, wenn der Gegenstand hinreichend klar bestimmt ist – bei Kalibrierungen und Prüfungen ist ein Kalibrier- bzw. Prüfprogramm zu vereinbaren. Es ist allgemein üblich, bei Kalibrierungen und Prüfungen nur rückführbar und sinnvoll kalibrierte Referenzen zu verwenden, denn es ist offensichtlich, dass dies eine notwendige Bedingung für die metrologische Rückführbarkeit ist.

Wozu braucht es nun einen Beitrag zu diesen Selbstverständlichkeiten? All diese notwendigen Bedingungen reichen nicht aus, um die Rückführungskette bis zum Prüfling weiterzuführen. Es muss sichergestellt werden, dass Vorgaben – beispielsweise das Prüfprogramm – auch korrekt umgesetzt werden. Ein hierzu von der ISO/IEC 17025 vorgesehenes Verfahren ist die Eignungsprüfung, die in diesem Beitrag am praktischen Beispiel der Elektrizitätszählerprüfung vorgestellt wird.

Abstract

A contractually agreed service will only be provided to the satisfaction of both parties when the subject of the contract is sufficiently well defined. For calibrations and tests, a calibration or test programme must be agreed. Metrological traceability is an essential aspect of such services, so the reference standards must be calibrated traceably and meaningfully.

So why is an article about these obvious aspects of metrology necessary? All these conditions are necessary, but not sufficient to extend the traceability chain all the way to the DUT. The requirements – e.g., the test programme – must be implemented correctly. One

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tool to ensure this is proficiency testing as defined in ISO/IEC 17025. As an example, this article discusses proficiency testing for electricity meter verification labs.

1. Einleitung

Ein Vertrag über die Erbringung von Dienstleistungen wird nur dann zur Zufriedenheit beider Parteien ausgeführt werden können, wenn der Gegenstand hinreichend klar bestimmt ist. Dies ergibt sich aus entsprechenden Gesetzen [1], aber auch beispielsweise aus Abschnitt 7.1 ISO/IEC 17025:2017 [2]. Bei Kalibrierungen und Prüfungen ist daher ein Kalibrier- bzw. Prüfprogramm zu vereinbaren, entweder explizit oder durch Verweis beispielsweise auf Normen oder Vorschriften. Somit ist der vertragliche Rahmen definiert.

Die metrologische Rückführbarkeit ist eine Grundvoraussetzung für sinnvoll verwendbare Messergebnisse in der Industrie und der Wirtschaft sowie für die Gesellschaft [3, 4]. Daher ist es allgemein üblich, bei Kalibrierungen und Prüfungen nur Referenzen zu verwenden, die durch ein nationales Metrologieinstitut wie das METAS oder eine akkreditierte Kalibrierstelle kalibriert wurden (siehe auch Anhang A ISO/IEC 17025:2017 [2]). Naheliegend ist auch, dass die Referenzen an Punkten zu kalibrieren sind, die eine Aussage über ihre Eigenschaften an den Betriebspunkten, an denen sie als Referenz dienen, erlauben. Dies ist zwar scheinbar trivial, es sollte jedoch regelmäßig überprüft werden, ob diese Vorgabe im Einzelfall eingehalten wird. Häufig kann die Referenz nicht an allen in der Praxis verwendeten Punkten kalibriert werden, weil es derer unendlich viele gibt. Mit Wissen über das Funktionsprinzip der Referenz kann trotzdem ein aussagekräftiges Kalibrierprogramm mit einer endlichen Anzahl von Punkten definiert werden. Inwieweit sich dieses auf andere Gerätebauarten übertragen lässt, ist im Einzelfall zu prüfen [5, 6]. Somit ist die Rückführung bis einschließlich zur Referenz gewährleistet.

Ziel einer Kalibrierung ist jedoch, die Rückführungskette bis zum Prüfling zu verlängern. Analog soll eine Prüfung eine Konformitätsaussage auf Grundlage von rückführbaren Messungen treffen. Dieser letzte Schritt beinhaltet die praktische Durchführung, die Dienstleistung an sich. Zwar werden Arbeitsanleitungen und Dokumente zu Aufträgen, beispielsweise Protokolle, anlässlich von Audits geprüft. Dies ist aber nur dann relevant, wenn die Dokumente der Wirklichkeit entsprechen, also die Anleitungen befolgt werden, die Protokolle richtig und ausreichend vollständig sind. Zwar gibt es Fälle vorsätzlicher Manipulation von Kalibrierungen und Prüfungen, was als schwerwiegender Verstoß gegen die Treuepflicht des Arbeitnehmers eine fristlose Entlassung rechtfertigen kann [7]. Wesentlich häufiger dürften aber versehentliche Abweichungen sein. Beispielsweise kann es genaue Vorgaben zur Aufwärm- oder Stabilisierungszeiten [8] oder zur Reihenfolge der

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Kalibrierpunkte geben. Diese sind aus den Protokollen nicht zwangsläufig ersichtlich, ein Audit ist also diesbezüglich nicht aussagekräftig. Bei automatisierten Messungen kann es legitim sein, beim Debugging Aufwärm- und Stabilisierungszeiten zu verkürzen oder gar zu überspringen. Insbesondere, wenn die Programmierung von einer Person und die Messung von einer anderen durchgeführt wird, kann es leicht vorkommen, dass diese Maßnahme nach dem Debugging nicht wieder zurückgenommen wird und dies nicht bemerkt wird. Der Programmierer ist bei der Messung nicht anwesend. Der, der die Messung durchführt, vermutet in der Regel nicht, dass derartige Verkürzungen implementiert wurden und hat daher keinen Anlass, zu überprüfen, ob sie wieder entfernt wurden. Aus Sicherheitsgründen ist es bei Hochspannungskalibrierungen sinnvoll, die höchste Spannung manuell einzustellen, um frühzeitig erkennen zu können, ob ein Prüfling einen Isolationsdefekt aufweist. Eine anschließende Verringerung der Spannung hingegen ist unproblematisch und kann gefahrlos automatisiert werden. Es kann aber vorkommen, dass bei der Offertstellung eine andere Reihenfolge gewählt wird, beim ersten Mal explizit, bei allen weiteren Kalibrierungen implizit durch Verweis auf das jeweils vorherige Mal. Zwischen Offertstellung und Kalibrierung können einige Wochen vergehen. Auch wird die Offerte nicht zwingend von der Person gestellt, die die Messungen durchführt. Somit kann die nötige Information leicht unbemerkt verloren gehen.

2. Eignungsprüfung

Die ISO/IEC 17025 definiert die Eignungsprüfung als Bewertung der Leistung eines Teilnehmers nach zuvor aufgestellten Kriterien durch Vergleiche zwischen Laboratorien. Sie dient der «Sicherung der Validität von Ergebnissen» (Abschnitt 7.7 ISO/IEC 17025:2017 [2]). Zweckmäßig ist es, spezielle Prüflinge kalibrieren oder prüfen zu lassen, die die an ihnen durchgeführten Arbeiten automatisch aufzeichnen und sich ansonsten wie ein gewöhnlicher Prüfling verhalten. Besonders komfortabel ist es, wenn die Prüflinge handelsübliche Geräte sind, die so um die für Eignungsprüfung notwendige Funktionalität erweitert sind, dass dies die Handhabung nicht beeinflusst. Das Eidgenössische Institut für Metrologie METAS verfügt über Elektrizitätszähler, die sich von handelsüblichen Zählern dadurch unterscheiden, dass vom Hersteller besonders stabile Referenzen verwendet wurden, die Justierung vorsätzlich vom METAS verstellt werden kann und das METAS sie um einen Logger erweitert hat. Da der Logger sich innerhalb des Zählergehäuses befindet, unterscheiden sich diese Elektrizitätszähler von handelsüblichen Elektrizitätszählern bezüglich der Handhabung und der äußeren Erscheinung nicht.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bild 1: Elektrizitätszähler als Prüfling für Eignungsprüfungen.

Das METAS ist im Bereich des gesetzlichen Messwesens für die Eichung und die statistische Prüfung von Elektrizitätszählern zuständig. Es kann die Arbeiten an Eichstellen delegieren und ist dann als Aufsichtsbehörde für die Überwachung der Eichstellen verantwortlich [9]. In dieser Funktion erlässt es Weisungen [8], in denen für Eichstellen verbindlich festgelegt wird, wie Eichungen durchzuführen sind. Auch im privatrechtlichen Bereich muss die nötige metrologische Infrastruktur und Kompetenz bereitgestellt und vermittelt werden [10]. Die Eignungsprüfung erlaubt es, vertrauenswürdig, leicht und für alle beteiligten Parteien bequem die automatisierten Prozeduren zu überprüfen. Ein Zusatzvorteil ist, dass die Zähler dank ihrer außergewöhnlichen Stabilität auch geeignet sind, um bei

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Umzügen oder Anpassungen der Zählerprüfeinrichtung zu überprüfen, ob die messtechnischen Eigenschaften beeinflusst wurden. Mit diesen Prüflingen können auch für privatrechtliche Kunden, beispielsweise akkreditierte Prüfstellen oder Hersteller, Eignungsprüfungen durchgeführt werden, damit diese ihrer Verpflichtung genügen können, «[ihre] Leistung durch Vergleich mit den Ergebnissen anderer Laboratorien [zu] überwachen» (Abschnitt 7.7.2 ISO/IEC 17025:2017 [2]). Dies scheiterte bisher oft mangels geeigneter Prüflinge. Analog gibt es entsprechende Prüflinge auch im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) als Eigenentwicklung [11 bis 14]. Grundsätzlich lässt sich die Methode auf beliebige Messmittelarten anwenden, um Gewissheit über die richtige Implementierung der Abläufe zu erlangen.

3. Prüfung von Elektrizitätszählern

Bei der Prüfung von Wechselstrom-Elektrizitätszählern sind vier elektrische Eingangsgrößen – Strom, Spannung, Phasenverschiebungswinkel und Frequenz – von der Quelle vorzugeben. Daher muss der Prüfling für die Eignungsprüfung diese Parameter protokollieren. Relevant sind ferner die Aufwärmzeit sowie die Stabilisierungszeit zwischen dem Anfahren eines neuen Prüfpunktes und der ersten Messung an diesem Punkt. Durch letztere soll auch eine Abhängigkeit von der Reihenfolge der Prüfpunkte verhindert werden. Daher muss der Prüfling die Messwerte mit Zeitstempeln versehen, was sehr leicht umzusetzen ist. Die Umgebungstemperatur wird in der Regel – bei Eichstellen immer – durch Temperaturlogger protokolliert und anlässlich von Audits kontrolliert; sie braucht also nicht Gegenstand der Eignungsprüfung zu sein.

Um auch die übrigen Arbeiten der Kalibrierung oder Prüfung zu überwachen, sollte sich der Prüfling für die Eignungsprüfung wie ein üblicher Prüfling verhalten. Für Elektrizitätszähler bedeutet dies, dass er über einen Pulsausgang verfügen sollte. In der Regel ist dies eine Leuchtdiode, deren Blinken der Rotation der Läuferscheibe der traditionellen Ferraris-Elektrizitätszählern entspricht. Darüber hinaus sind moderne Elektrizitätszähler in der Regel mit mindestens einer, in manchen Fällen mindestens zwei Datenschnittstellen ausgestattet [15]. Wenn diese ebenfalls Gegenstand der Kalibrierung oder Prüfung sind, so sollte der Prüfling ebenfalls über diese Schnittstellen verfügen. Diese Bedingungen sind automatisch erfüllt, wenn der Prüfling – wie hier – ein handelsüblicher Zähler derselben Art ist, der um einen Logger erweitert ist.

Für Nacheichungen und Prüfungen im statistischen Prüfverfahren ist das Prüfprogramm verbindlich vorgeschrieben [8]. Gegenüber dem Programm für eine Bauartprüfung beispielsweise nach EN 50470-3 [16] ist dieses stark vereinfacht. Hintergrund ist, dass die

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Prüflinge zur Zeitpunkt ihres Inverkehrbringens bereits durch eine Konformitätsbewertung erfasst sind. Somit ist die Frage nicht, ob sie *gut* sind, sondern ob sie *immer noch gut* sind. Es reicht daher aus, wenige, kritische Punkte zu prüfen, an denen sich eine Alterung besonders auswirkt. Es ist nicht das Ziel, die Qualität der Messung zu quantifizieren. Es werden weder Messabweichungen in Eichzertifikaten angegeben, noch wird zwischen *außergewöhnlich schlecht*, *ein bisschen schlecht* und *sehr gut* unterschieden – das Ergebnis ist die amtliche Bestätigung, dass die gesetzlichen Vorschriften entweder erfüllt oder nicht erfüllt sind [17]. Falls die Vorschriften nicht erfüllt sind, so ist es in diesem Zusammenhang nicht relevant und für die beteiligten Parteien auch nicht interessant, welches Phänomen genau hierfür verantwortlich ist und wie das Problem behoben werden könnte. Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied zu privatrechtlichen Bauartprüfungen beispielsweise in Hinblick auf eine Konformitätsbewertung bezüglich der Messmittelrichtlinie MID [18], die von einem Hersteller in Auftrag gegeben wird, der sein Produkt bei allfälligen Problemen verbessern wird.

Bei Nacheichungen und Prüfungen im statistischen Prüfverfahren werden bei reinen MID-Wirkenergiezählern folgende messtechnisch Punkte geprüft. Formale Punkte wie das Vorliegen einer Konformitätserklärung sind zwar auch Gegenstand der Nacheichung und der Prüfung im statistischen Prüfverfahren, aber nicht Gegenstand dieser Veröffentlichung.

1. Genauigkeitsprüfung der Energiemessung
2. Anlauf- und Leerlaufprüfung
3. Registerprüfung

Bei der Genauigkeitsprüfung der Energiemessung wird geprüft, ob die Eichfehlergrenzen eingehalten werden, der Zähler also unter Berücksichtigung seiner Genauigkeitsklasse richtig misst. Bei einem statischen Zweirichtungs-Drehstromzähler werden hier 11 Punkte mit unterschiedlichen Stromstärken und Leistungsfaktoren geprüft, während Nennspannung und Nennfrequenz anliegen. Bei Gleichstrom-Wirkenergiezählern wird nur mit Leistungsfaktor $\lambda = 1$ geprüft; bei einphasigen Zählern entfallen 6 der 11 Punkte. Diese Genauigkeitsprüfung muss zwingend am betriebswarmen Zähler durchgeführt werden. Nach dem Anfahren jedes Punktes muss eine Stabilisierungszeit abgewartet werden. Anschließend muss je Ablesung eine ausreichende Anzahl von Impulsen gesammelt werden, bevor Mittelwert und Standardabweichung über mindestens drei Ablesungen bestimmt werden.

Bei der Leerlaufprüfung wird geprüft, ob der Zähler bei offenem Strompfad nicht zählt. Dieser Fall kann in der Praxis längere Zeit vorkommen, beispielsweise in einer leerstehenden Wohnung. Da bei dieser Prüfung eine genaue Messung nicht erforderlich ist, darf sie auch am nicht vollständig betriebswarmen Zähler durchgeführt werden. Während einer von den

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Kenndaten des Prüflings abhängigen Dauer darf höchsten ein Impuls am Impulsausgang abgegeben werden.

Bei der Anlaufprüfung wird geprüft, ob der Zähler vorschriftsgemäß beginnt, eine Energie zu messen, wenn im Strompfad der Anlaufstrom fließt. Zwischen Leerlauf und Anlauf wird in der Regel softwaremäßig umgeschaltet abhängig davon, ob der Strom im Strompfad einen Schwellwert überschreitet oder nicht. Durch die Anlauf- und die Leerprüfung wird insbesondere geprüft, ob dieser Schwellwert innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen liegt. Auch bei der Anlaufprüfung ist daher keine genaue Messung erforderlich; auch sie darf am nicht vollständig betriebswarmen Zähler durchgeführt werden.

Aus praktischen Gründen wird bei den vorgenannten Prüfungen der Impulsausgang verwendet, nicht das Register, da die Auflösung des Impulsausgangs in der Regel feiner ist als die des Registers und daher schnellere Messungen erlaubt. Die Rechnungstellung erfolgt jedoch auf Grundlage des Registers, nicht des Impulsausgangs. Ziel der Registerprüfung ist es daher, sicherzustellen, dass die Messungen unter Verwendung des Impulsausgangs eine Aussage über das Register erlauben. Der Unterschied zwischen der Messabweichung, die über den Impulsausgang bestimmt wurde, und der Messabweichung, die über die Registerwerte bestimmt wurde, wird an einem Punkt bestimmt. Er darf ein Zehntel der Klassengenauigkeit nicht überschreiten. Da es auf den absoluten Wert der Messabweichung hier nicht ankommt – dieser wird bei der Richtigkeitsprüfung der Energiemessung geprüft – darf auch diese Prüfung am nicht vollständig betriebswarmen Zähler durchgeführt werden.

Aus dem Prüfprotokoll ist ersichtlich, welche Punkte genau konfiguriert wurden und in der Regel auch, in welcher Reihenfolge sie angefahren wurden. Meist enthält das Prüfprotokoll die konfigurierten Sollwerte, jedoch keine Messwerte von Strom, Spannung, Leistungsfaktor und Frequenz. Sollte also beispielsweise die Spannung eines Außenleiters weder an die Referenz noch an die Prüflinge angeschlossen worden sein, fiele das nicht auf, denn die von Referenz und Prüflingen zu messende Energie wäre gleich. Nur durch die Eignungsprüfung wird ersichtlich, ob die Verweilzeiten bei den verschiedenen Punkten zu den Vorgaben passen und ob die Aufwärmzeit eingehalten wurde. Bild 2 zeigt beispielhaft einen protokollierten Verlauf einer Messgröße. Deutlich zu erkennen ist das Anfahren des Prüfpunktes, das Verweilen während der Stabilisierungszeit und der Messung und das Anfahren des nächsten Prüfpunktes. Im Beispiel wird die Messgröße während 56 s gehalten, wobei währenddessen die Abweichung zwischen Maximum und Minimum 0.24 % beträgt.

Darüber hinaus können die bei der Eignungsprüfung gewonnenen Informationen nicht nur genutzt werden, um Fehler im Prüfprogramm aufzuzeigen, sondern auch, um Potential für Effizienzsteigerungen zu identifizieren. Es ist beispielsweise zulässig, aber nicht effizient, die

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Anwärmzeit abzuwarten, dann die Genauigkeitsprüfung für die Energiemessung und anschließend die übrigen Prüfungen durchzuführen, denn letztere dürfen auch vor Ende der Anwärmzeit durchgeführt werden. Während Fehler, die sich auf das Messergebnis auswirken, bei Vergleichsmessungen auffallen, bleiben Optimierungsmöglichkeiten ohne Eignungsprüfung unbemerkt.

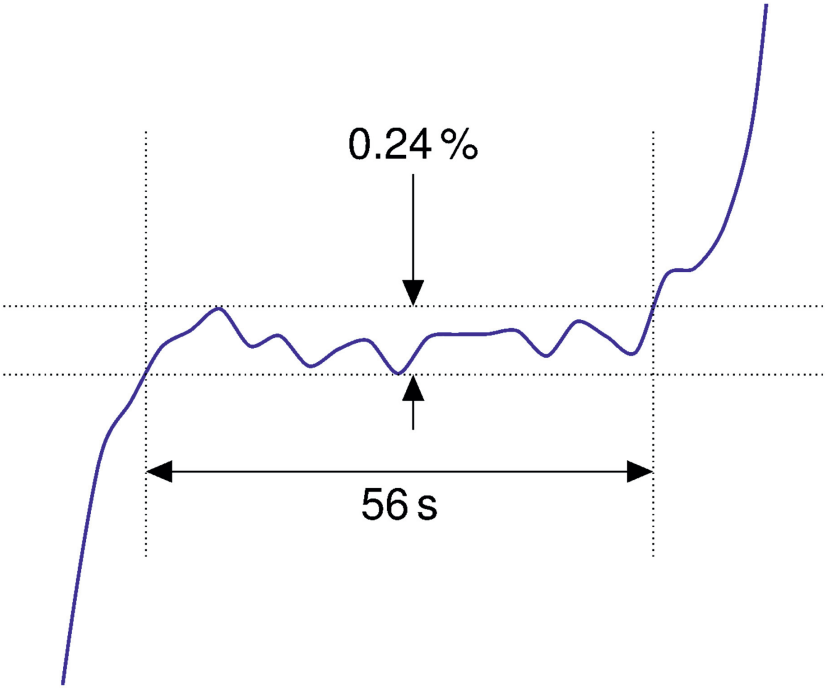


Bild 2: Änderung einer Messgröße: Anfahren eines Prüfpunktes, Halten des Prüfpunktes, Anfahren des nächsten Prüfpunktes. Hier wird innerhalb des Prüfpunktes die Messgröße während 56 s innerhalb von 0.24 % gehalten.

Dank der hohen Stabilität der Prüflinge für die Eignungsprüfung können sie gleichzeitig auch benutzt werden, um Vergleichsmessungen durchzuführen. Die ist insbesondere dann nützlich, wenn an einer Zählerprüfeinrichtung Veränderungen vorgenommen werden, beispielsweise bei Umzügen oder der Ergänzung von Trennwandlern im Strompfad. Der

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Einfluss derartiger Veränderungen wird durch die übliche Kalibrierung der Referenz nicht erfasst.

4. Zusammenfassung

Am Beispiel der Elektrizitätszählerprüfung wurde gezeigt, dass die Eignungsprüfung wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung der Prüf- und Kalibrierabläufe und zur Sicherstellung der korrekten Umsetzung von Vorgaben liefert. Hierbei ist es zweckmäßig, handelsübliche Prüflinge zu verwenden, die ohne Anpassung der Abläufe und der Ausrüstung geprüft oder kalibriert werden können. Dies ist wichtig, weil der Gegenstand der Eignungsprüfung nicht der einzelne Elektrizitätszähler ist, sondern diese Abläufe, selbst wenn der Elektrizitätszähler oft gewohnheitsmäßig trotzdem Prüfling genannt wird.

Die praktische Durchführung der durch die ISO/IEC 17025:2017 nahegelegten Eignungsprüfung scheitert in der Praxis häufig an der Verfügbarkeit geeigneter Prüflinge. Das METAS verwendet hierzu angepasste Prüflinge, die bezüglich der Handhabung handelsüblichen Elektrizitätszählern gleichen, aber um ins Gehäuse integrierte Logger ergänzt sind und mit besonders stabilen internen Referenzen ausgestattet sind.

5. Literatur

[1] Bundesgesetz betreffend die Ergänzung des Schweizerischen Zivilgesetzbuches (Fünfter Teil: Obligationenrecht) vom 30. März 1911 (OR; SR 220)

[2] ISO/IEC 17025:2017: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

[3] Mester, C.: The role of national metrology institutes, the international system of units and the concept of traceability, First International Colloquium on Smart Grid Metrology (SmaGriMet), Split, 2018

[4] Sené, M., Gilmore, I. und Janssen, J.-T.: Metrology is key to reproducing results. Nature 2017, 547, S. 397–399

[5] Mester, C.: Technologiegerechtes Kalibrierprogramm für moderne Messgeräte: Neue Möglichkeiten durch Kalibrierung tatsächlich nutzbar machen, VDI Berichte 2365, 2019, S. 75–86

[6] Mester, C.: Optimised calibration programmes for comparators for instrument transformers, Technisches Messen, Technisches Messen, 2021, 88(2), S. 122–131

[7] Urteil des Bundesverwaltungsgerichts BVGer A-3509/2020 vom 19. August 2021

[8] Weisungen zu der Verordnung des EJPD über Messmittel für elektrische Energie und Leistung (EMmV) vom 12. Dezember 2016

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[9] Verordnung über die Zuständigkeiten im Messwesen vom 7. Dezember 2012 (ZMessV; SR 941.206)

[10] Bundesgesetz über das Eidgenössische Institut für Metrologie vom 17. Juni 2011 (EIMG; SR 941.27)

[11] Tas, E. und Pythoud, F.: Design, Implementation, and Evaluation of Proficiency Testing in EMC Conducted Immunity, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 59, Nr. 5, S. 1433–1440, 2017

[12] Tas, E. und Pythoud, F.: Proficiency Testing in EMC Radiated Immunity, IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility, Vol. 60, Nr. 5, S. 1249–1253, 2018

[13] Tas, E. und F. Pythoud, F.: Design, Implementation, and Evaluation of Proficiency Testing in EMC Surge Immunity, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 62, Nr. 6, S. 2368–2375, 2020

[14] Tas, E. und F. Pythoud, F.: Proficiency testing – La démonstration par les faits!, METinfo, Vol. 24, S. 9–12, 1/2017

[15] Verordnung des EJPD über Messmittel für elektrische Energie und Leistung vom 26. August 2015 (EMmV; SR 941.251)

[16] EN 50470-3:2006: Electricity metering equipment (a.c.) – Particular requirements. Static meters for active energy (class indexes A, B and C)

[17] Messmittelverordnung vom 15. Februar 2006 (MessMV; SR 941.210)

[18] Richtlinie 2014/32/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt (Neufassung)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Messunsicherheiten von modalen Streuparametern

Measurement Uncertainties for Mixed-Mode Scattering Parameters

Dr.-Ing. **K. Kuhlmann**, Dr.-Ing. **F. Gellersen**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig;
Dipl.-Ing. R. **Pöhmerer**, LEONI Kabel GmbH, Roth

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird der mathematische Zusammenhang zwischen nodalen (*single-ended*) und modalen (*mixed-mode*) Streuparametern beschrieben und eine vollständige Messunsicherheitsanalyse für die Messung modaler Streuparameter von einer verdrillten Doppelader (*twisted-pair cable*) vorgestellt. Theoretisch abgeleitete Ergebnisse sowie Messungen werden berichtet und verglichen, und es wird ein neuer Weg zur Behandlung von Drift und Wiederholbarkeit in Messsystemen für modale Streuparameter vorgeschlagen. Letzteres führt zu realistischeren und oft kleineren Messunsicherheiten.

Abstract (optional)

In this paper, the mathematical relation between single-ended and mixed-mode scattering parameters is briefly described, and a complete measurement uncertainty analysis for the measurement of mixed-mode scattering parameter of twisted pair cables is presented. Theoretically derived results, as well as measurements are reported and compared, and a new way to treat drift and repeatability in measurement systems for so called mixed-mode scattering parameters is proposed. The latter resulting in more realistic and often smaller measurement uncertainties.

1. Einleitung

Differentielle Signalübertragung (eng. *differential signaling*) ist eine etablierte Methode [1] für die elektrische Übertragung von Informationen unter Verwendung von zwei komplementären Signalen. Es ist im Vergleich zur massebezogenen Signalübertragung (engl. *single-ended signaling*) weniger anfällig für externe elektromagnetische Interferenz. Dieser Vorteil ist besonders wichtig, wenn kostengünstige Übertragungsleitungen wie beispielsweise verdrillte Leitungen oder parallele Leitungen auf PCBs (Leiterplatten), beides oft ohne Abschirmung, verwendet werden. Heute wird differentielle Signalübertragung häufig in digitalen

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Computerbussen wie beispielsweise Serial ATA, PCI Express, Ethernet oder DDR SDRAM eingesetzt.

Bei HF-Messungen (Hochfrequenzmessungen) von modalen S-Parametern (Streuparametern) wurde der Begriff *Mixed-Mode* eingeführt [2]. Er beschreibt die Reaktion eines Netzwerks auf Gleich- und Gegentaktanregung. Die mathematische Beziehung zwischen SE (*single-ended*) und MM (*Mixed-Mode*) S-Parameters wurde weiterentwickelt in [3, 4, 5, 6] und wird mittlerweile für viele Messungen mit VNAs (Vektoriellen Netzwerkanalysatoren) eingesetzt. Typische Messobjekte sind beispielsweise Kabel, Operationsverstärker, Transformatoren oder Baluns.

Im letzten Jahrzehnt konnte beobachtet werden, dass die Qualitätsanforderungen im Hinblick auf die Überwachung von Messungen und Rückverfolgbarkeit zugenommen haben. Dies führt zu einem höheren Bedarf der Industrie an Dienstleistungen von ISO/IEC 17025 akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien und damit auch von NMIs (nationalen Metrologieinstituten). Für den Automobilbereich zeigte sich dies besonders nach der Überarbeitung von [7]. Seit 2016 ist der Bedarf an rückgeführten Kalibrierungen vieler Messgrößen stark gestiegen, auch im HF-Bereich. Diese Arbeit zeigt die rückgeführte Kalibrierung eines VNA-Messplatzes zur Messung von MM-S-Parametern von verdrillten Aderpaaren (engl. *twisted pair cables*).

In Abschnitt 2 dieser Arbeit werden die grundlegenden mathematischen Beziehungen zwischen SE- und MM-S-Parametern gezeigt. In Abschnitt 3 werden die MM-S-Parameter-Messungen und eine vollständige Unsicherheitsanalyse vorgestellt, sowie neue Ansätze, um Messwiederholbarkeit (engl. *repeatability*) und thermische Drift zu berücksichtigen.

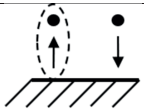
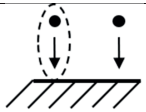
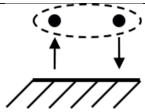
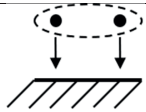
2. Mixed-Mode S-Parameter

Die hier verwendete Impedanzdefinition der MM-S-Parameter ist in

Tabelle 1 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 1: Impedanzdefinitionen für die MM-S-Parameter.

Impedanz	Gegentakt der Einzelleiter (engl. *Odd*)	Gleichtakt der Einzelleiter (engl. *even*)	Gegentakt im Leiterpaar (engl. *differential*)	Gleichtakt im Leiterpaar (engl. *common*)
Definition	$Z_{oo}=k_{oo}Z_0=Z_d/2$	$Z_{oe}=k_{oe}Z_0=2Z_c$	$Z_d=2Z_{oo}$	$Z_c=Z_{oe}/2$
Üblicher Wert (Z_0 = 50 Ω und k_{oo} = k_{oe} = 1)	50 Ω	50 Ω	100 Ω	25 Ω
Erklärung	Impedanz einer Leitung gegen Masse		Impedanz zwischen Leitungen	
El. Felder (vereinfacht)				

Es ist zu unterscheiden, ob man die Impedanz gegen Masse oder gegen eine andere Leitung betrachtet, und ob sich die beiden Leitungen im Gleich- oder Gegentaktbetrieb befinden. Die Konstanten k_{oe} und k_{oo} hängen von der tatsächlichen Signalverkopplung ab. Es gilt $Z_c \neq Z_d$.

Wenn die VNA-Tore 1 und 2 zu einem logischen Tor kombiniert werden und die VNA-Tore 3 und 4 zu einem anderen, ergeben sich für die Umrechnung zwischen SE-S-Parametern und MM-S-Parametern die folgenden Gleichungen:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} b_{d1} \\ b_{d2} \\ b_{c1} \\ b_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} & S_{dc11} & S_{dc12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} & S_{dc21} & S_{dc22} \\ S_{cd11} & S_{cd12} & S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cd21} & S_{cd22} & S_{cc21} & S_{cc22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix} = S^{mm} \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$S^{mm} = (M_1 S + M_2)(M_1 + M_2 S)^{-1}, \tag{3}$$

$$S^{mm}(M_1 + M_2 S) - M_1 S - M_2 = 0, \tag{4}$$

$$S^{mm} M_2 S - M_1 S = M_2 - S^{mm} M_1, \tag{5}$$

$$S = (S^{mm} M_2 - M_1)^{-1}(M_2 - S^{mm} M_1), \tag{6}$$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$M_1 = \begin{bmatrix} \frac{1+k_{oo}}{2\sqrt{2k_{oo}}} & -\frac{1+k_{oo}}{2\sqrt{2k_{oo}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+k_{oo}}{2\sqrt{2k_{oo}}} & -\frac{1+k_{oo}}{2\sqrt{2k_{oo}}} \\ \frac{1+k_{oe}}{2\sqrt{2k_{oe}}} & \frac{1+k_{oe}}{2\sqrt{2k_{oe}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+k_{oe}}{2\sqrt{2k_{oe}}} & \frac{1+k_{oe}}{2\sqrt{2k_{oe}}} \end{bmatrix}, \tag{7}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \frac{1-k_{oo}}{2\sqrt{2k_{oo}}} & -\frac{1-k_{oo}}{2\sqrt{2k_{oo}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-k_{oo}}{2\sqrt{2k_{oo}}} & -\frac{1-k_{oo}}{2\sqrt{2k_{oo}}} \\ \frac{1-k_{oe}}{2\sqrt{2k_{oe}}} & \frac{1-k_{oe}}{2\sqrt{2k_{oe}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-k_{oe}}{2\sqrt{2k_{oe}}} & \frac{1-k_{oe}}{2\sqrt{2k_{oe}}} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Die Indizes *d* und *c* stehen für die Gegentakt und Gleichtaktanteile. Mit der üblichen Annahme (keine Verkopplung)

$$k_{oo} = k_{oe} = 1 \tag{9}$$

folgt

$$Z_{oo} = Z_{oe} = Z_0, \tag{10}$$

$$Z_d = 2Z_{oo} = 2Z_0, \tag{11}$$

$$Z_c = \frac{Z_{oe}}{2} = \frac{Z_0}{2}, \tag{12}$$

und man erhält die gebräuchlichen vereinfachten Gleichungen:

$$S^{mm} = M_1 S M_1^{-1}, \tag{13}$$

$$S = M_1^{-1} S^{mm} M_1, \tag{14}$$

$$M_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \tag{15}$$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Messergebnisse

Der Messaufbau ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

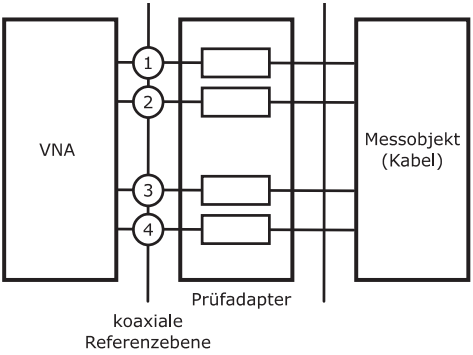


Bild 1: Schematischer Messaufbau.

Das Messobjekt ist in diesem Fall eine verdrillte zweiadrige Leitung. Der allgemeine Umgang mit Messunsicherheit ist in [10] beschrieben, Ergänzungen und Besonderheiten für VNA-Messungen finden sich in [11]. Für die rigorose Fehlerfortpflanzung wird [12] verwendet. Bild 2 zeigt das Vorgehen bei der Messung und der Unsicherheitsbestimmung.

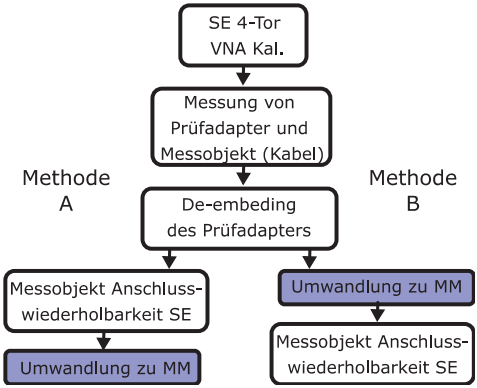


Bild 2: Vorgehen bei der Messung und der Unsicherheitsbestimmung.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Im ersten Schritt wird der 4-Tor VNA mit koaxialen Anschlüssen vom Typ 3,5 mm für die koaxialen Messebenen für SE-Messungen kalibriert, und die Messunsicherheit wird gemäß [10] bestimmt. Dies geschieht mit der METAS-Software VNA Tools II, die Dokumentation findet sich hier [13].

Im zweiten Schritt wird das Messobjekt in Serie mit einem Prüfadapter (engl. *test fixture*) gemessen, siehe Bild 1. In industriellen Anwendungen werden für gewöhnlich verschiedene Prüfadapter mit beispielsweise Löt- oder Klemmmechanismen angewendet. In der Regel optimiert ein Hersteller oder ein Messlabor diesen Prüfadapter für jede Anwendung. Er sollte ermöglichen, eine elektrisch kurze und mechanisch stabile Verbindung zwischen den koaxialen Referenzebenen und dem Messobjekt mit minimalem Einfluss auf das HF-Testergebnis herzustellen. Die Charakterisierung des verwendeten Prüfadapters erfolgte in dieser Arbeit mit der Software CST Microwave Studio [14]. Er wird als 8-Tor modelliert und charakterisiert und dann in Reihe mit dem eigentlichen 4-Tor-Messobjekt gemessen. Die Charakterisierung basiert auf bereitgestellten geometrischen Angaben und Materialeigenschaften vom Hersteller (LEONI), Datenblattwerte für kommerziell erhältliche Teile (beispielsweise Koaxialadapter), sowie bestimmte Grenzen der numerischen Simulation. Die Verarbeitung der Ergebnisse und Berechnung der weiteren Messunsicherheitsbeiträge wird mit MATLAB und [12] durchgeführt.

Im nächsten Schritt wird der Prüfadapter mathematisch eliminiert (engl. *de-embedding*), so dass nur das SE-Ergebnis des Messobjekts übrigbleibt. Für die letzten beiden Schritte werden zwei Varianten verglichen. Für Methode A wird die Anschlusswiederholbarkeit des Messobjekts anhand der SE-Messungen ermittelt, und die Messunsicherheit wird zu den SE-Messungen hinzugefügt, bevor die Transformation zu MM durchführt wird. Bei Methode B werden die SE-Messungen zunächst zu MM transformiert. Die Anschlusswiederholbarkeit des Messobjekts wird für MM ausgewertet und die sich ergebende Messunsicherheit anschließend zu den MM-Ergebnissen hinzugefügt.

Die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge für SE-VNA-Messungen in der koaxialen Messebene sind:

- VNA-Rauschen
- VNA-Drift
- VNA-Linearität
- Anschlusswiederholbarkeit der standardisierten Anschlüsse
- Kalibriernormale
- Bewegungen der Messkabel

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Für eine Messobjekt kommen folgende Beiträge hinzu:

- Prüfadapter
- Anschlusswiederholbarkeit des Messobjekts (am Prüfadapter)

Der Prüfadapter erzeugt eine zusätzliche Messunsicherheit. Er wird aber, wie bereits angesprochen, für diese Art von Messungen immer benötigt. Die Anschlusswiederholbarkeit des Messobjekts spiegelt wider, wie zuverlässig die Verbindung von Prüfadapter und Messobjekt ist.

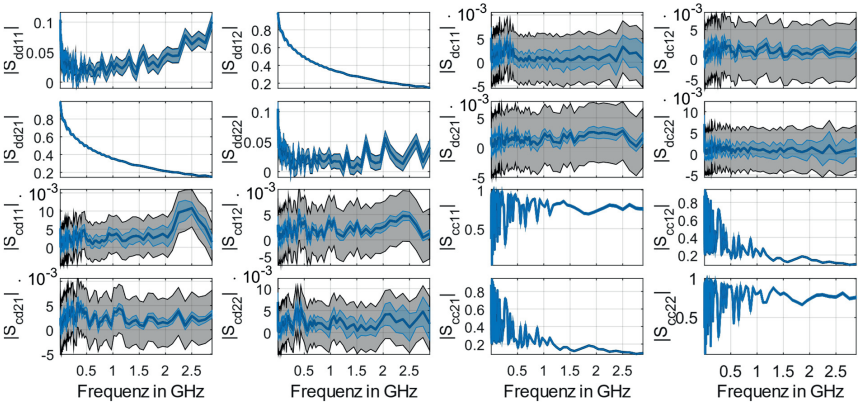


Bild 3: Messwerte und Unsicherheiten (transparente Bereiche) für die MM-S-Parameter für beide Methoden.

Beispielhaft werden Messwerte und Unsicherheiten (transparente Bereiche) für die MM-S-Parameter für beide Methoden in Abbildung 3 gezeigt. Methode B führt zu geringeren Messunsicherheiten. Dies resultiert mit großer Sicherheit aus den inhärenten Vorteilen von MM-Messungen im Vergleich zu SE-Messungen: identische Einflüsse löschen sich für differentielle Signale aus (Idealfall). Allgemein gilt, die Wiederholbarkeit von Experimenten sollte immer für die eigentliche Messgröße (hier MM-S-Parameter) ermittelt werden, nicht für Zwischengrößen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 2: Messunsicherheitsbilanz ist bei der Frequenz von 1 GHz.

Messunsicherheitsbeiträge bei 1 GHz	$\|S_{dd12}\|$ Methode A	$\|S_{dd12}\|$ Methode B	$\|S_{dc12}\|$ Methode A	$\|S_{dc12}\|$ Methode B
Prüfadapter	0,0019	0,0019	8,8e-6	8,8e-6
Bewegungen der Messkabel	0,0004	0,0004	0,0008	0,0008
Kalibriernormale	0,003	0,003	1,6e-5	1,6e-5
Anschlusswiederholbarkeit der std. Anschlüsse	1,8e-5	1,8e-5	3,8e-5	3,8e-5
Anschlusswiederholbarkeit des Messobjekts	0,005	0,0006	0,005	5,2e-5
VNA-Drift	6,9e-5	6,9e-5	6,8e-5	6,8e-5
VNA-Linearität	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
VNA-Rauschen	1,5e-5	1,5e-5	1,2e-5	1,2e-5
Summe der Messunsicherheiten	0,0062	0,0036	0,0051	0,0009

Eine vollständige Messunsicherheitsbilanz ist bei der Frequenz von 1 GHz in Tabelle 1 angegeben.

Die Messunsicherheitsbilanz variiert etwas über der Frequenz, aber die Hauptbeiträge für die Modenumwandlungsterme (beispielsweise S_{dc11}, S_{dc12}, S_{cd11}, S_{cd12}) sind immer die Bewegungen der Messkabel, die VNA-Linearität und die VNA-Drift. Für die modenerhaltenen Terme (beispielsweise S_{dd11}, S_{dd12}, S_{cc22}, S_{cc12}) tragen die Kalibriernormale, der Prüfadapter und die Anschlusswiederholbarkeit der Messobjekts hauptsächlich zur Messunsicherheit bei.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

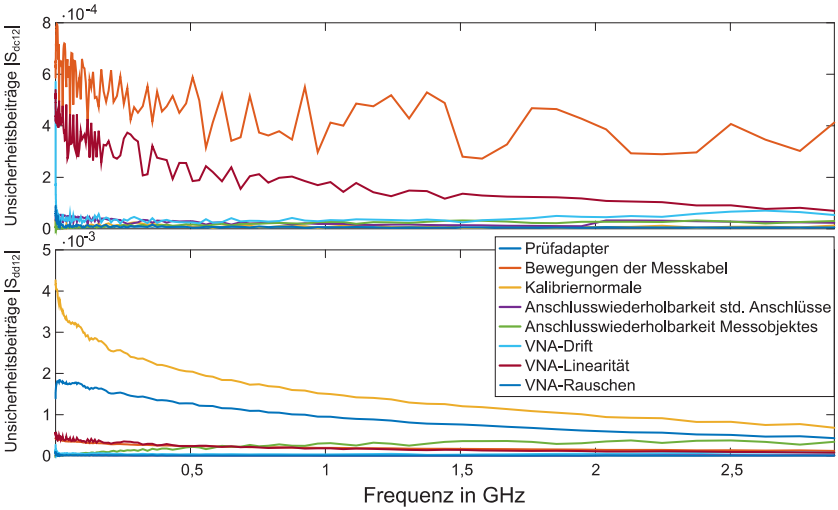


Bild 4: Messunsicherheitsbilanz für $|S_{dc12}|$ und $|S_{dd12}|$ über der Frequenz.

In Bild 4 ist die Messunsicherheitsbilanz für $|S_{dc12}|$ und $|S_{dd12}|$ beispielhaft über der Frequenz aufgetragen.

Da die Methode B für die Messunsicherheit bei mehreren MM-S-Parametern ein deutlich anderes Ergebnis zeigt als Methode A, wird der Beitrag VNA-Drift ebenfalls diesbezüglich untersucht. Der Beitrag VNA-Drift wird aus einer 24-stündigen-Messreihe einer kalibrierten Durchgangsverbindung abgeleitet [11]. Das Ergebnis ist in Bild 5 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

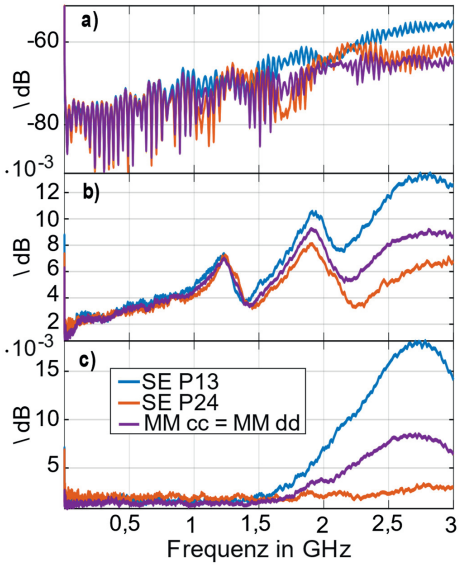


Bild 5: VNA-Drift aus einer 24-stündigen-Messreihe einer kalibrierten Durchgangsverbindung abgeleitet.

Unterschiede zwischen dem SE- und MM-Ergebnis können zwar beobachtet werden, aber es hängt auch stark vom eigentlichen MM-Parameter und den beteiligten physischen Toren ab. Für ein besseres Verständnis wird deshalb in einem weiteren Test ein virtueller VNA mit perfekt identischem Driftverhalten für alle vier Tore verwendet. Das Ergebnis ist in Bild 6 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

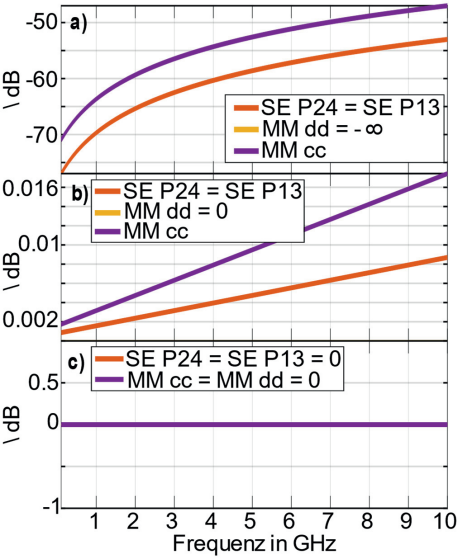


Bild 6: Drift eines virtuellen VNA mit perfekt identischem Driftverhalten für alle vier Tore.

Wie erwartet ist zu erkennen, dass die Drift für die beiden VNA-Tor-Kombination (Tore 1 und 3 und Tore 2 und 4) identisch ist. Außerdem ist der Symmetrieteil immer Null. Die Drift-Parameter der Gleichtaktanteile für MM sind doppelt so groß wie die SE-Anteile, während es keine Drift für die Differenzanteile gibt. Obwohl diese vollständige Aufhebung in Abbildung 5 nicht zu sehen ist, so ist der MM-dd-Anteil kleiner als die SE- und MM-cc-Anteil für den Gleichlauf (engl. *tracking*) und die Symmetrie. Die angepassten Anteile (*Switch term, directivity* and *match*) sind von der Größenordnung sehr ähnlich.

An dieser Stelle kann die Untersuchung auf die Modenumwandlungsterme (cd und dc) ausgedehnt werden und je nach VNA und der Ausführung der Durchgangsverbindung für die 24-Stunden-Messung (koaxial, verdrillte Leitungen, PCB-Leitungen, ...), kann sich das Ergebnis erheblich ändern. Bei der Messunsicherheitsberechnung ist es jedoch der übliche Weg, etwas großzügigere Grenzen für den gesamten Frequenzbereich zu definieren. Für SE-VNA-Drift würden beispielsweise alle Tore ausgewertet, aber das größte Ergebnis für die nachfolgenden Messungen benutzt.

Auch für die MM-S-Parameter könnten also individuelle VNA-Driftkomponenten (bis zu 16 komplexe Parameter) berechnet werden, und die daraus resultierende Messunsicherheit könnte sich, je nach Randbedingungen, deutlich verändern. Obwohl es durchaus Fälle geben

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

könnte, in denen es sinnvoll wäre, genauso vorzugehen, ist der umsichtigere Weg (wurde auch hier verwendet) der, einen Satz von Driftparametern für die SE-Beiträge (Match, Directivity, Switch-Begriffe, Tracking und Symmetrie) zu definieren, um nicht versehentlich die Messunsicherheit zu unterschätzen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird eine vollständige Messunsicherheitsanalyse für MM-S-Parameter von *Twisted-Pair*-Kabeln vorgestellt. Obwohl die Grundlagen für diese Untersuchung von Literatur und Richtlinien bekannt sind, so muss doch eine besondere Aufmerksamkeit auf die Messunsicherheitsbeiträge Messwiederholbarkeit und Drift gelegt werden. Die Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit den zu erwartenden Werten von erfahrenen Nutzern dieser Messtechnik.

In dieser Veröffentlichung wurde eine koaxiale VNA-Kalibrierung mit herkömmlichen und kommerziell verfügbaren Normalen angewendet, um die Untersuchung zu starten. Man könnte allerdings auch die Methode *Multimode* TRL [15] benutzen. Dieses Verfahren unterscheidet sich deutlich von dem hier gezeigten Vorgehen, könnte unter Umständen aber die Messunsicherheit reduzieren.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Literaturverzeichnis

[1] Robert D. Middlebrook. Differential amplifiers: their analysis and their applications in transistor dc amplifiers. Wiley, 1963.

[2] David E. Bockelman and William R. Eisenstadt. “Combined differential and common-mode scattering parameters: Theory and simulation”. In: IEEE transactions on microwave theory and techniques 43.7 (1995), pp. 1530–1539.

[3] David E. Bockelman and William R. Eisenstadt. “Pure-mode network analyzer for on-wafer measurements of mixed-mode S-parameters of differential circuits”. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 45.7 (1997), pp. 1071–1077.

[4] David E. Bockelman, William R. Eisenstadt, and Robert Stengel. “Accuracy estimation of mixed-mode scattering parameter measurements”. In: IEEE Transactions on Microwave theory and techniques 47.1 (1999), pp. 102–105.

[5] Dylan Williams, L. Hayden, and Roger Marks. “A Complete Multimode Equivalent-Circuit Theory for Electrical Design”. In: Journal of Research (NIST JRES) (June 1999).

[6] Andrea Ferrero and Marco Pirola. “Generalized mixed-mode S-parameters”. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 54.1 (2006), pp. 458–463. DOI: 10.1109/TMTT.2005.860497.

[7] International Automotive Task Force (IATF). Automotive Quality Management System Standard IATF 16949:2016. Oct. 2016.

[8] Allan Huynh, Par Hakansson, and Shaofang Gong. “Mixed-mode S-parameter conversion for networks with coupled differential signals”. In: 2007 European Microwave Conference. IEEE. 2007, pp. 238–241.

[9] Allan Huynh, Magnus Karlsson, and Shaofang Gong. “Mixed-Mode S-Parameters and Conversion Techniques”. In: Advanced Microwave Circuits and Systems. Ed. by Vitaliy Zhurbenko. Rijeka: IntechOpen, 2010. Chap. 1. DOI: 10.5772/8419.

[10] Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM. Sept. 2008.

[11] M. Zeier, D. Allal, and R. Judaschke. Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA). Euramet Calibration Guide No. 12. Version 3.0. Euramet e.V., 2018.

[12] M. Zeier, J. Hoffmann, and M. Wollensack. “Metas.UncLib—a measurement uncertainty calculator for advanced problems”. In: Metrologia 49 (Nov. 2012), pp. 809–815. DOI: 10.1088/0026-1394/49/6/809.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[13] Michael Wollensack and Johannes Hoffmann. METAS VNA Tools II - Math Reference V2.2.6. Tech. rep. 2.2.6. Bern, Switzerland: METAS, Oct. 2019.

[14] Dassault Syst`emes. CST Studio Suite. 2020. URL: https: //www.3ds.com/de/.

[15] C. Seguinot et al. “Multimode TRL. A new concept in microwave measurements: theory and experimental verification”. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 46.5 (1998), pp. 536–542. DOI: 10.1109/22.668653.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Konformitätsbeurteilung von 5G-Basisstationen
The conformity of 5G base stations

Dr. **Frédéric Pythoud**,
Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Bern-Wabern, Schweiz

Kurzfassung

Eine der letzten Entwicklungen aus dem Gebiet der Mobilfunkkommunikation nennt sich 5G, für fünfte Generation Mobilfunksystem. Die Einführung der 5G-Technologie hat in Europa viele Ängste bei der Bevölkerung erzeugt. Die Technologie ist komplex und erfordert Fachwissen. Der Nachweis der Konformität verlangt zuverlässige Mess-Methoden. Dabei spielt die Messunsicherheit eine wichtige Rolle. Dieser Beitrag wird all diese Themen ansprechen. Die Problematik der Rechtsicherheit wird auch diskutiert.

Abstract

One of the latest developments in the field of mobile communications is called 5G, for fifth generation mobile system. The introduction of 5G technology has created a lot of anxiety among citizens in Europe. The technology is complex and practically requires specialist knowledge to understand it. Demonstrating compliance also requires reliable measurement methods. Measurement uncertainty plays an important role for conformity assessment. This paper will address all these issues. The problems of the legal certainty will also be commented.

1. Die 5G Technologie

Die 5G-Technologie, die auch als New Radio (NR) bezeichnet wird, wurde vom Third Generation Partnership Project (3GPP) standardisiert, um die Übertragungskapazität auf bis zu 10 Gbit/s zu erhöhen, was etwa 100 Mal mehr ist als 4G in seiner Anfangsphase (siehe Tabelle 1). Die theoretische Latenzzeit von 5G beträgt 1 ms, während sie bei 4G bei 50 ms liegt. Die hohe Übertragungskapazität wird durch eine grössere Übertragungsbandbreite und durch die Beamforming-Technologie erreicht. Dank dem Beamforming werden verschiedene Informationen gleichzeitig in verschiedene Richtungen übertragen (Massive Multiple-Input-Multiple-Output). Die vorgesehenen Frequenzbereiche für 5G sind einerseits der

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Frequenzbereich FR1, von 410 MHz bis 7.125 GHz, und anderseits der Frequenzbereich FR2, von 24.5 GHz bis 71 GHz.

Tabelle 1: Übersicht der Übertragungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Mobilfunkgenerationen. Bei diesen Werten handelt es sich eher um eine Grössenordnung als um einen absoluten Wert, da durch Verbesserungen heute höhere Werte erreicht werden können.

Mobilfunkgeneration	Übertragungsgeschwindigkeit
2	10 kbit/s
3	1 Mbit/s
4	100 Mbit/s
5	10 Gbit/s

Das Ziel dieser Präsentation ist es nicht, eine detaillierte Messmethode für Spezialisten zu liefern (diese ist bereits in der Referenz [1] verfügbar), sondern einen allgemeinen Überblick über die Messprinzipien zu geben. Zu diesem Zweck ist es wichtig, zwei Merkmale der 5G-Technologie zu verstehen. Erstens ist die Modulation das Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Das bedeutet, dass die Informationen in kleine Informationszellen, so genannte Ressource-Elemente (RE), kodiert werden, die in einem Zeit-Frequenz-Raster, dem so genannten Ressouce Grid (Bild 1), übertragen werden.

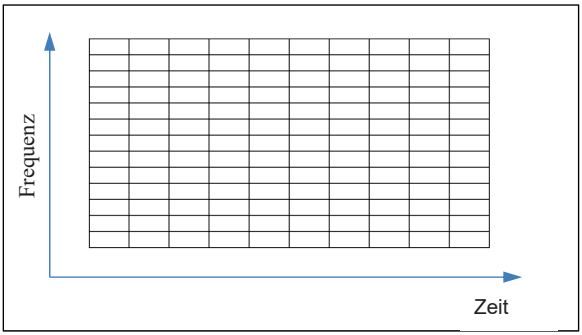


Bild 1: Bei OFDM modulierte Signale, wird die Information (Bit) in unabhängige Ressourcenelement enkodiert, die dann einem Zeit-Frequenz-Raster übertragen werden. Jede Zelle im oberen Bild zeigt schematisch ein Ressource-Element.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Das zweite Merkmal ist die Strahlformung. Die 5G-Basisstation ist in der Lage, verschiedene Strahlen gleichzeitig zu übertragen, jede für einen anderen Nutzer, oder sogar in einigen Fällen verschiedene Strahlen für denselben Nutzer zu koppeln, wie in Bild 2 dargestellt. Damit ist die 5G-Technologie vielseitig, anpassungsfähig und hochdynamisch.

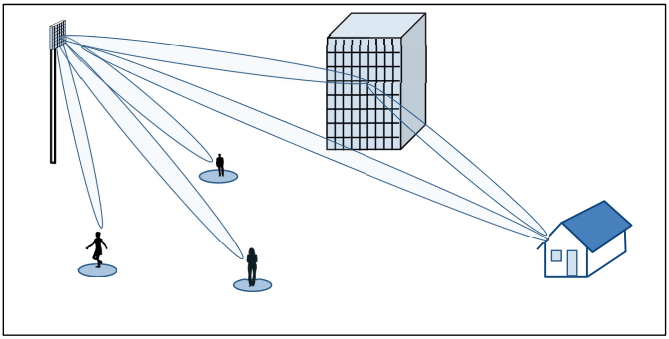


Bild 2: Darstellung der 5G adaptiven Keulen Technologie.

2. Messprinzipien

Wie können wir bei einer so dynamischen Technologie das elektromagnetische Feld messen: die Strahlung ändert sich ständig in Richtung und Intensität, die Anzahl der Nutzer ändert sich auch? Als erstes muss die Messgrösse definiert werden: in unserem Fall definieren wir die Messgrösse als der Höchstwert, das das Feld an einem bestimmten Ort erreichen kann (Bild 3).

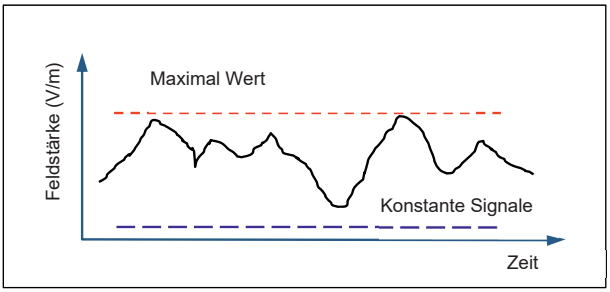


Bild 3: Darstellung des Zeitverlaufs der Feldstärke in einem Bestimmten Ort.

Die zweite Frage ist, wie man diesen Wert messen kann? Im Prinzip gibt es drei Strategien, um dies zu erreichen: man kann über lange Zeiträume, mehrere Tage, messen, ohne jedoch eine Garantie zu erhalten, dass der Höchstwert erreicht wird. Man kann auch die Basisstation

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

in einem Betriebsmode versetzen, der dem maximalen Betrieb der Station entspricht. Damit ist zu erwarten, dass die Kommunikation während dieser Zeit sicherlich unterbrochen werden muss. In der Schweiz wurde einen dritten Ansatz gewählt, nämlich die Messung der konstanten Signalsignale (Bild 3) der Basisstation und die Extrapolation auf die maximale Leistung. Gewählt wurden die sekundäre Synchronisierungssignal (SSS) des Downlink-Signals des Physical Broadcast Channel (PBCH). Damit lautet unser Messverfahren für die maximale Feldstärke E:

$$E = E^{\mathrm{SSS}} \cdot K \tag{1}$$

Wo E^{SSS} die Feldstärke des Synchonisationssignal SSS ist, und K ein Hochrechnungsfaktor, der die Charakteristik der Basisstation berücksichtigt. Weil die SSS-Signale im Zeit-Frequenz-Raster platziert sind, wird eine code-selektive Feldsonde benötigt, die die NR Signale dekodiert und daraus den Anteil der SSS-Signale messen kann. Der Extrapolationsfaktor K enthält die Beiträge des Leistungsverhältnisses zwischen den Synchronisationssignale und den Verkehrssignalen sowie die Beiträge der Strahlungsdiagramm der Synchronisation und der Verkehrssignale. Eine der Besonderheiten von 5G-Sender im Vergleich zu 4G-Sender besteht darin, dass die Synchronisationssignale nicht mehr die gleiche Abstrahlungscharakteristik wie die Verkehrssignale aufweisen (Bild 4). Das bedeutet, dass der Extrapolationsfaktor K nicht nur von der gemessenen Antenne abhängt, sondern auch von dem Mess-Ort.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

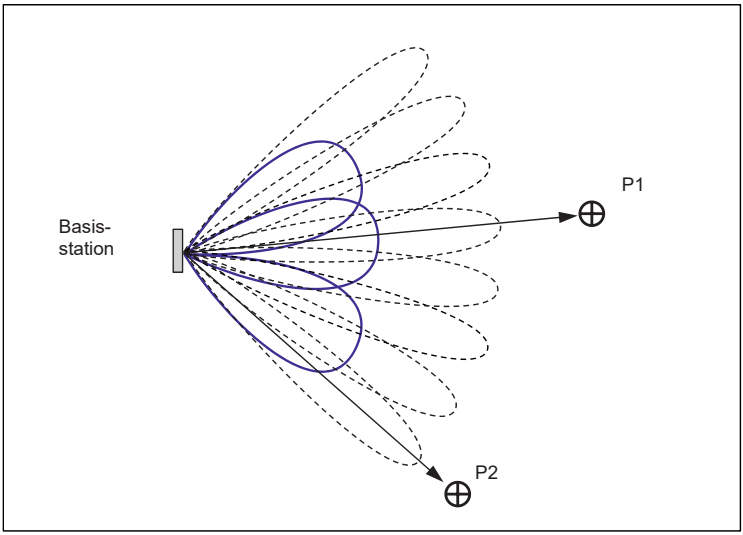


Bild 4: Schematische Darstellung der Abstrahlungscharakteristik der Synchronisationssignale (blau) und der Verkehrssignale (schwarz, gestrichelt). Auch dargestellt sind zwei Messpunkte P1 und P2. Im Messpunkt P1 ist der Verkehrssignal maximal, genauso wie im Punkt P2. Anders ist es für das Synchronisationssignal, das im Punkt P2 weniger stark empfangen wird als im Punkt P1.

3. Messunsicherheit

Wie bereits erwähnt, ist die Technologie äusserst komplex, und es stellt sich die Frage, ob ein solches Messverfahren zur Feststellung der Konformität einer Messeinrichtung verwendet werden kann. Wie kann die Messunsicherheit berechnet werden? Welche Rechtssicherheit wird erreicht? Nicht nur die Technologie ist äusserst komplex, aber gleichzeitig das Messverfahren sowie das code-selektive Messgerät. Zunächst ist es vielleicht wichtig, die Definition der Messunsicherheit nach GUM [2] zu erinnern:

(Mess)unsicherheit

Dem Messergebnis zugeordneter Parameter,

der die Streuung der Werte kennzeichnet,

die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden könnte

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Messunsicherheit gibt eine Aussage über unsere Messfähigkeit, über unsere Fähigkeit Messergebnisse zu reproduzieren? Die Frage der Kalibration, d.h. die Rückführbarkeit zum Internationalen Einheitensystem (SI), ist natürlich auch dabei. Das zentrale Element bei der Ermittlung der Unsicherheit nach dem GUM ist das Messmodell. Wir haben es hier mit einer komplexen Situation zu tun, aber wir werden ein sehr einfaches Messmodell wählen, das auf dem Black-Box-Ansatz basiert, weil wir nicht in der Lage sind, den Messprozess, einschliesslich der Demodulation und der Extrapolation zu einem maximalen Übertragungsmodus, genau zu modellieren. Als Messmodell starten wir in der Tat von der oben dargestellten Gleichung (1). Diese Gleichung ist in dieser Form nicht geeignet, um alle Unsicherheitsquellen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird sie nach dem Prinzip der "Black Box Approach" mit weiteren Einflussgrössen erweitert. Die Einflussgrössen haben in der Regel einen Erwartungswert von 1.0 (hier haben wir ein multiplikatives Modell) oder nahe zu 1.0 (z.B. Kalibrierung), aber sie liefern einen signifikanten Beitrag zur Messunsicherheit:

$$E = E^{\mathrm{SSS}} \cdot \delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Kalibration}} \cdot \delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Freq}} \cdot \delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Lin}} \cdot \delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Iso}} \cdot \delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Probenahme}} \cdot K \qquad (2)$$

Wir haben also ein multiplikatives Modell, bei dem sich die relativen Unsicherheiten quadratisch addieren. Somit kann die Unsicherheitsbilanz einfach geschrieben werden, wenn die Unsicherheiten in % oder in dB angegeben werden (hier haben wir uns für % entschieden). Da die Empfindlichkeitskoeffizienten jeder Einflussgrösse 1.0 sind, fallen sie einfach weg.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 2: Beispiel Unsicherheitsbilanz für die Messung von 5G Basis-stationen

Einflussfaktor	Datenherkunft	Unsicherheitsbeitrag (%)	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit (%)
Ablesung-Unsicherheit E^{SSS}	Wiederholbarkeit der Messung vor Ort	5.0	Normal	1	5.0
Unsicherheit der Kalibrierung $\delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Kalibration}}$	Kalibrierzertifikat der Feldsonde, Unsicherheit der Kalibrierung	2.0	Normal	2	1.0
Unsicherheit der Frequenzgang-Korrektur (wenn diese nicht gemacht wird) $\delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Freq}}$	Kalibrierzertifikat der Feldsonde, Flachheit des Frequenzganges	8.0	Rechteck	1.73	4.6
Unsicherheit der Linearität-Korrekturen (wenn diese nicht gemacht wird) $\delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Lin}}$	Kalibrierzertifikat der Feldsonde, Flachheit der Linearität	1.6	Rechteck	1.73	0.9
Unsicherheit der Isotropie-Korrekturen (wenn diese nicht gemacht werden) $\delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Iso}}$	Kalibrierzertifikat der Feldsonde, Flachheit der Isotropie	1.7	Rechteck	1.73	1.0
Probenahme-Unsicherheit $\cdot\, \delta E^{\mathrm{SSS}}_{\mathrm{Probenahme}}$	Ausführliche Experimente über Reproduzierbarkeit	15	Normal	1	15.0
Unsicherheit des Korrekturfaktors K	Konservative Pauschalabschätzung basierend auf Antennen-Charakterisierung	10	Rechteck	1.73	6.4
Total (k=1)					17.7
Total (k=2)					35.5

Die Ableseunsicherheit berücksichtigt die Tatsache, dass Wiederholte Messungen eine kleine Streuung aufweisen. Grundsätzlich gilt: wenn es möglich ist, eine Messung ohne grossen finanziellen oder materiellen Aufwand zu wiederholen, wiederholt man die Messung immer ein paar Mal.

Die Unsicherheit der Kalibrierung setzt voraus, dass das Messgerät kalibriert wurde. Dies um die Rückführbarkeit auf das SI-System zu gewährleisten. Da das Gerät bestimmte Zeitsignale

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

messen kann, wird es mit einem Generator kalibriert, der in der Lage ist, bekannte Signalsignale zu erzeugen. Die Kalibrierungsunsicherheit ist durch die auf dem Kalibrier-Zertifikat angegebene Unsicherheit definiert.

Bei den folgenden drei Unsicherheiten, nämlich der Unsicherheit der Frequenzgang-Korrektur, der Linearität-Korrektur und der Isotropie-Korrektur, wird davon ausgegangen, dass die im Kalibrierschein angegebenen Korrekturen nicht angewendet werden, z. B. aus praktischen Gründen, da dies Interpolationen und Berechnungen erfordern würde, um den genauen Wert der Korrektur zu bestimmen. Alle diese Werte werden unter Berücksichtigung der maximalen Abweichungen der Korrekturfaktoren von ihren Nennwerten ermittelt, und aus diesem Grund aus Rechteckverteilungen bestimmt.

Die Stichprobenunsicherheit berücksichtigt die sehr unregelmässige Struktur des elektromagnetischen Feldes aufgrund von Interferenzen. Unabhängig davon, ob man sich dafür entscheidet, an einem bestimmten Punkt zu messen, oder ob wie dies in der Schweiz geschieht, um das lokale Maximum zu finden, sind erhebliche Abweichungen zu beobachten, die von der verwendeten Probenahme-Methode und den Auswirkungen der von der messenden Person verursachten Interferenzen abhängen. Ihr Wert wird in der Regel in grossen Messkampagnen ermittelt, bei denen eine signifikante Anzahl von Teilnehmern aufgefordert wird, dieselbe Situation mehrmals zu messen [3].

Die Unsicherheit des Korrekturfaktors kommt aus der Charakterisierung der Sendeantenne. Diese Daten werden in der Regel vom Hersteller geliefert und man nimmt hier eine pauschale Unsicherheit in der Grössenordnung von 1 dB an, mit einer Rechteck Verteilung.

4. Konformität Abklärung

Die Messung einer 5G-Basisstation sollte sicherstellen, dass die Station konform ist. Wie wir in unserem Fall gesehen haben, ist die erweiterte Unsicherheit relativ gross, typischerweise 35 % bei einem Erweiterungsfaktor von 2. Nehmen wir ein Beispiel wo die nach dem erklärtem Verfahren gemessene Feldstärke 4.3 V/m beträgt. Nehmen wir auch an, dass der Grenzwert bei 5 V/m liegt (in der Schweiz wird dies als Installationsgrenzwert bezeichnet). Dann stellt sich die Frage, ob die Anlage konform ist oder nicht. Die Antwort auf diese Frage ist nicht wissenschaftlich, sondern hängt von der Entscheidungsregel ab, die vor der Messung festgelegt wurde.

Wurde eine strenge Akzeptanz gewählt, d. h. Messwert plus erweiterte Unsicherheit muss kleiner als der Grenzwert sein, wird die Anlage als nicht konform eingestuft. Wenn ein Verfahren mit geteiltem Risiko gewählt ist, d. h. der gemessene Wert muss kleiner als der

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Grenzwert sein, wird die Anlage für konform erklärt. In diesem Fall ist eine maximale Unsicherheit erforderlich, um Messungen mit zu grossen Unsicherheiten zu vermeiden.
In der Schweiz wurde die Regel des geteilten Risikos gewählt, weil in einer strickten Akzeptanz würde die grosse Messunsicherheiten zu einer sehr strengen Bewertung der Sender führen. Die Regel des geteilten Risikos erfordert aber ein gründliches Verständnis dafür, wie man mit einigen der auftretenden Situationen umgeht. Angenommen, eine Anlage wurde an einem Tag mit 4.3 V/m und zwei Wochen später mit 6.1 V/m gemessen. Ist die Anlage immer noch konform? Die Antwort auf diese Frage lautet: wenn es keine Anzeichen dafür gibt, dass die Anlage verändert wurde, dann ist sie noch konform. Denn wenn man sich für das Prinzip des geteilten Risikos entscheidet, akzeptiert man implizit das Risiko falsch positiver bzw. falsch negativer Ergebnisse. Wenn wir zwei Wochen nach der ersten Messung 6.1 V/m erhalten und davon ausgehen, dass die Anlage nicht verändert wurde, können wir uns einfach vorstellen, dass diese zweite Messung eine zweite Stichprobe der Statistik ist, die einen Durchschnittswert von z. B. 4,8 V/m hätte. Hätte man aus der zweiten Messung daraus entschieden, die Anlage als nicht konform zu deklarieren, dann hätten wir indirekt als Entscheidungsregel die strenge Akzeptanz gewählt.

5. Schlussfolgerung

Dieses Beispiel aus der Praxis ist lehrreich. Es zeigt, dass trotz der sehr hohen Komplexität der 5G-Modulation, die Konformität einer 5G-Basisstation mit der notwendigen Rechtssicherheit bestimmt werden kann. Als Erstes muss eine Messgrösse genau definiert werden. Der "Black Box"-Ansatz ermöglicht es, sehr gute Unsicherheitswerte zu erhalten. Dieser Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass man ein Modell des Messprozesses verwendet, das nicht in der typischen Form $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots)$ geschrieben wird, wobei Y die Ausgangsgrösse und X_i die Eingangsgrössen sind, sondern in der Form $Y = Y_0 + \delta Y_1 + \delta Y_2 + \cdots + \delta Y_n$ im Fall eines additiven Modells, oder $Y = Y_0 \cdot \delta Y_1 \cdot \delta Y_2 \cdot \dots \cdot \delta Y_n$ im Fall eines multiplikativen Modells, wo zur Messgrösse Y_0 zusätzliche Einflussgrössen δY_1 ... δY_n berücksichtigt werden. Trotz der grossen Komplexität des Messverfahrens, und trotz des unfassbaren Charakters der Messgrösse, lassen sich Messungen durchführen die zu rechtsichere Entscheide führen. Die endgültige Verifikation des Messresultats lässt sich schlussendlich über Messvergleiche bestätigen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[1] METAS-Bericht 154.1-2020-5218-1016: «Technischer Bericht: Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz », Februar 2020, verfügbar auf www.metas.ch.

[2] JCGM 100:2008: "Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)", 2008, verfügbar auf www.bipm.org.

[3] METAS-Bericht 154.1-2014.5218.904: "Measurement of non-ionizing radiation from a LTE base station: Inter-laboratory comparison – November 2013", November 2014, verfügbar auf www.metas.ch.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Unsicherheitsbetrachtungen zur Charakterisierung von Mikrokugeln auf Basis von AFM-Oberflächenscans

Erik Oertel, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. **Eberhard Manske**,
Technische Universität Ilmenau

Kurzfassung

Taktile Mikrotaster benötigen zur Erfassung kleinster Strukturen Antastkugeln mit Radien von 150 µm und kleiner. Zur geometrischen Charakterisierung solcher Kugeln wurde am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau ein neuartiges Verfahren auf Basis von AFM-Oberflächenscans entwickelt. Im Rahmen des Beitrags wird das Messverfahren, die wesentliche physikalische Modellierung sowie die Einschätzung ausgewählter Einflussgrößen vorgestellt. Anhand ausgewählter Simulationen werden erste Rückschlüsse zur Weiterentwicklung, Optimierung und erreichbaren Messunsicherheit des Verfahrens getroffen. Der Fokus liegt dabei auf den Einflüssen der Kugel und des Rotationsmechanismus.

1. Einleitung

Die in Mikro- und Nano-Koordinatenmessgeräten (KMGs) eingesetzten Mikrotaster benötigen zur Erfassung kleinster Strukturen Antastkugeln mit Radien von 150 µm und kleiner. Für die erforderliche Korrektur des Kugeleinflusses ist eine präzise geometrische Charakterisierung solcher Kugeln erforderlich. Etablierte Verfahren, wie zum Beispiel Rundheitsmessgeräte, sind jedoch aufgrund ihrer Eigenschaften für Mikrokugeln nur bedingt geeignet [1]. Als Alternative wurde von METAS ein 3-Kugeltest entwickelt, welcher die Kugelform von drei unbekannten Kugeln durch eine Reihe von Vergleichsmessungen separiert [2]. Die Umsetzung dieses Ansatzes erfordert allerdings einen erheblichen experimentellen Aufwand, weil die Kugeln während des Messprozesses mehrfach ausgetauscht und neu ausgerichtet werden müssen. Dennoch ist es mit diesem Verfahren nicht möglich alle Rundheitsabweichungen vollständig zu separieren.

Aus diesem Grund wurde am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau ein neuartiges Verfahren zur Radius- und Rundheitsmessung von Mikrokugeln entwickelt. In ersten Versuchen konnte der mittlere Kugelradius einer 150-µm-Rubinkugel mit einer Wiederholbarkeit von 4 nm erfasst werden [3]. Als wesentliche Einflüsse auf den Messprozess wurden die zu messende Kugel (Radius, Formabweichungen und Rauheit), die Taumelbewegung des Rotationsmechanismus, die Unsicherheit der Koordinaten und der

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Einfluss der AFM-Spitze identifiziert. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge wurde zur Untersuchung und Einschätzung dieser Einflussgrößen ein auf Simulationen basierender Ansatz gewählt.

Im Rahmen dieses Beitrages wird die grundlegende Messstrategie und die wesentliche Modellbildung vorgestellt. Anhand ausgewählter Simulationen werden erste Rückschlüsse zur erreichbaren Messunsicherheit und Anwendbarkeit des Verfahrens getroffen. Die Simulationen konzentrieren sich dabei vorerst auf den Einflüssen der Kugel (als Messobjekt) und des Rotationsmechanismus.

2. Messstrategie

Das Messverfahren basiert auf einzelnen Oberflächenscans, welche mit einem Atomkraftmikroskop (AFM) durchgeführt werden.

Die von dem AFM erfassten Oberflächenkoordinaten werden in einem globalen Koordinatensystem mit den Koordinaten x, y und z erfasst. Weil mit jedem Scan nur ein Teil der Kugel abgetastet werden kann, ist eine Rotation der Kugel zwischen den Oberflächenscans notwendig. Zur Reduktion der Komplexität wurde zunächst nur eine Rotation implementiert. Mit dieser und Oberflächenscans entlang der x-Achse (Äquatorscans) ist somit eine vollständige Abtastung eines Großkreises (Äquator) der Kugel möglich. Zur Zentrierung der Kugel werden zusätzlich Oberflächenscans entlang der z-Achse (Meridianscans) durchgeführt (Bild 1).

Die erhaltenen Messwerte müssen von dem globalen Koordinatensystem in ein mit dem Kugelzentrum verbundenes Koordinatensystem transformiert werden, welches im weiteren als lokales Koordinatensystem mit den Koordinaten x', y' und z' bezeichnet wird. Die beiden Koordinatensysteme unterscheiden sich durch einen unbekannten Translationsvektor $\vec{x}_c$ und

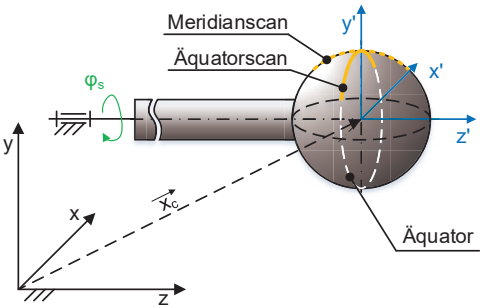


Bild 1: Abtaststrategie in einer Rotationslage der Kugel und die Definition der Koordinatensysteme.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

einer Rotation um die z-Achse φ_s.

Die Information über die Rotationslage der Kugel φ_s wird durch einen Winkelsensor erhalten. Der Translationsvektor $\vec{x}_c$, welcher sich aufgrund der Rundlaufeigenschaften des Rotationsmechanismus in jeder Rotationslage ändert, muss hingegen geschätzt werden. Ein erster, grober Schätzwert wird durch einen Kreisfit der Oberflächenscans analog zu [4] ermittelt. Dieser Schätzwert unterliegt jedoch systematischen Abweichungen, weil in jeder Rotationslage nur ein Teil des gesamten Kreises bekannt ist und dieser bei realen Kugeln Rundheitsabweichungen aufweist. In einem weiteren Schritt wird deshalb ein globaler Stitching-Algorithmus angewendet, welcher von einem bereits etablierten Verfahren [5, 6] zur interferometrischen Kugelmessung (Siliziumkugeln mit einem Durchmesser von 98 mm) für die konkrete Messaufgabe adaptiert wurde. Der Stitching-Algorithmus verbessert den Schätzwert für den Translationsvektor $\vec{x}_c$ und komprimiert die Kenntnis über den Äquator $r(\varphi)$ mit dem Polarwinkel φ auf die Konstanten r_0, a_k, und b_k (Gleichung 1).

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{k=2}^{k_{max}} a_k cos(\varphi k) + b_k sin(\varphi k) \quad (1)$$

Die detaillierte Messstrategie und eine reale Implementierung auf einer Nanomessmaschine sowie erste experimentelle Untersuchungen wurden in [3] veröffentlicht.

3. Modellbildung

3.1. Kugel (Messobjekt)

Die Untersuchungen werden an virtuellen Kugeln mit dem mittleren Radius r_0 und den Formabweichungen $\Delta r(\varphi, \theta)$ durchgeführt. Diese können im allgemeinem durch eine Linearkombination von Kugelflächenfunktionen $Y_l^m(\varphi, \theta)$ modelliert werden, wobei sich dieser Ansatz aufgrund des Rechenaufwands eher für räumlich langsam ändernde Formabweichungen eignet [5]. Deshalb wird der Effekt von Rauheiten im weiterem vernachlässigt. Um den Einfluss der jeweiligen Kugelform separieren zu können, wird im Rahmen dieser Untersuchungen für jede Kugelflächenfunktion eine separate Kugel nach Gleichung 2 generiert und einzeln untersucht.

$$r(\varphi, \theta) = r_0 + \Delta r(\varphi, \theta) = r_0 + k_l^m \, Y_l^m(\varphi, \theta) \quad (2)$$

Für die Kugelflächenfunktion $Y_l^m(\varphi, \theta)$ wird dieselbe Konvention wie in [6, S. 26] verwendet. Wir beschränken uns dabei auf Kugelflächenfunktionen für welche $m = l$ gilt, weil wir uns auf Formabweichungen entlang des Äquators konzentrieren (Bild 2b, 2c). Der Parameter l bezieht sich dabei auf die Anzahl der sinusförmigen Wellen entlang des Äquators. Die Amplituden der Formabweichungen orientieren sich an derzeit verfügbaren Kugeln, welche

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

meistens entsprechend der DIN 5401 [7] nach ihrer Qualität (Grade) klassifiziert werden. Die höchste dort definierte Qualitätsstufe (Grade 3) erlaubt Rundheitsabweichungen von bis zu 80 nm. Obwohl für die Anwendung auf Mikro- und Nano-KMGs eher noch bessere Kugeln benötigt werden, werden aufgrund der Verfügbarkeit in den Simulationen auch Kugeln der Qualitätsstufe Grade 5 mit Rundheitsabweichungen von bis zu 130 nm berücksichtigt (Bild 2d). Der Faktor k_l^m wird entsprechend numerisch ermittelt.

3.2. Abtastung der Kugel

Zur Abtastung des Äquators und zur Zentrierung der Kugel wird jeweils ein Oberflächenscan entlang der x- und z-Achse des globalen Koordinatensystems durchgeführt. Der Kugelmittelpunkt $\vec{x}_c$ wird anschließend aus den Oberflächendaten durch die Anpassung von

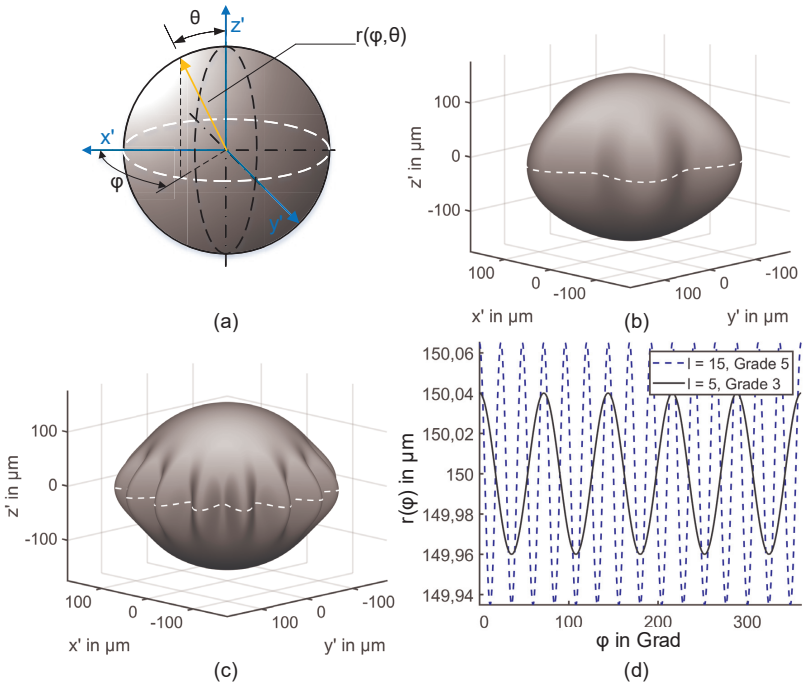


Bild 2: Definition des Polar- und Azimutwinkels (a) sowie zwei exemplarisch generierte Kugeln mit l = 5 (b) und l = 15 (c). Die Formabweichungen der Kugeln (b, c) wurden zur Visualisierung stark übertrieben. Zusätzlich wurde der jeweilige Äquator beider Kugeln mit den untersuchten Qualitätsstufen (Grade) dargestellt (d).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

idealen Kreisen nach dem Kriterium der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt und die Kugel auf Basis dieser Informationen neu positioniert. Dieser Vorgang benötigt mindestens zwei Iterationen. Der Einfluss dieser Zentrierstrategie, der Filtereffekt der AFM-Spitze und die Unsicherheit der Koordinaten stehen nicht im Fokus dieser Untersuchungen und werden deshalb in der Simulation vorerst nicht berücksichtigt.

Die Länge der Oberflächenscans ist abhängig vom mittleren Radius der verwendeten Kugel r_0 und von dem Kreisbogen φ_{Scan} (Äquatorscan) bzw. θ_{Scan} (Meridianscan). Weiterhin bestimmt der Rotationsschritt des Drehtisches φ_{Step} zwischen den Oberflächenscans den Überlappungsgrad und die Anzahl der notwendigen Oberflächenscans zur Abdeckung des Äquators. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass diese, in gewissen Grenzen wählbaren Parameter einen deutlichen Einfluss auf das Messergebnis haben. Aus Gründen des Umfangs wird hier dennoch auf eine Variation und Optimierung dieser Parameter verzichtet. Stattdessen wird die konkrete Realisierung in [3], mit φ_{Scan} = 80°, θ_{Scan} = 60° und φ_{Step} = 40° untersucht. Die Kugel wird dabei zur Vereinfachung in konstanten Winkelschritten abgetastet. Die Größe der Winkelschritte entspricht etwa einer lateralen Auflösung von 20 nm.

3.3. Rotationsmechanismus

Die Messstrategie setzt voraus, dass die z-Achsen der globalen und lokalen Koordinatensysteme während der Messung parallel zueinander ausgerichtet sind, weil die Rotationslage der Kugel lediglich über den Winkelsensor φ_s des Rotationstisches erfasst werden kann. In der Praxis ist damit eine Justierstrategie erforderlich. Insgesamt ergeben

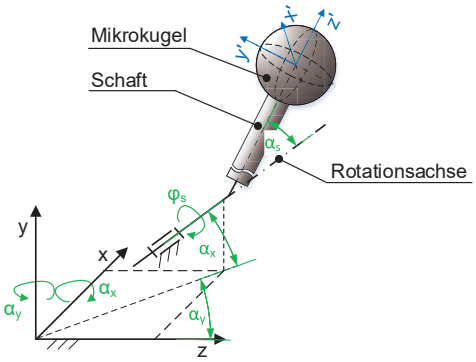


Bild 3: Kinematisches Modell des Rotationsmechanismus unter Berücksichtigung der Justierung der Rotationsachse (α_x, α_y) und der Schiefstellung des Schafts (α_s).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

sich für die Lagerung der Kugel (Rotationsachse) zwei Freiheitsgrade: jeweils eine Rotation um die y- (α_y) und x-Achse (α_x) des globalen Koordinatensystems. Als Referenz für die Rotationsachse diente in den ersten Versuchen der Schaft des Taststifts, welcher durch Oberflächenscans abgetastet wurde [3]. Im Rahmen dieser Versuche wurde als weiterer signifikanter Einfluss eine Winkelabweichung (α_s) der Schaftachse relativ zur Rotationsachse am vorhanden Versuchsaufbau identifiziert (Bild 3).

Um die Anforderungen an den Rotationsmechanismus und die Justierung besser bewerten zu können, wurde ein kinematisches Modell in Form einer Rotationsmatrix erstellt, welche die Transformation zwischen dem lokalen und globalen Koordinatensystem beschreibt. Auf Basis dieser wird eine weitere Rotationsmatrix berechnet, welche direkt auf die Kugelflächenfunktionen und somit auf die simulierte Kugel angewendet werden kann. Dazu nutzen wir eine Implementierung von [8], welche auf den Arbeiten in [9] basiert.

Eine erste qualitative Bewertung dieser Einflüsse ist anhand Bild 4 möglich. In dieser wurde

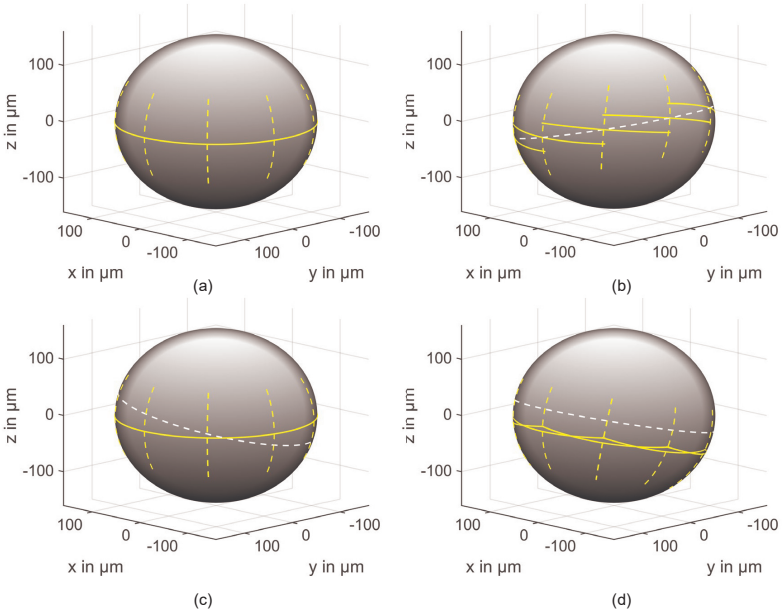


Bild 4: Visualisierung eines idealen Abtastvorgangs (a) und der Einfluss eines um die y-Achse (b) oder x-Achse (d) dejustierten Aufbaus sowie der Einfluss einer Schiefstellung des Schafts relativ zur Rotationsachse (c). Alle Winkelabweichungen betragen jeweils 15° (zur Visualisierung).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

der Effekt einer mangelhaften Justierung (α_x, α_y) und eine Schiefstellung des Schafts (α_s) auf die Abtastung der Kugel jeweils separat visualisiert.

4. Simulationen

Auf Basis des im dritten Abschnitt vorgestellten Modells vom Messprozess wurden Simulationen zur Untersuchung einzelner Einflussgrößen durchgeführt. Bild 5a zeigt exemplarisch das Ergebnis einer ideal abgetasteten Kugel nach der ersten Koordinatentransformation durch Kreisfits. Wie auch bereits bei realen Messwerten zu beobachten [3], weisen die einzelnen Oberflächenscans keine zufriedenstellende Überlappung auf. Dies kann durch eine Optimierung anhand des Stitching-Algorithmus behoben werden (Bild 5b). Der Stitching-Algorithmus selbst unterliegt jedoch einer Linearisierung, wodurch weiterhin systematische Fehler zu erwarten sind. Die Fehler werden durch die Abweichung von einer idealen Kugel verursacht und sind somit unmittelbar abhängig vom Messobjekt. Die Untersuchung dieser Abhängigkeiten unter Ausblendung jeglicher weiteren Einflüsse ist Gegenstand des folgenden Unterabschnitts.

4.1. Einfluss der Kugel

Zur Transformation der einzelnen Äquatorscans muss der Vektor $\vec{x}_c = [x_c, y_c]^T$ für jeden Oberflächenscan separat geschätzt werden. In einer ersten Iteration erfolgt dies durch das Fitten eines idealen Kreises in die verfügbaren Daten, welche nur einen Teil des Kreises abdecken. Dieser Bereich liegt in den vorliegenden Untersuchungen bei $\varphi_{scan} = 80°$, ist aber in gewissen Grenzen variierbar. Der so ermittelte Mittelpunkt $\vec{x}_{cind} = [x_{cind}, y_{cind}]^T$ weist bei

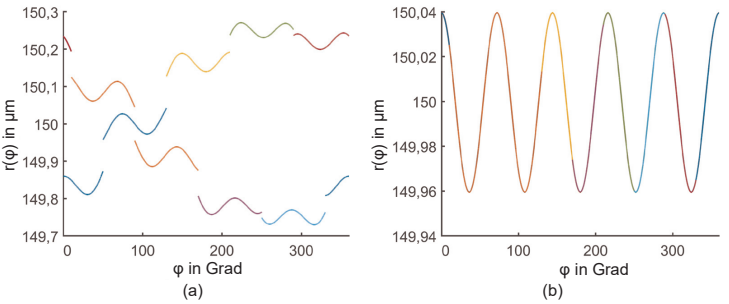


Bild 5: Exemplarisches Messergebnis einer Grade-3-Kugel ($l = 5$), ohne Einflüsse des Rotationsmechanismus. Nach der ersten Koordinatentransformation auf Basis von Kreisfits (a) sind deutliche Abweichungen erkennbar, welche durch den darauffolgenden Stitching-Algorithmus minimiert werden (b).

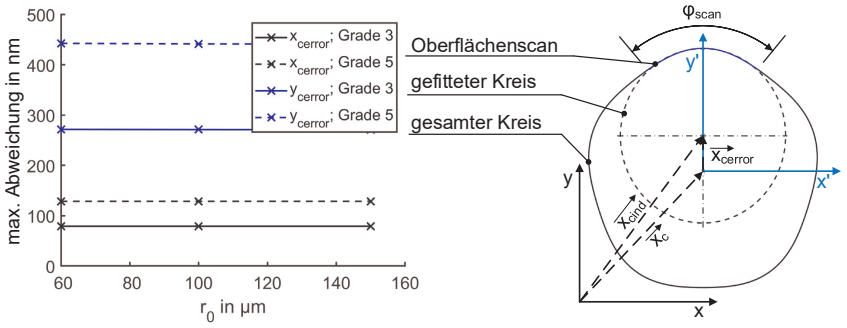
https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

einer nicht idealen Kugel systematische Abweichungen $\vec{x}_{cerror} = [x_{cerror}, y_{cerror}]^T$ auf (Bild 6b).

Zur Untersuchung dieser Abweichungen wurden virtuelle Kugeln mit unterschiedlichen mittleren Radien (60 µm, 100 µm und 150 µm) und unterschiedlicher Qualität (Grade 3 und Grade 5) von jeweils l = 2 bis l = 100 generiert und virtuell vermessen. Die beobachteten Abweichungen hängen unter anderem von der Art der Formabweichung (l) und von der Orientierung der Kugel ab. Zur Zusammenfassung der Ergebnisse werden hier allerdings nur die je Versuchsreihe maximal beobachteten Abweichungen dargestellt (Bild 6a). Für das Fitten des Kreises wird im Rahmen dieser Untersuchung eine Implementierung von [10], welche auf einem Algorithmus nach [11] basiert, genutzt.

Der laterale Kugelmittelpunkt x_c wird durch die Information aus dem Äquatorscan abgeschätzt, der vertikale Kugelmittelpunkt y_c hingegen durch die Information aus dem Meridian- und Äquatorscan (Mittelwert). Insgesamt weist der vertikale Kugelmittelpunkt eine deutlich größere Abweichung auf. Ein Einfluss des mittleren Radius ist im Gegensatz zur Qualität der Kugel nicht feststellbar. Die maximalen Abweichungen können die eigentlichen Rundheitsabweichungen deutlich übertreffen. Beide Schätzwerte werden im weiteren Verlauf durch den Stitching-Algorithmus optimiert.

Die gleiche Strategie wird, wie im Abschnitt 3.2. beschrieben, auch für die Zentrierung der Oberflächenscans während des Messablaufs angewendet. In diesem Fall muss auch die z-Koordinate z_c des Kugelmittelpunkts berücksichtigt werden. Diese wird nach der gleichen Strategie wie für x_c anhand des Meridianscans abgeschätzt. Die daraus resultierenden Abweichungen liegen deshalb in derselben Größenordnung. Diese Abweichungen können



(a) (b)

Bild 6: Untersuchung der systematischen Abweichungen (a), welche in der ersten Koordinatentransformation auf Basis von Kreisfits auftreten (b).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

allerdings anhand des derzeitigen Stitching-Ansatzes nicht weiter optimiert werden und führen dazu, dass die Äquatorscans mit einem Parallelversatz entlang der z-Achse durchgeführt werden. Der Einfluss auf den mittleren Radius r_0 wird als vernachlässigbar eingeschätzt, sollte allerdings durch eine Erweiterung des Modells im virtuellen Abtastvorgang berücksichtigt werden. Bei einer geplanten Erweiterung der Messstrategie auf die gesamte Kugel kann dieser Einfluss hingegen durch einen Stitching-Algorithmus berücksichtigt werden.

Um die Auswirkungen auf den ermittelten mittleren Radius r_{0ind} und die ermittelten Rundheitsabweichungen $\Delta r_{ind}(\varphi)$ zu untersuchen, wurden diese mit dem jeweiligen Werten der simulierten Kugel r_{0ref} und $\Delta r_{ref}(\varphi)$ als Referenz verglichen. Die je Messreihe maximal beobachteten Abweichungen $r_{0error} = |r_{0ind} - r_{0ref}|$ und $\Delta r_{error}(\varphi) = |\Delta r_{ind}(\varphi) - \Delta r_{ref}(\varphi)|$ sind in Bild 7 dargestellt.

Es zeigt sich, dass auch nach Anwendung des Stitching-Algorithmus systematische Fehler verbleiben. Dies wird, wie bereits erläutert, auf eine Linearisierung zurückgeführt. Die dadurch getroffene Näherung setzt Kugeln mit geringen Formabweichungen voraus, wobei die Anforderungen mit sinkendem Radius steigen.

4.2. Einfluss des Rotationsmechanismus

Um den Einfluss des Rotationsmechanismus einzuschätzen, wurde eine Monte-Carlo Simulation mit ausgewählten Kugeln durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist eine Tolerierung für die Justierstrategie und der Fertigungstoleranzen. Die Kenntnis der drei Einflussgrößen α_x, α_y und α_s beschränkt sich deshalb auf eine Gleichverteilung (Bild 8a). Zur Vereinfachung und mangels genauerer Kenntnisse gelten für alle drei die gleichen

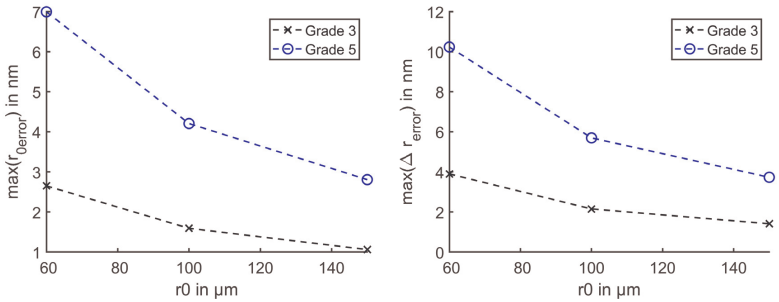


Bild 7: Einfluss des Messobjekts auf den ermittelten mittleren Radius (a) und die Rundheitsabweichungen (b).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Grenzen (β), wobei α_s keine negativen Werte annehmen kann. Nach ersten Vorversuchen [3], wird davon ausgegangen, dass am vorhandenen Versuchsaufbau die Bedingung $\beta = 0{,}15°$ eingehalten werden kann. Zur weiteren Untersuchung werden jedoch auch die Einflüsse größerer Toleranzen ($\beta = 0{,}5°$ und $\beta = 1°$) berücksichtigt.

Für die Monte-Carlo Simulation wurde aufgrund des Zeitaufwands einer einzelnen Simulation (mehrere Sekunden) ein adaptiver Ansatz nach [12, Abschnitt 7.9.4] mit nDig = 1 und M = 100 gewählt. Die numerische Toleranz δ wurde jedoch auf mindestens 0,05 nm gesetzt. Weil nur der Einfluss des Rotationsmechanismus berücksichtigt werden soll, werden die Oberflächenscans nicht durch Kreisfits zentriert. Dadurch verbleiben bei einer idealen Abtastung lediglich numerische Abweichungen.

Als Messgröße wird die Differenz des erfassten lokalen Radius zur jeweiligen virtuellen Kugel $r_{error}(\varphi) = r_{ind}(\varphi) - r_{ref}(\varphi)$ betrachtet. In Bild 8b sind beispielhaft alle Simulationen für eine Grade-5-Kugel ($l = 25$) mit $\beta = 0{,}5°$ dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass der Unsicherheitsbeitrag unter anderem von dem Polarwinkel φ abhängig ist.

Zur Zusammenfassung der Ergebnisse wird deshalb die Standardunsicherheit an 360 Positionen (1 Grad Schritte) ermittelt und der jeweils größte Wert berücksichtigt. Als Schätzwert für die Standardunsicherheit $u(r)$ wird die Standardabweichung berechnet. Mögliche verbleibende systematische Abweichungen werden wie in [13, Abschnitt 3] berücksichtigt. Bild 9 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Insgesamt ist der Einfluss bei den untersuchten Kugeln, verglichen mit dem Einfluss des Kreisfits, nicht signifikant. Erwartungsgemäß haben sich räumlich schnell ändernde Formabweichungen, Kugeln geringerer Qualität und eine höhere Toleranz des Rotationsmechanismus einen größeren Unsicherheitsbeitrag zur Folge. Ein Grenzfall stellt dabei die auf der Kugel vorhandene

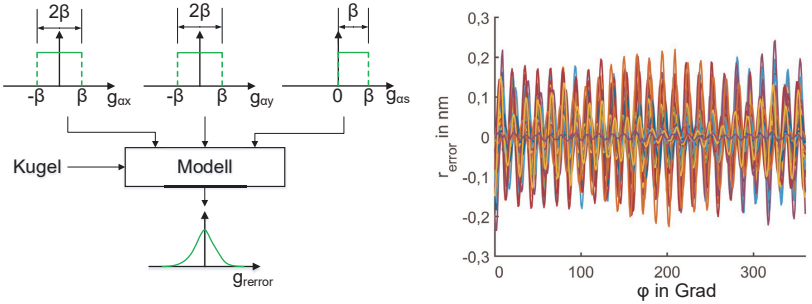
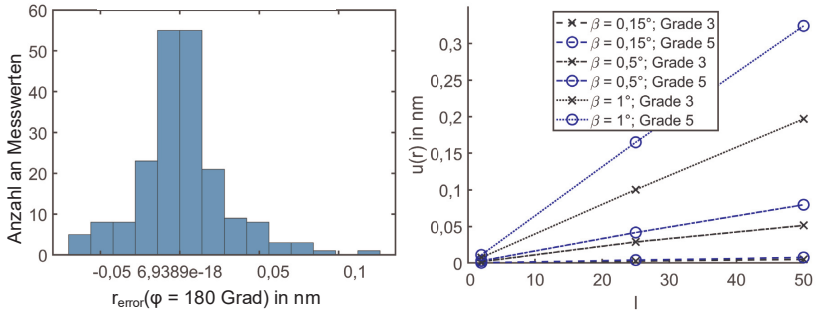


Bild 8: Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Einflussgrößen (a) und alle Simulationen einer Grade-5-Kugel ($l = 25$) mit $\beta = 0{,}5°$ (b).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Rauheit dar, welche in den Simulationen nicht berücksichtigt wurde. Es ist davon auszugehen, dass diese vollständig zur Unsicherheit beiträgt.



(a) (b)

Bild 9: Histogramm aller beobachteten Messwerten an einer Position bei der Messung einer Grade 5 Kugel ($l = 25$) mit $\beta = 0{,}5°$ (a) und das zusammengefasste Ergebnis der Untersuchungen (b).

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Anhand der durchgeführten Untersuchungen ist festzustellen, dass die erreichbare Unsicherheit der Messstrategie in der derzeitigen Implementierung signifikant von der zu messenden Kugel abhängt. Unsicherheitsangaben ähnlicher Verfahren (z.B. in [14]) welche diesen Einfluss vernachlässigen sind unter diesem Hintergrund kritisch zu betrachten.

Die beobachteten Abweichungen im Abschnitt 4.1. sind zum Teil auf bewusst eingeführte Näherungen zurückzuführen und könnten dementsprechend durch eine Veränderung des Stitching-Algorithmus reduziert werden. Ob dies jedoch erforderlich ist, hängt unter anderem von der zu messenden Kugel und der geforderten Unsicherheit ab.

Die Modellierung der hier betrachteten Effekte wird als geeignet betrachtet. Für eine routinemäßige Anwendung muss allerdings die Dauer einer Simulation (zum Teil mehrere Sekunden) deutlich reduziert und weitere Effekte im Modell berücksichtigt werden. Insbesondere eine Erweiterung zur Modellierung des Spitzeneinflusses ist in weiteren Arbeiten geplant.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieses Projekts (Projektnummer 405975441).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur

[1] Chetwynd, D. (1987): High-precision measurement of small balls. – J. Phys., 20, 1179

[2] Küng, A. u. Meli, F. (2005): Self calibration method for 3D roundness of spheres using an ultraprecision coordinate measuring machine. – Proc. 5th euspen Int. Conf., 193 – 196, Montpellier, Frankreich

[3] Oertel, E. u. Manske, E. (2021): Radius and roundness measurement of micro spheres based on a set of AFM surface scans. – Meas. Sci. Technol., 32, 044005

[4] Fang, C., Huang, Q., Xu, J., Cheng, R., Chen, L., Li, R., Wang, C. u. Zhang, L. (2019): A Measurement Method of Microspheres with Dual Scanning Probes. – Appl. Sci., 9, 1598

[5] Lawrence, G. N. u. Day, R. D. (1987): Interferometric characterization of full spheres: data reduction techniques. – Appl. Opt., 26, 22

[6] Bartl, G.: Interferometrische Bestimmung von absoluten Kugelradiustopografien. Dissertation. TU Braunschweig 2010

[7] DIN 5401:2002-08, Wälzlager – Kugeln für Wälzlager und allgemeinen Industriebedarf

[8] Politis, A. (2021): Real/Complex Spherical Harmonic Transform, Gaunt Coefficients and Rotations (https://github.com/polarch/Spherical-Harmonic-Transform). – GitHub, heruntergeladen am 25.06.2021

[9] Ivanic, J. u. Ruedenberg, K. (1996): Rotation Matrices for Real Spherical Harmonics. Direct Determination by Recursion. – J. Phys. Chem., 100, 6342 – 6347

[10] Chernov, N. (2021): Circle Fit (Pratt method). -- https://www.mathworks.com/matlabcentra l/fileexchange/22643-circle-fit-pratt-method, heruntergeladen am 18.06.2021

[11] Pratt, V. (1987): Direct Least-Squares Fitting of Algebraic Surfaces. – Computer Graphics, 21, 145 – 152

[12] JCGM 101:2008: Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte-Carlo method

[13] Härtig, F. u. Krystek, M. (2009): Correct treatment of systematic errors in the evaluation of measurement uncertainty. – The ninth international symposium on measurement technology and intelligent instruments ISMTII-2009

[14] Fang, C., Huang, Q., Ding, X., Cheng, R., Zhang, L., Wang, C., Mei, J. u. Li, H. (2020): Measurement and uncertainty evaluation of the microsphere used for micro-CMM probe. – Meas. Sci. Technol., 31, 025004

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Messunsicherheitsbudgets in der Oberflächentechnik

Stufenhöhe, Schichtdicke, Eindringhärte, Haftfestigkeit

U. Beck, **A. Hertwig**, **M. Griepentrog**, **S. Hielscher**, **T. Lange**, **M. Weise**, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kurzfassung

Die Messung und Prüfung von physikalischen bzw. Werkstoffkenngrößen verlangt immer auch die Angabe des Vertrauensbereiches, eines Toleranzbandes oder wenigstens den Nachweis des Erreichens eines spezifizierten Sollwertes. Dies ist im Bereich der Ober-flächentechnik oft noch eine Herausforderung, da Schichtkenngrößen nicht unabhängig vom Substrat betrachtet werden können und im Mikro- und Nanobereich in vielen Fällen auch Eigenschaften der Messsonde nicht vernachlässigbar sind. Zunächst wird der konzeptionelle Unterschied zwischen Messen und Prüfen erläutert, dann die Bestimmung der Mess-unsicherheit als kombinierter erweiterter Unsicherheit einer Messung oder quantitativen Prüfung formelmäßig beschrieben und schließlich auf die Begrifflichkeiten Präzision, Richtig-keit und Genauigkeit eingegangen. Danach werden Messunsicherheitsbetrachtungen für die zerstörungsfreie Messung der Stufenhöhe h mittels Weißlichtinterferenzmikroskopie (WLIM), der zerstörungsfreien Bestimmung der Schichtdicke d mittels spektroskopischer Ellipsome-trie (SE), der minimal-invasiven Prüfung der Eindringhärte H_{IT} mittels instrumentierter Eindringprüfung (IIT; en: Instrumented Indentation Testing) und der zerstörenden Prüfung der Schicht-Substrat Systemeigenschaft Haftfestigkeit σ_A mittels Stirnabzugsprüfung in einer analytischen Zentrifuge (CAT; en: Centrifugal Adhesion Testing) durchgeführt. Dabei wird auf die Verwendung von Standards und Referenzmaterialien eingegangen sowie unterschied-liche Einflussgrößen diskutiert. Einer der Vorteile der zerstörungsfreien Messung (h und d) liegt darin, dass Wiederholungsmessungen am selben Messort möglich sind und so eine Wiederholpräzision ohne jeden Materialeinfluss bestimmt werden kann. Schon bei minimal-invasiven Prüfungen (H_{IT}) sind Wiederholungsmessungen am selben Messort *per se* nicht möglich und jede Statistik beinhaltet deshalb auch immer etwaige Inhomogenitäten des Materials. Bei der zerstörenden Prüfung der Schicht-Substrat Systemeigenschaft Haftfestig-keit σ_A muss man sich in der Regel statt der Angabe einer Messunsicherheit mit der Angabe

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

eines Schwellwertes begnügen, u.a. weil in den Bruchbildern über die makroskopisch ausgedehnte Prüffläche verschiedene Versagensformen auftreten.

1. Oberflächentechnik und Messunsicherheitsbudgets

Grundsätzlich müssen bei der Bestimmung der Messunsicherheit und der Betrachtung von Messunsicherheitsbudgets auch in der Oberflächentechnik die Anforderungen des GUM [1] erfüllt werden. Als Besonderheit ist in der Oberflächentechnik festzuhalten, dass die interessierenden Kenngrößen der Oberflächenmodifizierung nicht unabhängig vom Substrat, das oft nur als mechanischer Träger der Funktionalisierung fungiert, betrachtet werden können. Als Beispiel sei die Schichtdicke einer funktionellen Schicht und die Rauheit des funktionalisierten Substrats genannt. An der Grenzfläche Schicht/Substrat ergibt sich dann speziell im Mikro- und Nanobereich oft die Frage, ob und in welcher Weise die Rauheitsgrenzschicht zu berücksichtigen ist. Hinzu kommt, dass Schichten und Schichtsysteme als Oberflächenmodifizierungen auf dem Bauteil einerseits oft lateral-global, d.h. makroskopisch ausgedehnt sind, andererseits Kenngrößen, wie zum Beispiel die Schichtdicke, vertikal-lokale Merkmale in mikros- bzw. nanoskopischer Ausprägung sind. Wegen der ggf. vorhan-denen lateralen Inhomogenität sind deshalb Mapping- bzw. Imaging-Verfahren zur orts-aufgelösten Bestimmung der interessierenden Kenngrößen unverzichtbar.

Neben der Frage, ob es sich um eine lokale Kenngröße (Stufenhöhe, Schichtdicke, Eindringhärte) oder um eine globale Kenngröße (Haftfestigkeit) handelt, ist zudem von Belang, ob eine metrologische, d.h. SI-rückfahrbare Messgröße (Stufenhöhe, Schichtdicke), eine prüftechnische, oft durch Normen untersetzte, Bestimmung einer Werkstoffkenngröße (Eindringhärte) oder aber eine Systemeigenschaft (Haftfestigkeit) vorliegt. Neben dem möglichen Substrateinfluss ist immer auch eine Schichtdickenabhängigkeit in Erwägung zu ziehen. Die Methodiken des Messens (en: measurement) und Prüfens (en: testing) sind in [2] prägnant zusammengefasst. Das Konzept zur Angabe einer Messunsicherheit nach [1] ist für metrologische Messungen und quantitative Prüfungen direkt SI-rückführbarer Größen durchgehend umzusetzen. In diesem Sinne sind Messungen und quantitative Prüfungen synonym zu sehen. Für quantitative Prüfungen nicht direkt SI-rückführbarer Kenngrößen (Härte) können Referenzmaterialien (Härtevergleichsplatten) verwendet werden oder falls diese kommerziell nicht verfügbar sind (Eindringhärte), muss das gesamte Messunsicherheitsbudget aller für die Eindringhärte relevanten Einflussgrößen betrachtet werden. Für semi-quantitative oder qualitative Prüfungen sind entsprechend validierte Aussagen zur Unsicherheit bzw. Richtigkeit des Prüfergebnisses zu machen. Für Prüfergebnisse mit Boolschem Charakter (Prüfung

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

bestanden: ja/nein) bleibt oft nur die Validierung der Einhaltung der Prüfparameter und Prüfbedingungen.

Die Angabe einer Messunsicherheit ist heutzutage in Wissenschaft und Technik unver-zichtbar und wird oft umso aufwendiger, je mehr die Messung den Mikro- und Nanobereich betrifft, da zunehmend Eigenschaften der Mess- bzw. Prüfsonde eine Rolle spielen. Auch ist zwischen zerstörungsfreien, minimal-invasiven und zerstörenden Prüfungen zu unterschei-den. Bei zerstörungsfreien Prüfungen [Stufenhöhe mittels Weißlichtinterferenzmikroskopie (WLIM); Schichtdicke mittels spektraler Ellipsometrie (SE)] kann die Messung beliebig oft an derselben Stelle wiederholt werden. Die Bestimmung einer Wiederholpräzision ist ohne den etwaigen Einfluss der Inhomogenität des Materials möglich. Bei minimal-invasiven Prüfungen [Bestimmung der Eindringhärte mittels Instrumentierter Eindringprüfung (IIT)] oder gar bei zerstörenden Prüfungen [Haftfestigkeit mittels Centrifugal Adhesion Testing (CAT)] ist eine Wiederholung der Prüfung an derselben Stelle einer Probe (IIT) bzw. an derselben Probe (CAT) nicht möglich. Die Angabe einer Präzision aus wiederholten Messungen setzt dann voraus, dass die Proben auf der Probe (en: intra-sample) bzw. von Probe zu Probe (en: inter-sample) homogen sind. Die Präzision der Messung der physikalischen Größe x wird generell durch die Standardabweichung $s(x)$ erfasst, wobei mindestens n = 5 Wiederholungs-messungen verlangt werden. Die Standardunsicherheit $u(\bar{x})$ des Mittelwertes $\bar{x}$ der Mess-reihe und dessen erweiterte Standardunsicherheit $U(\bar{x})$ ergeben sich entsprechend den Gleichungen 1 und 2.

$$u(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

$$U(\bar{x}) = k\,u \quad (2)$$

Dabei wird für die erweiterte Standardunsicherheit als statistischer Anteil der Unsicherheit in der Regel der Erweiterungsfaktor k = 2 verwendet (95% statistische Sicherheit, ohne Betrachtung der Anzahl der Freiheitsgrade ν der Messung). Zu berücksichtigende systemati-sche Anteile der Unsicherheit stehen entweder mit dem Mess- bzw. Prüfgerät und ggf. verwendeten Standards bzw. Referenzmaterialien zur Gerätekalibrierung bzw. -überprüfung in Zusammenhang. Wird ein Standard bzw. Referenzmaterial verwendet, ist nicht nur die statistische Unsicherheit der Messung der Probe (en: sample) nach Gleichung 1 sondern auch die statistische Unsicherheit der Messung der Referenz (en: reference) in einer Messreihe [en: series of measurement (som)] mit mindestens 5 Wiederholmessungen einzubeziehen. Hinzu kommen die zertifizierte Standardunsicherheit $u_{\text{reference}}$ des Standards bzw. des Referenzmaterials und alle systematischen Anteile der Standardunsicherheit $u_{\text{systematic}}$ des

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2_{som,\,sample} + u^2_{reference} + \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2_{som,\,reference} + u^2_{systematic}} \quad (3)$$

Mess- bzw. Prüfgeräts, die relevant für das Mess- bzw. Prüfergebnis sind. Für gleichberechtigte, nicht gekoppelte Standardunsicherheiten ergibt sich dann die kombinierte Standardunsicherheit u_c nach Gleichung 3.

Darin werden statistische und systematische Unsicherheitsbeiträge zusammenführt. Die erweiterte kombinierte Unsicherheit $U_c(\bar{x})$ ergibt sich mit dem Erweiterungsfaktor k analog zu Gleichung 2 gemäß Gleichung 4.

$$U_c(\bar{x}) = k\, u_c \quad (4)$$

Nur $U_c(\bar{x})$ darf als **Mess**unsicherheit bezeichnet werden und beschreibt den Vertrauensbereich des Mittelwertes der Messung und ist das Maß für die Genauigkeit (en: accuracy), das sich aus der Präzision (en: precision) als statistischem Unsicherheitsbeitrag und der Richtigkeit (en: trueness) als systematischem Unsicherheitsbeitrag zusammensetzt. Die Ge-nauigkeit einer statistischen Messung beinhaltet für invasive und zerstörende Prüfungen somit auch immer die Inhomogenität auf der Probe bzw. von Probe zu Probe.

Bei vielen Mess- und Prüfverfahren kommt man insbesondere im Mikro- und Nanobereich nicht mehr ohne Modellierung aus. Die Richtigkeit des Modells bestimmt dann die Mess-unsicherheit zum Teil wesentlich. Die Ellipsometrie ist eine Methode mit extrem hoher Präzision, die für die Schichtdicke d auch für reale Proben im unteren pm-Bereich liegen kann. Aber selbst für ideale Materialkombinationen mit hohem optischem Kontrast und verschwin-dender Grenzflächenrauheit wie SiO_2-Schichten auf Si-Wafern wird im Ergebnis der erreich-baren Richtigkeit (insbesondere der im Modell/im Fit verwendeten optischen Konstanten) bestenfalls eine Genauigkeit von 0,1 nm erreicht.

Die GUM-konforme Beschreibung von Messergebnissen ist zudem Voraussetzung zur Erfüllung der Anforderungen nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, die für akkreditierte Prüflaboratorien relevant ist. Die BAM stellt zudem eine Reihe von Referenzverfahren bereit, die diese Anforderungen in besonderer Weise erfüllen und sich durch eine durchgehende Validierungsstrategie auszeichnen. Im Bereich der Oberflächentechnik gehören die Weißlicht-interferenzmikroskopie (WLIM), die Spektroskopische Ellipsometrie (SE) und die Instrumentierte Eindringprüfung (IIT) zu den BAM-Referenzverfahren [3], die in diesem Beitrag ergänzt

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

durch das nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditierte Verfahren der Zentrifugentechnologie zur Bestimmung der Haftung (CAT) vorgestellt werden.

2. Weißlichtinterferenzmikroskopie (WLIM) zur Bestimmung der Stufenhöhe h

Die Weißlichtinterferenzmikroskopie ist ein optisch-zerstörungsfreies Messverfahren bei senkrechtem Lichteinfall zur Bestimmung von lateralen und vertikalen Merkmalen der Oberflächentopographie im Imaging-Mode. Man erhält im Gesichtsfeld sofort ein Abbild der gesamten Topographie, jeder Pixel ist ein Messpunkt. Der einfachste Fall modifizierter Oberflächen ist eine geätzte Stufe (mit scharfen Kanten) einer Einfachschicht auf einem Substrat. Die Bestimmung der Stufenhöhe h als Messgröße der SI-Basiseinheit Länge erfolgt direkt. Unterschiedliche Phasensprünge beidseits der Stufe sind wegen der verschiedenartigen Materialien zu korrigieren oder durch eine metallische nichttransparente Deckschicht, die gleiche Reflexionsbedingungen beidseits der Stufe garantiert, zu eliminieren. Die Korrektur setzt dann die Kenntnis der optischen Konstanten des Schicht- und des Substratmaterial voraus, entweder aus Datenbankwerten oder mittels Ellipsometrie bestimmt. Da Datenbankwerte leicht von den realen Materialien abweichen können, ist die ellipsometrische Bestimmung am realen Material zu bevorzugen. Die Berücksichtigung dieser Unsicherheitsbudgets ist aber nicht trivial, weshalb beidseits der Stufe oft mit metallischen Deckschichten, vorzugsweise aus Chrom, gearbeitet wird. Bild 1 zeigt einen mit Chrom beschichteten Stufenhöhenstandard, der zu Validierungszwecken als Probe verwendet wurde. Dabei wurden n = 5 Messungen an unterschiedlichen Stellen im zertifizierten Bereich vorgenommen, die Inhomogenität der Stufenhöhe ist dabei sehr gering.

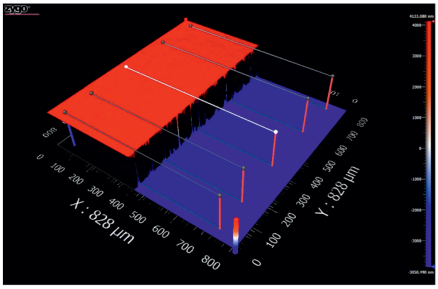


Bild 1: Zertifizierter Stufenhöhenstandard h_{sample} = (7871 ± 64) nm als Probe

Das Messystem arbeitet nach dem Prinzip der Coherence Scanning Interferometry (CSI) welches in [4] beschrieben ist. Insgesamt steht ein z-Scanbereich von bis zu 145 µm zur Verfügung. Auf Grund des Messprinzips ist vom Gerätehersteller eine Gerätekalibrierung mit

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

einem Stufenhöhenstandard $h_{reference}$ = (1796 ± 10) nm, also unüblicherweise am Anfang des Messbereiches liegend, vorgeschrieben. Die Unsicherheitsbudgets setzen sich dann wie folgt zusammen:

a) Die Gerätecharakterisierung liefert als Rauschen ±2 nm, was unter Annahme einer Rechteckverteilung gemäß [1] in eine Standardunsicherheit des Messsystems u_{system} umgerechnet werden kann: u_{system} = 2 nm/√3 = 1,15 nm.

b) Die zertifizierte erweiterte (k = 2,31 bei ν = 8) kombinierte Unsicherheit des Stufenhöhenstandards beträgt 10 nm, was einer Standardunsicherheit von $u_{reference}$ = 10 nm/2,31 = 4,33 nm entspricht.

c) Die Messung des Stufenhöhenstandards in einer Messreihe mit n = 5 (d.h. ν = 4) ergibt als Standardunsicherheit $u_{som,\ reference}$ = 0,16 nm.

d) Die Messung der Probe (Stufenhöhenstandard in Bild 1) in einer Messreihe mit n = 5 (d.h. ν = 4) liefert als Standardunsicherheit $u_{som,\ sample}$ = 2,9 nm.

Mit a) bis d) ergibt sich nach Gleichung 3 als kombinierte Standardunsicherheit u_c = 5,34 nm und schließlich eine mit k = 2,36 (t-Studentverteilung für 95% Sicherheit und ν_{eff} = 7) erweiterte kombinierte Unsicherheit U_c (= Messunsicherheit) von $\boldsymbol{U_c}$ **= 13 nm**. Das Messer-gebnis kann dann nach Gleichung 5 quantitativ angegeben werden,

$$h = (7884 \pm 13)\ \text{nm} \tag{5}$$

wobei die effektive Zahl der Freiheitsgrade ν_{eff} gemäß Gleichung 6 berechnet wurde.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4}{\nu_i}} \tag{6}$$

Auffällig ist hierbei, dass die nach Gleichung 5 berechnete Messunsicherheit von ± 13 nm für k = 2,36 der Probe, die ein Standard ist, deutlich kleiner als die zertifizierte Unsicherheit dieses Standards von ± 64 nm für k = 2 ist. Nach den Gleichungen 3 und 4 muss die Messunsicherheit der Probe immer größer sein als *die Unsicherheit der zur Gerätekalibrierung verwendeten Referenz* und zur Kalibrierung verwendet wurde ein Standard mit einer Unsicherheit von ± 4,33 nm für k = 2,31. Die Verfügbarkeit und Verwendung von eng tolerierten zertifizierten Standards sind somit unabdingbar.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Spektroskopische Ellipsometrie (SE) zur Bestimmung der Schichtdicke *d*

Die Spektroskopische Ellipsometrie ist ein optisch-zerstörungsfreies Messverfahren bei schrägem Lichteinfall zur Bestimmung von Schichtdicken und optischen bzw. dielektrischen Materialkonstanten im Mapping- oder Imaging-Mode. Im Mapping-Mode wird sequentiell typischerweise über Messflächen zwischen 0,1 mm^2 und 0,5 mm^2 integriert. Im Imaging-Mode erhält man im Gesichtsfeld sofort ein Abbild der gesamten Oberfläche, jeder Pixel ist ein Messpunkt mit einer Auflösung im unteren µm-Bereich. Der einfachste Fall modifizierter Oberflächen ist die transparente Einfachschicht auf einem stark reflektierenden Substrat. Die Bestimmung der Schichtdicke d als Messgröße der SI-Basiseinheit Länge erfolgt indirekt auf Basis eines Modells über einen parametrisierten Fit aus den ellipsometrischen Transfergrößen Ψ (Amplitudenverhältnis) und Δ (Phasendifferenz). Voraussetzung für die Bestimmung der Schichtdicke ist materialseitig, dass die Schicht im betreffenden Spektralbereich wenigstens semitransparent ist, d. h. die Schicht-Substrat Grenzfläche noch auf die ellipsometrischen Transfergrößen Ψ und Δ Wirkung entfaltet. Die mittlere quadratische Abweichung (MSD, en: mean squared deviation) zwischen gemessenen und auf Basis eines Modells gefitteten Transfergrößen wird als Maß für die Fitgüte herangezogen. Als Probe wird der besseren Nachvollziehbarkeit wegen wieder ein zertifizierter Standard verwendet. Es handelt sich dabei um eine SiO_2-Schicht auf Silizium, zertifiziert von der PTB für k = 2 mit d = (69,1 ± 0,9) nm. Für die Schichtdicke d als gefitteter Parameter ist in Bild 2 die normierte Funktion MSD = MSD (d) dargestellt.

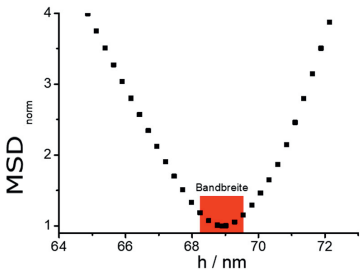


Bild 2: Sensitivitätsanalyse der MSD-Funktion zur Bewertung der Fitgüte

Die sich aus dem Fit auf Basis des verwendeten Modells (transparente SiO_2-Einfachschicht auf Silizium) ergebende Schichtdicke d = 68,9 nm entspricht dem Minimum der MSD-Funktion. Die Ellipsometrie hat eine sehr hohe Präzision. Wiederholungsmessungen (am selben Messort) und auch eine Wiederholung des Fits unter gleichen Fitbedingungen liefern

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

praktisch immer die gleichen Ergebnisse und sind in der Unsicherheitsbetrachtung oft vernachlässigbar. Der dominierende Unsicherheitsbeitrag resultiert aus dem gewählten Modell (hier transparente Einfachschicht) und den verwendeten optischen Konstanten (hier SiO_2 und Si). Die Standardunsicherheit des Modells wird nun aus der Bandbreite $2a$ des MSD-Minimums entsprechend Bild 2 durch ein selbst definiertes Kriterium nach Gleichung 7 abgeleitet.

$$\text{MSD} < 1{,}1\ \text{MSD}_{\text{min}} \text{ bis MSD} < 2\ \text{MSD}_{\text{min}} \tag{7}$$

Für ideale Materialien und gut validierte Modelle, die in der Regel ein ausgeprägtes MSD-Minimum aufweisen, wird entsprechend Gleichung 7 das 10% Kriterium, für reale Materialien und weniger gut validierte Modelle das 100%-Kriterium Anwendung finden. Wählt man im vorliegenden Fall das 10%-Kriterium, ergibt sich für die Bandbreite $2a$ = 2,6 nm. Die Unsicherheitsbudgets setzen sich dann wie folgt zusammen:

a) Die Standardunsicherheit des Modells wird aus der Bandbreite $2a$ unter der Annahme einer Rechteckverteilung gemäß [1] in $u_{\text{model}} = a/\sqrt{3}$ = 0,751 nm umgerechnet.

b) Die zertifizierte erweiterte (k = 2) kombinierte Unsicherheit des Schichtdickenstandards beträgt 0,9 nm, was einer Standardunsicherheit $u_{\text{reference}}$ = 0,9 nm /2 = 0,45 nm entspricht.

c) Die Messung des Schichtdickenstandards als Referenz in einer Messreihe mit n = 5 ergibt als Standardunsicherheit $u_{\text{som, reference}}$ = 0,014 nm.

d) Die Messung der Probe (***desselben*** Schichtdickenstandards) in einer Messreihe mit n = 5 liefert als Standardunsicherheit analog $u_{\text{som, sample}}$ = 0,014 nm.

Als gekoppelte Größen müssen die Standardunsicherheiten a), c) und d) linear addiert werden, was auf u_{sample} = 0,779 nm führt. Unter Verwendung von Gleichung 3 wird das Er-gebnis zusammen mit der Standardunsicherheit b) als nicht gekoppelte Größen geometrisch addiert, was unter Verwendung des Erweiterungsfaktors k = 2 eine erweiterte kombinierte Unsicherheit U_c **= 1,8 nm** ergibt. Das Messergebnis lautet dann nach Gleichung 8 quantitativ:

$$d = (68{,}9 \pm 1{,}8)\ \text{nm} \tag{8}$$

Im Ergebnis bestimmen also selbst für ideale Proben die Unsicherheit des Modells und die Unsicherheit des Standards das Ergebnis. Somit ist die Verfügbarkeit von validierten Modellen und eng tolerierten zertifizierten Standards unabdingbar.

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Instrumentierte Eindringprüfung (IIT) zur Bestimmung der Eindringhärte H_{IT}

Die instrumentierte Eindringprüfung ist ein mechanisch minimal-invasives Prüfverfahren mit senkrechtem Eindringen eines Prüfkörpers (Indentors) in eine Oberfläche zur Bestimmung der plasto-elastischen Materialeigenschaften insbesondere der Eindringhärte H_{IT} und des Eindringmoduls E_{IT} im Mapping-Mode. Der einfachste Fall ist die Bestimmung der Eindringhärte einer nicht zu dünnen, relativ duktilen Schicht auf einem harten, d.h. tragfähigen Substrat. Nach der klassischen Härtedefinition ist auch die Eindringhärte durch die wirkende Maximalkraft F_{max} und die projizierte Kontaktfläche A_p gemäß Gleichung 9 definiert.

$$H_{IT} = F_{max} / A_p\,(h_c) \tag{9}$$

Dabei wird bei der Eindringhärte H_{IT} die projizierte Kontaktfläche A_p von der Kontakttiefe h_c bestimmt, wobei die Geometrie des Eindringkörpers durch die Indentor-Flächenfunktion $A_p(h)$ Berücksichtigung findet. Im Gegensatz zur klassischen Härteprüfung bezieht sich Gleichung 9 aber auf einen Zustand *unter Last*, denn die elastischen Anteile der Verformung würden anderenfalls nach Entlastung relaxieren, d.h. der Eindringmodul E_{IT} wäre gar nicht zugänglich. Allerdings ist die Kontakttiefe h_c unter Last experimentell nicht messbar. Im Gegensatz zur klassischen Härteprüfung erfolgt deshalb die Bestimmung der Eindringhärte H_{IT} als Werkstoffkenngröße mit der Dimension Kraft pro Fläche über die Auswertung der Last-Eindringtiefen-Kurve (Kraft F vs. Eindringtiefe h). Zur Bestimmung der Eindringhärte H_{IT} wird der Anstieg ($\mathrm{d}F/\mathrm{d}h$) der Entlastungskurve bei maximaler Kraft F_{max} bzw. maximaler Eindringtiefe h_{max} nach dem Oliver-Pharr Algorithmus [5] verwendet, woraus h_c gemäß Gleichung 10 berechnet werden kann.

$$h_c = h_{max} - \varepsilon\, F_{max}/(\mathrm{d}F/\mathrm{d}h) \text{ für } h = h_{max} \tag{10}$$

Mit der Kenntnis der Kontakttiefe h_c und unter Verwendung der Indentor-Flächenfunktion sowie Gleichung 9 kann dann die Eindringhärte H_{IT} berechnet werden. Im Gegensatz zur klassischen Härteprüfung und zu den Messverfahren der Abschnitte 2 und 3 existieren allerdings für die Eindringhärte keinerlei zertifizierte Standards oder Referenzmaterialien. Quarzglas (en: fused silica) wird oft als Referenzmaterial für E_{IT} verwendet. In Bild 3 sind fünf Indentationen mit einem Berkovic-Indentor (3-seitige Pyramide) dargestellt, die bei der invasiven Eindringprüfung an unterschiedlichen Stellen in hinreichendem Abstand vonein-ander durchgeführt wurden und somit auch die Inhomogenität des Materials beinhalten. Als Mittelwert dieser Messungen ergibt sich H_{IT} = 8,82 MPa. Als systematische Unsicherheitsanteile, die im Ergebnis der Gerätekalibrierung bezüglich Kraft F(Kraftmessdose) und Weg h

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

(Interferometer) auftreten sowie mit der Bauart des Messsystems (Nachgiebigkeit des Rahmens bzw. Steifigkeit der Stützfedern) zusammenhängen, bleibt für die Bestimmung der zufälligen Anteile der Unsicherheit, da für die IIT keine Referenzmaterialien verfügbar sind, nach DIN EN ISO 14577 Teil 1, *Metallic materials - Instrumented indentation test for hard-ness and material parameters*, Annex H nur die Methode 2 *Bestimmung der zufälligen Unsicherheit über die vollständige Quantifizierung aller identifizierten Unsicherheitsbeiträge*. Eine detaillierte zahlenmäßige Darstellung ist hier nicht möglich, die zu erfassenden Unsicherheitsbeiträge sind: Standardunsicherheit u_{hmax} in der Bestimmung von h_{max}, Standardunsicherheit u_z in der Bestimmung der Oberflächendetektion, Standardunsicherheit u_{Fmax} der Maximalkraft, Standardunsicherheit u_s der Nachgiebigkeit, Standardunsicherheit u_{hc} der Kontakttiefe h_c und die Standardunsicherheit in der projizierten Kontaktfläche $A_p(h_c)$.

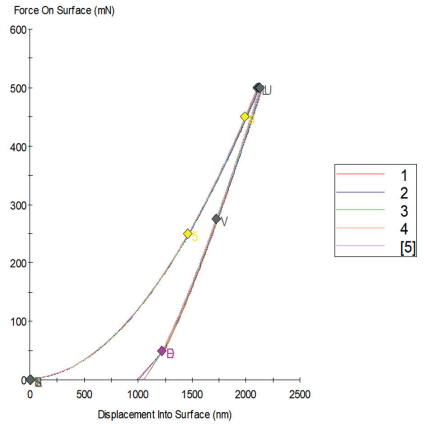


Bild 3: Last-Eindringtiefen-Kurven (n = 5) eines Berkovich Eindringkörpers in Quarzglas

Die systematischen Unsicherheitsbeiträge der Kalibrierung und die Mittelwerte der zufälligen Unsicherheitsbeiträge aus den Einzelmessungen werden dann unter Verwendung von Gleichung 3 zur kombinierten Standardunsicherheit u_c = 0,23 MPa zusammengeführt. Mit dem Erweiterungsfaktor k = 2 ergibt sich für die erweiterte kombinierte Standardunsicherheit U_c = 0,46 MPa. Das Messergebnis lautet dann gemäß Gleichung (11).

$$H_{IT} = (8{,}82 \pm 0{,}46)\ \text{MPa} \qquad (11)$$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Eine Messunsicherheit von nur etwa 5% ist natürlich auch der Tatsache geschuldet, dass bei Quarzglas als Probe praktische keine Inhomogenitätseinflüsse eingehen.

5. Centrifugal Adhesion Testing (CAT) zur Bestimmung der Haftfestigkeit σ_A

Die Zentrifugentechnologie zur Bestimmung von Festigkeiten ist ein mechanisch zerstörendes Prüfverfahren. Prüfkraft ist die auf einen aufgeklebten Prüfstempel wirkende Zentrifugalkraft F_Z, die sich mit der Masse m des Prüfkörpers, der Winkelgeschwindigkeit ω des Trommelrotors und dem Abstand r der Drehachse vom Massenmittelpunkt des Prüfstempels gemäß Gleichung 12 ergibt.

$$F_Z = m\,\omega^2\,r \tag{12}$$

Messgröße ist immer die Verbundfestigkeit σ (Festigkeit bei Versagen des Prüfkörperverbundes) gemäß Gleichung 13 mit der Dimension Kraft pro Fläche.

$$\sigma = F_Z / A \tag{13}$$

Die Betrachtung der systematischen Anteile (Masse m, Winkelgeschwindigkeit ω, Abstand r, Klebfläche A) zeigt, dass diese mit Ausnahme der Klebfläche A vernachlässigbar sind. Die Erfassung der Unsicherheit der Klebfläche A ist mit schwer erfassbaren Einflussgrößen behaftet: Klebwulst (Klebstoffüberschuss), nicht klebende Bereiche (Klebstoffdefizit), unterschiedliche Klebschichtdicken, unterschiedliche Elastizität der Klebstoffe und unterschiedliche Oberflächenzustände. Die genannten Einflussgrößen führen dazu, dass bei der Bestimmung der Haftfestigkeit σ_A einer Einfachschicht an der Schicht-Substrat Grenzfläche nur in seltenen Fällen reines Delaminationsversagen (DIN EN 10365) auftritt. Hinzu kommt, dass bei der zerstörenden mechanischen Prüfung des Schicht-Substrat Verbundes immer auch die plasto-elastischen Eigenschaften des Substrats (elastische Verformung, z.B. Durch-biegung) und des verwendeten Klebstoffs zu berücksichtigen sind, die Querkräfte induzieren können. Bild 4 zeigt ein Beispiel einer CAT-Prüfung für SiO_2-Schichten auf unterschiedlich dicken (2 mm, 4 mm, 8 mm) CR39 Polymersubstraten. Für die mit 2 mm dünnsten Substrate wird nach der Prüfung durch Inspektion der Bruchflächen insbesondere kohäsives Substrat-versagen (en: cohesive substrate failure, CSF) festgestellt, da nicht zu vermeiden ist, dass sich die Substrate bei der Prüfung durchbiegen. Für 4 mm und 8 mm dicke Substrate wird vorwiegend adhäsives Versagen (en: adhesive failure, AF) des Klebstoffs auf der Einfach-schicht beobachtet. Das für die Angabe der Haftfestigkeit σ_A notwendige Schadensbild reines

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Delaminationsversagen (en: delamination failure, DF) wird bei der Prüfung aber gar nicht beobachtet, weil die Klebfestigkeit des Klebstoffs auf der Einfachschicht offensichtlich geringer ist als die Haftfestigkeit der SiO_2-Schicht auf dem CR39 Substrat. Da die CAT-Prüfung mit bis zu n = 8 Prüfkörpern gleichzeitig durchgeführt werden kann, ist dies auch statistisch gesichert, sogar mit einer relativ kleinen Standardunsicherheit von ca. 1 MPa wie in Bild 4 ersichtlich. Die Haftfestigkeit σ_A wird somit über dem gemessenen Mittelwert der Verbundfestigkeit von ca. 8,5 MPa abzüglich der Standardunsicherheit von ca. 1 MPa liegen.

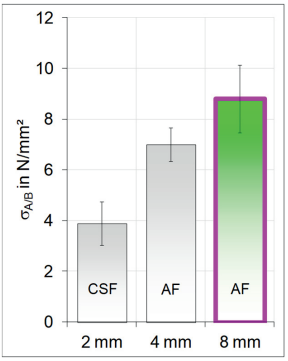


Bild 4: CAT-Prüfung zur Bestimmung der Haftfestigkeit von SiO_2-Schichten auf unterschiedlich dicken CR39 Polymersubstraten (2 mm, 4 mm bzw. 8 mm)

Die Angabe einer Messunsicherheit ist in diesem Falle weder möglich noch sinnvoll. Sinnvoll auch deshalb nicht, weil die Spezifikation von Festigkeiten nie über Mittelwert und Messunsicherheit, sondern immer über zu garantierenden Mindestwerte vorgenommen wird, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Anwendungen. Das Messergebnis könnte also z.B. gemäß Gleichung 14 angegeben werden.

$$\sigma_A \geq 7{,}5 \text{ MPa} \tag{14}$$

Obwohl die Messunsicherheit für die Verbundfestigkeit σ gemäß Gleichung 13 berechnet (m, ω, r, A_{nominal}) werden könnte und vom Gerätehersteller auch drehzahlabhängig (für k = 2 zwischen 4,4 % und 2,9 % liegend) angegeben wird, erscheint es nicht sinnvoll, den daraus resultierenden Beitrag von maximal 0,3 MPa als Unsicherheit im Prüfergebnis auszuweisen, denn das Nichtvorliegen des relevanten Schadensbildes DF, mögliche Mischbrüche, plastoelastische Eigenschaften des Klebstoffs und des Substrats sowie die Substratdicke von

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Polymeren haben ggf. ein weit größeren Einfluss auf das Prüfergebnis. Mit der Angabe einer Messunsicherheit würde ein Vertrauensbereich vorgetäuscht, der tatsächlich nicht existiert.

[1] ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 “Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)”
[2] H. Czichos, Metrologist Vol. 8 No. 3, July 2015, 30-33
[3] https://rrr.bam.de/RRR/Navigation/EN/Reference-Procedures/reference-procedures.html
[4] Peter J. de Groot and Xavier Colonna de Lega, Proc. of SPIE Vol. 7064 70640I-3
[5] W. C. Oliver, G.M. Pharr, J. Mater In: Res. 7, 1992, S. 1564.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Nach der Neudefinition des Kilogramms: Darstellung kleiner Kräfte heute

Prof. Dr.-Ing. **Thomas Fröhlich**, Technische Universität Ilmenau

Kurzfassung

Seit dem 20. Mai 2019 gilt das neue Internationale Einheitensystem SI. Nach seiner Neudefinition basiert das Kilogramm nicht mehr auf dem Urkilogramm sondern auf dem Zahlenwert der Planck-Konstante. Da die Kraft bislang über die Masse rückgeführt wurde, öffnen sich aber auch für deren Definition neue Wege - insbesondere für Kräfte kleiner als 1 N.

Abstract (optional)

The new International System of Units (SI) has been in effect since May 20, 2019. After its redefinition, the kilogram is no longer based on the International Kilogram Prototype but on the numerical value of the Planck constant. Since the force has so far been traced back using the mass, new paths are also opening up for its definition - especially for forces less than 1 N.

1. Einleitung

Im November 2018 hatte die Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) auf ihrer 26. Sitzung beschlossen, das Internationale Einheitensystem (SI) neu zu ordnen. Seit dem 20. Mai 2019 ist dieses in Kraft und das Kilogramm aus dem Jahr 1889 neu definiert, indem der numerische Wert der Planck-Konstante *h* festgelegt wird [1,2,6,8,10,16,19,31,43]. Der Wortlaut der seitdem weltweit und einheitlich gültigen Definition ist:

> Das Kilogramm (Symbol kg) ist die SI-Einheit der Masse. Es wird definiert durch die Konstante des Planck'schen Wirkungsquantums *h*. Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf $6{,}62607015 \cdot 10^{34}$ festgelegt, wenn sie in der Einheit J·s bzw. $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ angegeben wird und die Sekunde und der Meter durch $\Delta\nu_{Cs}$ und *c* definiert sind.

Um den numerischen Wert der Planck-Konstante *h* experimentell zu ermitteln, haben die Metrologischen Staatsinstitute weltweit und das Internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM) seit mehreren Jahrzehnten an unterschiedlichen Experimenten geforscht [4,5,15]: Nur zwei

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

grundlegend verschiedene Wege erlauben derzeit ausreichend kleine Messunsicherheiten als Basis für eine neue Kilogramm-Definition. Einerseits die Rückführung auf die elektrischen Einheiten Volt und Ampere, die sogenannten Wattwaagen oder zu Ehren des Erfinders Bryan Peter Kibble (1938 – 2016) „Kibble-Waagen“ – das Prinzip, wie es heute verwendet wird, wurde erstmals 1976 von ihm vorgeschlagen – und andererseits die Bestimmung der Anzahl von Atomen innerhalb einer einkristallinen 1kg Kugel aus isotopenreinem Silizium 28.

Die wichtigsten von der SI-Basiseinheit Kilogramm abgeleiteten physikalischen Größen in der Prozessmesstechnik sind Dichte, Massestrom, Druck, Kraft und Drehmoment. Auch hier wird sich die Neudefinition auswirken, weil bisher die Fundamentalmethoden auf rückführbar kalibrierte Massenormale aufbauten. Im vorliegenden Artikel beschränken wir uns auf die Messung und die fundamentale Darstellung von Kräften im Bereich unterhalb von 1 N. Durch die Neudefinition ergeben sich viele neue Möglichkeiten, die in den nächsten Abschnitten näher erläutert werden.

Kraftsensoren werden oft in Anwendungen genutzt, welche die Messung von statischen, quasi-statischen oder dynamischen Kräften erfordern. Kleine Kräfte, also Kräfte im Bereich unterhalb von 1 N, treten bei Mikrowägungen, bei der spitzenbasierten Nanofabrikation [26] und bei der Kalibrierung von AFM-Cantilevern [9] auf. Die Raster-Kraft-Mikroskopie (AFM) hat sich in den letzten 15 Jahren zu einer Standard-Analysemethode in der Mikro- und Nanosystemtechnik entwickelt [21] und ist ein wichtiger Bestandteil der rasanten Entwicklung in der Nanotechnologie geworden. Durch rasterhafte Abtastung einer Probenoberfläche mittels sogenannter Cantilever entsteht ein zweidimensionales Bild der Topographie oder anderer Oberflächeneigenschaften. AFM-Cantilever können zur Erfassung mechanischer Eigenschaften wie der Steifigkeit von biologischen Zellen oder zum DNA-Ripping, also das mechanische Auseinanderreißen der beiden DNA-Halbstränge, verwendet werden. Hierzu sind Kräfte im Nano- bis Piconewtonbereich aufzuwenden, da die interessierenden Eigenschaften bei geringen Kräften auftreten und die Proben bei größeren Kräften mechanisch zerstört würden. In der Kraftspektroskopie stellt die Federkonstante der Cantilever einen der größten Messunsicherheitsbeiträge dar. Für quantitative Kraftmessungen wird eine rückführbare Kalibrierung der Federkonstanten mit geringen Unsicherheiten benötigt. Die Federkonstante ist von Geometrie und Material des Cantilevers abhängig, eine genaue Einstellung erfordert präzise und reproduzierbare Herstellprozesse. Typische Federsteifigkeiten liegen im Bereich von 0,001 bis 100 N/m, wobei Cantilever mit Steifigkeiten kleiner 1 N/m als weiche Cantilever gelten. Zur Kalibrierung werden Kräfte im Mikro- oder Nanonewtonbereich verwendet [9,20,30,37].

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Deutlich kleinere Kräfte entstehen bei der Messung des Strahlungsdruckes, der durch reflektierte oder absorbierte elektromagnetische Strahlung auf eine Fläche wirkt [39-41]. Ein perfekt reflektierter Laserstahl mit 1 W Leistung erzeugt eine Kraft von 7 nN.
Die kleinsten derzeit messtechnisch zugänglichen Kräfte sind Casimir-Kräfte, die deutlich kleiner als 1 pN sind. Der Casimir-Effekt ist ein quantenmechanischer Effekt, der bewirkt, dass auf zwei parallele, leitfähige Platten im Vakuum eine Kraft wirkt, die beide zusammendrückt.

2. Methoden zur Messung kleiner Kräfte

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Methoden zur Messung kleiner Kräfte, die mit den Prinzipien maximal messbaren Kräfte und die minimal erreichbaren Ablesbarkeiten. Da nicht beide Parameter gleichzeitig technisch realisierbar sind, ist zusätzlich die typischerweise erreichbare relative Auflösung als Verhältnis aus Ablesbarkeit zum Kraftmessbereich angegeben. Die Verfahren werden im Folgenden kurz beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht über Methoden zur Messung kleiner Kräfte

Methode	Max. Kraft	Min. Ablesbarkeit	Typ. relative Auflösung
DMS	10^{5} N	10^{-5} N	10^{-3}…10^{-5}
EMK	10^{3} N	10^{-9} N	10^{-6}…10^{-7}
ESK	10^{-3} N	10^{-10} N	10^{-2}…10^{-3}
OKK	10^{-6} N	10^{-12} N	10^{-1}…10^{-2}

Die häufigsten Methoden zur Messung kleiner Kräfte sind Verformungskörper, deren kraftabhängige Auslenkung mit Dehnungsmessstreifen (DMS) direkt in ein elektrisch auslesbares Signal umgewandelt wird. DMS basierte Kraftsensoren sind für kleine Kräfte fast ausschließlich als Parallelfederanordnung realisiert, wobei bei großen Kräften auch andere Bauformen üblich sind. Zur elektrischen Auslesung der Auslenkung von Cantilevern oder allgemeiner MEMS Kraftsensoren gibt es photoelektrische Verfahren oder Cantilever mit integrierter piezoresistiver Dehnungsmessung. Typische relative Auflösungen von DMS basierten Kraftsensoren sind im Bereich 10^{-3}…10^{-5}.
Der Vergleich von mechanischer Kraft mit elektromagnetischer Kraft, die von Gast [13,14] bereits in den 1940er Jahren beschrieben wurde, ist durch die Verwendung einer in Abbildung 2 schematisch dargestellten Kraftmesszelle oder Wägezelle mit elektromagnetischer Kraftkompensation (EMK) möglich. Wägezellen nach dem EMK Prinzip sind heute der Stand

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

der Technik in Anwendungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen, wie Präzisionswaagen [3,17], elektronischen Massekomparatoren und Mikrokraftkalibrierständen. Die Gewichtskraft einer auf die Waagschale einer EMK-Wägezelle aufgelegten Masse wird durch eine elektromagnetische Kraft – eine Lorentzkraft – kompensiert.

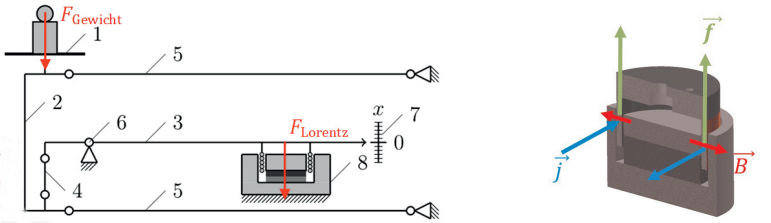


Abbildung 1: EMK Waage (links), 1-Waagschale, 2-Koppelstück, 3-Hebel, 4-Kopplelband, 5-Krafteinleitungssystem, 6- Hebellager, 7-Positionssensor, 8-Spule-Permanentmagnet-System (rechts noch einmal dargestellt)

Diese elektromagnetische Kraft wird von einem Spulen-Magnet-System erzeugt. Die Gleichung für dieses Kräftegleichgewicht lautet:

$$F(t) = B \cdot l \cdot I(t)$$

wobei B die magnetische Flussdichte, l die Länge der Spule und I die elektrische Stromstärke bezeichnet.

Für noch kleinere Kräfte kann die kompensierende Kraft auch elektrostatisch erzeugt werden [20,27,30,36,38], beispielsweise durch einen einfachen Plattenkondensator oder auch komplexere Geometrien. Die Elektrostatische Kraftkompensation (ESK) erlaubt relative Auflösungen im Prozent- bis Promillebereich.

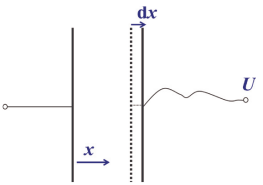


Abbildung 2: Elektrostatische Krafterzeugung mit einem Plattenkondensator

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die elektrostatische Kraft an einem (Platten-)Kondensator ist proportional zum Quadrat der anliegenden Spannung und immer abstoßend gerichtet. Der Zusammenhang zwischen Spannung und Kraft wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$F(t) = K \cdot U(t)^2 \qquad \text{mit} \quad K = \tfrac{1}{2}\, \mathrm{d}C/\mathrm{d}x$$

Für nochmals kleinere Kräfte kann die kompensierende Kraft auch optisch durch mittels eines Laserstrahles erzeugtem Strahlungsdruck aufgebracht werden. Bei konstanter Laserleistung und perfekter Reflektion entsteht eine Kraft gemäß folgender Gleichung:

$$F(t) = 2 \cdot P(t) / c$$

wobei P die Laserleistung ist und c die Lichtgeschwindigkeit. Durch Pulsweitenmodulation kann diese Kraft gezielt verringert werden und damit eine Optische Kraftkompensation (OKK) verwirklicht werden, die die geringsten Kräfte realisiert und auch die derzeit schlechteste relative Auflösung hat. Beim heutigen Stand der Technik hat die Verwendung des Photonenimpulses zur Bestimmung der strahlungsbasierten Kraft oder zur Erzeugung von Kalibrierkräften [39,40,41,43] bedeutende Fortschritte gemacht. Wichtiger scheint aber derzeit insbesondere die Messung der optischen Leistung von Lasern im Kilowatt-Bereich, weil die herkömmliche EMK- oder ESK-basierte Kraftmessung geringere Messunsicherheiten als derzeitige optoelektronische Verfahren zur Laserleistungsmessung erreichen. Williams et al. erreichten relative erweiterte Messunsicherheiten von 1,6% für Laserleistungen zwischen 1 kW und 50 kW [44]. Verwendet wurde dort ein kommerzieller EMK-Kraftsensor und ein Spiegel mit hoher, nahezu perfekter Reflektivität (0,9999). Die Messung geringerer optischer Leistungen (weniger als 1 kW) nach dieser Methode ist äußerst anspruchsvoll, da der Kraftsensor Kräfte im Nanonewton- und Picoonewtonbereich auflösen muss. Vasilyan et al [39-41] beschreibt für eine Laserleistung von 1 W erste Ansätze hierzu und verwendet zwei Kraftsensoren in Differenzanordnung zur Störgrößenreduzierung und Mehrfachreflektionen, um die Kraft zu erhöhen.

Weil Kräfte und Drehmomente vektorielle Größen mit jeweils drei Freiheitsgraden sind, gibt es auch Kraft- und Drehmomentsensoren zur simultanen Messung von mehreren Komponenten. Mehrkomponentensensoren stellen spezielle Anordnungen zur simultanen Erfassung von

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Kräften und Drehmomenten dar. In [11] wird beispielsweise eine Vorrichtung zur simultanen Erfassung von Kraft- und Momentenkomponenten mit einem würfelförmigen Verformungskörper beschrieben. Die grundlegende Funktionsweise des Sensors basiert auf der für einachsige Kraftmessungen weit verbreiteten Parallelfederanordnung als Verformungskörper und der elektrischen Erfassung der Verformung mit Dehnungsmessstreifen (DMS). Mehrkomponentensensoren mit elektromagnetischer Kraftkompensation (EMK) werden in [12] beschrieben. Die Kalibrierung von mehrkomponentigen Kraft- und Drehmomentsensoren wird typischerweise auf Kalibrierverfahren für einachsige Kraft- bzw. Drehmomentsensoren zurückgeführt [28,29]. Jedoch ergeben sich anwendungsspezifisch unterschiedliche Anforderungen an die Kraft- und Drehmomentsensoren, woraus verschiedene Normen und Empfehlungen für Kalibrierungen resultieren. Für dynamische mehrkomponentige Sensoren sind die Kalibrierabläufe anzupassen [23-25,29,32-25].

3. Methoden zur Rückführung kleiner Kräfte

Für einfache Vergleichskalibrierungen kleiner Kräfte werden Referenzmesssysteme zur Bereitstellung bekannter externer Kräfte eingesetzt. Für hochgenaue Kalibrierungen bzw. zur Realisierung der Einheit der Kraft wurde bisher die im Erdschwerefeld wirkende Gewichtskraft von rückführbar an die Einheit Kilogramm angeschlossenen Massenormalen als externe Kalibrierkraft verwendet [7]. Dies funktioniert jedoch nur in vertikaler Richtung und ist durch die minimalen Massenormale mit Nennwert von 1 mg und deren vergleichsweise hoher relativer Messunsicherheit limitiert. Im Folgenden wird beschrieben wie Kraftsensoren mit elektromagnetischer oder elektrostatischer Kraftkompensation ohne Verwendung von Massenormalen rückführbar kalibriert werden können.

Die Kalibrierung von EMK-Wägezellen erfolgt nach der alten Definition immer durch Beladung der Waagschale mit Massenormalen, die über die Rückführungspyramide mehrstufig metrologisch bis zum Urkilogramm zurückgeführt werden können. Die ausschlaggebende Idee von Kibble [10,18,22,43] war die Einführung eines zweiten Modus, um die Kalibrierung metrologisch mit den elektrischen Einheiten zu verknüpfen. Kibble schlug vor, den sogenannten Geometriefaktor $B \cdot l$ durch Bewegen der Spule im Magnetfeld des Permanentmagneten bei einer Geschwindigkeit v zu bestimmen. Dadurch wird eine Spannung U_{ind} in der Spule induziert,

$$U_{\mathrm{ind}}(t) = B \cdot l \cdot v(t)$$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

die, für Messungen mit der Kibble-Waage mit einem Josephson-Spannungsnormal metrologisch direkt auf elektrische Quanteneffekte rückgeführt gemessen werden kann. Dieser zweite Modus heißt Geschwindigkeitsmodus, der statische oben beschriebene Modus heißt Kraftmodus. Der Kraftmodus und der Geschwindigkeitsmodus werden durch die beiden Gleichungen jeweils modellhaft stark vereinfacht beschrieben. Die Messung der Geschwindigkeit v im Geschwindigkeitsmodus erfolgt laserinterferometrisch mit metrologisch rückgeführter Wellenlänge und unter Hinzunahme einer rückführbaren Zeitmessung. Der Strom I im Kraftmodus kann als Spannungsabfall U_R über einem hochgenauen Widerstand R gemessen werden und wird in der Kibble-Waage über den Quanten-Hall-Effekt metrologisch wieder auf die Planck-Konstante zurückgeführt. Für die in der Messung kleiner Kräfte erreichbaren kombinierten Messunsicherheiten ist die elektrische Messung mit üblichen elektrischen Präzisionsmessgeräten völlig ausreichend. Durch die Kalibrierung des Geometriefaktors mit dem Bewegungsmodus entfällt einerseits die Verwendung von kleinen Massenormalen und andererseits auch die Beschränkung auf die vertikale Richtung: Kalibriert wird immer in Richtung des Geschwindigkeitsvektors.

Die elektrostatische Kraft an einem Plattenkondensator kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$F(t) = K \cdot U(t)^2$$

Um eine rückführbare elektrostatische Kraft zu erzeugen, muss der Kalibrierfaktor $K = ½\, \mathrm{d}C/\mathrm{d}x$ bestimmt werden. Hierfür gibt es neben der klassischen Vergleichskalibrierung mit einer bekannten Referenzkraft, z.B. einer elektromagnetischen Kraft $F(t) = B \cdot l \cdot I(t)$ oder einer statischen Totlast $F = m \cdot g$, drei Methoden:

(a) Numerische oder analytische Berechnung des Kapazitätsgradienten [36]
(b) Elektrische Messung von Kapazitätswerten bei unterschiedlichen Abständen zwischen den beiden Elektroden (direkte Bestimmung des Kapazitätsgradienten)
(c) Messung des induzierten Stroms bei Bewegung der Platten in einem Geschwindigkeitsmodus und konstanter Spannung. Der Kalibrierfaktor kann aus $K = I(t)/[2 \cdot U \cdot v(t)]$ berechnet werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Alle Methoden können unterschiedliche Messunsicherheiten erzielen. Beim Verfahren (a) gehen alle dimensionellen Größen in die kombinierte Messunsicherheit ein, die im Prozentbereich liegt. Beim Verfahren (b), bei dem die Kalibrierung durch Bestimmung des Kapazitätsgradienten durchgeführt wird, ist die Unsicherheit des Kalibrierfaktors durch die elektrische Messung der Kapazität und die Unsicherheit der statischen Positionsmessung limitiert. Das Verfahren (c) ähnelt methodisch stark der Kibble-Kalibrierung der EMK-basierten Kraftsensoren: die Kalibrierung erfolgt in einem Bewegungsmodus. In [45] werden die Verfahren (b) und (c) ausführlich durch Modelle, Messungen und Messunsicherheitsanalysen verglichen. Die dort erzielten relativen Messunsicherheiten für den Kalibrierfaktor betrugen 5% und 20%, wobei mit dem konkreten Aufbau und einer Spannung von 0,5 V eine Kraft von 77 nN erzeugt wurde.

Ein Vorteil der Bewegungsmodus basierten Kalibrierungen sowohl beim EMK als auch beim ESK Verfahren liegt darin, dass eine quasistatische Erzeugung der Kraft und gleichzeitig die Messung einer deutlich höherfrequenten der Relativgeschwindigkeit der ortsfesten Elektrode (ESK) oder des Magnetsystems (EMS) eine kontinuierliche Selbstkalibrierung ermöglicht. Entsprechende Verfahren stehen aber noch ganz am Anfang der Erforschung.

4. Zusammenfassung

Die am 20. Mai 2019 in Kraft getretene Neudefinition des Kilogramms eröffnet neue Möglichkeiten im Bereich der Messung von kleinen Kräften. Die Neudefintion ist unabhängig von der Methode der Realisierung, da sie auf der Festlegung des Zahlenwertes des Planck'schen Wirkungsquantums beruht. Ein großer – derzeit kaum ausgenutzter – Vorteil ergibt sich im Bereich der Kalibrierung von Kräften dadurch, dass diese Definition eine Realisierung der Kraft unabhängig von kalibrierten Massenormalen und unabhängig von der lokalen Fallbeschleunigung ermöglicht.

Literatur

[1] Y. Azuma, P. Barat, G. Bartl, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D'Agostino, K. Fujii, H. Fujimoto, A. Hioki, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, R. Meeß, S. Mizushima, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Pramann, S. A. Rabb, O. Rienitz, C. Sasso, M. Stock, R. D. V. Jr, A. Waseda, S. Wundrack und S. Zakel. Improved measurement results for the Avogadro constant using a 28 Si-enriched crystal. Metrologia, 52(2):360, 2015. 10.1088/0026-1394/52/2/360.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[2] H. Baumann, H. Bettin, F. Bielsa, A. Eichenberger, G. Geneves, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, F. P. dos Santos, A. Picard, P. Pinot und A. Schindler. Realization of the anticipated definition of the kilogram. In 2012 Conference on Precision electromagnetic Measurements. IEEE, 2012. 10.1109/cpem.2012.6250941.

[3] H. Baumgartl. Optimierung dynamischer Waagen nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation mittels numerischer Modelle zur Systemsimulation. PhD thesis, Technische Universität Ilmenau, 2015. URL http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2015000362.

[4] L. O. Becerra, M. Borys, J. W. Chung, S. Davidson, P. Fuchs, C. Jacques, W. Jian, Z. J. Kubarych, A. Kumar,A. Malengo, K. Fen, N. Medina, P.-A. Meury, S. Mizushima, A. Picard, R. Steyn und Z. Zelenka. Final report on CCM.M-K4: Key comparison of 1 kg stainless steel mass standards. Metrologia, 51(1A):07009–07009, 2014. 10.1088/0026-1394/51/1a/07009.

[5] P. Becker. Tracing the definition of the kilogram to the Avogadro constant using a silicon single crystal. Metrologia, 40(6):366, 2003. 10.1088/0026-1394/40/6/008. URL http://stacks.iop.org/0026-1394/40/i=6/a=008.

[6] M. Borys, M. Gläser und M. Mecke. Mass determination of silicon spheres used for the Avogadro project. Measurement, 40(7-8):785–790, 2005. 10.1016/j.measurement.2006.08.006.

[7] C. Buchner und M. Manlik. Konzeptionierung einer Totlastanlage zur Darstellung der Kraft auf Basis der Messunsicherheitsbetrachtung. tm - Technisches Messen, 0(0), 2019. 10.1515/teme-2018-0063.

[8] R. S. Davis. What Is a Kilogram in the Revised International System of Units (SI)? Journal of Chemical Education, 92(10):1604–1609, 2015. 10.1021/acs.jchemed.5b00285.

[9] C. Diethold, M. Kühnel, F. Hilbrunner, T. Fröhlich und E. Manske. Determination of force to displacement curves using a nanopositioning system based on electromagnetic force compensated balances. Measurement, 51:343–348, 2014. 10.1016/j.measurement.2014.02.034.

[10] A. Eichenberger, B. Jeckelmann und P. Richard. Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical methods. Metrologia, 40(6):356–365, 2003. 10.1088/0026-1394/40/6/007. URL http://stacks.iop.org/00261394/40/i=6/a=007.

[11] T. Fröhlich, I. Rahneberg und F. Hilbrunner. Vorrichtung zur simultanen Erfassung von Kraft- und Momentenkomponenten, 2011. DE102011106894.

[12] T. Fröhlich, I. Rahneberg, F. Hilbrunner und J. Schleichert. Vorrichtung und Verfahren zur Kalibrierung von Kraft und Drehmomentmesseinrichtungen, 2016. DE102016010668.

[13] T. Gast. Eine registrierende Torsionswaage mit elektrischer Kompensation, 1943. DE000000914445B.

[14] T. Gast. Elektronische Waage, 1955. DE000001035371B.

[15] M. Gläser und M. Borys. Precision mass measurements. Reports on Progress in Physics, 72(12):126101, 2009.10.1088/0034-4885/72/12/126101.

[16] M. Gläser, M. Borys, D. Ratschko und R. Schwartz. Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination. Metrologia, 47(4):419–428, 2010. 10.1088/0026-1394/47/4/007.

[17] F. Hilbrunner, H. Weis und T. Fröhlich. Parameterization and optimisation of EMC balances based on the frequency response of the impedance. Measurement, 51:349–355, 2014. 10.1016/j.measurement.2014.01.032.

[18] F. Hilbrunner, I. Rahneberg und T. Fröhlich. Wattwaage mit Hebelübersetzung auf Basis eines kommerziellen EMKWägesystems. Technisches Messen, 2017. 10.1515/teme-2017-0065.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[19] F. Härtig. Das neue Internationale Einheitensystem – jetzt auch für Außerirdische. tm - Technisches Messen, 86(5):249–257, 2019. 10.1515/teme-2019-0029.

[20] M. Kim, J. R. Pratt, U. Brand, C. W. Jones. Report on the first international comparison of small force facilities: a pilot study at the micronewton level. Metrologia, 49-1, 2011.

[21] R. Leach, D. Chetwynd, L. Blunt, J. Haycocks, P. Harris, K. Jackson, S. Oldfield, S. Reilly. Recent advances in traceable nanoscale dimension and force metrology in the UK. Measurement Science and Technology, 17 467-476, 2006.

[22] S. Li, F. Bielsa, M. Stock, A. Kiss und H. Fang. Coil-current effect in Kibble balances: analysis, measurement, and optimization. Metrologia, 55(1):75, 2018. 10.1088/1681-7575/aa9a8e. URL http://stacks.iop.org/0026-1394/55/i=1/a=75.

[23] A. Link, B. Glöckner, C. Schlegel, R. Kumme und C. Elster. System identification of force transducers for dynamic measurements. In Proceedings of the XIX IMEKO World Congress, 2009. URL https://www.imeko.org/publications/wc-2009/IMEKO-WC-2009-TC3-039.pdf.

[24] R. R. Marangoni. Traceable multicomponent force and torque measurement. PhD thesis, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2019. URL https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00038350. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2019.

[25] R. R. Marangoni, J. Schleichert, I. Rahneberg, F. Hilbrunner und T. Fröhlich. A self-calibrating multicomponent force/torque measuring system. Measurement Science and Technology, 29(7):074002, 2017. 10.1088/13616501/aac00f. URL http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017iwk-081:5.

[26] R. R. Marangoni, J. Schleichert, I. Rahneberg, R. Mastylo, E. Manske und T. Fröhlich. Multi-component force measurement in micromachining. Technisches Messen, 84:587, 2017. 10.1515/teme-2016-0066.

[27] D. B. Newell, J. A. Kramar, J. R. Pratt, D. T. Smith, E. R. Williams. The NIST Microforce Realization and Measurement Project. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 52:508, 2003.

[28] J. Nitsche, S. Baumgarten, M. Petz, D. Röske, R. Kumme und R. Tutsch. Measurement uncertainty evaluation of a hexapod-structured calibration device for multi-component force and moment sensors. Metrologia, 54(2):171, 2017.10.1088/1681-7575/aa5b66.

[29] Y.-K. Park, R. Kumme, D. Roeske und D.-I. Kang. Column-type multi-component force transducers and their evaluation for dynamic measurement. Measurement Science and Technology, 19(11):115205, 2008. 10.1088/09570233/19/11/115205.

[30] R. Pratt, J. A. Kramar, D. B. Newell, D. T. Smith. Review of SI traceable force metrology for instrumented indentation and atomic force microscopy. Measurement Science and Technology. 16 2129–2137, 2005.

[31] C. Rothleitner, J. Schleichert, N. Rogge, L. Günther, S. Vasilyan, F. Hilbrunner, D. Knopf, T. Fröhlich und F. Härtig. The Planck-Balance - using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights. Measurement Science and Technology, 29(7):074003, 2018. 10.1088/1361-6501/aabc9e.

[32] J. Schleichert. Entwicklung und Untersuchung von Mehrkomponentensensoren für Kraft und Drehmoment. PhD thesis, Technische Universität Ilmenau, 2015. URL http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000165.

[33] J. Schleichert, I. Rahneberg und T. Fröhlich. Calibration of a novel Six-Degree-of-freedom Force/Torque Measurement System. International Journal of Modern Physics: Conference Series, 24:1360017, 2013.10.1142/S2010194513600173.

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[34] J. Schleichert, I. Rahneberg und T. Fröhlich. Dynamische Kalibrierung eines Mehrkomponentensensors für Kraft und Drehmoment. tm - Technisches Messen, 83(3), 2016. 10.1515/teme-2015-0090.

[35] J. Schleichert, I. Rahneberg, F. Hilbrunner und T. Fröhlich. Mehrkomponenten-Kraft- und -Drehmomentsensor nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kompensation. Technisches Messen, 83:445, 2016. 10.1515/teme-2015-0088.

[36] G. A. Shaw, J. Stirling, J. A. Kramar, A. Moses, P. Abbott, R. Steiner, A. Koffman, J. R. Pratt und Z. J. Kubarych. Milligram mass metrology using an electrostatic force balance. Metrologia, 53(5):A86, 2016. 10.1088/00261394/53/5/A86.

[37] L. Song, Y. Zheng, G. Hu, J. Ma, T. Werner, M. Zhao, F. Fang. Highly sensitive, precise, and traceable measurement of force. Instrumentation Science and Technology. 44, NO.4,386-400, 2016.

[38] J. Stirling, G. A. Shaw. Realising traceable electrostatic forces despite non-linear balance motion. Measurement Science and Technology, 28-055003, 2017.

[39] S. Vasilyan et al, Revisiting the limits of photon momentum based optical power measurement method, employing the case of multi-reflected laser beam. 2021 Metrologia 58 015006

[40] S. Vasilyan et al, Total momentum transfer produced by the photons of a multi-pass laser beam as an evident avenue for optical and mass metrology, 2017, Opt. Express 25 20798–816

[41] S. Vasilyan et al, Photon momentum induced precision small forces: a static and dynamic check, 2019, Meas. Sci. Technol. 30 105004

[42] Y. Na, High resolution force measurement system for Lorentz force velocimetry. Ilmenau. 2019, https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00038434.

[43] P. Williams et al. Comparison of electrostatic and photon pressure force references at the nanonewton level. 2019, Metrologia 56 025002

[44] P. Williams et al. Portable, high-accuracy, non-absorbing laser power measurement at kilowatt levels by means of radiation pressure. 2017, Opt. Express 25 4382–92

[45] Z. Zhang, H. Qing, L. Zhengkun, H. Bing, L. Yunfeng, L. Jiang, L. Chen, L. Shisong, X. Jinxin, W. Nong, W. Gang und G. Hongzhi. The joule balance in NIM of China. Metrologia, 51(2):S25, 2014. 10.1088/0026-1394/51/2/S25. URL http://stacks.iop.org/0026-1394/51/i=2/a=S25.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Systematische Realisierung von Software zur Messunsicherheitsbestimmung am Beispiel der Virtuellen Planck-Waage

Ivan Poroskun, **Christian Rothleitner**, **Daniel Heißelmann**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Kurzfassung

Die rechnergestützte Ermittlung von Messunsicherheiten spielt insbesondere im Hinblick auf zunehmend komplexere Messaufgaben eine immer größere Rolle. Der Bedarf für eine systematisierte Vorgehensweise bei Erstellung langlebiger und komplexer Software zur Messunsicherheitsbestimmung, bzw. Digitaler Metrologischer Zwillinge (D-MT), wird immer deutlicher. In diesem Bericht wird eine allgemeine Softwarestruktur vorgestellt, welche aus dem Virtuellen Koordinatenmessgerät VCMM abgeleitet wurde. Die Struktur ermöglicht die Beschreibung beliebiger Messsysteme im Hinblick auf die Messunsicherheitsbestimmung. Um den Implementierungsprozess neuer Simulationssoftware zu erleichtern, wurde eine unterstützende Softwarebibliothek erstellt. Die Bibliothek ist in C++ geschrieben und enthält alle notwendigen Komponenten, um eine GUM-konforme Monte-Carlo-Simulation zu implementieren. Als ein Anwendungsbeispiel der Bibliothek und der Softwarestruktur für die Erstellung neuer D-MT wird der aktuelle Entwicklungsstand der Virtuellen Planck-Waage vorgestellt.

1. Einleitung

Oftmals kann für die Auswertung komplexer Messaufgaben keine geschlossene analytische Beschreibung gefunden werden. Somit ist die Anwendung der klassischen GUM-Methode [1] für die Bestimmung der Messunsicherheit nicht – oder nur mit entsprechenden Vereinfachungen – möglich. In diesen Fällen empfiehlt sich die Verwendung der Monte-Carlo (MC) basierten Methode, wie sie in GUM S1 [2] beschrieben ist.

Jedes MC-basierte Programm zur Messunsicherheitsbestimmung enthält teils gleiche Komponenten, welche durch den Kontext der Aufgabe gegeben sind. Darunter zählen z. B. die Zufallszahlengeneratoren (kurz Generatoren) und Algorithmen für die Auswertung der Messunsicherheit. Heutzutage werden diese Komponenten innerhalb unterschiedlicher Projekte stets erneut implementiert, da bislang keine allgemein verfügbare Softwarebibliotheken existieren, welche einfach zu verwenden sind und einen Fokus auf die Gesamtstruktur der Software legen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Der Lösungsansatz für das Problem, der hier vorgestellt wird, verallgemeinert die Struktur einer etablierten Software zur Messunsicherheitsbestimmung und überträgt diese auf andere Anwendungen. Hierzu wird das Virtuelle Koordinatenmessgerät VCMM [3] herangezogen. Das VCMM ist in der Koordinatenmesstechnik ein etabliertes Werkzeug zur Bestimmung aufgabenspezifischer Messunsicherheiten. Es wird sowohl in von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) akkreditierten Laboren, als auch in der industriellen Qualitätssicherung zur Messunsicherheitsbestimmung eingesetzt.

In diesem Bericht wird eine Softwarestruktur vorgestellt, welche aus dem VCMM abgeleitet wurde. Die Struktur kann als Kommunikationsgrundlage zwischen Projekten und Organisationen, oder für den Überblick über das Gesamtprojekt, genutzt werden. Damit sie aber auch für die Realisierung realer Projekte eingesetzt werden kann, wurde eine unterstützende Softwarebibliothek (genannt *vmlib*) entwickelt. Die Bibliothek enthält Werkzeuge, um sowohl die gesamte Struktur als auch die projektspezifischen Komponenten für eine MC-Simulation zu implementieren.

Ein Nachteil der MC-Methode gegenüber dem analytischen Messunsicherheitsbudget ist, dass aus der Simulation zuerst nicht zu entnehmen ist, wie sich die Messunsicherheit zusammensetzt, bzw. welchen Beitrag die einzelnen Zufallsgrößen auf das Endergebnis haben. Die unterstützende Bibliothek stellt gesonderte Funktionalität zur Verfügung, welche die Durchführung einer Sensitivitäts- bzw. Beitragsanalyse erlaubt.

Als erstes Anwendungsbeispiel der Struktur und der Bibliothek wird ein Digitaler Metrologischer Zwilling (Digital Metrological Twin, D-MT) der Planck-Waage (PB), die sogenannte Virtuelle Planck-Waage (VPB), entwickelt. Die PB ist eine Kibble-Waage für industrielle Anwendung, welche zurzeit von der PTB und der TU Ilmenau entwickelt wird [4].

Im nächsten Kapitel wird zunächst die Softwarestruktur vorgestellt. Die Vorgehensweise, mit der die Struktur aus dem VCMM abgeleitet wurde, wird erläutert. Im Kap. 3 wird die unterstützende Softwarebibliothek mit den Schwerpunkten der Zufallszahlengenerierung und der Sensitivitätsanalyse beschrieben. Im Kap. 4 wird das Funktionsprinzip der Planck-Waage erklärt. Die ersten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Virtuellen Planck-Waage werden vorgestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. VCMM-Konzept und allgemeine Softwarestruktur

Das Grundprinzip, bzw. das Konzept des VCMM, besteht darin, dass der gesamte Messvorgang in einer Simulation nachgebildet wird. Durch die Nachbildung kann eine „virtuelle Messung“ mehrmals in einer Simulation durgeführt werden. Bei jedem Simulationsdurchlauf werden die unsicherheitsbehafteten Parameter variiert, durch die mathematisch-physikalischen Modelle fortgepflanzt und mithilfe der KMG-Auswertealgorithmen zu den Messgrößen ausgewertet. Nach der Simulation werden die Messunsicherheiten aller simulierten Messgrößen bestimmt.

Um aus dem VCMM eine allgemeine Softwarestruktur abzuleiten, wurde der Quelltext des VCMM, welcher aus ca. 38000 Quellcodezeilen besteht, gesichtet und nach der Funktion unterteilt. Somit ließ sich der Quelltext in drei wesentliche Gruppen aufteilen. Erstens sind es die physikalischen Modelle, welche den Messvorgang nachbilden. Diese machen ca. 45% des Quelltextes aus. Zweitens sind es die sogenannten unterstützenden Komponenten (ca. 31%), welche vorwiegend für das Einlesen der Parameter und die Kommunikation mit den externen Auswertealgorithmen des KMG verantwortlich sind. Drittens sind es die MC-bezogenen Komponenten, wie die Generatoren und die statistische Auswertealgorithmen. Diese machen ca. 24% des Quelltextes bzw. ca. 9000 Zeilen aus.

Die im VCMM enthaltenen Modelle und die unterstützenden Komponenten sind sehr spezifisch für die Koordinatenmesstechnik, bzw. sind auf die Schnittstellen der KMG zugeschnitten. Sie sind daher in der Regel nicht auf andere Messaufgaben bzw. Messgeräte übertragbar. Die Generatoren und die Algorithmen für die Auswertung der Messunsicherheit wären jedoch auf andere Simulationsaufgaben übertragbar. Diese Komponenten wurden als Vorlage für die Implementierung einer neuen, eigenständigen Softwarebibliothek verwendet, welche im nächsten Kapitel näher beschrieben wird.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

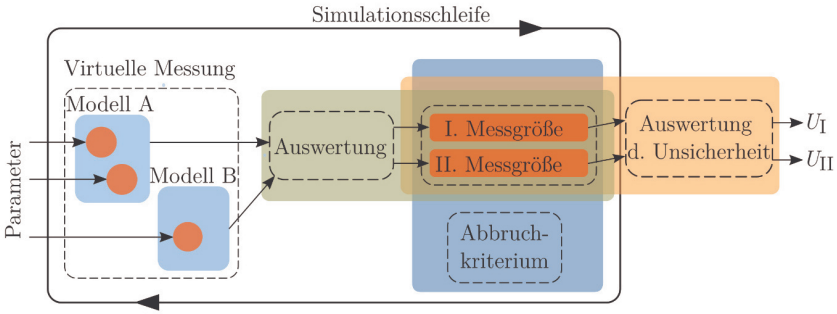


Bild 1: Struktur der Software zur Messunsicherheitsbestimmung, abgeleitet aus dem VCMM.

Während der Sichtung des VCMM-Quelltextes wurde die Beziehung zwischen den einzelnen Softwarekomponenten erkannt und in einer Struktur erfasst. Die Simulationsstruktur ist im Bild 1 dargestellt. Vor der Durchführung der Simulation werden zuerst die Generatoren (dargestellt als rote Kreise) innerhalb einzelner Modelle (hier *Modell A* und *Modell B* genannt) parametrisiert. Ein Simulationsdurchlauf besteht aus drei Schritten: Ausführung einer *virtuellen Messung*, *Auswertung* der Daten und Speicherung der simulierten Größen für die spätere Analyse. Dieser Vorgang wird in einer Schleife mehrmals wiederholt. Bei jeder Ausführung der virtuellen Messung generieren die vorab parametrisierten Zufallsgeneratoren neue Werte, welche durch die einzelnen Modelle fortgepflanzt werden. Als Zwischenergebnisse ergeben sich Daten, welche sonst aus einer realen Messung ermittelt werden könnten – hier geschieht es aber „virtuell“. Sie werden dem gleichen Auswertealgorithmus übergeben, der auch für die Auswertung der Daten aus realen Messungen genutzt wird. Nachdem die Ausführung der Simulationsschleife abgeschlossen ist, wird aus den simulierten Werten jeder Messgröße die Messunsicherheit bestimmt. Optional kann die Anzahl der Simulationsschritte über ein *Abbruchkriterium* gesteuert werden. Dies kann beispielsweise eingesetzt werden, um die Simulationen aus Effizienzgründen bei Unterschreiten einer als ausreichend betrachteten numerischen Toleranz zu beenden.

Nach diesem Ansatz setzt sich das Messergebnis aus einem Messwert, welcher aus der Auswertung realer Messdaten erhalten wird, und aus einer Messunsicherheit aus der statistischen Auswertung der wiederholten Simulationsergebnisse zusammen. Die Struktur ist mit Absicht sehr allgemein gehalten, um eine möglichst vielseitige Anwendung zu finden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Unterstützende Softwarebibliothek

Die Komponenten der oben beschriebene Struktur können auf die projektspezifischen und die projektunabhängigen Komponenten aufgeteilt werden. Zu den ersten zählen der Auswertealgorithmus und die einzelnen mathematisch-physikalischen Modelle. Die projektunabhängigen Komponenten sind die Generatoren, die Messgrößen, Abbruchkriterien und die Algorithmen für die Auswertung der Messunsicherheiten. Diese wurden als eigenständige C++-Bibliothek implementiert.

Wichtig ist zu erwähnen, wie viele Quellcodezeilen notwendig sind, um eine Komponente der Struktur mithilfe der Bibliothek zu implementieren, und wie die Aufteilung der Codezeilen über das Gesamtprojekt zu erwarten ist. Dafür wird angenommen, dass der Auswertealgorithmus bereits implementiert ist und im besten Falle in einer Codezeile aufgerufen werden kann. Das Erzeugen und Speichern von simulierten Werten bedarf nur zwei Zeilen pro simulierte Größe. Das Abrufen statistischer Größen nach der Simulation erfolgt auch in einer Zeile pro statistische Größe. Ein Abbruchkriterium kann über drei Codezeilen aufgesetzt und parametrisiert werden. Damit soll deutlich gemacht werden, dass die meisten Komponenten der vorgestellten Struktur in ca. 10 Zeilen (für eine einfache Messaufgabe) mithilfe der Bibliothek implementiert werden können. Der größte Aufwand verbleibt bei der Erstellung der einzelnen Modelle innerhalb der virtuellen Messung. Hier ist die Komplexität, und somit auch die Anzahl der Quellcodezeilen, durch die konkrete Aufgabenstellung gegeben.

3.1 Zufallszahlengeneratoren

Für die Erstellung der physikalischen Modelle stellt die Bibliothek umfangreiche Funktionalität für die Erzeugung von Zufallsgrößen zur Verfügung. Im Weiteren wird nur ein Teil dieser Funktionalität im Hinblick auf die Sensitivitätsanalyse betrachtet.

Die Bibliothek unterstützt die Erzeugung von Zufallszahlen für alle univariate Verteilungsfunktionen (PDF). Von praktischer Relevanz sind aber oft nur die Verteilungen, welche über ihren Mittelwert und die Standardabweichung (Std.-Abw.) beschrieben werden können. Darunter zählen beispielsweise die Normal-, Gleich- und Dreiecksverteilung. Da diese über zwei Parameter eindeutig beschrieben werden können, lassen sie sich als eine Gruppe polymorpher Objekte beschreiben. Das bedeutet, die Parameter eines Zufallszahlengenerators (die Verteilung, ihr Mittelwert und die Std.-Abw.) können zur Laufzeit des Programms geändert werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zusätzlich zu den genannten Verteilungsfunktionen wurde die sogenannte Delta-Distribution implementiert. Sie generiert keine Zufallszahlen, sondern gibt stattdessen stets den vorab gesetzten Mittelwert zurück. Mithilfe dieser Distribution kann die „Zufälligkeit“ eines Generators gezielt ausgeschaltet werden. Basierend auf dieser Funktionalität können verschiedene Analysewerkzeuge implementiert werden. In Kap 3.3 wird ein Tool für die Sensitivitätsanalyse beschrieben.

3.2 Registry

Vorab ist aber noch ein Zwischenschritt erforderlich, welcher im nächsten Abschnitt die Verwaltung der einzelnen Generatoren zur Laufzeit ermöglicht. Dies wird mithilfe der sogenannten *registry*-Objekte möglich. Die *registry* ist ein Verwaltungsmechanismus, welcher die Adressen der einzelnen Generatoren zusammen mit einem eindeutigen Namen speichert. Zur Laufzeit der Simulation kann aus einer *registry* die Adresse eines Generators abgerufen werden, wodurch dann die Parameter des Generators geändert werden können.

Mithilfe dieses Tools kann beispielsweise die „Zufälligkeit“ einzelner Einflussgrößen ausgeschaltet werden, was auch über die manuelle Änderung der Simulationsparameter möglich wäre – hiermit lässt sich aber der Vorgang automatisieren. Optional können auch Einflussgrößen in einer *registry* als Gruppen zusammengefasst werden. Genau wie mit einzelnen Einträgen, lassen sich die Eigenschaften der Generatoren einer Gruppe gleichzeitig ändern. So kann beispielsweise in einem Funktionsaufruf die Zufälligkeit aller Generatoren einer Gruppe ganz ausgeschaltet oder alle Std.-Abw. um 10 % reduziert werden.

3.3 Sensitivitätsanalyse

Aufbauend auf der Funktionalität der *registry-Objekte* können verschiedene Tools für die Analyse des Messvorgangs implementiert werden. So enthält die Bibliothek bereits ein Tool für die Beitrags- bzw. Sensitivitätsanalyse. Damit lassen sich die Beträge der Empfindlichkeiten einzelner Einflussgrößen und deren Beitrag zu der Gesamtvarianz einer Messgröße bestimmen.

Vor der eigentlichen Analyse wird die Unsicherheit der betrachteten Messgröße bestimmt. Hierbei sind alle Einflussgrößen aktiv. Mit „aktiv“ ist dabei gemeint, dass alle Generatoren tatsächlich Zufallsgrößen generieren. Anschließend wird die Simulation ein Mal pro Einflussgröße wiederholt, wobei nur eine Einflussgröße während der Simulation aktiv ist. Die resultierende Varianz der simulierten Messgröße wird gespeichert. Anschließend werden die

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Verhältnisse der einzelnen Varianzen zu der Gesamtvarianz gebildet. Dies gibt (in erster Näherung) den prozentualen Beitrag der einzelnen Einflussgrößen auf die Gesamtvarianz an. Die Analyse kann ebenfalls mit Gruppen von Einflussgrößen durchgeführt werden.

Die Sensitivitätsanalyse lässt sich mit nur wenig Zusatzaufwand parallelisieren, da die einzelnen Simulationen keine Abhängigkeiten zueinander aufweisen sollten. Die automatisierte Parallelisierung wird durch die Bibliothek unterstütz. Im nächsten Kapitel wird beispielhaft das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse der VPB vorgestellt.

4. Virtuelle Planck-Waage

Die Planck-Waage nutzt das Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation (EMK) [5]. Eine Messung zur Bestimmung der Masse eines Wägestückes besteht aus zwei separaten Messschritten: dem sogenannten *velocity mode* (VM) und dem *force mode* (FM). Im FM wird ein Wägestück mit der Masse m auf die Waagschale aufgelegt; der zur Kompensation der Schwerkraft notwendige Strom I wird als Spannungsabfall U_{FM} über einen Referenzwiderstand R gemessen. Der Messvorgang ist durch die folgende Beziehung gegeben:

$$m \cdot g = Bl \cdot I = Bl \cdot \frac{U_{\mathrm{FM}}}{R}, \tag{1}$$

wobei g die Gravitationsbeschleunigung und Bl ein sog. Formfaktor der Spule ist. Der Formfaktor Bl wird in einer separaten Messung (VM) bestimmt. Hierfür wird die Spule in eine sinusförmige Bewegung versetzt. Dabei wird ein Spannungssignal mit der Amplitude U_{VM} in der Spule induziert. Die Geschwindigkeitsamplitude der Schwingung v wird mittels eines Interferometers gemessen. Diese Messung geschieht ohne das Wägestück. In erster Näherung wird der Formfaktor aus der folgenden Beziehung ermittelt:

$$U_{\mathrm{VM}} = Bl \cdot v. \tag{2}$$

Durch das Einsetzen der Gl. (2) in Gl. (1) ergibt sich die Messgleichung für die Masse als

$$m = \frac{U_{\mathrm{VM}}\, U_{\mathrm{FM}}}{v\, R\, g}. \tag{3}$$

Zur Minderung der zufälligen Messabweichungen werden die beiden Messungen (VM und FM) mehrmals durchgeführt. Das Endergebnis der Masse wird dann über die Mittelwertbildung bestimmt. Eine solche Messreihe kann zwischen wenigen Stunden oder einigen Tagen dauern. Auf derartig langen Zeitskalen muss die Änderung der Gravitationsbeschleunigung durch die relative Lageänderung der Sonne und des Mondes bezüglich der Erde mitberücksichtigt werden. Hierzu muss sowohl die geografische Lage des Messaufbaus als auch der Zeitpunkt einzelner Messungen bekannt sein. Mit dieser Information kann die Gravitationsbeschleunigung bei der Auswertung korrigiert werden. Das entsprechende

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

physikalische Modell ist in [6] beschrieben. Da die Korrektur nicht exakt ist, verbleibt ein Restfehler g_{r}. Somit wird die für die Simulation der Messunsicherheit eingesetzte Fallbeschleunigung g als eine Summe der lokalen Beschleunigung g_{loc} und des Restfehlers g_{r} (auch als *tidal error* bezeichnet) verwendet. Der Restfehler wird mit einer um Null zentrierten Verteilung mit der Std.-Abw. von 5 nm s^{-2} beschrieben.

Zu dem beschriebenen Modell werden in der Virtuellen Planck-Waage noch weitere Effekte berücksichtigt. Dazu zählen u. a. die Temperaturabhängigkeit des Formfaktors, die Umgebungsbedingungen und die interferometrische Geschwindigkeitsmessung. Des Weiteren wird in der Simulation mitberücksichtigt, zu welchem Zeitpunkt eine Einflussgröße auf die Messgröße wirkt. So wird beispielsweise für die lokale Beschleunigung nur ein Mal pro simulierte Messreihe ein neuer Wert erzeugt. Hierbei ist die Beschleunigung zwar „unsicher" aber während der gesamten Messreihe unveränderlich, stellt also einen systematischen Einfluss dar. Der Wert für die Korrektur der Beschleunigung wird dementgegen für jede einzelne FM neu generiert, wie ein zufälliger Effekt.

Aufgrund der Komplexität des Messvorgangs und der zusätzlichen Komplexität bei der Simulation mit der Beachtung verschiedener Zeitskalen (wann für welche Einflussgröße ein neuer Wert generiert wird) lässt es sich nicht trennen, zu welchem Anteil die einzelnen Einflussgrößen auf die Varianz gemessener Massen beitragen.

Tabelle 1: Vorläufige Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der VPB für ein Wägestück von 100 g.

Name	**Beitrag**	**Sensitivität**	**Mittelw. in kg**	**u_i (y) in kg**	**rel. u_i (y)**
__all__	1,00E+00	–	9,86E-02	2,31E-05	2,34E-04
__none__	-	–	9,86E-02	-	-
wave_length	1,75E-14	4,83E-07 [kg/µm]	9,86E-02	3,06E-12	3,10E-11
position_error	9,99E-01	2,22E-05 [kg/nm]	9,86E-02	2,31E-05	2,34E-04
temp_coefficient	1,72E-10	3,03E-07 [kg K/Tm]	9,86E-02	3,03E-10	3,07E-09
local_acceleration	5,69E-09	1,02E-02 [kg s^2/m]	9,86E-02	1,74E-09	1,77E-08
tidal_error	7,11E-10	4,10E-12 [kg s^2/nm]	9,86E-02	6,15E-10	6,24E-09
resistor	3,01E-08	4,01E-04 [kg/Ω]	9,86E-02	4,01E-09	4,06E-08

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Mithilfe der in der Bibliothek verfügbaren Funktionalität lässt sich eine Sensitivitätsanalyse durchführen. Um die Analyse in eine bereits vorhandene Simulation einzubauen ist nur ein minimaler Aufwand notwendig. Das Ergebnis einer solchen Analyse für die VPB ist in der Tab. 1 dargestellt. Die ersten beiden Einträge werden immer automatisch erzeugt. Der Eintrag *__all__* liefert die Messunsicherheit der simulierten Masse, wenn alle Einflussgrößen aktiv sind. Dies ist die Referenz für spätere Betrachtungen. Der zweite Eintrag *__none__* gilt zur Kontrolle, dass alle Einflussgrößen bei der Analyse berücksichtigt werden (hierbei soll die resultierende Unsicherheit gleich Null sein). Weitere Einträge entsprechen den Namen der Einflussgrößen, wie sie auch in der Software (in den *registry*-Objekten) hinterlegt sind.

Aus der vorliegenden Analyse lässt sich erkennen, dass der größte Beitrag (99,9 %) aus der Amplitudenmessung der Geschwindigkeit bzw. Position (*position_error*) stammt. Einige andere Eingangsgrößen, wie die Wellenlänge des Interferometers, haben einen vernachlässigbar kleinen Beitrag und können daher aus weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden.

Zu beachten ist, dass die Beiträge aus den Varianzen errechnet werden – dargestellt sind aber die Standardabweichungen. Die einzelnen Beiträge addieren sich nicht exakt zu Eins, da aufgrund der endlichen Anzahl der Simulationsläufe alle Größen mit einer Unsicherheit behaftet sind. Ebenfalls liegt dies daran, dass die nichtlinearen Beiträge nicht betrachtet werden.

Wenn im Laufe der weiteren Entwicklung der VPB neue Einflussgrößen hinzugefügt werden, werden diese automatisch bei zukünftigen Sensitivitätsanalysen mitberücksichtigt. Da die VPB noch in der Entwicklung ist, dürfen die vorliegenden Ergebnisse auf keine Weise für weitere Betrachtungen herangezogen werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Ziel der Vereinfachung der Erstellung neuer D-MT wurde aus dem VCMM eine allgemeine Softwarestruktur abgeleitet. Die projektunabhängigen, übertragbaren Softwarekomponenten wurden in Form einer Bibliothek zusammengefasst. Die Bibliothek stellt Werkzeuge zur Verfügung, welche notwendig sind, um eine GUM-konforme Software zur Messunsicherheitsermittlung zu schreiben. Die Bibliothek kann für die Implementierung beliebiger Messvorgänge genutzt werden. Der Schwerpunkt bei der Erstellung neuer D-MT

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

liegt in der Implementierung der physikalischen Modelle des jeweiligen Messvorgangs. Hierfür stellt die Bibliothek eine umfangreiche Funktionalität für die Zufallszahlengenerierung zur Verfügung. Zusätzliche Analysetools sind ebenfalls in der Bibliothek enthalten.
Als erstes Anwendungsbeispiel für die erarbeitete Struktur und die Softwarebibliothek wird die sich zurzeit in Entwicklung befindliche VPB herangezogen. Das Ziel ist es, mithilfe der VPB messspezifische Messunsicherheiten zu bestimmen. Diese sollten mit den empirisch ermittelten Unsicherheiten aus wiederholten Messungen hinreichend genau übereinstimmen. Mit der fortschreitenden Entwicklung der PB werden neue Modelle in die VPB eingebaut. Die Entwicklung der VPB soll auch die Entwicklung der PB vorantreiben.

Zukünftig soll die erarbeitete Systematik für die Realisierung von D-MT für beliebige Messvorgänge eingesetzt werden. Hiermit soll die Entwicklung auf dem Gebiet der virtuellen Messtechnik vorangetrieben werden.

[1] JCGM, „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM): JCGM 100:2008“, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008.
[2] JCGM, „Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method: JCGM 104:2009“, JCGM, 2008.
[3] M. Franke, T. Kistner, T. Hausotte, D. Heißelmann, C. Schwehn, und K. Wendt, „Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme“, *Tm - Tech. Mess.*, Bd. 84, Nr. 5, S. 325–335, 2017, doi: 10.1515/teme-2017-0016.
[4] C. Rothleitner *u. a.*, „The Planck-Balance—using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights“, *Meas. Sci. Technol.*, Bd. 29, Nr. 7, S. 9, Juli 2018, doi: 10.1088/1361-6501/aabc9e.
[5] Hilbrunner et al., Wattwaage mit Hebelübersetzung auf Basis eines kommerziellen EMK-Wägesystems“. *Tm - Tech. Mess.*, Bd. 85, Nr. 11, S. 658-679, doi: 10.1515/teme-2017-0065
[6] I. M. Longman, „Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun“, *J. Geophys. Res.*, Bd. 64, Nr. 12, S. 2351–2355, Dez. 1959, doi: 10.1029/JZ064i012p02351.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Virtuelle dimensionelle Röntgencomputertomografie für die numerische Messunsicherheitsbestimmung

Tamara Reuter, **Florian Wohlgemuth, Tino Hausotte**,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT),
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen

Kurfassung

Die industrielle Röntgencomputertomografie wird durch ihre Eigenschaft innen- und außenliegende Merkmale mit einer Messung zu erfassen, immer mehr neben der Zerstörungsfreien Prüfung auch in der dimensionellen Messtechnik eingesetzt. Um eine Aussage über die Güte eines Messwerts treffen zu können, ist jedoch die Kenntnis über die aufgabenspezifische Messunsicherheit notwendig. Derzeit kann diese nach VDI / VDE 2630 Blatt 2.1 nur mit einer Vielzahl an experimentellen Wiederholmessungen bestimmt werden. Eine numerische Messunsicherheitsbestimmung in Anlehnung an GUM Supplement 1 wird daher angestrebt. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über das prinzipielle Vorgehen der Messunsicherheitsbestimmung nach der genannten VDI / VDE 2630 und der numerischen Messunsicherheitsbestimmung nach GUM Supplement 1, sowie auftretende Problematiken und mögliche Anwendungen eines entsprechenden virtuellen dimensionellen Röntgencomputertomografen.

1. Einleitung

Die industrielle Röntgencomputertomografie (CT) bietet für die dimensionelle Messtechnik viele Vorteile wie beispielsweise die Erfassung beliebig vieler Geometrieelemente, sowohl im außenliegenden Bereich, als auch innenliegender Merkmale, mit einer einzelnen Messung. Eine Herausforderung für den Einsatz in der dimensionellen Messtechnik ist allerdings die Messunsicherheitsbestimmung mit einer Vielzahl an experimentellen Wiederholmessungen (VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1]). Dies ist zeit- und somit auch kostenintensiv. Aus diesem Grund ist eine numerische Messunsicherheitsbestimmung im Sinne von GUM Supplement 1 [2] ein großer Fortschritt für die dimensionelle Röntgencomputertomografie.

Der Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT) hat sich in den letzten Jahren intensiv der wissenschaftlichen Fragestellung gewidmet, wie diese numerische Messunsicherheitsbestimmung möglich ist – momentan in den Verbundprojekten EMPIR AdvanCT [3] und WIPANO CTSimU [4]. Zur Simulation des röntgencomputertomografischen Aufnahme-

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

prozesses wird dabei die Software aRTist (Version 2.10) der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM, Berlin) eingesetzt. In Vorarbeiten wurde mithilfe eines Prototypen gezeigt, dass die Bestimmung von numerischen Messunsicherheiten in Übereinstimmung mit experimentell bestimmten Werten für einfache Messaufgaben möglich ist [5]. Auch die Korrektur auftretender starker systematischer Messabweichungen ist prinzipiell möglich [6]. Es konnte allerdings auch gezeigt werden, dass die statistische Unsicherheit der gemessenen Messwerte bzw. das Konvergenzverhalten der bestimmten numerischen Messunsicherheit noch problematisch sind [7]. Der richtige Umgang mit nicht-korrigierten systematischen Messabweichungen ist eine weitere offene Forschungsfrage bei der korrekten Umsetzung des Vorgehens nach GUM Supplement 1 für die dimensionelle Röntgencomputertomografie [7]. Neuere Arbeiten konzentrieren sich auf die systematische Quantifizierung der Auswirkung von einzelnen Einflussgrößen auf bestimmte Messgrößen [8, 9] und systematische Methoden, Charakteristika eines realen CT-Systems mithilfe standardisierter Messprozeduren realistisch nachbilden zu können [10, 11].
In den folgenden Kapiteln wird zuerst das prinzipielle Vorgehen bei einer dimensionellen Messung mit einem CT beschrieben bevor ein Überblick über die Möglichkeiten, Messunsicherheiten für die industrielle Röntgencomputertomografie zu bestimmen, gegeben wird. In Kapitel 3 wird die Simulation als Werkzeug für die numerische Messunsicherheitsbestimmung beschrieben. Kapitel 4 gibt abschließend einen Überblick über bisherige Studien zur numerischen Messunsicherheitsbestimmung.

2. Dimensionelle Messung mit der Röntgencomputertomografie

Folgende Beschreibung gibt einen Überblick über den schematischen Ablauf einer dimensionellen Messung mit einem CT (Bild 1). Ein CT besteht üblicherweise aus einer (punktförmigen) Röntgenquelle, einem Drehtisch für die Positionierung des Bauteils und einem Detektor. Dabei nimmt im ersten Schritt üblicherweise ein Röntgendetektor zweidimensionale Durchstrahlungsbilder des Bauteils, sogenannte Projektionen, aus verschiedenen, vorher definierten Winkelstellungen auf. Die erhaltenen Projektionen werden in einem zweiten Schritt zu einem Volumen rekonstruiert. Aus diesem wird, im Fall der dimensionellen Röntgencomputertomografie, mit einer entsprechenden Software eine Objektoberfläche extrahiert. An der Objektoberfläche können dann dimensionelle Messungen durchgeführt werden. (Für eine detaillierte Darstellung, siehe [12]).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

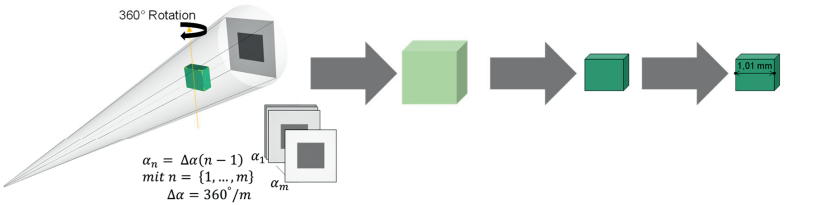


Bild 1: Schematische Darstellung des Ablaufs einer dimensionellen Messung mit einem industriellen Computertomografen.

Damit die Güte eines Messwerts bestimmt werden kann, muss die aufgabenspezifische Messunsicherheit ermittelt werden. Dabei ist das Vorgehen nach VDI/ VDE 2630 Blatt 2.1, wie bereits beschrieben, sowohl zeit- als auch kostenintensiv. Daher wird eine numerische Messunsicherheitsbestimmung gemäß GUM Supplement 1 angestrebt.

3. Messunsicherheitsbestimmung für industrielle Röntgencomputertomografie-messungen

Die Messunsicherheit ist als ein nichtnegativer Parameter definiert, der die Streuung der Messwerte angibt, die einer Messgröße auf Grundlage der verwendeten Informationen beigeordnet ist [13]. Sie ist also stets aufgabenspezifisch [1]. Für die Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit für die industrielle Röntgencomputertomografie werden im Weiteren zwei Verfahren vorgestellt.

Aufgabenspezifische Messunsicherheitsbestimmung nach VDI/VDE 2630 Blatt 2.1

Die Richtlinie VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] beschreibt ein experimentelles Verfahren zur Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit. Diese wird üblicherweise als erweiterte Messunsicherheit U_{MP} angegeben. Dabei wird ein kalibriertes Bauteil zwanzig Mal experimentell vermessen. Aus der Kalibrierunsicherheit und der Messdatenstatistik wird eine Messunsicherheit berechnet. Das Verfahren ist durch die zwanzig wiederholten Messungen sowie das Kalibrieren des Bauteils zeitaufwendig und kostenintensiv (vor allem, da Präzisionsmessungen jeweils mehrere Stunden dauern können). Daher wird es in der Praxis wenig verwendet und ist meist nur bei Serienprüfaufgaben wirtschaftlich. Bild 2 zeigt die Schritte, die zur Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit notwendig sind.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

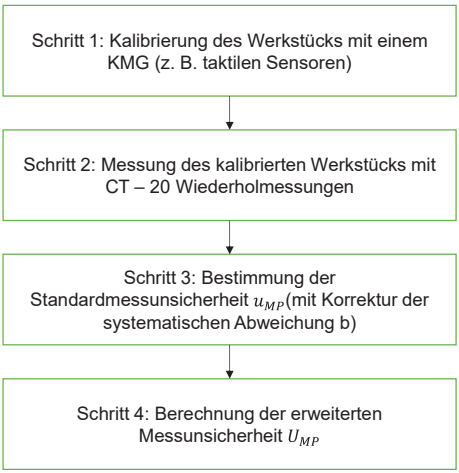


Bild 2: Allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit nach VDI / VDE 2630 Blatt 2.1 [1].

In einem 1. Schritt wird eine Kalibrierung des zu untersuchenden Werkstücks mit einem Koordinatenmessgerät durchgeführt, bevor im Schritt 2 die Messung des kalibrierten Werkstücks mit dem CT-Gerät mit 20 Wiederholmessungen durchgeführt wird. Anschließend wird in Schritt 3 die Standardmessunsicherheit u_{MP} bestimmt. Diese kann die Standardmessunsicherheit der Korrektur systematischen Abweichung b beinhalten. Falls die Korrektur der systematischen Abweichung nicht mit einberechnet werden soll, so muss dies gesondert in der erweiterten Messunsicherheit U_{MP} angegeben werden. U_{MP} wird im vierten Schritt aus den jeweiligen Unsicherheitsbeiträgen aus den vorangegangenen Schritten berechnet. Formel (1) zeigt die Gleichung zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit U_{MP} mit der Standardmessunsicherheit aus der Korrektur der systematischen Abweichung. Formel (2) wird angewendet, wenn die Korrektur des Messergebnisses um die systematische Abweichung b nicht erfolgt.

$$U_{MP} = k\sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_p^2 + u_w^2 + u_b^2} \tag{1}$$

$$U_{MP} = k\sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_p^2 + u_w^2 + b^2} \tag{2}$$

Dabei ist k ein Erweiterungsfaktor, um U_{MP} auf ein bestimmtes Vertrauensniveau umzurechnen. Üblicherweise wird für $\mathrm{k} = 2$ angenommen, damit (unter Annahme einer

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Normalverteilung) ein Vertrauensniveau von 95% erreicht wird. Die Standardmessunsicherheit u_{cal} entspricht der Unsicherheit aus der Kalibrierung des Werkstücks, u_{drift} ergibt sich aus dem Drift der Werkstückgestalt seit der Kalibrierung, u_P ist die Standardmessunsicherheit aus dem Messprozess und ergibt sich aus den Wiederholmessungen, u_w ist definiert als die Standardmessunsicherheit aus der Werkstoff- und Produktionsstreuung und u_b ist die Standardmessunsicherheit der Korrektur der systematischen Abweichung b zwischen dem Messwert aus dem CT-Gerät und dem Kalibrierwert. [1]

Numerische Messunsicherheitsbestimmung nach GUM Supplement 1 unter Verwendung einer Monte Carlo Methode

Eine mögliche Alternative ist die numerische Messunsicherheitsbestimmung nach dem GUM („Guide to the expression of uncertainty in measurement“) Supplement 1 [2] unter Verwendung einer Monte Carlo Methode. Dabei wird ein numerisches Modell des Messaufnahmeprozesses benötigt – dies ist im Fall der dimensionellen Röntgencomputertomografie die radiografische Simulation (siehe Kapitel 3). Unter Einsatz der Nominalgeometrie des Bauteils, der Information über das Bauteilmaterial sowie der Abbildungs- und Maschineneigenschaften des realen Röntgencomputertomografen, kann für eine bestimmte Messaufgabe und einen bestimmten Röntgencomputertomografen realitätsnahe Projektionen und folglich realitätsnahe Messvolumen simuliert werden. Um die reale Messstatistik abzubilden, werden die in die Simulation einfließenden Parameter X_i nach empirischen Eingangsverteilungsfunktionen (in Bild *3* sind diese mit $g_{x_i}(\xi_i)$angegeben) auf Basis einer Monte Carlo Methode variiert und die Simulation mehrfach mit leicht variierten Parametern durchgeführt. Aus der resultierenden Messstatistik lässt sich anschließend eine Messunsicherheitsaussage, aus der sich ergebenden Verteilungsfunktion $g_y(\eta)$ der jeweiligen dimensionellen Messgröße, ableiten.

Bild 3 stellt die Vorgehensweise schematisch für drei Input Parameter dar. Die Verteilungsfunktionen hängen dabei von Expertenwissen ab oder werden aus der Unsicherheit des experimentell ermittelten zugehörigen Input Parameters bestimmt. ξ_i ist dabei ein möglicher Wert des Input Parameters X_i. Momentan noch unklar sind im Fall der Röntgencomputertomografie die notwendige Anzahl an Wiederholungen M in der Monte Carlo-Simulation sowie die Behandlung unkorrigierter systematischer Abweichungen [7]. Eine grundlegende Darstellung, wie der Ansatz für die dimensionelle Röntgencomputertomografie angewandt werden kann, findet sich in [5].

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

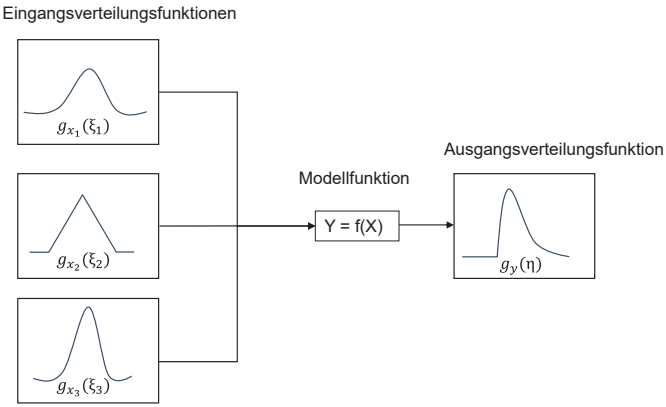


Bild 3: Schematische Darstellung der Vorgehensweise nach GUM Supplement 1. Als Eingangsverteilungsfunktionen sind die Gauß Funktionen für 1 und 3 zu sehen. 2 stellt eine Dreiecksfunktion dar. Es werden 3 unabhängige Input Parameter angenommen. Aus diesen ergibt sich die Modellfunktion, welche durch M Wiederholungen zur Ausgangsverteilungsfunktion führt. [2]

4. Simulation von industriellen Röntgencomputertomografiemessungen

Die Messkette dimensioneller Röntgencomputertomografen (Bild 1) besteht bereits aus mehreren rein digitalen Schritten: der Rekonstruktion der aufgenommenen Projektionen, der Oberflächenfindung am rekonstruierten Volumen sowie der Vermessung dieser Oberfläche. Zur Simulation einer solchen Messung muss also primär die Durchstrahlung des Bauteils mit Röntgenstrahlung und die anschließende Detektion des Durchstrahlungsbildes simuliert werden [14]. Zur Simulation dieses radiographischen Aufnahmeprozesses sind verschiedene Werkzeuge entwickelt worden, zum Beispiel Scorpius XLab des Fraunhofer Entwicklungszentrums Röntgentechnik [16], SimCT des Fachhochschule Oberösterreich [15] oder aRTist der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung [17]. All diesen Simulationssoftwares gemeinsam ist, dass diese generische CT-Systeme simulieren, nicht jedoch auf die Simulation spezifischer realer CT-Systeme ausgelegt sind. Daher müssen Röntgenquelle, Röntgendetektor, Bauteil und die geometrischen Eigenschaften des verwendeten CT-Systems, gegebenenfalls mit ihren zugeordneten zeitlichen Variationen während der Messung, charakterisiert und in der Software entsprechend realistisch modelliert werden [11]. Ein Überblick, wie eine solche realistische Modellierung technisch umgesetzt werden kann, ist z. B. in [5] zu finden.

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Studien zur numerischen Messunsicherheitssimulation

In Forschungsarbeiten haben sich verschiedene Gruppen bisher mit der simulativen Bestimmung von Messunsicherheiten beschäftigt. Die Arbeiten verwenden die drei in Kapitel 3 vorgestellten Simulationssoftwares.

Helmecke et al. haben in einer Studie experimentelle Messunsicherheiten für Messungen mit einem Röntgencomputertomografen Werth TomoCheck 200 3D an zwei kalibrierten Kleinbauteilen aus Aluminium und Polymer bestimmt. Mit einer simulativen Nachbildung des Geräts in aRTist 2, welche Verteilungsfunktionen für die Aufnahmegeometrie enthält, wurden je fünfzig Wiederholsimulationen durchgeführt und daraus numerische Messunsicherheiten bestimmt. Für das Aluminiumbauteil stimmten die Messunsicherheiten in grober Näherung überein, für das Polymerbauteil gab es größere Abweichungen. [18, 19]

Hiller et al. führten eine Fallstudie mit einem Hohlzylinder aus Stahl als Messobjekt durch. In dieser Fallstudie wurden in der Simulation nicht nur die Geometrieparameter, sondern auch andere Aufnahmeparameter variiert. Dabei wurden die Simulationen in der Umgebung Scorpius Xlab durchgeführt. Die numerisch bestimmten Messunsicherheiten bewerteten die Autoren als zu hoch. [20]

Reiter et al. demonstrierten mit SimCT an einem Aluminium-Bauteil, dass SimCT grundsätzlich die notwendigen Funktionalitäten zur Monte Carlo-Messunsicherheitsbestimmung und der Analyse einzelner Messunsicherheitsbeiträge bietet. [21]

6. Zusammenfassung

Der Beitrag bietet einen Überblick über die Möglichkeiten der Messunsicherheitsbestimmung für die dimensionelle Röntgencomputertomografie und beschreibt relevante Fallstudien sowie Möglichkeiten zur numerischen Simulation des Aufnahmeprozesses. Der Beitrag hat gezeigt, dass Simulationen röntgencomputertomografischer Messaufgaben immer relevanter werden, da sie sowohl kostensparend als auch zeitsparend sein können. Für eine Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit nach GUM Supplement 1 ist es jedoch notwendig alle relevanten physikalischen Wechselwirkungen zu modellieren. Die Ermittlung dieser Einflüsse für spezifische CT-Geräte, sowie deren Übertragung in eine Simulationsumgebung, stellt derzeit die größte Herausforderung dar. Perspektivisch wird vor allem relevant sein, eine möglichst realistische Simulation spezifischer CT-Systeme zu erhalten und anhand dieser Simulationen zu verifizieren, dass für eine breite Auswahl von Bauteilen und entsprechender Messaufgaben eine realistische Vorhersage der experimentell bestimmten aufgabenspezifischen Messunsicherheit möglich ist. Dies ist Inhalt laufender Forschungsarbeiten.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Beiträge nach CRediT [22]

Tino Hausotte (T.H.) und Florian Wohlgemuth (F.W.) waren an dem Finanzierungsantrag und der Projektadministration beteiligt. T.H. war für Betreuung und Bereitstellung der benötigten Ressourcen zuständig. Tamara Reuter (T.R.), F.W und T.H. waren am Review und an der Finalisierung des Manuskripts beteiligt. T.R., und F.W. waren für Konzeptualisierung, Datenpflege, Methodik, Software, Visualisierung und Entwurf des Manuskripts zuständig.

Danksagung

Die dargestellte Arbeit ist im Rahmen des WIPANO Förderprojektes CTSimU [4] (03TNH026A) durchgeführt worden. Die WIPANO-Förderrichtlinie wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie finanziert und durch den Projektträger Jülich verwaltet. Die Autoren danken allen beteiligten Forschungspartnern des Projekts CTSimU für die fachliche Diskussion und Unterstützung.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur

[1] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2015): Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik, Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozesseignung von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren. VDI/VDE 2630 Blatt 2.1, Düsseldorf: Beuth Verlag.

[2] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1) (2008): JCGM 101:2008 - Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” - Propagation of distributions using a Monte Carlo method.

[3] https://www.ptb.de/empir2018/advanct/project/, abgerufen am 24.08.2021.

[4] https://www.ctsimu.forschung.fau.de/, abgerufen am 23.08.2021.

[5] F. Wohlgemuth, A. M. Müller, and T. Hausotte (2018): Development of a virtual metrological CT for numerical measurement uncertainty determination using aRTist 2, Tm-Technisches Messen, Vol. 85, Nr. 12, S. 728–737.

[6] A. M. Müller, F. Wohlgemuth u. T. Hausotte (2018): Simulation-based correction of systematic errors for CT measurements, 8th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels.

[7] F. Wohlgemuth u. T. Hausotte (2020): Convergence behaviour of numerical measurement uncertainty evaluation using a virtual metrological computed tomography system, 10th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels.

[8] T. Reuter, F. Borges de Oliveira, D. Plotzki. U. T. Hausotte (2022): Influence of detector misalignments on different geometrical and dimensional measurands using a dedicated test specimen, 11th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels (eingereicht).

[9] T. Reuter, D. Plotzki, F. Borges de Oliveira, u. T. Hausotte (2021): Simulative Untersuchung des Einflusses von Bildrauschen auf dimensionelle Messungen mit industriellen Computertomografen, DGZfP-Jahrestagung 2021.

[10] F. Wohlgemuth, C. Bellon, u. T. Hausotte (2022): Measurement-based Detector Characteristics for Digital Twins in aRTist, 20th World Conference on Nondestructive Testing, Incheon, Korea (eingereicht).

[11] F. Wohlgemuth u. T. Hausotte (2021): Realistische Simulation spezifischer CT-Systeme in aRTist 2, DGZfP-Jahrestagung 2021.

[12] S. Carmignato, W. Dewulf, u. R. Leach (2018): Industrial X-ray computed tomography, Cham, Schweiz: Springer-Verlag.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[13] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2012): Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM) Deutsch-Englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 4. Auflage.

[14] F. Wohlgemuth, F. Wolter u. T. Hausotte (2020): Digitale Zwillinge metrologischer Röntgencomputertomografen für die numerische Messunsicherheitsbestimmung, ZfP heute. Wissenschaftliche Beiträge zur zerstörungsfreien Prüfung, S. 106–110.

[15] M. Reiter, M. Erler, C. Kuhn, C. Gusenbauer u. J. Kastner (2016): SimCT: a simulation tool for X-ray imaging, 6th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels.

[16] J. Hiller, T. O. Fuchs, S. Kasperl u. L. M. Reindl (2011): Einfluss der Bildqualität röntgentomographischer Abbildungen auf Koordinatenmessungen: Grundlagen, Messungen und Simulationen, Tm-Technisches Messen, Vol. 85, Nr. 7-8, S. 334–347.

[17] C. Bellon, A. Deresch, C. Gollwitzer u. G.-R. Jaenisch (2012): Radiographic simulator aRTist: version 2, 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa.

[18] E. Helmecke, M. Fleßner, M. Kaufmann, A. Staude, u. T. Hausotte (2016): Numerical measurement uncertainty determination for dimensional measurements of microparts with CT, 6th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels.

[19] E. Helmecke, F. Wohlgemuth, C. Klein, and T. Hausotte (2017): Numerische Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit mit Hilfe eines virtuellen metrologischen Röntgencomputertomografen, Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, Tagung Erfurt, Vol. 15.

[20] J. Hiller u. L. M. Reindl (2012): A computer simulation platform for the estimation of measurement uncertainties in dimensional X-ray computed tomography, Measurement, Vol. 45, Nr. 8, S. 2166–2182.

[21] M. Reiter u. J. Kastner (2016): Investigation towards simulation-based determination of measurement uncertainties for X-ray computed tomography, 4th International Conference on Image Formation in X-ray Computed Tomography, S. 177–180.

[22] CASRAI CRediT, https://casrai.org/credit/, abgerufen am 23.08.2021

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Modellbildung in der Messtechnik und ihre künftige Entwicklung

Nadine Schiering, **Olaf Schnelle-Werner**,
ZMK & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen;
Michael Heizmann, Institut für Industrielle Informationstechnik,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT);
Klaus-Dieter Sommer, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Kurzfassung
Modelle sind in der Messtechnik essenziell, da sie ermöglichen, aus Messdaten bzw. Ausgangssignalen und Kenntnissen über den Messprozess Messergebnisse und Messunsicherheiten abzuleiten. Sie stellen den mathematischen Zusammenhang zwischen der Messgröße und allen relevanten Größen, von denen die Messgröße abhängt, her. Modelle werden verwendet, um Messsysteme zu entwerfen, Messdaten zu analysieren, Rückschlüsse und Vorhersagen zu machen, und bildet die Grundlage für die Bewertung von Messunsicherheiten. Klassische Modellbildungsansätze basieren auf physikalischen Prinzipien und sind typischerweise analytisch-parametrisch. Doch mit dem zunehmenden Einsatz digitaler Technologien, großer Sensornetzwerke und leistungsfähiger Computer werden die klassischen Ansätze mehr und mehr durch datengetriebene Modellbildungsansätze ersetzt bzw. ergänzt. Das gilt insbesondere da, wo große und komplex vernetzte Sensorsysteme verwendet werden und wenig Expertenwissen über die realen und sich oft ändernden Zusammenhänge verfügbar ist. In diesem Beitrag wird die Entwicklung von traditionellen analytisch-parametrischen zu datengetriebenen Modellierungsansätzen aufgezeigt.

Abstract
Models are essential in metrology, as they enable measurement results and measurement uncertainties to be derived from measurement data or output signals and knowledge about the measurement process. They establish the mathematical relationship between the measurand and all relevant quantities on which the measurand depends. Models are used to design measurement systems, analyse measurement data, make inferences and predictions, and forms the basis for evaluating measurement uncertainties. Classical modelling approaches are based on physical principles and are typically analytical parametric. However, with the increasing use of digital technologies, large sensor networks, and powerful computer, classical approaches are increasingly being replaced or complemented by data-driven modelling approaches. This is especially true where large and complex networked sensor systems are used and little expert knowledge of real-world and often changing contexts is available. In this paper, the evolution from traditional analytical parametric to data-driven modelling approaches is highlighted.

1. Vorbemerkung

Wesentliche Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen des europäischen Joint Research project 17IND12 Met4FoF of the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) erarbeitet. Siehe dazu auch die Danksagung.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Einleitung

Durch die digitale Transformation verändern sich die Produktionsprozesse in der Industrie mit zunehmender Geschwindigkeit. In vollständig digitalisierten Produktionsprozessen kommen komplexe Netzwerke von Sensoren sowie künstliche Intelligenz zur Anwendung. Die Netzwerke beinhalten häufig eine internetbasierte Verbindung der Sensoren, ähnlich dem Industrial Internet of Things (IIoT). Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von kostengünstigen IIoT-fähigen Messgeräten sind die Sensornetzwerke viel größer und komplexer als bei traditionellen Messanwendungen. Infolgedessen und aufgrund unvollständigen Expertenwissens über die Systeme und ihre möglichen Veränderungen ist die Datenanalyse typischerweise datengetrieben und es werden zunehmend Methoden des maschinellen Lernens eingesetzt. Darüber hinaus erhöht der Einsatz von digitalen Zwillingen, bei denen ein Modell eines physischen Objekts auf der Grundlage eines sich entwickelnden Datensatzes aktualisiert wird [Wright 2020] gewollt die Flexibilität der Vernetzung. Mit diesem Paradigmenwechsel in der Behandlung und Analyse von Messdaten müssen traditionelle Ansätze für die Modellierung in der Messtechnik weiterentwickelt und ergänzt werden.
Die mathematische Modellierung beinhaltet im Allgemeinen die Zuordnung von mathematischen Begriffen zu allen relevanten Komponenten eines Systems oder Prozesses und die Ableitung von mathematischen Gleichungen, die die Beziehungen zwischen diesen Begriffen angeben. In der Messtechnik unterscheidet man zwischen Termen, die sich auf bekannte oder gemessene Größen beziehen und solchen, die unbekannt sind und aus gemessenen Daten geschätzt werden müssen. Ein Modell kann unter Verwendung physikalischer Prinzipien konstruiert werden, die auf einer Theorie und Expertenwissen darüber beruhen, die definieren, wie die Größen voneinander abhängen. Alternativ dazu ist ein datengetriebenes Modell eines, bei dem Beziehungen zwischen den Größen erwartet oder anhand von Daten beobachtet werden, jedoch ohne eine unterstützende Theorie. Viele Modelle haben aber sowohl physikalische als auch datengesteuerte Komponenten.
Modelle liefern auch die Grundlage für die Bewertung der Unsicherheit, die erforderlich ist, um die Qualität von Schätzungen von Größen zu quantifizieren. Diese wird auch für Entscheidungsfindungen genutzt und um die Rückführbarkeit von Messergebnissen leicht verständlich darzustellen.
Der "Guide to the expression of uncertainty in measurement" (GUM) [GUM 2008] gilt in der Metrologie als De-facto-Standard und bietet Vorgehensweisen zur Bewertung der Messunsicherheit, die sowohl modellbasiert als auch probabilistisch sind.

3. Allgemeine Ziele und Konzepte der mathematischen Modellierung

Im Allgemeinen ist ein Modell ein auf das Wesentliche reduziertes Abbild der Wirklichkeit. In der Messtechnik meist das Abbild eines Prozesses oder Objektes oder Systems. Ein Modell kann dazu verwendet werden, ein Messergebnis zu ermitteln und damit einen Prozess oder ein System zu erklären oder quantitativ zu simulieren oder zu bewerten. Ein Modell kann auch dazu verwendet werden, einen neuen Sensor zu entwickeln und damit ein System oder einen Prozessablauf systematisch und erklärbar zu gestalten und zu erstellen. Erklärbarkeit und quantitative Bewertung erfordern eine (manchmal sehr) vereinfachte Sicht auf reale Systeme und Prozesse. Alle Modelle sind unvollkommen und ihre Fähigkeit, das Verhalten in der realen Welt darzustellen, ist immer begrenzt. Eine Modellierung muss jedoch alle wesentlichen Komponenten und Einflüsse beinhalten, die das gewünschte Ergebnis bestimmen. Dieses Zusammenspiel zwischen Vereinfachung auf der einen Seite und Relevanz und Zweckmäßigkeit auf der anderen Seite ist als Pragmatismusprinzip bekannt.
Normalerweise besteht ein Modell aus einer Reihe von mathematischen Gleichungen, die mindestens zwei Größen betreffen. Im Allgemeinen kann ein Modell grafisch, in tabellarischer Form, als Flussdiagramm oder Zeitplan, als erläuternder Text oder auf andere Weise dargestellt und angewendet werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Schritte der Modellbildung

Wir können prinzipiell den Modellbildungsprozess in die folgenden sechs Schritte aufteilen [Sommer 2021]:

Abgrenzung: Modelle sind in der Regel nicht universell anwendbar, sondern beziehen sich auf einen bestimmten Geltungsbereich. Der Arbeitsbereich, auf den das Modell anwendbar ist, kann z. B. durch physikalische Bedingungen definiert werden. Der Umfang des Modells bestimmt im Wesentlichen seine Verallgemeinerbarkeit.

Abstraktion: Modelle werden in der Regel nicht nur für einzelne Systeme erstellt, sondern für Klassen von Systemen, die sich auf die gleiche Weise beschreiben lassen. Ein Modell kann dann - jeweils nach Anpassung der Modellparameter - auf eine ganze Klasse von gleichen oder ähnlichen Systemen angewendet werden.

Reduktion: Mit dem Schritt der Abstraktion geht in der Regel die notwendige Reduktion der Systembeschreibung einher, um sie im Sinne der Zielsetzung verständlich und erklärbar zu machen. Einflussfaktoren und Details, die für das Systemverhalten von geringer Relevanz sind, werden weggelassen. Diese Reduktion der Systembeschreibung und damit die Reduktion der Informationen über das System führt natürlich zwangsläufig zu Abweichungen des modellierten Verhaltens vom realen, zu bewertenden Systemverhalten. Im Rahmen der Messtechnik sind die durch die Reduktion entstehenden systematischen oder zufälligen Abweichungen zu bewerten, vorzugsweise mittels Messunsicherheitsanalyse.

Dekomposition: In der Regel lassen sich reale, meist komplexe Systeme nicht vollständig verstehen und beschreiben. Dann besteht der bevorzugte Ansatz darin, das System in überschaubare und leicht zu modellierende Teilsysteme zu zerlegen, so dass mehrere Teil-modelle das Gesamtsystem in seiner Gesamtheit repräsentieren. Die Herausforderung dabei ist, die Grenzen der Teilsysteme so zu wählen, dass möglichst einfach zu modellierende Funktionsprimitive entstehen, die sogenannte flache Modellierung. Ein anderer Ansatz zur Definition von Teilsystemen ist die Klassifizierung nach den physikalischen Bereichen, für die sie gelten.

Aggregation: Um das Modell für das Gesamtsystem zu generieren, müssen die im Dekompositionsschritt generierten Teilmodelle zu einem Gesamtmodell kombiniert werden. Dieser Schritt setzt voraus, dass sich die Teilmodelle so ergänzen, dass ein gültiges Gesamtmodell erstellt werden kann. Eine zu starke Reduktion innerhalb der Teilmodelle kann zu Abweichungen im Gesamtmodell führen, die für jedes Teilmodell noch als tolerierbar angesehen werden. Diese Abweichungen können sich so stark auf das Gesamtmodell auswirken, dass die Modellbildung überarbeitet werden muss, z. B. durch Einbeziehung bisher nicht berücksichtigter Einflussgrößen oder Nichtlinearitäten.

Verifizierung: In diesem letzten Schritt sollen die Abweichungen zwischen Modell und Realität empirisch ermittelt und bewertet werden. Neben der Bewertung von systematischen und zufälligen Abweichungen spielen Fragen der Systemdynamik, der zeitlichen Variabilität des Systemverhaltens und der Systemreaktion auf externe Störungen eine große Rolle.

5. Vorwärts- und Rückwärtsmodellierung in der Messung

Der klassische kognitiv-systematische Ansatz zum Verständnis eines Objekts, Systems oder Prozesses führt von der/den Ursache(n) zur/den Wirkung(en) bzw. im Zeitbereich vom Anfang oder Startzeitpunkt zum Ende des zeitlichen Prozesses [Sommer 2005, Sommer 2006]. Dieser sog.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ursache-Wirkungs-Ansatz ist die übliche und häufigste Art der Modellbildung in den Naturwissenschaften und in der Technik.
Im Kontext der Messtechnik ist der Ausgangspunkt der Modellierung meist eine Messkette, deren einzelne Elemente, die sich aus der Zerlegung des Gesamtsystems ergeben, als Übertragungselemente verstanden werden. Die Messgröße ist die Haupteingangsgröße, die ersten Übertragungselemente sind notwendigerweise Messwertaufnehmer oder Sensoren, und die Kette endet mit der Anzeige oder dem Signalausgang. Einfluss- oder Störgrößen können als sekundäre Eingangsgrößen gesehen werden. Bild 1 verdeutlicht den Ansatz der Ursache-Wirkungs-Modellierung am Beispiel eines dimensionellen Messprozesses. Die einzelnen Übertragungselemente können zunächst getrennt voneinander betrachtet werden. In diese Betrachtung fließen sowohl bekannte physikalische Zusammenhänge für das Übertragungsverhalten ein, um z. B. optische Oberflächeneigenschaften des Prüflings zu berücksichtigen, als auch empirische Zusammenhänge, z. B. die Wärmeausdehnung oder die Temperaturabhängigkeit des Messobjekts. Ein solches Ursache-Wirkungs-Modell einer Messung könnte z. B. dazu verwendet werden, das wesentliche und signifikante Verhalten eines Sensors oder eines in Entwicklung befindlichen Messsystems zu simulieren. In der Messtechnik basiert die Ursache-Wirkungs-Modellierung oder Vorwärtsmodellierung oft auf grundlegenden physikalischen Zusammenhängen und entsprechenden Messungen, die zur Erzeugung oder Reproduktion von Referenzwerten von Größen verwendet werden.
Die weitaus häufigsten Anwendungen in der Metrologie zielen aber natürlich auf die Bereitstellung des (bestmöglich geschätzten) Wertes der Messgröße und die Bewertung ihrer zuordenbaren Unsicherheit. Ein Rückwärts- oder Inversmodell dient dazu, aus dem angezeigten Wert und dem Wissen über eventuell dominierende Einflussgrößen und den modellierten Prozess auf Informationen über die Messgröße zu schließen. Die Auswertung einer Messung beinhaltet also die Lösung eines inversen Problems. Das Rückwärtsmodell wird durch die Umkehrung des Ursache-Wirkungs- oder Vorwärtsmodells gewonnen und ist der Ausgangspunkt für die Anwendung der im GUM [GUM 2008] und seinen unterstützenden Dokumenten beschriebenen Methoden zur Unsicherheitsbewertung. Die Ableitung der Messgleichung aus der Ursache-Wirkungs-Beziehung ist im unteren Teil von Bild 1 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

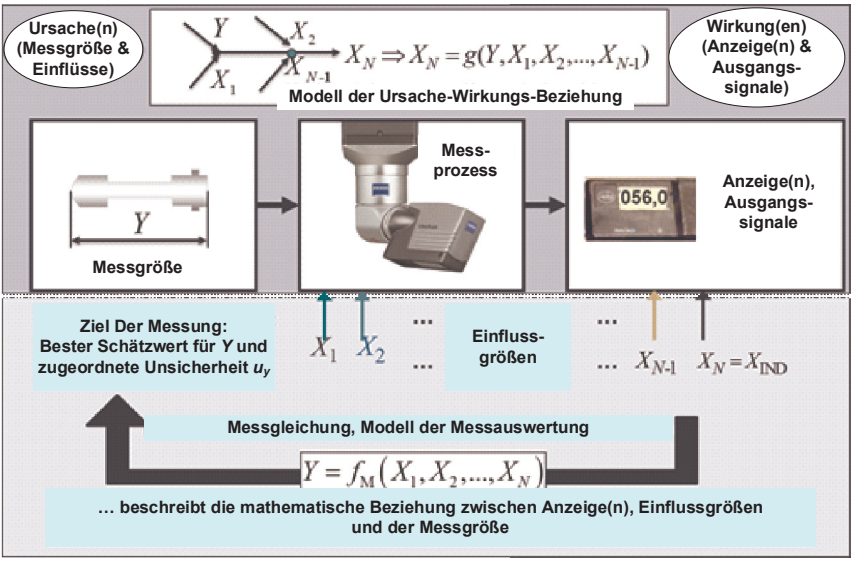


Bild 1: Modellierung einer Messung: (oben) Ursache-Wirkungs-Beziehung und (unten) Messgleichung [Sommer 2018].

6. Modellarten

Die mathematischen Terme, die zur Darstellung der relevanten Komponenten oder Größen eines Systems oder Prozesses verwendet werden, enthalten im Allgemeinen Modellparameter, die zur Erfassung der Abhängigkeiten zwischen diesen Termen dienen. Die Art und Bedeutung solcher Parameter variiert je nach Art des Modells. Bei einem aus der Physik abgeleiteten Modell beispielsweise beziehen sich die Modellparameter in der Regel auf bestimmte physikalische Eigenschaften, wie Temperaturkoeffizient, Masse oder Zeit. Solche Modelle werden als White-Box-Modelle bezeichnet. Manchmal lassen sich die Abhängigkeiten nicht allein aus physikalischen Argumenten ableiten. Daher sind Modelle dieser Art eine Mischung aus einer direkten Beziehung auf der Grundlage einer bekannten (physikalischen oder anderen) Beziehung und einer abstrakteren Beziehung. Solche Modelle werden als Grey-Box-Modelle bezeichnet. Wenn es keine direkte Beziehung gibt, die von physikalischen oder anderen Argumenten abgeleitet ist, wird das Modell üblicherweise als Black-Box-Modell bezeichnet. Bild 2 zeigt einen Überblick über diese drei Arten von Modellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

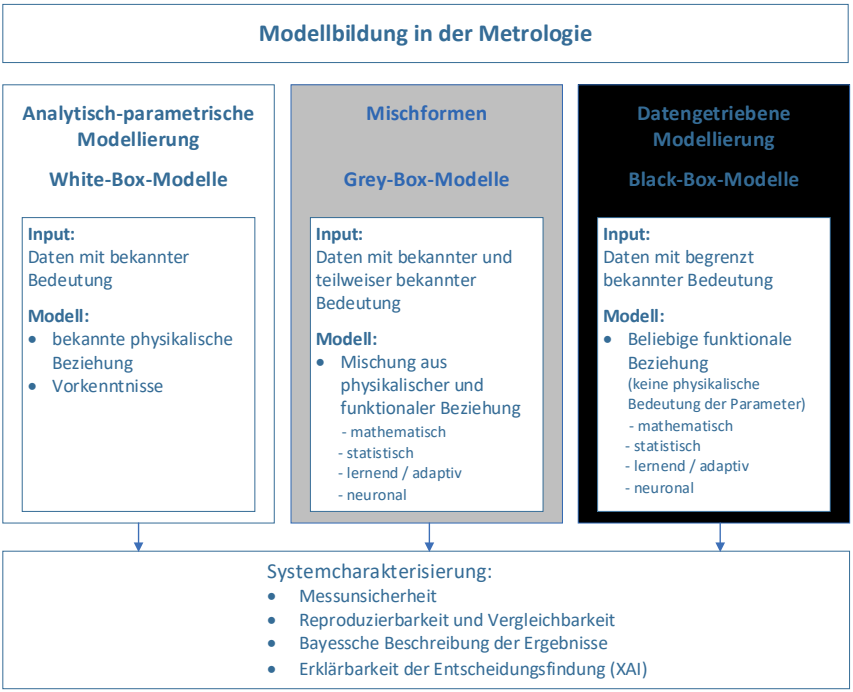


Bild 2: White-, Grey- und Black-Box-Modelle und ihre grundlegenden Eigenschaften [Sommer 2021]

6.1 Analytisch-parametrische Modellierung

Die Grundlage für die analytische Modellierung ist die Analyse der Systemstruktur. Dabei wird versucht, das physikalische System möglichst direkt als mathematisches Modell in Bezug auf alle relevanten Einflussfaktoren und Wechselwirkungen abzubilden. Das Ergebnis ist ein Modell, dessen Eigenschaften vollständig bekannt sind. Ein solches Modell wird daher auch als White-Box-Modell bezeichnet. Die für die Modellierung betrachteten Größen sind in der Regel physikalische Größen wie Drücke, Temperaturen oder Durchflüsse [Heizmann 2016].
Die Erstellung eines analytischen Modells ist nur möglich, wenn ein ausreichendes physikalisches Verständnis des Systems und aller Einflussfaktoren vorhanden ist. Alle Einflüsse, die nicht verstanden werden oder nicht beobachtet werden können oder zu komplex sind, um sie zu modellieren oder zu beobachten, können jedoch durch Zufallsvariablen im Sinne einer Modellreduktion beschrieben werden. Die Aspekte der Dekomposition und Aggregation sind bei dieser Art der Modellierung durch die Auswahl und Kombination der verwendeten Teilsysteme implizit.

Vorteile analytischer Modelle:

- gute Interpretierbarkeit
- einfache Plausibilitätprüfung der grundlegenden Modelleigenschaften
- gute Systembeschreibung über ein großes Intervall

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Nachteil analytischer Modelle:

- physikalisches Verständnis des Systems erforderlich (Expertenwissen)
- erheblicher Aufwand für Systemanalyse und Parametrierung des Modells, um relevante Einflussfaktoren und Ursache-Wirkungsbeziehungen zu ermitteln oder entsprechende Experimente durchzuführen

6.2 Datengetriebene Modelle

Bei der datengetriebenen Modellierung entfallen die Analyse und Abbildung von bereits bekannten Strukturen, physikalischen Wechselwirkungen und ähnlichen Eigenschaften des Systems. Im Gegensatz dazu wird das System nur durch die Interaktion mit seiner Umgebung an den Ein- und Ausgängen des Systems beschrieben. Diese Wechselwirkung wird durch systematische Beobachtung der Ein- und Ausgänge erfasst [Heizmann 2016] und (ursprünglich) mit klassischen mathematischen Ansätzen wie Reihenentwicklungen in ein Modell überführt. Zunehmend kommen nun Ansätze und Methoden des maschinellen Lernens zur Anwendung. Die Anwendungsmöglichkeiten sind breiter gefächert und der Einsatz ist flexibler. Da die interne Struktur des Modells nicht bekannt ist, wird ein solches Modell auch als Black-Box-Modell bezeichnet. Da für die Erstellung des Modells keine Kenntnisse über die interne Struktur des Systems erforderlich sind, kann dieses Verfahren auch in Fällen angewendet werden, in denen die Systemstruktur und das Zusammenspiel der Komponenten im System nicht oder nicht ausreichend bekannt sind, z. B. bei bestehenden Systemen, deren Dokumentation unvollständig ist oder veränderbar ist, z. B. bei softwarestrukturierten Systemen. Datengetriebene Modelle können auch dann von Vorteil sein, wenn die Wechselwirkungen im System schwer zu beschreiben oder zu parametrieren sind, z. B. bei stark nichtlinear gekoppelten Zustandsgrößen.
Bei datengetriebenen Modellen findet insofern eine implizite Reduktion statt, als dass nur die Variablen, die als Eingangs- oder Ausgangsgrößen in der Interaktion mit der Umwelt beobachtbar sind, explizit in der Systemmodellierung berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu analytischen Modellen sind die internen Zustandsgrößen in der Regel keine physikalischen Größen, sondern die Modellvariablen sind synthetische Größen und können daher nicht immer eindeutig interpretiert werden. Die oben genannten Aspekte der Modelldekomposition und -aggregation treten bei datengetriebenen Modellen nicht auf, da das zu modellierende System nicht in Teilmodelle zerlegt oder aus diesen zusammengesetzt wird.
Der Ausgangspunkt für die Erstellung eines datengetriebenen Modells ist das Wissen über die Eingangs- und Ausgangsgrößen im Modell. Diese Größen müssen in allen relevanten Betriebs- bzw. Wertebereichen beobachtet werden, und auch die Dynamik der Größen muss beobachtet werden. Die Auswahl der zur Modellerstellung verwendeten Lerndaten für typische Systemzustände und Betriebsbereiche führt implizit zu einer Eingrenzung des Modells.

Vorteil datengetriebener Modelle:

- kein explizites physikalisches Verständnis des Systems erforderlich
- anwendbar auf komplexe Systeme oder System mit unbekannter interner Struktur
- Modellierung im laufenden Betrieb möglich
- gut geeignet, um Anomalien, d. h. signifikante Abweichungen des aktuellen Systemzustands von einem gewünschten oder normalen Zustand, zu erkennen

Nachteile datengetriebener Modelle:

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Nachteile datengetriebener Modelle:

- typische Werte von Eingängen und Ausgängen müssen in allen relevanten Formen vorliegen, wenn diese Beobachtungen nicht verfügbar sind, kann das Modell unvollständig sein, d. h. die Reduktion ist zu stark oder die Abgrenzung ist nicht korrekt
- Mindestmaß an Wissen über das System ist dennoch erforderlich
- schwierige Plausibilitätsprüfung aufgrund der Interpretierbarkeit der Modellvariablen
- geringe Generalisierbarkeit
- Bildung von Klassen ähnlicher Systeme schwierig

6.3 Mischformen

Logischer- und vernünftigerweise gibt es viele Mischformen aus analytisch-parametrisch und datengetriebenen Modellen, die Vorteile beider Ansätze kombinieren. Bekannte Zusammenhänge (z. B. von Teilsystemen) werden für die Modellbildung genutzt, unbekannte Zusammenhänge werden mittels datengetriebener Modellbildung nutzbar gemacht. Bei diesen gemischten Ansätzen spricht man von *Greybox*-Modellen [Heizmann 2016].
Auch wenn die physikalische Struktur des Systems durch analytische Modellierung definiert ist und die Modellparameter zunächst durch Analyse des Systems ermittelt werden, kann die Qualität der Parameteranpassung meist durch eine spätere datengetriebene Optimierung verbessert werden. Bei einem reinen White-Box-Modellansatz müssten die unbekannten Wechselwirkungen mit Hilfe probabilistischer Argumente oder als Modellunsicherheiten einbezogen werden. Ein kombinierter Ansatz aus analytischer und datengetriebener Modellierung kann dann die Gesamtunsicherheit reduzieren.

6.4. Digitale Zwillinge in der Messtechnik

Digitale Zwillinge, als eine besondere Ausprägung von Grey-Box-Modellen, sind einer der wichtigsten und aktuellsten Enabler für die Automatisierung von Prozessen in der Industrie. Aber auch bei der Messung von komplexen Prozessen oder Objekten, z. B. der Geometrie mehrdimensionaler Strukturen oder der Kombination mehrerer Messgrößen, z. B. bei indirekten Messungen, Softsensoren und Condition Monitoring, spielen sie eine immer wichtigere Rolle.
Im Allgemeinen ist ein digitaler Zwilling eine vollständige digitale Repräsentation eines Objekts oder Prozesses aus der realen Welt in der virtuellen Welt. Diese digitale Repräsentation enthält ausgewählte Merkmale, Zustände und, abhängig von äußeren Einflüssen, das Verhalten des Messobjekts oder -prozesses. Es handelt sich also um ein System von aggregierten digitalen Modellen, die durch verarbeitete externe Daten und Informationen gesteuert werden. Innerhalb dieser Repräsentation können unterschiedliche Modelle, Informationen oder Daten während verschiedener Lebenszyklus- oder Prozessphasen miteinander verknüpft werden [Stark 2020]. Konnektivität und Interoperabilität mit IT (ECO-)Systemen sind daher wesentliche Fähigkeiten Digitaler Zwillinge. Digitale Zwillinge ermöglichen somit einen umfangreichen und weitgehend unsicherheitsfreien Datenaustausch. Die weiterzugebenden Daten sind bis auf die Diskretisierungs-Unsicherheit theoretisch als sehr genau bekannt [Sommer 2021] anzunehmen.
Ein digitaler Zwilling wird als komplexes Modell aus einer realen Instanz, z. B. einem (komplexen) Messobjekt oder Messsystem, oder aus einem sogenannten digitalen Prototyp/Master erstellt. Die Aufbereitung der Betriebs-, Zustands- oder Prozessdaten der realen Instanz wird oft als digitaler Schatten bezeichnet. Ein digitaler Schatten hat die Aufgabe, große Mengen heterogener Daten in eine Form umzuwandeln, die leicht in spezialisierte messtechnische Modelle übertragen und verwendet werden kann.

Die prinzipielle Funktionsweise eines digitalen Zwillings in der Mess- und Sensortechnik und Metrologie ist in Bild 3 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

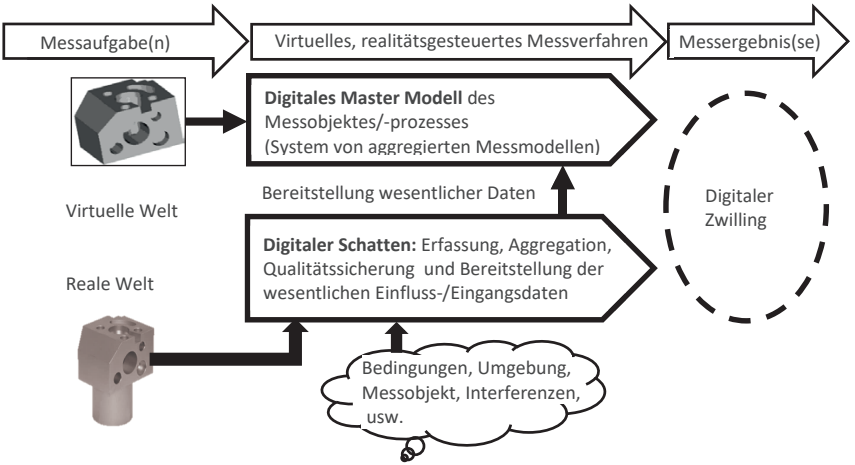


Bild 3: Prinzipielle Funktionsweise eines digitalen Zwillings in der Mess- und Sensortechnik [Sommer 2021]

7. Schlussfolgerung und Ausblick

In der Messtechnik spielt das mathematische Modell, das die Messwerte mit dem (geschätzten) Wert der Messgröße in Beziehung setzt, eine wesentliche Rolle bei der Bewertung der Unsicherheit. Dieses Modell ist die Grundlage für die Propagierung von Unsicherheiten, die mit den Einflussgrößen verbunden sind, auf eine Unsicherheit, die mit der Schätzung der Messgröße verbunden ist. Ein kürzlich veröffentlichtes Supplement [GUM6 2020] zum "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" widmet sich der Aufgabe der Modellierung und gibt einen Überblick über verschiedene, typischerweise in der Metrologie angewandte Methoden.

In der Zukunft wird es immer mehr vernetzte, verteilte Messsysteme, große Mengen flüchtiger Daten, d. h. sogenannte "Big Data" und datengetriebene Modellierungsansätze geben. Die Kombination dieser Eigenschaften stellt die etablierten Modellierungsansätze, die typischerweise in der Messtechnik angewendet werden, vor Herausforderungen. So werden in der Ergänzung [GUM6 2020] lineare zeitinvariante Systemmodelle für die Messung zeitabhängiger Größen vorgestellt. Dabei werden viele solcher Sensoren typischerweise mit anderen Datenquellen zu einem komplexen Netzwerk von Sensoren miteinander kombiniert.

In diesem Beitrag haben wir die bestehenden Konzepte aus der Modellierung kurz aufgezeigt und ihre mögliche Nutzung diskutiert. White-Box-, Black-Box- und Grey-Box-Modelle sind aus der Systemidentifikation und anderen Bereichen bekannt. Ihre Verwendung in der Messtechnik als Grundlage für die Ausbreitung von Unsicherheit in Sensornetzwerken wurde jedoch bis vor kurzem noch nicht behandelt. Die Verwendung von White- und Grey-Box-Modellen ist in der Metrologie recht gut bekannt, wobei z. B. der jüngste Nachtrag zum GUM sich auf diese Modelltypen konzentriert. Die Erweiterung und Weiterentwicklung der zugrundeliegenden Prinzipien in Richtung der Behandlung von datengetriebenen Black-Box-Modellen wird auf diesem Wissen aufbauen. Daher werden in diesem Beitrag die Grundprinzipien für White- und Grey-Box-Modelle dargestellt und deren Abgrenzung zu Black-Box-Modellen eingeführt. Nähere Erläuterungen und weiterer Beispiele

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zu den in diesem Beitrag beschriebenen Konzepten der Modellbildung sind im Beitrag [Sommer 2021] aufgeführt.

Danksagung / Acknowledgement
Part of this work has been developed within the Joint Research project 17IND12 Met4FoF of the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). The EMPIR is jointly funded by the EMPIR participating countries within EURAMET and the European Union.

Unser spezieller Dank gilt unseren Autorenkollegen, mit denen wir im Rahmen des EMPIR-Projektes 17IND12 Met4FoF gemeinsam das Manuskript „Modelling of Networked Measuring Systems – an Essential Component of the Factory of the Future“ [Sommer 2021] erarbeitet haben, namentlich Andonovic, I., University of Strathclyde, UK; Dorst, T., ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Saarbrücken; Eichstädt, S., Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig and Berlin; Füssl, R., Technische Universität Ilmenau; Gourlay, G., University of Strathclyde, UK; Harris, P. M., National Physical Laboratory, Teddington, UK; Luo Y., National Physical Laboratory, Teddington, UK; Maier, A., Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; Schütze, A., Universität des Saarlandes, Saarbrücken; Tachtatzis, C., University of Strathclyde, UK.

Literatur

[GUM 2008] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008.

[GUM6 2020] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 6: Developing and using measurement models. Joint Committee for Guides in Metrology, GUM-6: 2020.

[Heizmann 2016] Heizmann, M. und Puente León F.: Modellbildung in der Mess- und Automatisierungstechnik, DE GRUYTER OLDENBOURG tm – Technisches Messen 2016; 83(2): 63–65, DOI 10.1515/teme-2015-0126.

[Sommer 2005] Sommer, K.-D., Weckenmann, A. and Siebert, B.R.L. A systematic approach to the modelling of measurements for uncertainty evaluation. J. Phys.: Conf. Ser., 13, 052, pp. 224-227, 2005.

[Sommer 2006] Sommer, K.-D., Siebert, B.R.L. Systematic approach to the modelling of measurements for uncertainty evaluation. Metrologia, 43, pp. 200-210, 2006.

[Sommer 2018] Sommer, K.-D. Lecture on measurement data evaluation and uncertainty. Lecture script. Technische Universitaet Ilmenau, 2018.

[Sommer 2021] Sommer K. D. et al. Modelling of Networked Measuring Systems – an Essential Component of the Factory of the Future, JSSS, 2021 – in print

[Stark 2020] Stark, R. et al. WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. http://www.wigep.de/fileadmin/Positions_und_Impulspapiere/Positionspapier_Gesamt_20200401_V11_final.pdf (Abruf: 2020.10.07)

[Wright 2020] Wright, W. and Davidson, S. How to tell the difference between a model and a digital twin. *Adv. Model. and Simul. In Eng. Sci.*, **7**: 13, 2020. https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Steifigkeitskalibrierung von Cantilevern

Rückführbares Messen der Kraft-Weg-Kennlinie

Dr. -Ing. **Oliver Dannberg**, Prof. **Thomas Fröhlich**,
Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Kurzfassung

Mit AFM-Cantilevern lassen sich Kräfte im Subnanonewtonbereich messen. Dazu muss die Durchbiegung gemessen werden und deren Steifigkeit bekannt sein. Aufgrund von Fertigungstoleranzen kommt es zu großen Abweichungen der Steifigkeit, sodass jeder Cantilever individuell kalibriert werden muss. An der TU-Ilmenau wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher die Steifigkeit von Cantilevern nach dem statisch-experimentellen Verfahren misst. Dazu wird die Spitze des Cantilevers in Kontakt mit einer Waage gebracht und die Kraft-Weg-Kennlinie gemessen. Aus deren Anstieg lässt sich die Steifigkeit mit einer kombinierten Messunsicherheit von ca. 1,5% bestimmen. In diesem Artikel wird der Messablauf anhand eines Beispiels erörtert und anschließend ein Messunsicherheitsbudget aufgestellt. Der größte Unsicherheitsbeitrag der Cantilevesteifigkeit kommt durch die Kraftmessung zustande.

1. Messprinzip

An der TU Ilmenau wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher die Cantileversteifigkeit durch ein statisch experimentelles Verfahren ermittelt [1]. Dafür wird der Cantilever an einem Piezopositioniertisch befestigt und in Stufen auf den Taster einer EMK-Waage gedrückt. In Bild 1 ist der prinzipielle Ablauf einer Kalibrierung, sowie die ermittelte Kraft-Weg-Kennlinie, deren Anstieg der Cantileversteifigkeit entspricht, dargestellt.

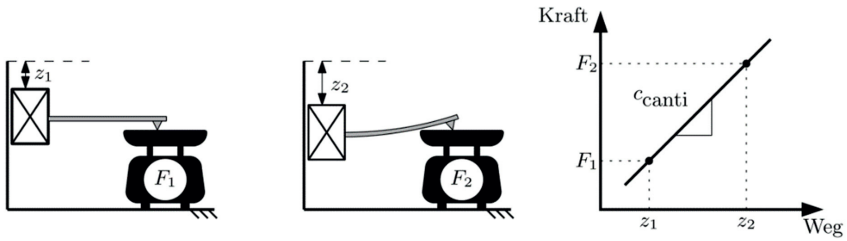


Bild 1: Kalibrierung eines AFM-Cantilevers mit einem statisch experimentellen Verfahren sowie die gemessene Kraft-Weg-Kennlinie

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Spitzen von Cantilevern weisen, je nach Anwendung, ein hohes Aspektverhältnis sowie einen geringen Spitzenradius auf. Der für diese Kalibriermethode zwingend notwendige Kontakt zwischen Spitze und Taster kann bei großen Kalibrierkräften zu einer Beschädigung der Spitze führen [2]. Zudem reduziert eine große Durchbiegung des Cantilevers dessen effektive Länge und ruft einen nichtlinearen Verlauf der Kraft-Weg-Kennlinie hervor. Der Effekt ist in Bild 2 schematisch dargestellt.

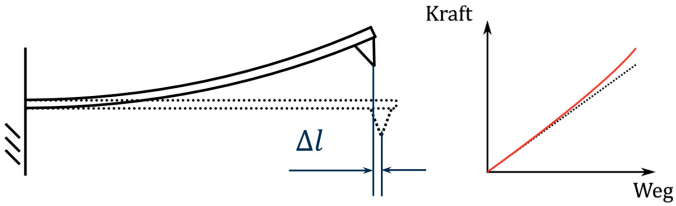


Bild 2: Die effekve Länge des Cantilevers reduziert sich bei starker Durchbiegung (links) und die Kraft-Weg-Kennlinie wird nichtlinear (rechts)

Um diese Effekte zu vermeiden, muss die Steifigkeitsmessung bei einer geringen Kalibrierkraft erfolgen. Das wiederum hat einen höheren Unsicherheitsbeitrag der Kraftmessung zur Folge. In [3] und [4] wurden kommerzielle Wägezellen zur statischen Kalibrierung von Cantilevern verwendet. Diese haben zwar einen großen Messgebereich, sind dadurch aber in ihrer Auflösung limitiert.

Daher wurde für diesen Prüfstand eine neuartige Wägezelle entwickelt, welche auf das Messen von sehr kleinen Kräften optimiert wurde.

2. Messaufbau

In Bild 3 ist eine schematische Übersicht des Prüfstandes dargestellt. Die Kraftmessung erfolgt durch eine eingelenkige, monolithische Wägezelle (gelb), welche nach dem Prinzip der elektrostatischen Kraftkompensation arbeitet [5]. So wird die Kraft des Cantilevers über einen Taster (5) eingeleitet und durch einen Voice Coil Aktor (6) kompensiert. Aus dem notwendigen Strom in der Spule lässt sich mithilfe der Kraftkonstante sowie dem Hebelverhältnis auf die wirkende Kraft am Taster schließen. Um sicherzustellen, dass sich der Wägebalken während der Messung stets in derselben Position befindet, misst ein Differenzinterferometer (7) dessen Position.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

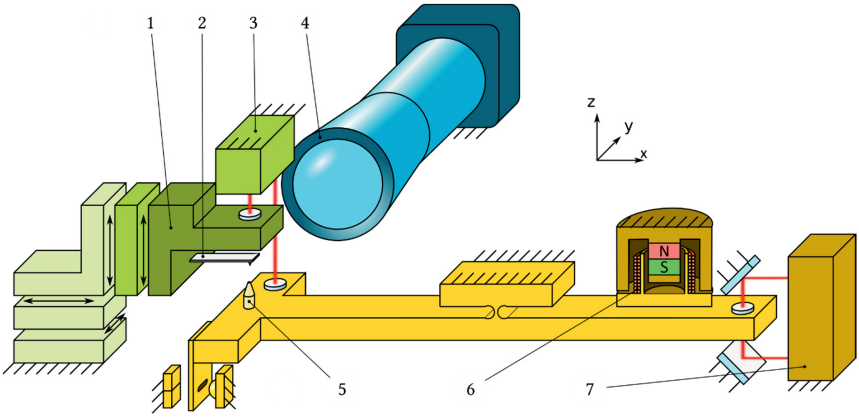


Bild 3: Cantileverprüfstand mit Führungen zur Positionierung (grün) und einer Wägezelle (gelb) zur Kraftmessung

Der Cantilever (2) wird an einem Halter (1) befestigt und durch Spindelführungen in x, y und z positioniert. Eine Kamera (4) gewährleistet, dass sich die Spitze des Cantilevers zu Beginn der Messung mittig über dem Taster (5) befindet. Während der Messung erfolgt die Positionierung durch eine Piezoführung, da diese kein Umkehrspiel ausweist und eine kleinere Schrittweite ermöglicht. Ein weiteres Differenzinterferometer (2) misst rückführbar die Relativposition zwischen Cantileverhalter und Wägezelle. Durch das relative Messen der Cantileverposition werden Effekte wie eine Nullpunktdrift oder thermische Ausdehnung mit erfasst und haben folglich keinen Einfluss auf das Messergebnis.

3. Messergebnisse

Im Folgenden wird die Kalibrierung eines weichen Cantilevers beschrieben, dessen Steifigkeit vom Hersteller mit $30\,\mathrm{mNm^{-1}}$ angegeben wird [6]. Das stellt für die statisch experimentelle Kalibriermethode eine Herausforderung dar, da bereits eine kleine Kalibrierkraft zu einer starken Durchbiegung und den beschriebenen Effekten führt. Außerdem wird der Radius der Spitze mit $< 30\mathrm{nm}$ angegeben, sodass diese beim Kontakt zum Taster der Waage beschädigt werden kann.

Während der Kalibrierung wurde der Cantilever in $1\mu\mathrm{m}$ Schritten auf die Wägezelle gedrückt. Jeder Lastzyklus umfasst 7 Schritte, welche in einem ABA-Zyklus durchlaufen wurden. In Bild 4 sind die Rohdaten des Kompensationsstroms während eines Lastzyklus dargestellt. Nach jedem Lastwechsel benötigt die Wägezelle eine Einschwingzeit, weshalb nur die Messwerte am Ende einer Laststufe (orange) gemittelt wurden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

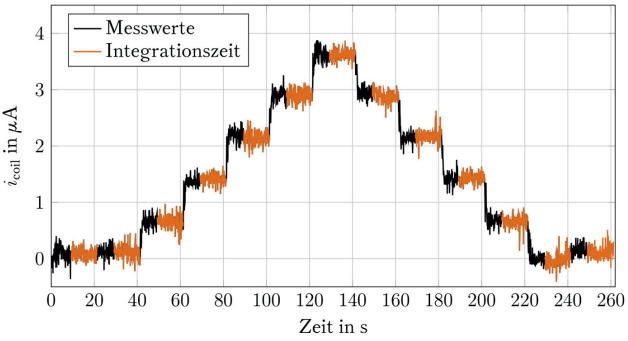


Bild 4: Rohdaten des Kompensationsstroms während der Kalibrierung

Die Messdaten des Differenzinterferometers wurden auf die gleiche Weise verarbeitet und sind in Bild 5 gegenüber der Kraft dargestellt. Während der ersten 2 Schritte befand sich der Cantilever in Luft, sodass sich die Kraft nicht erhöht hat. Sobald es zum Kontakt zur Waage kam, stieg die Kennlinie linear an. Beim Entlasten wurde eine negative Kraft gemessen, was auf ein Haften der Cantileverspitze auf dem Taster zurückzuführen ist. Die Steigung der Kennlinie wurde durch eine Regressionsgerade im linearen Bereich ermittelt und die Residuen im Diagramm dargestellt.

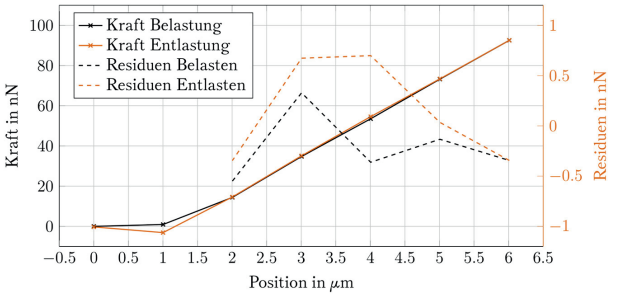


Bild 5: Kraft-Weg-Kennlinie des Cantilevers während eines Lastzyklus sowie die Linearitätsabweichungen

Dieser Zyklus wurde in einer Dauermessung über 20h wiederholt und jeweils der Anstieg der Be- und Entlastungskennlinie ermittelt. Die gefundenen Werte sind in Bild 6 dargestellt und weisen keine Drift oder systematische Abweichung auf.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

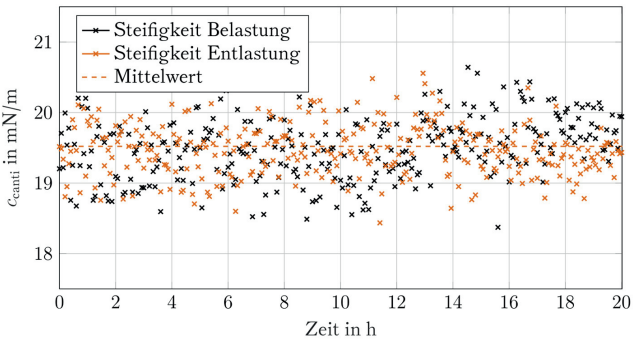


Bild 6: Messergebnisse einer Langzeitmessung der Cantileversteifigkeit

Der Mittelwert aus allen Zyklen beträgt $c_{\mathrm{canti}} = 19{,}52\ \mathrm{mNm}^{-1}$ und stellt den besten Schätzwert für die Cantileversteifigkeit dar.

4. Spitzenverschleiß

Das Messen der Steifigkeit ermöglicht eine rückführbare Kraftmessung mit dem Cantilever. Voraussetzung dafür ist, dass die Spitze des Cantilevers während der Kalibrierung nicht beschädigt wird. Um das zu überprüfen, wurde der Cantilever nach der Kalibrierung mit einem Rasterelektronenmikroskop untersucht.

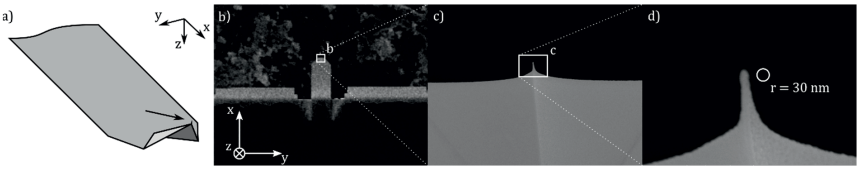


Bild 7: Schematische Darstellung des Cantilevers (a) sowie eine Rasterelektronenaufnahme nach der Kalibrierung mit einer Größenreferenz

In Bild 7 a) ist der Cantilever zur Verdeutlichung von dessen Form schematisch dargestellt. Die Abbildungen b), c) und d) zeigen wiederum die REM-Aufnahme der Cantileverspitze nach der Kalibrierung in verschiedenen Vergrößerungen. Der Kreis in d) dient als Größenreferenz und entspricht der Herstellerangabe für den Spitzenradius. Die Spitze unterschreitet den spezifizierten Radius und weist keine Bruchkanten auf. Es ist daher anzunehmen, dass durch die Kalibrierung kein Schaden an der Spitze entstanden ist. Alternativ kann der Cantilever auch nach der Nutzung im AFM kalibriert werden, sodass ein Spitzenverschleiß während der anschließenden Kalibrierung keine Konsequenzen hat. Allerdings kommt es besonders bei der

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Kraftspektroskopie zur Kontamination der Cantilever mit biologischen und chemischen Proben, welche vor der späteren Kalibrierung aufwändig entfernt werden müssten.

5. Messunsicherheit

Der hier vorgestellte Prüfstand bestimmt durch gleichzeitiges Messen von Kraft und Weg die Cantileversteifigkeit. Das Verhältnis dieser Größen hängt von der Steifigkeit des zu messenden Cantilevers ab. Demzufolge ändern sich auch die relativen Unsicherheitsbeiträge dieser Größen. Im Folgenden wird das Messunsicherheitsbudget für die zuvor beschriebene Messreihe vorgestellt und diskutiert. Die gemessene Steifigkeit des Cantilevers ergibt sich aus folgender Modellgleichung.

$$c_{\mathrm{canti}} = \frac{B\ell \cdot i_{\mathrm{coil}} \cdot f_\alpha \cdot f_\beta \cdot f_\Delta + s_{\mathrm{bal}} \cdot c_{\mathrm{joint}} + \delta F}{(s_{\mathrm{int}} + \Delta s_{\mathrm{int}}) \cdot f_\gamma}$$

Der Faktor $B\ell$ gibt die Kraftkonstante der Wägezelle an und i_{coil} den notwendigen Kompensationsstrom in der Spule. Die Größenf_α, f_β und f_Δ berücksichtigen geometrische Abweichungen am Cantileverprüfstand. So ist beispielsweise γ der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Cantilevers und der Messachse des Interferometers.

Der Term $s_{\mathrm{bal}} \cdot c_{\mathrm{joint}}$ gibt die mechanische Steifigkeit der Wägezelle sowie die Auflösung des Nullpunktindikators an. Diese Werte hängen maßgeblich vom Design der Wägezelle ab und werden in [7] näher erläutert. Bei δF handelt es sich um den Standardfehler beim Ermitteln der Regressionsgerade. Die Größe Δs_{int} berücksichtigt die Nichtlinearitäten des Interferometers.

In Die Kalibrierung des Cantilevers ergab eine Steifigkeit von $(19{,}52 \pm 0{,}3)\mathrm{mNm}^{-1}$. Das entspricht einer relativen Messunsicherheit von $1{,}5\%$ und liegt damit in der Größenordnung ähnlicher Experimente ,. Den größten Einfluss auf die kombinierte Messunsicherheit hat die Regressionsabweichung der Kraft-Weg-Kennlinie δF, welche auf die limitierte Kraftauflösung der Wägezelle zurückzuführen ist.

Durch eine größere Anzahl an Schritten ließe sich der Beitrag reduzieren. Allerdings würde sich dadurch die Zeit pro Messzyklus und somit auch der Einfluss einer Drift erhöhen. Zudem würde die verringerte Gesamtzahl an Messzyklen zu einem größeren Standardfehler $\delta c_{\mathrm{canti}}$ führen. Die Messung des Kompensationsstroms i_{coil} liefert einen ebenfalls nicht unerheblichen Messunsicherheitsbeitrag. Da diese Einflüsse nicht skalieren, sinkt deren Beitrag bei zunehmender Kalibrierkraft. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Positionsmessung selbst bei steifen Cantilevern nur geringfügig zur kombinierten Messunsicherheit der Steifigkeit beiträgt.

Tabelle 1 sind die Einflussgrößen und deren relativer Unsicherheitsbeitrag zur Cantileversteifigkeit aufgelistet. Die Kalibrierung des Cantilevers ergab eine Steifigkeit von $(19{,}52 \pm$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$0{,}3)\mathrm{mNm}^{-1}$. Das entspricht einer relativen Messunsicherheit von $1{,}5\%$ und liegt damit in der Größenordnung ähnlicher Experimente [3], [4]. Den größten Einfluss auf die kombinierte Messunsicherheit hat die Regressionsabweichung der Kraft-Weg-Kennlinie δF, welche auf die limitierte Kraftauflösung der Wägezelle zurückzuführen ist.

Durch eine größere Anzahl an Schritten ließe sich der Beitrag reduzieren. Allerdings würde sich dadurch die Zeit pro Messzyklus und somit auch der Einfluss einer Drift erhöhen. Zudem würde die verringerte Gesamtzahl an Messzyklen zu einem größeren Standardfehler $\delta c_{\mathrm{canti}}$ führen. Die Messung des Kompensationsstroms i_{coil} liefert einen ebenfalls nicht unerheblichen Messunsicherheitsbeitrag. Da diese Einflüsse nicht skalieren, sinkt deren Beitrag bei zunehmender Kalibrierkraft. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Positionsmessung selbst bei steifen Cantilevern nur geringfügig zur kombinierten Messunsicherheit der Steifigkeit beiträgt.

Tabelle 1: Messunsicherheitsbudget für die vorgestellte Cantileverkalibrierung

Messgröße	Erwartungswert	Unsicherheit	Rel. Unsicherheit
F_{canti}	$59{,}58\mathrm{nN}$	$0{,}45\mathrm{nN}$	$7{,}5 \cdot 10^{-3}$
$B\ell$	$25{,}905\mathrm{mNA}^{-1}$	$4{,}06\mu\mathrm{NA}^{-1}$	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$
i_{coil}	$2{,}300\mu\mathrm{A}$	$4{,}06\mathrm{nA}$	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
δF	$0\mathrm{nN}$	$0{,}42\mathrm{nN}$	$7{,}0 \cdot 10^{-3}$
s_{bal}	$0\mathrm{nm}$	$78{,}8\mathrm{pm}$	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$
α	$0°$	$2°/\sqrt{3}$	$2{,}3 \cdot 10^{-4}$
β	$0°$	$0{,}5°/\sqrt{3}$	$8{,}8 \cdot 10^{-4}$
$\Delta r_{\mathrm{canti}}$	$0\mu\mathrm{m}$	$3{,}3\mu\mathrm{m}/\sqrt{3}$	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$
s_{canti}	$3{,}052\mu\mathrm{m}$	$3{,}00\mathrm{nm}$	$9{,}8 \cdot 10^{-4}$
s_{int}	$3{,}052\mu\mathrm{m}$	$6{,}7\mathrm{pm}$	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
Δs_{int}	$0\mu\mathrm{m}$	$3{,}00\mathrm{nm}$	$9{,}8 \cdot 10^{-4}$
γ	$0°$	$30'/\sqrt{3}$	$7{,}3 \cdot 10^{-6}$
$\delta c_{\mathrm{canti}}$	$0\mu\mathrm{Nm}^{-1}$	$16{,}1\mu\mathrm{Nm}^{-1}$	$8{,}2 \cdot 10^{-4}$
$\boldsymbol{c_{\mathrm{canti}}}$	$19{,}52\mathrm{mNm}^{-1}$	$0{,}15\mathrm{mNm}^{-1}$	$7{,}6 \cdot 10^{-3}$

6.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

7. Literaturverzeichnis

[1] C. A. Clifford und M. P. Seah, „The determination of atomic force microscope cantilever spring constants via dimensional methods for nanomechanical analysis," *Nanotechnology,* Bd. 16, p. 1666, 2005.

[2] Y. Song, S. Wu, L. Xu und X. Fu, „Accurate calibration and uncertainty estimation of the normal spring constant of various AFM cantilevers," *Sensors,* Bd. 15, p. 5865–5883, 2015.

[3] L. Doring, U. Brand und J. Fruhauf, „Micro force transfer standards," *VDI BERICHTE,* Bd. 1685, p. 83–90, 2002.

[4] C. Diethold, M. Kühnel, F. Hilbrunner, T. Fröhlich und E. Manske, „Determination of force to displacement curves using a nanopositioning system based on electromagnetic force compensated balances," *Measurement,* Bd. 51, p. 343–348, 2014.

[5] S. V. Gupta, Mass metrology, Bd. 155, Springer Science & Business Media, 2012.

[6] „Olympus Micro Cantilever: BL-RC150VB-HW / 210," 2-3 Kuboyama-chi, Hachioji-shi, Tokyo 192-8512 Japan, 2012.

[7] O. Dannberg, „Entwicklung eines Prüfstandes zur rückführbaren Kalibrierung von Cantilevern," 2020.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Quantitativer Ergebnis-Indikator zur Bewertung von Vergleichsmessungen

Vergleichsmessungen aus Sicht des Verbraucherschutzes auswerten

Sven Friederici, Dr. rer. nat. **Steffen Rudtsch**, Dr.-Ing. **Lars Bünger**, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin

Kurzfassung

Bei der Bewertung von Vergleichsmessungen wird in der Regel der E_n-Wert als alleiniges Nachweiskriterium für eine erfolgreiche Teilnahme herangezogen. Diese Herangehensweise ist jedoch allein nicht ausreichend und kann zu falschen Schlussfolgerungen führen, wenn ein teilnehmendes Kalibrierlaboratorium sehr kleine Messunsicherheiten nachweisen möchte. In solchen Fällen wird oft nicht beachtet, dass es aus metrologischen Gründen zwingend erforderlich ist, dass die Unsicherheit des Referenzwertes einer Vergleichsmessung grundsätzlich kleiner sein muss als die zu bestätigende Messunsicherheit eines teilnehmenden Laboratoriums. Dies beinhaltet sowohl die kleinste angebbare Messunsicherheit des Referenzlaboratoriums als auch die Stabilität bzw. Drift des Transferstandards. Da die Einhaltung dieser grundlegenden Voraussetzung in vielen Fällen nicht überprüft und gelegentlich sogar infrage gestellt wird, schlagen wir einen zusätzlichen Ergebnis-Indikator C_n vor. Dieser ist ein Maß dafür, ob das Ergebnis einer Vergleichsmessung eine hinreichend kleine Messunsicherheit hat, um die angestrebte Messunsicherheit eines teilnehmenden Laboratoriums bestätigen zu können.

Abstract

During the evaluation of comparison measurements, the E_n value is commonly used as the sole criterion of proof for successful participation. However, this approach is no longer sufficient and can lead to false conclusions, if a participating calibration laboratory intends to demonstrate very small measurement uncertainties. It is often not considered that – for metrological reasons – the uncertainty of the reference value of a comparison measurement must be smaller than the uncertainty of the participating laboratory to be confirmed. This includes both, the smallest possible measurement uncertainty of the reference laboratory and the stability or drift of the transfer standard. Since compliance with this basic requirement

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

in many cases is not checked and sometimes even questioned, we propose an additional performance indicator C_n. This is a criterion for whether the result of a comparison measurement has a sufficiently small measurement uncertainty for confirming the target measurement uncertainty of a participating laboratory.

1. Einleitung

Im Bereich der Messgröße Temperatur, aber auch in anderen Bereichen, ist bereits seit Jahren die Bestrebung von einigen Kalibrierlaboratorien zu erkennen, immer kleinere akkreditierte CMC-Werte (calibration and measurement capabilities, Kalibrier- und Messmöglichkeiten) zu erhalten. Die angestrebten CMC-Werte einiger Laboratorien liegen dabei teilweise auf dem Niveau von metrologischen Staatsinstituten (NMIs) oder in Einzelfällen sogar darunter. Damit ergibt sich in immer mehr Fällen, dass ein geeignetes Referenzlaboratorium (akkreditiert oder NMI) nicht existiert, welches signifikant kleinere CMC-Werte besitzt als die angestrebten Werte.

Im Folgenden wird gezeigt, dass die Bestätigung akkreditierter CMC-Werte auf dem genannten Niveau, allein über den sogenannten E_n-Wert, in den meisten Fällen aus metrologischer Sicht nicht mehr sinnvoll möglich ist.

2. Aktueller Stand

Vergleichsmessungen zwischen Kalibrierlaboratorien werden zur objektiven Bewertung der Leistungsfähigkeit von Laboratorien herangezogen. Deren Ergebnisse können als Kompetenznachweis im Rahmen einer Erstakkreditierung oder der Erweiterung des Akkreditierungsumfangs, zur Bestätigung einer bereits bestehenden Akkreditierung, aber auch als Begründung für die Reduzierung von akkreditierten CMC-Werten dienen. Diese Vergleichsmessungen müssen üblicherweise entsprechend DIN EN ISO/IEC 17043:2010 [1] ausgewertet werden. In der Regel erfolgt dies anhand folgender Formel aus [1]:

$$E_n = \frac{x_{\text{lab}} - X_{\text{ref}}}{\sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2}} \tag{1}$$

Hierbei ist x_{lab} das Messergebnis des teilnehmenden (zu bewertenden) Laboratoriums (Laboratory Under Test, LUT) und X_{ref} das Messergebnis des Referenzlaboratoriums. U_{lab} und U_{ref} sind entsprechend die erweiterten Messunsicherheiten der Laboratorien.

Zeigt der E_n-Wert ein Ergebnis zwischen -1 und +1, so gilt die Vergleichsmessung als erfolgreich. Ist $|E_n| > 1$, so konnten die bestehenden oder beantragten CMC-Werte nicht bestätigt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Forderung aus der Norm [1], also Gleichung (1), ist dabei so konzipiert, dass die Differenz der Messergebnisse lediglich kleiner sein muss als die kombinierte Messunsicherheit der beteiligten Laboratorien, also der Unsicherheit des Vergleiches.
Besser ersichtlich ist dies durch die mathematisch äquivalente Forderung

$$|d_i| < U(d_i) \tag{2}$$

aus dem EURAMET Guide No. 3 [3] mit

$$d_i = x_{\text{lab}} - X_{\text{ref}} \quad \text{und} \tag{3}$$

$$U(d_i) = \sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2} \tag{4}$$

3. Die Herausforderung richtig zu entscheiden

Auch wenn die normative Anforderung eindeutig ist, so bedeutet das Ergebnis $|E_n| \leq 1$ aus metrologischer Sicht nur, dass der Vergleich nicht fehlgeschlagen ist. Also rein normativ dem Laboratorium (LUT) keine Abweichung bzgl. der o.g. Forderung aus [1] und DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 (7.7.2) [2] vorliegt.
Rein messtechnisch hat diese Aussage jedoch nur eine Bedeutung, wenn zwei selbstverständliche metrologische Randbedingungen zu Gleichung (1) ebenfalls eingehalten werden. Es sind die Forderungen:

$$\Delta X_{\text{TS}} \ll U_{\text{lab}} \quad \text{und} \tag{5}$$

$$U_{\text{ref}} \ll U_{\text{lab}} \tag{6}$$

Dies bedeutet, dass die Messunsicherheit des Referenzlaboratoriums U_{ref} und die Instabilität bzw. Drift des Transfernormals ΔX_{TS} jeweils deutlich kleiner sein müssen als die Messunsicherheit des Laboratoriums (LUT) U_{lab}. Diese Randbedingungen werden in der Regel jedoch eher selten genannt und überprüft.
In den in Abschnitt 1 genannten Fällen kann dann speziell Bedingung (6) in der Regel nicht mehr eingehalten werden.
Das Ergebnis $|E_n| \leq 1$ sagt also nicht in jedem Fall aus, dass das angegebene Unsicherheitsintervall $\pm U_{\text{lab}}$ den „wahren Wert“ der Messung einschließt. (Zum „wahren Wert“ bzw. „true value“, der nicht exakt bekannt ist, siehe auch VIM3 [6].)
Werden die genannten Randbedingungen nicht ausreichend eingehalten, so ist eine metrologisch korrekte Entscheidung, ob eine Vergleichsmessung erfolgreich war oder nicht, keineswegs immer eindeutig. Dabei gibt es Fälle, die keine klare Aussage zulassen.
Hinzu kommt, dass – auch bei Einhaltung der Bedingungen (5) und (6) – das Unsicherheitsintervall $\pm U_{\text{lab}}$ in der Regel (gaußsche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und Erweiterungsfaktor $k = 2$) nur mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 95% den „wahren Wert“

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

einschließt. Dieser Aspekt soll hier jedoch nicht näher verfolgt werden, da er prinzipbedingt so gewollt ist.

4. Beweislast und Risiko

Bei Nichteinhaltung der Bedingungen (5) und (6) besagt $|E_n| \leq 1$ lediglich, dass ein Fehlschlag der Vergleichsmessung nicht nachgewiesen werden konnte. Der Umkehrschluss, dass die Messunsicherheit U_{lab} zweifelsfrei nachgewiesen wurde, ist somit nicht zulässig.
Gehen wir jetzt von dem Fall aus, dass ein Laboratorium sich neu für ein Messverfahren akkreditieren lassen will oder kleinere CMC-Werte anstrebt. So muss dieses Kalibrierlaboratorium zweifelsfrei die Richtigkeit seiner Messungen nachweisen. Andernfalls besteht die akute Gefahr, dass später Kunden fehlerhaft kalibrierte Messgeräte erhalten, ohne dass dies im Rahmen einer Vergleichsmessung aufgefallen wäre. Dies könnte ernsthafte Konsequenzen nach sich ziehen in kritischen Bereichen, wie beispielsweise der Pharma- oder Kraftwerksindustrie.

Im Prinzip läuft dies auf die Entscheidung hinaus, wer trägt die Beweislast und wer das (größere) Risiko für eine falsch positive oder falsch negative Aussage des Ergebnisindikators. Eine falsch negative Entscheidung könnte für ein Laboratorium finanzielle Einbußen mit sich bringen. Eine falsch positive Entscheidung dagegen könnte in den oben genannten kritischen Bereichen sogar eine Gefahr für Leib und Leben bedeuten.
Es ist denkbar, je nach Situation und Anforderungen unterschiedliche Maßstäbe anzulegen. Es sollte jedoch klar sein, nach welchen Regeln und Maßstäben entschieden wird.
Ein vergleichbares Konzept findet beispielsweise statt bei Entscheidungsregeln, wie sie bei Konformitätsbewertungen Anwendung finden. (Siehe dazu [7], [8] und [9].) Hier wird klar kommuniziert, in welchen Fällen falsch positive oder falsch negative Aussagen möglich sind.

Dies geschieht bei Akkreditierungsvorgängen nicht. Bei Anwendung von Gleichung (1) trägt die Akkreditierungsstelle bzw. der Fachbegutachter die Beweislast. In Fällen, bei denen falsch positive Entscheidungen möglich sind, ist es für Begutachter oder die Akkreditierungsstelle schwierig bis unmöglich negative Entscheidungen zu fällen. Der Kunde trägt in diesen Fällen entsprechend das Risiko für eine fehlerhafte Kalibrierung durch das Laboratorium mit den geschilderten, möglicherweise kritischen, Konsequenzen.

Veranschaulicht wird das Prinzip der Entscheidungsregel in Bild 1. Ein $|E_n| \leq 1$ ergibt sich für die Fälle A, B und C. Eine Akkreditierung könnte in all diesen Fällen positiv beschieden

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

werden. Jedoch ist nur in Fall A eine falsch positive Entscheidung ausgeschlossen. Nur in Fall D müsste eine Akkreditierungsentscheidung negativ ausfallen.

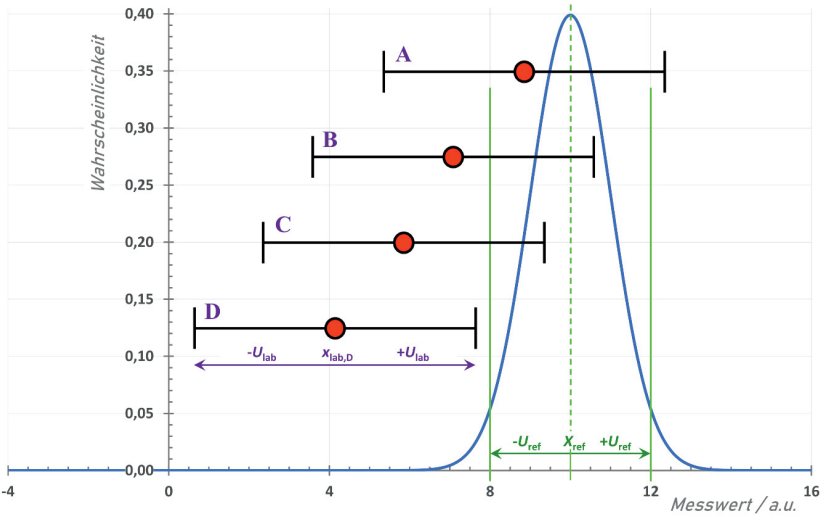


Bild 1: Prinzip der Entscheidungsregel
Im Fall einer Vergleichsmessung würden die Unsicherheiten U_{ref} (Glockenkurve) und U_{lab} (horizontale Unsicherheitsbalken) nicht linear kombiniert, wie hier angedeutet, sondern quadratisch.

5. Referenzmessung

Das („wahre“) Ergebnis der Referenzmessung X_{ref} kann mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 95% im ganzen, von den grünen Linien eingeschlossen, Intervall liegen.

Für die Fälle B und C ist es jedoch wahrscheinlich, dass die Unsicherheit U_{lab} den „wahren Wert“ *nicht* mit einschließt und so zu einer falsch positiven Entscheidung führt. Für den Fall C ist dieses Risiko am größten.

Soll dem eingangs genannte Aspekt des Verbraucherschutzes Priorität eingeräumt werden, so müsste ein Ergebnisindikator Anwendung finden, bei dem nur Fall A als positive Entscheidung akzeptiert wird. Die Fälle B und C könnten in diesem Szenario zu einer falsch negativen Entscheidung führen.

Bei der Auswertung einer Vergleichsmessung sollte zudem klar kommuniziert werden, wenn falsche Entscheidungen (in welche Richtung auch immer) möglich sind. Dies würde

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gleichzeitig die Laboratorien dazu motivieren, möglichst geeignete Randbedingungen ((5) und (6)) bei einer Vergleichsmessung zu realisieren.

Bei Einhaltung der Bedingung (6) geht Fall B → Fall A (positiv) und Fall C → Fall D (negativ) über. In diesen Fällen sind folglich keine Fehlentscheidungen mehr möglich.

6. Transfernormal

Die Drift eines Transfernormals, oder eine anders geartete Instabilität, würde man im Normalfall, soweit möglich, korrigieren. In der Regel würde das Referenzlaboratorium das Transfernormal vor und nach der Messung des Laboratoriums (LUT) kalibrieren und die Werte $X_{\mathrm{ref},1}$ und $X_{\mathrm{ref},2}$ bestimmen. Dadurch können die Werte $\Delta X_{\mathrm{TS}} = X_{\mathrm{ref},2} - X_{\mathrm{ref},1}$ (Drift) und $\bar{X}_{\mathrm{ref}}$ (Mittelwert) bestimmt werden. Für den häufigen Fall, dass der zeitliche Verlauf dieser Drift (oder Instabilität) unbekannt ist, bleibt nur die Möglichkeit, die Drift mit $½\Delta X_{\mathrm{TS}}$ anzusetzen und die dazugehörigen Fehlergrenzen als $\pm ½\Delta X_{\mathrm{TS}}$; welche wir zur normal verteilten erweiterten Unsicherheit der Drift des Transfernormals U_{TS} umrechnen mit

$$U_{\mathrm{TS}} = ½\Delta X_{\mathrm{TS}} * \frac{2}{\sqrt{3}} = \sqrt{⅓}\Delta X_{\mathrm{TS}} \,. \tag{7}$$

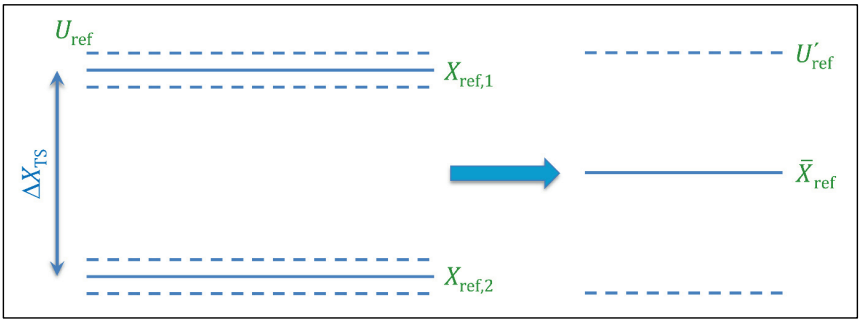


Bild 2: Transformation der Drift des Transfernormals in Messunsicherheit des Referenzwertes.

Der Einfluss der Drift des Transfernormals (Randbedingung (5)) lässt sich ebenso mit Bild 1 visualisieren, in dem man die Transformationen

$$X'_{\mathrm{ref}} = \bar{X}_{\mathrm{ref}} = ½\left(X_{\mathrm{ref},1} + X_{\mathrm{ref},2}\right) \quad \text{und} \tag{8}$$

$$U'_{\mathrm{ref}} = \sqrt{U_{\mathrm{ref}}^2 + U_{\mathrm{TS}}^2} = \sqrt{U_{\mathrm{ref}}^2 + ⅓\Delta X_{\mathrm{TS}}^2} \tag{9}$$

vornimmt.

Die Transformationen selbst sind in Bild 2 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Eine Drift des Transfernormals hat also den gleichen Effekt, wie eine größere Messunsicherheit des Referenzwertes.

7. Lösungsansatz

Eine Möglichkeit für eine objektive Bewertung ist, die Schärfe der metrologischen Randbedingungen zu definieren, in dem man beispielsweise die minimalen Verhältnisse von $U_{\text{lab}} / U_{\text{ref}}$ und $U_{\text{lab}} / \Delta X_{\text{TS}}$ festlegt.

Es ist auch möglich, den Grad der Einhaltung dieser Bedingungen in der Auswertung zu berücksichtigen.

Wie schon eingangs erwähnt, sind die angestrebten CMC-Werte einiger Kalibrierlaboratorien in der gleichen Größenordnung, wie die erreichbaren Messunsicherheiten der Referenzlaboratorien. Aus diesem Grund wird die letztere Variante angestrebt. Zu diesem Zweck entwerfen wir empirisch einen neuen Ergebnis-Indikator, welcher sowohl die Drift des Transfernormals als auch die Messunsicherheit des Referenzwertes im Verhältnis zur Messunsicherheit des LUT bzw. zum angestrebten CMC-Wert berücksichtigt.

Gehen wir von der Prämisse aus, dass ein Laboratorium (LUT) seine erweiterte Messunsicherheit zweifelsfrei nachweisen kann, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

Bedingungen (5) und (6) werden eingehalten, also das Referenzlaboratorium hat eine vernachlässigbar kleine Messunsicherheit und das Transfernormal hat eine vernachlässigbar kleine Drift. Zudem gilt

$$\frac{|x_{\text{lab}} - X_{\text{ref}}|}{U_{\text{lab}}} \leq 1 \ . \tag{10}$$

Für die oben diskutierten Fälle, dass Bedingungen (5) und (6) gerade nicht ideal eingehalten werden können, kombinieren wir die Unsicherheitsanteile von U_{TS} und U_{ref} quadratisch mit der Abweichung d_i des Laboratoriums zu

$$\sqrt{U_{\text{TS}}^2 + U_{\text{ref}}^2 + d_i^2} \ . \tag{11}$$

Dies setzen wir in Relation zur erweiterten Messunsicherheit des Laboratoriums, so dass wir mit Gleichungen (3) und (7) einen neuen Ergebnisindikator erhalten, den wir hier C_n nennen:

$$C_n = \frac{\sqrt{U_{\text{TS}}^2 + U_{\text{ref}}^2 + d_i^2}}{U_{\text{lab}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}\Delta T_{\text{TS}}^2 + U_{\text{ref}}^2 + (x_{\text{lab}} - \bar{X}_{\text{ref}})^2}}{U_{\text{lab}}} \tag{12}$$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Dieser Indikator ist ein Maß für das Zutrauen (engl. Confidence) in die Eignung der Vergleichsmessung und der Eindeutigkeit des Ergebnisses. Ein C_n-Wert ≤ 1 bedeutet, dass die Vergleichsmessung geeignet ist, die angegebene Messunsicherheit U_{lab} des Laboratoriums (LUT) nachzuweisen. Die metrologischen Randbedingungen wurden somit ausreichend eingehalten und die Aussage des E_n-Wertes ist vertrauenswürdig.

Für die richtige Anwendung von Gleichung (12) ist der Mittelwert $\bar{X}_{\mathrm{ref}}$ aus Hin- und Rückmessung des Referenzwertes zu verwenden; andernfalls müsste das ⅓ dort gegen ⅔ getauscht werden, da dann der Faktor ½ aus Gleichung (7) entfällt.

Prinzipiell lässt sich Gleichung (12) problemlos erweitern, falls weitere Einflüsse vorhanden, aber nicht korrigierbar sind. Diese Terme müssten entsprechend unter der Wurzel quadratisch addiert werden.

8. Erläuterung und Test

Das Verhalten von Gleichung (12) schauen wir uns unter verschiedenen Bedingungen und vor allem kritischen Grenzfällen an, wie sie bei Vergleichsmessungen auftreten können.

Fall 1: $d_i \rightarrow U_{\mathrm{lab}}$

Wie im Beispiel links in Bild 3 dargestellt, ist die Differenz der Ergebnisse zwischen Referenzlaboratorium und Laboratorium (LUT) nahe der nachzuweisenden Messunsicherheit vom LUT. Es ist zu sehen, dass eine erfolgreiche Vergleichsmessung nur noch sicher nachgewiesen wird, wenn $\mathrm{U}_{\mathrm{ref}} \ll \mathrm{U}_{lab}$. Auch in Gleichung (12) ist ersichtlich, dass aus $d_i \rightarrow U_{\mathrm{lab}} \Longrightarrow C_n \leq 1$ nur für den Fall, dass $U_{\mathrm{TS}} \ll U_{\mathrm{lab}}$ und $\mathrm{U}_{\mathrm{ref}} \ll \mathrm{U}_{\mathrm{lab}}$.

Fall 2: $U_{\mathrm{ref}} \rightarrow U_{\mathrm{lab}}$ bzw. $U'_{\mathrm{ref}} \rightarrow U_{\mathrm{lab}}$

Rechts in Bild 3 ist der gegenteilige Fall $U_{\mathrm{ref}} \cong U_{\mathrm{lab}}$ dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass eine erfolgreiche Vergleichsmessung nur sicher nachgewiesen werden kann, falls $d_i \ll U_{\mathrm{lab}}$, was im rechts dargestellten Beispiel nicht so wäre. Auch der C_n-Wert bleibt nur kleiner 1, wenn $d_i \ll U_{\mathrm{lab}}$.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

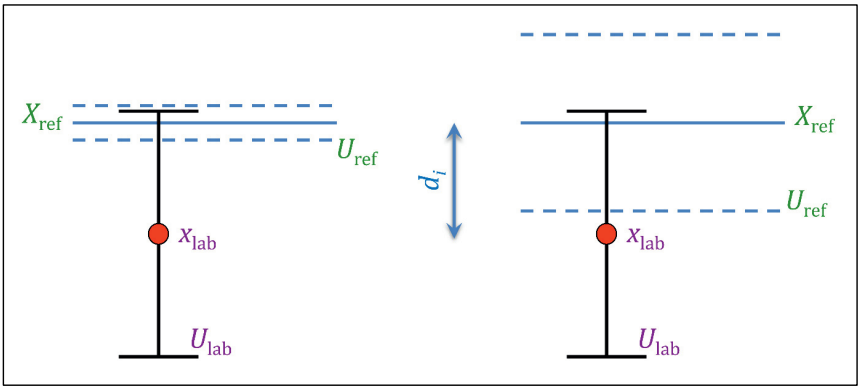


Bild 3: Darstellung von Fall 1 (links) und Fall 2 (rechts).
Die Differenz der Ergebnisse ist in diesen Beispielen nahe der nachzuweisenden Messunsicherheit.

Fall 3: $U_{\mathrm{TS}} \to U_{\mathrm{lab}}$

Dieser Fall behandelt ein stark driftendes oder instabiles Transfernormal. Der Effekt ist vergleichbar mit einer großen Messunsicherheit des Referenzlaboratoriums.

Bereits in Bild 2 wurde die Transformation von ΔX_{TS} in U'_{ref} gezeigt. Entsprechend können wir den Fall 3 auf Fall 2 zurückführen mit $U'_{\mathrm{ref}} = \sqrt{U_{\mathrm{ref}}^2 + U_{\mathrm{TS}}^2}$ (9) und dort veranschaulichen.

Faktisch bedeutet dies für eine sicher nachgewiesene Vergleichsmessung, dass gelten muss $U_{\mathrm{TS}} = \sqrt{1/3}\Delta X_{\mathrm{TS}} < U_{\mathrm{lab}}$. Für $U_{\mathrm{TS}} \to U_{\mathrm{lab}}$ nur möglich, wenn $U_{\mathrm{ref}} \ll U_{\mathrm{lab}}$ und $d_i \ll U_{\mathrm{lab}}$.

Fall 4: Bedingungen (5) und (6) erfüllt, also ΔX_{TS} und U_{ref} klein gegenüber U_{lab}

Der metrologisch angestrebte Fall ist zweifellos diese Konstellation. Für $\Delta X_{\mathrm{TS}} \ll U_{\mathrm{lab}}$ bzw. $\Delta X_{\mathrm{TS}} \to 0$ und $U_{\mathrm{ref}} \ll U_{\mathrm{lab}}$ bzw. $U_{\mathrm{ref}} \to 0$ ergibt sich einerseits für Gleichung (12), dass $C_n \to \frac{|x_{\mathrm{lab}} - X_{\mathrm{ref}}|}{U_{\mathrm{lab}}}$ und andererseits für Gleichung (1), dass $E_n \to \frac{x_{\mathrm{lab}} - X_{\mathrm{ref}}}{U_{\mathrm{lab}}}$; also $C_n \to |E_n|$.

In diesem Fall müsste C_n gar nicht erst bestimmt werden, da die erforderlichen Randbedingungen eingehalten werden. Würde der neue Ergebnisindikator C_n bestimmt, so wäre das Ergebnis zahlenmäßig sehr ähnlich dem Betrag des E_n-Wertes.

Für die Auswertung von Vergleichsmessungen ergeben sich die folgenden logischen Zusammenhänge zwischen E_n und C_n, welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 1: Matrix der Ergebnis-Indikatoren E_n und C_n

	$\lvert E_n \rvert \leq 1$	$\lvert E_n \rvert > 1$
$C_n \leq 1$	Vergleichsmessung erfolgreich	nicht möglich
$C_n > 1$	(unbestimmt) Randbedingungen nicht eingehalten	Vergleichsmessung nicht erfolgreich

Aus den Gleichungen (1) und (12) ergibt sich, dass immer gilt: $C_n > |E_n|$.

Würde man also eine Vergleichsmessung nur mit Hilfe von C_n (12) auswerten und ergäbe das Resultat einen Erfolg ($C_n \leq 1$), so wäre die Berechnung von E_n (1) obsolet. In diesem Fall wäre immer $E_n \leq 1$. In der Praxis muss dennoch der E_n-Wert berechnet werden, um normenkonform die Forderung aus der DIN EN ISO/IEC 17043:2010 zu erfüllen.

Für der Fall, dass $C_n > 1$ und $E_n \leq 1$ ist, erhält man ein unbestimmtes Ergebnis der Vergleichsmessung. Ein Erfolg oder Misserfolg konnte somit nicht nachgewiesen werden. Eine derartige Vergleichsmessung kann nicht Basis für eine positive Akkreditierungsentscheidung sein.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein neuer Ergebnisindikator C_n vorgestellt, welcher berücksichtigt, wenn Vergleichsmessungen nicht unter optimalen Bedingungen ablaufen. Für den Fall, dass die wichtigen metrologischen Randbedingungen ($\Delta X_{\mathrm{TS}} \ll U_{\mathrm{lab}}$ und $U_{\mathrm{ref}} \ll U_{\mathrm{lab}}$) nicht eingehalten werden, ist damit trotzdem eine eindeutige und belastbare Aussage über den Erfolg einer Vergleichsmessung möglich.

Ein Ziel ist es, die Kunden der Kalibrierlaboratorien zu schützen, um falsch positive Ergebnisse von fragwürdigen Vergleichsmessungen zu vermeiden. Die Beweislast für die Eignung einer Vergleichsmessung, geht damit auf das Kalibrierlaboratorium über, welches neue oder kleinere CMC-Werte anstrebt.

Der Nachweis der Kompetenz von Kalibrierlaboratorien durch Eignungsprüfungen wird hiermit aufgewertet.

Der bekannte E_n-Wert kann weiterhin verwendet werden, falls die genannten Randbedingungen eingehalten werden können. Das Konzept des E_n-Wertes hat jedoch seine Grenzen für den Fall, dass CMC-Werte in der Größenordnung der Messunsicherheit des Referenzwertes nachgewiesen werden sollen. Dies betrifft auch instabile Transfernormale, welche nicht im E_n-Wert berücksichtigt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Durch die zusätzliche Angabe des Ergebnisindikators C_n wird aufgezeigt, ob der Referenzwert einer Vergleichsmessung eine hinreichend kleine Messunsicherheit hat, um die angestrebte Messunsicherheit eines Teilnehmers bestätigen zu können.
Entsprechend Tabelle 1 ist mit Hilfe von E_n und C_n eine Aussage zum Erfolg, Misserfolg oder der Uneindeutigkeit einer Vergleichsmessung möglich. Dies bietet sich auch in automatisierten Auswerteverfahren, bei größeren Ringvergleichen oder vielen Messpunkten an.

[1] DIN EN ISO/IEC 17043:2010-05, Konformitätsbewertung - Allgemeine Anforderungen an Eignungsprüfungen
[2] DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien
[3] EURAMET Guide No. 3, Version 2.0 (01/2015), EURAMET Procedures and Review Criteria for CMCs
[4] EURAMET Guide No. 4, Version 2.0 (04/2021), EURAMET Guide on Comparisons
[5] ILAC-P9:06/2014, ILAC Policy for Participation in Proficiency Testing Activities
[6] JCGM 200:2008, VIM, Version 3, International Vocabulary of Metrology
[7] JCGM 106:2012, Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment
[8] EUROLAB Technical Report No.01/2017, Decision rules applied to conformity assessment
[9] ILAC-G8:03/2009, Guidelines on the Reporting of Compliance with Specification

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Frequenzkamm-gekoppelte Metrologielaser für den Einsatz in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

U. Blumröder, **R. Füßl**, **E. Manske**,
Technische Universität Ilmenau, Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau;
P. Köchert, **J. Flügge**,
Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Precision Engineering Division, Braunschweig

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie eine direkte Rückführung der interferometrischen Längenmessung in Nanopositioniermaschinen durch eine Anbindung der Metrologielaser an eine Frequenzkammlinie erfolgen kann. Der Ansatz basiert auf einem GPS-referenzierten Frequenzkamm mit dem die Stabilität des Zeitgebers (Atomuhr über GPS) auf die Metrologielaser der Nanopositionier- und Nanomessmaschine NPMM-200 übertragen wird. Es werden die notwendigen Voraussetzungen für die Gewährleistung der Rückführbarkeit diskutiert und demonstriert, dass mit diesem Ansatz eine Verbesserung in der Langzeitstabilität der Metrologielaser um drei Größenordnungen erreicht werden kann.

1. Einleitung

Die rasante Zunahme nanotechnologischer Ansätze in Industrie und Forschung erfordert neue Fabrikationsansätze und Charakterisierungsmethoden, die es ermöglichen Strukturen bis in den (Sub-)Nanometerbereich auf immer größer werdenden Messbereichen abzubilden [1,2]. Dies erfordert eine hochgenaue Positionierung der entsprechenden Messobjekte, der im Allgemeinen interferometrische Messverfahren zugrundeliegen. Die TU Ilmenau arbeitet seit mehr als 20 Jahren an der Entwicklung von Nanopositionier- und -messmaschinen (NPMM), die eine nanometergenaue 3D-Positionierung von Messobjekten ermöglichen und mit einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren oder Fabrikationswerkzeugen ausgestattet werden können [3,4]. Die neue Generation der an der TU Ilmenau entwickelten Nanopositioniermaschinen umfasst einen Messbereich von 200 mm x 200 mm x 25 mm und gewährleistet bei einer Auflösung von 20 pm eine Positionierwiederholbarkeit ≤ 4 nm über den gesamten Messbereich [3,5]. Das Positioniersystem der NPMM-200 basiert auf einem sechsachsigen, fasergekoppelten Interferometersystem, das drei stabilisierte He-Ne-Laser als Maßverkörperung der interferometrischen Längenmessung verwendet [3]. Stabilisierte He-Ne-Gaslaser haben sich zu den

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

am häufigsten verwendeten Laserquellen für präzise interferometrische Längenmessungen entwickelt [6]. Sie weisen typischerweise eine Frequenzstabilität (24 h) im Bereich von $2 \cdot 10^{-9}$ auf und führen somit bei einem maximalen Verfahrweg von 200 mm zu einem alleinig durch Frequenzschwankungen bedingten Längenmessfehler von 0,4 nm. Zusätzlich können Degradationseffekte eine Drift der Mittenfrequenz von bis zu ± 5 MHz/a ($\Delta f/f = 10^{-8}$/a) verursachen [8]. Zur Gewährleistung der Rückführbarkeit der interferometrischen Längenmessung müssen die Metrologielaser der NPMM-200 daher in periodischen Abständen gegen einen BIPM konformen Frequenzstandard vermessen werden. Jahrzehntelang wurden dafür vor allem jodstabilisierte He-Ne-Laser mit einer empfohlenen Unsicherheit von u = 10 kHz ($21 \cdot 10^{-12}$) verwendet [9]. Diese Unsicherheit kann sich für an nationalen Metrologieinstituten zertifizierte und in Industrie- oder Forschungslaboren verwendete Referenznormale auf 10^{-10} erhöhen. Zusätzlich verfügen jodstabilisierte Laser über eine geringe Ausgangsleistung und sind somit nicht für den direkten Einsatz in mehrachsigen oder fasergekoppelten interferometrischen Systemen geeignet [6].

Mit der kommerziellen Verfügbarkeit der Frequenzkammtechnologie haben sich jedoch in den letzten Jahren neue Möglichkeiten bei der Rückführung der Wellenlänge auf die Meter-Definition eröffnet. Das optische Spektrum eines Frequenzkammes (OFC) kann gemäß:

$$f_n = n \cdot f_{REP} \pm f_{CEO} \quad (1)$$

beschrieben werden [10]. Eine einzelne optische Frequenz f_n des Kammspektrums wird damit durch zwei Frequenzen im Radiofrequenzbereich (die Wiederholrate des Lasersystems f_{Rep} sowie den „Carrier Envelope Offset“ f_{CEO} [10]*)* und die entsprechende Modennummer *n* vollständig bestimmt. Die beiden Kammparameter f_{Rep} und f_{CEO} werden üblicherweise an einen Frequenzstandard im Radiofrequenzbereich (z. Bsp. Cäsiumuhr, Wasserstoffmaser oder GPS disziplinierter Oszillator GPSDO) gebunden, womit sich die Stabilität des Zeitgebers (z. Bsp. Atomuhr über GPSDO mit $u_{rel} = 1{,}8 \cdot 10^{-12}$ für k = 2 und τ = 22 min, [11]) in den optischen Bereich übertragen lässt. Ein optischer Frequenzkamm kann somit, im Gegensatz zu einem jodstabilisierten Laser, viele optische Referenzfrequenzen in einem breiten Spektralbereich vom VIS–NIR mit z. T. geringerer Unsicherheit bereitstellen [11,12]. Dadurch werden sie zunehmend für metrologische Zwecke wie der Kalibrierung von Laserquellen eingesetzt [12,13]. Zusätzlich kann durch eine direkte Anbindung externer Laser an eine Kammlinie und damit an das Sekundennormal einer Atomuhr, entsprechend den Empfehlungen des CIPM für höchste Genauigkeitsanforderungen, eine Synchronisation zu einem primären Frequenzstandard realisiert werden [14].

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In dem vorliegenden Beitrag wird beschrieben, wie eine direkte Rückführung der Längenmessung in der NPMM-200 der TU Ilmenau durch die Kopplung der Metrologielaser an einen Frequenzkamm erfolgen kann. Es werden bei der praktischen Realisierung zu beachtende Probleme zur Gewährleistung der Rückführbarkeit diskutiert und gezeigt, dass sich durch die Anbindung der Laserfrequenz der Metrologielaser an den Frequenzkamm deren Langzeitstabilität um drei Größenordnungen verbessern lässt.

2. Frequenzkammgekoppelte Metrologielaser

2.1 Grundkonzept

Das Grundkonzept für die Anbindung der Metrologielaser der NPMM-200 an einen primären Frequenzstandard mittels Frequenzkamm ist in Abb. 1 dargestellt.

Ein GPS-referenzierter Frequenzkamm fungiert als „selbst-kalibrierender" Frequenzstandard [11]. Der GPSDO nutzt die von den GPS-Satelliten empfangenen Signale um den Frequenzausgang eines lokalen Oszillators zu steuern [15]. Die Kurzzeitstabilität wird von dem lokalen Oszillator bereitgestellt, während die Langzeitstabilität und Genauigkeit der Ausgangsfrequenz durch die Anbindung an die GPS-Signale generiert wird, welche direkt rückführbar auf die UTC(USNO) sind [15]. Durch diesen direkten Anschluss des Oszillators an das GPS-Signal wird die Rückführbarkeit auf den Primärstandard zur Realisierung der SI-Einheit Zeit gewährleistet [11].

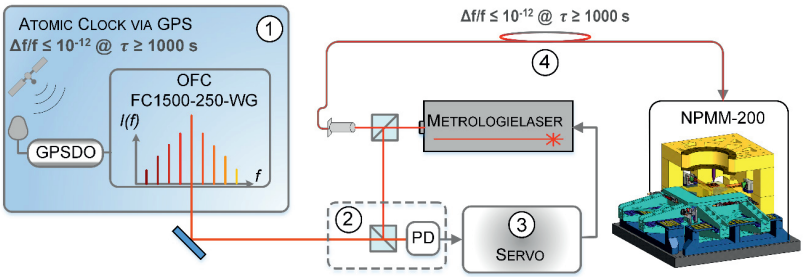


Bild 1: Grundkonzept eines frequenzkammgekoppelten Metrologielasers zur Anbindung der interferometrischen Längenmessung an eine Atomuhr. Die verwendeten Abkürzungen beschreiben: OFC - Optical Frequency Comb, GPSDO - GPS disziplinierter Oszillator und PD-Photodiode. Die einzelnen Glieder der Rückführungskette (1)-(4) werden im Text erläutert.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Um die Stabilität des Primärstandards auf die Metrologielaser zu übertragen, muss zunächst eine Überlagerung zwischen externem Laser und Frequenzkammlinie erfolgen. Auf dieser Grundlage kann die Absolutfrequenz des Lasers bestimmt und durch eine entsprechende Regelung korrigiert werden. Die stabilisierte Laserfrequenz des Metrologielasers kann anschließend zur Weitergabe an die Interferometer der NPMM-200 genutzt werden.
Für eine praktische Realisierung dieses Ansatzes müssen zur Gewährleistung der Rückführbarkeit der Laserfrequenz die in Abb. 1 dargestellten Aspekte berücksichtigt werden. Diese beinhalten: (1) eine ordnungsgemäße Funktionsweise des GPS-referenzierten Frequenzkammes um die seitens des Herstellers angegebene Unsicherheit für die Frequenz einer Kammlinie garantieren zu können, (2) eine seitens des Nutzers korrekt bestimmte Frequenz des Metrologielasers, (3) eine regelungstechnische Anbindung des Metrologielasers, die die Übertragung der Langzeitstabilität der Kammlinie auf den externen Laser ermöglicht und (4) die Gewährleistung einer störungsfreien Übertragungsstrecke zwischen Metrologielaser und NPMM-200, die die Weitergabe der stabilisierten Laserfrequenz an die Interferometer der NPMM-200 garantiert. Diese einzelnen Glieder werden im Folgenden ausführlicher beschrieben.

2.2. Experimentelle Realisierung

2.2.1 GPS-referenzierter Frequenzkamm

Der GPS-referenzierte Frequenzkamm der TU Ilmenau ist ein kommerzielles Modell der Firma Menlo Systems (Modell: FS 1500-250-WG, Menlo Systems, s. Abb .2). Dieser basiert auf einem modengekoppelten, polarisationserhaltenden Erbium-Faserlaser mit einer Zentralwellenlänge von 1552 nm [16]. Das System ist mit zwei Verstärkereinheiten ausgestattet. Eine dieser Einheiten wird für die Bestimmung der CEO Phase mittels 2f-f-Interferometer genutzt [17]. Die zweite Einheit dient der Erzeugung eines 633 nm-Ausgangs für die Überlagerung mit He-Ne-Laserquellen.
Der GPSDO basiert auf einem VCO (engl. Voltage controlled oszillator), der eine Ausgangsfrequenz von 10 MHz liefert [18]. Diese wird anschließend über eine SDU (engl. Signal Distribution Unit) an die Regelelektronik sowie die Frequenzzähler (π-Typ, FXM50) weiterverteilt. Die Kontrollelektronik zur Stabilisierung der Kammparameter enthält zwei Phasenregelschleifen, die die Wiederholrate und die CEO Phase auf ein Vielfaches des 10 MHz-Outputs des GPSDO stabilisieren. Die Wiederholrate beträgt standardmäßig 250 MHz, die CEO Phase 20 MHz. Die Kammparameter werden mittels der Frequenzzähler überwacht. Zwei weitere Kanäle des Frequenzzählers stehen für die Messung von Schwebesignalen zwischen Kamm und externen Lasern zur Verfügung.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Stabilisierung der Kammparameter ist direkt an eine ausfallsichere Operationsweise des GPSDO gebunden. Diese ist in erster Linie durch eine geeignete Positionierung der GPS-Antenne sicherzustellen. Zusätzlich ist eine permanente Überwachung der GPS-Signale empfehlenswert [15]. An der TU Ilmenau wird dies durch eine Auswertung der NMEA-Protokolle über die serielle Schnittstelle des GPSDO gewährleistet. Die entsprechenden Daten zum Status des GPS-Signals sowie der Anzahl verfügbarer Satelliten werden zentral gespeichert. Zusätzliche Informationen über eine ausfallfreie Funktion der GPS-Satelliten kann nur über öffentlich zugängliche Vergleichsdaten von Metrologieinstituten erfolgen, die die GPS-Signale mit nationalen Frequenzstandards vergleichen [15, 18].

Neben der Funktionalität des GPSDOs ist auch der Lockstatus der Regelung für die Kammparameter zu prüfen. Dies beinhaltet die Sicherstellung eines ausreichenden Signal-Rausch-verhältnisses der Kammfrequenzen, insbesondere der f_{CEO}, sowie eine dauerhafte Überwachung beider Parameter [11].

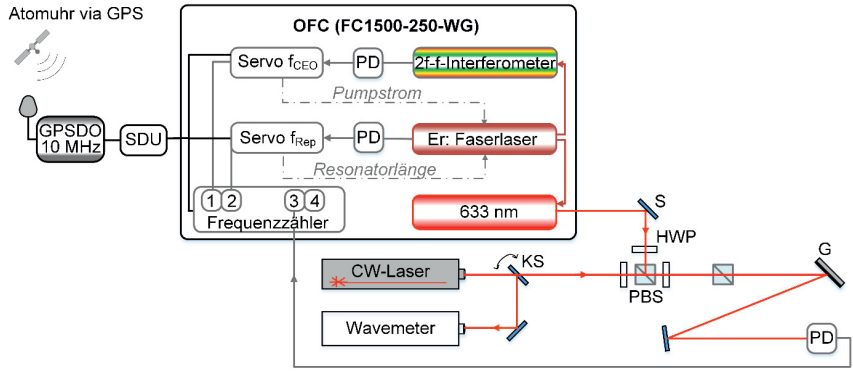


Bild 2: Aufbau des GPS-referenzierten Frequenzkammes und der Beat Detection Unit (BDU) zur Überlagerung eines externen CW-Lasers mit einer Kammlinie. Die verwendeten Abkürzungen sind: OFC – Optical Frequency Comb, GPSDO - GPS disziplinierter Oszillator, SDU – Signal Distribution Unit, PD - Photodiode, S - Spiegel, HWP - λ/2-Platte, PBS - Polarisierender Strahlteiler, KS - Klappspiegel, G – Gitter.

Die Unsicherheit eines GPS-referenzierten Kammes wird vor allem durch das kurzzeitige Rauschverhalten (Zeitskalen < 24 h) des GPSDOs bestimmt [11,15]. Um die resultierenden Frequenzschwankungen des Kammes zu quantifizieren werden Vergleiche zwischen Frequenzkämmen [12,20] oder gegen einen mindestens vergleichbar stabilen Referenzlaser

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

durchgeführt [11]. Im Falle des kommerziellen OFC der TU Ilmenau gewährleistet der Hersteller auf Basis eines Vergleichs zweier GPSDO-referenzierter Frequenzkämme eine relative Genauigkeit von besser als $8 \cdot 10^{-12}$ (τ = 1 s) und eine relative Stabilität (relative Allan-Abweichung) von $4 \cdot 10^{-12}$ (τ = 1 s) [18]. Die Genauigkeit wird dabei (s. auch [12,20]) über die Standardabweichung des Mittelwertes über eine etwa 13-stündige Messung (N=47600) ermittelt:

$$u = \frac{s}{\sqrt{N} \cdot \sqrt{2}} \quad (2)$$

Der Faktor $\sqrt{2}$ berücksichtigt, dass die Messung den Anteil beider Frequenzkämme enthält.

2.2.2 Bestimmung der Absolutfrequenz eines Metrologielasers mittels Frequenzkamm

Durch die Überlagerung einer externen Laserquelle f_{CW} mit einer Frequenzkammlinie kann deren Absolutfrequenz durch Messung der Beatfrequenz f_{Beat} durch:

$$f_{CW} = n \cdot f_{REP} \pm f_{CEO} \pm f_{Beat} = f_n \pm f_{Beat} \quad (3)$$

bestimmt werden. Für eine korrekte Bestimmung der Absolutfrequenz müssen systematische Messabweichungen vermieden werden, die in erster Linie durch die Erzeugung eines Beatsignals mit einem unzureichenden Signal-Rauschverhältnis (SNR), Vorzeichenfehler in der Bestimmung von f_{CEO} und f_{Beat} und einer falschen Bestimmung der Modennummer verursacht werden.

Die Erzeugung eines Beatsignals mit ausreichender Signalstärke ist von elementarer Bedeutung für die korrekte Zählung der Beatfrequenz mittels der Frequenzzähler. Der 633 nm-Ausgang des Frequenzkammes verfügt über eine mittlere Ausgangsleistung von 7 mW und einer spektralen Breite von 3 nm (FWHM). Diese Leistung verteilt sich auf mehrere tausend Moden, sodass eine maximale Leistung von etwa 800 nW pro Mode für die Erzeugung eines Beatsignals mit einer externen Laserquelle zur Verfügung steht. Diese Leistung wird durch die optischen Komponenten zur räumlichen Überlagerung und Anpassung der Polarisation beider Laserstrahlen weiter verringert (Abb. 2 und [11, 21]). Die Leistung der übrigen Kammmoden trägt bei der Detektion mittels Photodiode in erster Linie zu einer Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei. In der Freistrahleinheit zur Überlagerung beider Laserstrahlen erfolgt deswegen zusätzlich eine Vorselektion der Moden über ein Gitter (Abb. 2, [10,21]). Eigene Untersuchungen zum Einfluss des SNR des Beatsignals auf die Frequenzmessung mittels Frequenzzähler ergaben in Übereinstimmung zu [21] dass für ein SNR ≤ 28 dB mit dem Auftreten von Messabweichungen zu rechnen ist, die in Abhängigkeit der Höhe des SNR mehrere MHz betragen können.

Ist ein ausreichendes SNR des Beatsignals sichergestellt, muss zunächst eine Bestimmung der Vorzeichen von f_{Beat} und f_{CEO} erfolgen. Dies erfolgt üblicherweise über eine geringfügige Variation der Repetitionsrate und der CEO [11,17,22].

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Modennummer kann bei bereits vorhandener Kenntnis der Absolutfrequenz des zu vermessenden Lasers (bspw. über einen Kalibrierschein oder Datenblatt) mit einer Unsicherheit ≤ $f_{Rep}/2$ direkt aus Gl. 3 berechnet werden. Sind über den vorliegenden Laser keine weiteren Daten vorhanden, kann eine Bestimmung der Modennummer über eine Vergleichsmessung mit einem Wavemeter erfolgen, welches ebenfalls eine Unsicherheit von ≤ $f_{Rep}/2$ garantieren muss. Dies erfordert jedoch eine regelmäßige Kalibrierung des Wavemeters. Eine Bestimmung der Modennummer ohne zusätzliche Hilfsmittel kann auch durch eine Variation der Repetitionsrate erfolgen [11,17,22]. An der TU Ilmenau wird ein Wavemeter (High Finesse, Ångstrom Super Precision WLM-VIS, 350-1100 nm, Absolutgenauigkeit 100 MHz) und die Variation der Repetitionsrate zur Bestimmung unbekannter Laserfrequenzen genutzt. Eine Kombination dieser Methoden wird gelegentlich auch für He-Ne-Laser bekannter Frequenz als Konsistenztest zur Überwachung der Funktionalität des Frequenzkammes und des Wavemeters eingesetzt.

2.2.3. Anbindung des Metrologielasers an eine Frequenzkammlinie

Das sechsachsige Interferometersystem der NPMM-200 wird von drei fasergekoppelten, stabilisierten He-Ne-Lasern versorgt. Da nicht jeder dieser Laser gleichzeitig an eine Kammlinie gekoppelt werden kann, wurde die Anbindung über eine „Master-Slave-Anordnung“ realisiert. Dieses Konzept ist in Abb. 3 dargestellt. Zunächst wurde dafür das fasergekoppelte He-Ne-Lasermodul der NPMM-200 um eine fasergekoppelte He-Ne-Heterodynquelle erweitert [23]. Dieses System besteht aus zwei kommerziell erhältlichen, stabilisierten He-Ne-Lasern (Model: SL02/1, SIOS Messtechnik GmbH, P = 1 mW).

Ein Laser dieser Heterodynquelle wird für die Erzeugung eines Beatsignals mit einer Frequenzkammlinie genutzt. Dazu wird nahezu die gesamte nach Faserkopplung zur Verfügung stehende Leistung verwendet. Das erzeugte Beatsignal wird zunächst zur Bestimmung der Absolutfrequenz dieses Lasers herangezogen und anschließend als Eingangssignal eines FPGA-basierten Kontrollsystems verwendet. Die Regelung verwendet eine phasensensitive Detektion des Beatsignals mit dem der Unterschied zu einer aus dem 10 MHz-Ausgang des GPSDO abgeleiteten Referenzfrequenz bestimmt und anschließend durch einen digitalen PID-Regler kontrollliert wird. Die Anpassung der Laserfrequenz erfolgt über eine Änderung der Resonatorlänge mittels der Heizwicklung der Laserröhre. Der so stabilisierte Laser fungiert anschließend als Sekundärstandard [6].

Der zweite Laser der Heterodynquelle dient als eigentlicher Metrologielaser (ML). Er wird mit einem frei zwischen 0,1-20 MHz einstellbaren Frequenzoffset an den Sekundärstandard-Laser (SSL) gebunden. Dafür werden einige µW der Leistung des Sekundär- und Metrologielasers

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

durch zwei Strahlteiler zur Überlagerung ausgekoppelt und zur Erzeugung eines Schwebesignals mit einem hohen SNR im Bereich von mindestens 50 dB verwendet. Dieses analoge Signal wird zunächst mittels Schmitt-Trigger in ein TTL-Signal gewandelt, welches das Eingangssignal für ein weiteres FPGA-basiertes Kontrollsystem bildet. Die Frequenzbestimmung erfolgt dabei jedoch durch eine Kantendetektion. Die Anzahl gezählter Pulse wird mit einer vom Nutzer festgelegten Sollfrequenz verglichen, die den Frequenzoffset zwischen SSL und ML bestimmt. Die Differenz wird einem digitalen PID-Regler zugeführt, dessen Ausgangssignal ebenfalls zur Ansteuerung der Heizung des ML verwendet wird [23]. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Signalverarbeitungssysteme und Regelschleifen findet sich in [6,23].

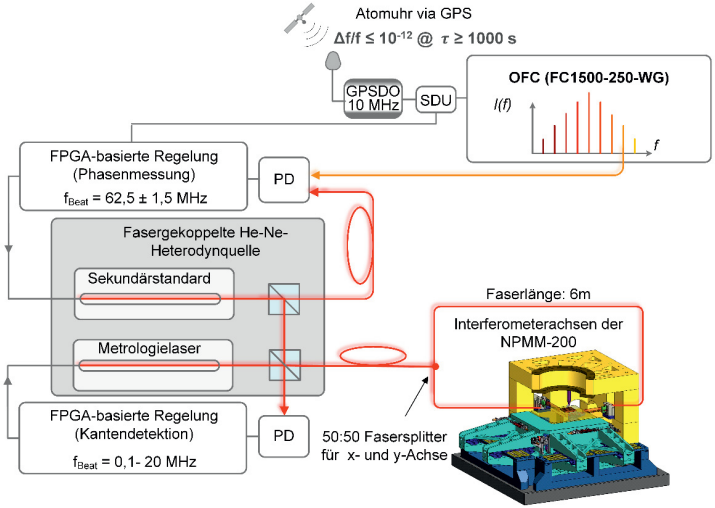


Bild 3: Konzept zur Anbindung der Metrologielaser der NPMM-200 an eine Frequenzkammlinie.

Im gelockten Status werden die Beatsignale zwischen SSL und Kammlinie bzw. SSL und ML permanent durch zwei Kanäle des Frequenzzählers der Signalverarbeitungseinheit des Frequenzkammes überwacht. Nach dem Einschalten der Laserquelle werden die Laser zunächst in ihre interne Stabilisierung gebracht. Anschließend kann durch einen manuellen Schalter in die externe Frequenzkammregelung umgeschaltet werden.

Die verbleibende Leistung des ML (etwa 500-700 µW) wird anschließend genutzt, um zwei Messachsen (x,y) der NPMM-200 zu bedienen. Hierfür wird ein 50:50-Splitter mit einer 6 m

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

langen Faser genutzt, der die Leistung direkt zu den Interferometerachsen der NPMM-200 führt.

2.3 Ergebnisse

In Abb. 4 ist eine 24-stündige Messreihe der Beatsignale zwischen dem SSL und einer Kammlinie sowie zwischen SSL und ML dargestellt. Die obere Abbildung zeigt die Abweichung des Beatsignals vom Mittelwert ($\Delta f_{Beat} = f_{Beat} - \overline{f_{Beat}}$) zwischen dem SSL und einer Kammlinie vor und nach dem Locken des SSL auf die Kammlinie. Die schwarze Kurve zeigt den SSL in seiner internen Stabilisierung. In diesem Fall fungiert die Kammlinie als stabile Referenzfrequenz und die Frequenzschwankungen werden vollständig durch den SSL determiniert. Dabei zeigt sich über einen Zeitraum von 24 h-Stunden eine maximale Frequenzabweichung von 1,1 MHz ($2{,}3 \cdot 10^{-9}$). Die resultierende Allan-Abweichung ist in Abb. 5 dargestellt und zeigt eine deutliche Zunahme für Integrationszeiten länger als 100 s.

Wird der Lock zur Kammlinie geschlossen, werden die Frequenzschwankungen des SSL nahezu vollständig eliminiert. Die Beatsignale verdeutlichen in diesem Fall wie gut der SSL bzw. ML der Kammlinie bei einer geeigneten Wahl der Regelparameter folgen kann. Die Abweichung des Mittelwertes der gemessenen Beatfrequenzen vom Sollwert der Regelung betrug bei dem SSL - 47 Hz ($9{,}9 \cdot 10^{-14}$) mit f_{Soll} = 62,5 MHz und bei dem ML 204 Hz ($4{,}3 \cdot 10^{-13}$) bei f_{Soll} = 4,5 MHz. Die maximale Frequenzabweichung vom Mittelwert der jeweiligen Beatsignale über ein Zeitfenster von 1 h beträgt 2,3 kHz (176 Hz) für den SSL (ML), welches einer relativen Frequenzabweichung von $4.8 \cdot 10^{-12}$ ($3.7 \cdot 10^{-13}$) entspricht. Über den gesamten Messzeitraum von 24 h wurden vereinzelt Ausreißer durch schwere akustische Störungen (Türknall) mit einer maximalen Frequenzabweichung von 11,7 kHz beobachtet.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

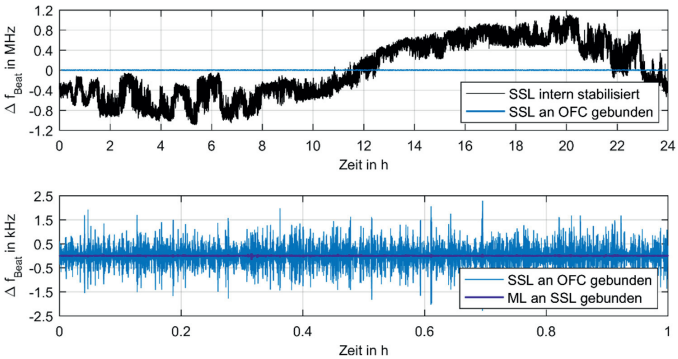


Bild 4: Frequenzabweichung eines an eine Kammlinie gebundenen SSL und ML über einen Zeitraum von 24 h (oben) und 1 h (unten).

Die aus der gesamten Messreihe berechneten Allan-Abweichungen sind in Abb. 5 dargestellt. Die rote Kurve zeigt die Frequenzstabilität des GPS-referenzierten Frequenzkammes. Die relativen Allan-Abweichungen der Beatsignale der beiden gelockten He-Ne-Laser liegen für Integrationszeiten ≥ 1 s unterhalb der Allan-Abweichung des Kammes. Dies zeigt, dass die Regelung die Anbindung eines Metrologielasers an eine Kammlinie gewährleistet und dass die Genauigkeit und Stabilität der so stabilisierten Laserfrequenz unter Vermeidung schwerer äußerer akustischer Störungen bis zu einer Integrationszeit von 10000 s durch die Frequenzschwankungen der Kammlinie dominiert werden. Für eine Integrationszeit von 10000 s fällt die relative Allan-Abweichung der Kammlinie auf $5 \cdot 10^{-13}$. Die Anbindung der He-Ne-Laser an eine Kammlinie resultiert damit, im Vergleich zu den intern stabilisierten He-Ne-Lasern mit einer relativen Allan-Abweichung von $4 \cdot 10^{-10}$ in einer Verbesserung der Langzeitstabilität um drei Größenordnungen. Für Integrationszeiten ≥ 1 s liegt somit der Einfluss von Frequenzschwankungen erstmalig unterhalb der relativen elektronischen Auflösungsgrenze der Interferometer von $25 \cdot 10^{-12}$ (5 pm bei einem maximalen Verfahrweg von 200 mm [6]) und kann damit als Einflussfaktor der interferometrischen Längenmessung eliminiert werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

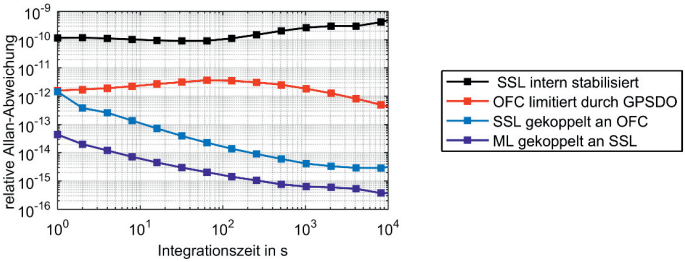


Bild 5: Relative Allan-Abweichungen eines Metrologielasers vor und nach dem Anbinden an eine Kammlinie.

Die Frequenzstabilität des ML muss jedoch abschließend über eine Faserkopplung an die NPMM-200 weitergegeben werden. In Abb. 3 wird deutlich, dass mögliche Störungen durch die Faserzuleitung des ML an die NPMM-200 durch die Regelung nicht kompensiert werden. Frequenzschwankungen durch Faserzuleitungen können vor allem durch umweltbedingte Störungen (thermisch, akustisch) auftreten. Durch eine möglichst kurze Faserlänge und der Aufstellung des Kammes sowie der Metrologielaser im gleichen klimatisierten Labor wie die NPMM-200 können solche Einflüsse jedoch weitestgehend vermieden werden. Eine Worst-Case-Szenario-Abschätzung auf Basis von [24] ergab für die Umgebungsbedingungen des klimatisierten Labors eine thermisch (max. Temperaturänderung von 7 mK/s) bedingte maximale Frequenzänderung von $8 \cdot 10^{-16}$/m Faserlänge. Die Vernachlässigung des Einflusses der Faserzuleitung auf die Frequenzstabilität des Metrologielasers muss jedoch noch durch weiterführende experimentelle Untersuchungen bestätigt werden.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Die kommerzielle Verfügbarkeit der Frequenzkammtechnologie eröffnet neue Möglichkeiten zur Entwicklung hochstabiler, optischer Frequenzen für die interferometrische Längenmessung. Durch die Kopplung eines He-Ne-Lasers an eine Frequenzkammlinie konnte eine direkte Anbindung der interferometrischen Längenmessung der NPMM-200 an eine Atomuhr demonstriert werden. Der vorgestellte Ansatz ermöglicht es die Frequenzstabilität einer Kammlinie auf einen Metrologielaser der NPMM-200 zu übertragen, was in einer Verbesserung der Langzeitstabilität um drei Größenordnungen resultiert. Die Charakterisierung der Frequenzstabilität ist jedoch derzeitig durch die Beschränkung der Stabilität der Kammlinie auf Integrationszeiten oberhalb von ≥ 1 s beschränkt. Zukünftige Untersuchungen werden sich daher auf die Charakterisierung und Verbesserung der Kurzzeitstabiliät für Integrationszeiten unterhalb von 1 s konzentrieren.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Danksagung

Die Autoren danken der Carl-Zeiss-Stiftung für die Finanzierung im Rahmen des Forschungsprojektes „MetroBase“. Weiterhin danken wir Menlo Systems für die Bereitstellung der Daten zur Frequenzstabilität des GPS-referenzierten Frequenzkammes.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literaturverzeichnis

[1] E. Manske, “Ongoing trends in precision metrology, particularly in nanopositioning and nanomeasuring technology.” *Technisches Messen, 82 (7-8), p. 359-366, 2015.*

[2] J. A. Kramar, “Nanometre resolution metrology with the molecular measuring machine”, *Measurement Science and Technology*, 16(11), p. 2121,2005.

[3] G. Jäger, “Nanopositioning and nanomeasuring machine NPMM-200 – a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology,” *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 4, p. 034004, 2016.

[4] 2. I. Ortlepp, “Tip- and Laser-based 3D Nanofabrication in extended macroscopic working areas”, *Nanomanufacturing and Metrology*, 4, p.132-148, 2021.

[5] E. Manske, “Progress of nanopositioning and nanomeasuring machines for cross-scale measurement with sub-nanometre precision”, *Meas. Sci. Technol.,* 31, p. 085005, 2020.

[6] P. Köchert, „Ultrastable metrology laser at 633 nm using an optical frequency comb“. In: *Optical Micro-and Nanometrology VII*. International Society for Optics and Photonics, p. 106780S, 2018.

[8] T. Niebauer, “Frequency stability measurements on polarization-stabilized He-Ne lasers”, *Applied Optics,* 27, pp. 1285-1289, 1988.

[9] F. Riehle, „The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures”, *Metrologia*, 55(2), p. 188, 2018,

[10] J. Reichert, “Measuring the frequency of light with mode-locked lasers”, *Optics communications*, 172(1-6), p. 59-68, 1999.

[11] J. E. Stone, “An optical frequency comb tied to GPS for laser frequency/wavelength calibration”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 115(6), p. 413, 2010.

[12] M. Matus, “Uncertainty estimation for comb based laser calibration by direct comparison of 3 different combs”, *MacroScale*, 2011.

[13] M.Matus, “Femtosecond comb generator as the primary length standard in Austria”. In: *Proceedings of the 11th International Metrology Congress*, 2003.

[14] SI Brochure – 9th edition (2019)- Appendix 2, “Mise en pratique for the definition of the metre in the SI”, *https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique*.

[15] M. A. Lombardi, “The use of GPS disciplined oscillators as primary frequency standards for calibration and metrology laboratories”, *NCSLI Measure*, 3(3), p. 56-65, 2008.

[16] W. Hänsel, „All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation”. Appl. Phys. B, 123, 41, 2017.

[17] Menlo Systems GmbH, “FC1500-250-WG”, *User Manual*, Menlo Systems GmbH, 2016.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[18] Menlo Systems GmbH, „GPS-8 10 MHz RF Reference“, *User Manual*, Menlo Systems GmbH, 2016.

[19] https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/services/gps-data-archive

[20] P. Kubina, “Long term comparison of two fiber based frequency comb systems”, *Optics Express*, 13(3), p. 904-909, 2005.

[21] W.-K. Lee, “Direct frequency counting with enhanced beat signal-to-noise ratio for absolute frequency measurement of a He-Ne/I2 laser at 633 nm”. *Applied optics*, 46(6), p. 930-934, 2007.

[22] J. Zhang, „Exact frequency comb mode number determination in precision optical frequency measurements”. *Laser physics*, 17(7), p. 1025-1028, 2007.

[23] C. Sternkopf, “Digital frequency offset-locked He–Ne laser system with high beat frequency stability, narrow optical linewidth and optical fibre output”, *Measurement Science and Technology*, 29(6), p. 064013, 2018.

[24] G. B. Hocker, “Fiber-optic sensing of pressure and temperature”, *Applied optics*, 18(9), pp. 1445-1448, 1979.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Längenmessabweichung und Antastabweichung in dem sich verändernden technischen Umfeld der Koordinatenmesstechnik

Dr.-Ing. **Dietrich Imkamp**, Carl ZEISS Industrielle Messtechnik, Oberkochen;
Dipl.-Ing. **Andre Martin**, HEXAGON Metrology GmbH, Wetzlar

Kurzfassung

Die Längenmessabweichung ist die wichtiges Kenngröße zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit eines Koordinatenmesssystems im Hinblick auf die zu erwartende Längenmessunsicherheit. Üblicherweise wird die Längenmessabweichung an kalibrierten Normalen, wie beispielsweise Parallelendmaßen für taktile Sensoren und Strichmaßstäben für Kamerasensoren ermittelt. Dabei werden die Abstände zwischen den Kanten (Messflächen) der Parallelendmaße beziehungsweise den Kanten der Striche mittels bidirektionaler Einzelpunkt-Antastung bestimmt und mit den zugehörigen Kalibrierwerten verglichen. Durch die bidirektionale Vorgehensweise werden Effekte bei der mechanischen Antastung wie die Hysteresen der Bewegungsachsen und der taktilen Sensoren sowie die Kantendetektionsfähigkeit von Kameras berücksichtigt. Wenn diese Effekte durch gleichgerichtete Antastungen oder durch die Bestimmung der Mittenabstandsabweichung an Normalen, wie beispielsweise Kugelleisten oder Kugelstäben, unterdrückt werden, müssen die Ergebnisse als unidirektional gekennzeichnet werden. Eine Vergleichbarkeit von unidirektionalen mit bidirektionalen Angaben ist nur möglich, wenn durch ergänzende Untersuchungen, beispielsweise an einem kurzen Endmaß, die Effekte bei der bidirektionalen Antastung bestimmt und zusätzlich angegeben werden. Einzelheiten zur Vorgehensweise sind in der Normenserie DIN EN ISO 10360 definiert. Die technische Entwicklung hat in der Koordinatenmesstechnik Systeme wie beispielsweise die Computertomographie und die Streifenprojektion hervorgebracht, die eine bidirektionale Einzelpunkt-Antastung praktisch nicht ausführen können und in dieser Form auch nicht eingesetzt werden. Sie nutzen üblicherweise die zuvor beschriebenen Normale mit Kugeln als Teil der Maßverkörperung zur Bestimmung der Längenmessabweichung, bei denen die Effekte aus der Bestimmung der Oberfläche („Antastung“) ausgemittelt werden. Daher sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich, um eine Längenmessabweichung angeben zu können, die mit den üblichen bidirektionalen Angaben vergleichbar ist. Der Beitrag beschreibt nach einer historischen und

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

begrifflichen Einführung die zuvor genannten Vorgehensweisen und diskutiert die Vergleichbarkeit der so ermittelten Angaben zur Längenmessabweichung unterschiedlicher Koordinatenmesssysteme. Weiterhin wird das Thema der Prüfwertunsicherheit angesprochen.

1. Einleitung und historische Entwicklung

Mit der Entwicklung von Koordinatenmessgeräten in den 80ziger Jahren des letzten Jahrhunderts stand erstmalig ein „Vielzweckmessgerät“ für geometrische Messaufgaben in der Produktion zu Verfügung, mit dem unterschiedliche Messaufgaben gelöst werden können [1]. Damit einher ging die Herausforderung die Leistungsfähigkeit der Geräte zu spezifizieren, und die Messunsicherheit bei Messungen auf diesen damals technologisch neuen Geräten zu bestimmen. In den 90ziger Jahren entstanden dazu in USA [2] und Deutschland [3] die ersten Standards, die sich auf Geräte mit vorwiegend taktiler Sensorik beschränkten. Durch die weitere technische Entwicklung wurden anschließend optische Sensoren in den Standards berücksichtigt. Gleichzeitig wurden die bestehenden Standards weiterentwickelt, beispielsweise in Deutschland im VDI als Richtlinienserie 2617 [4], sowie international in ISO als Normenserie ISO 10360 [5]. Durch die Verbreitung optischer Koordinatenmesssysteme ohne verkörpertes Koordinatensystem mit Bewegungsachsen beispielsweise auf Basis von Streifenprojektion, Photogrammetrie und Computertomographie wurden weitere Standards definiert. Damit einher ging die Einführung des Begriffs der Koordinatenmesssysteme als übergeordneter Begriff für diese Art von Messsystemen. Mit Koordinatenmessgerät werden nur Koordinatenmesssysteme bezeichnet, die stationär sind und mindestens einen Sensor bewegen [6].

Der Begriff der Messunsicherheit war in der Anfangsphase der Standardisierung nicht so eindeutig, wie dies heute durch den GUM [7] definiert ist, so dass die Begriffe für Abweichung, zulässige Abweichung und Messunsicherheit (Abschnitt 2) unterschiedlich verwendet wurden.

Schon zu diesem Zeitpunkt wurden verschiedene Eigenschaften der Geräte durch unterschiedliche Kenngrößen bewertet. Im Vordergrund stand dort, wie heute, die Unterscheidung zwischen der Fähigkeit die Objektoberfläche, oder allgemeiner formuliert eine Grenzfläche, zu erfassen und der Fähigkeit, eine Länge zu bestimmen. Auch dort wurden bereits dafür die Begriffe Antastabweichung und Längenmessabweichung (Abschnitt 3) verwendet.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Messabweichung, zulässige Messabweichung, Messunsicherheit und Eignung

Der Anwender eines Messsystem interessiert sich bei der Anwendung des Systems neben dem Messwert im Wesentlichen für die Messunsicherheit für eine Messaufgabe, da diese bei der Konformitätsbewertung gemäß der Entscheidungsregeln [8] berücksichtigt werden muss. Die Messunsicherheit ist bei einem Vielzweckmesssystem wie einem Koordinatenmesssystem aber nicht durch eine einzige Angabe zu beschreiben, weil sich das System für viele unterschiedliche Messaufgaben eignet, bei denen auch unterschiedliche Messunsicherheiten auftreten. Daher sind in den Normen typische Messaufgaben für Koordinatenmesssystemen definiert, um einheitliche Kenngrößen in Form von Messabweichungen ermitteln zu können, mit denen die Leistungsfähigkeit eines Systems beschrieben wird. Diese Messabweichungen, die aus den Differenzen zwischen den an einem Normal ermittelten Messwerten und den Kalibrierwerten des Normals bestimmt werden, dürfen die spezifizierten zulässige Messabweichungen unter Berücksichtigung der Prüfwertwertunsicherheit nicht überschreiten. Für die höchste zulässige Messabweichung hat sich nach der englischen Bezeichnung „Maximum Permissible Error“ die Abkürzung MPE [9] etabliert.

Wenn die nach der Norm definierte Messaufgabe und die am realen Bauteil durchgeführte Messung gleich sind, sind auch Messunsicherheit und maximal zulässige Messabweichung gleich. In vielen Fällen wird das aber nicht so sein, so dass eine separate Messunsicherheitsbestimmung beispielsweise nach [10] oder [11] erforderlich ist. Häufig wird diese auch als Teil einer Eignungsuntersuchung [12] durchgeführt. Dabei müssen auch Einflüsse besonders aus dem Messobjekt, die sich von den Einflüssen des Normals häufig unterscheiden (z. B. thermischer Ausdehnungskoeffizient), berücksichtigt werden.

3. Längenmessabweichung und Antastabweichung

Die Längenmessabweichung ist eine Kenngröße, die die Abweichung eines Koordinatenmesssystems bei einer Längenmessung in beliebiger Lage und Orientierung zwischen Einzelpunkten beschreibt. Sie berücksichtigt bei bidirektionaler Antastung sowohl die Abweichung bei der Antastung als auch die Abweichung aus dem System. Sie wird an Endmaßen oder Stufenendmaßen [13] beziehungsweise bei Kamerasensoren an Strichmaßstäben [14] aus den Abständen der Endflächen an den Endmaßen beziehungsweise der Grenzflächen an den Strichmaßstäben bestimmt (Bild 1).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bei Kugelstäben werden die Längen aus den Kugelmittelpunktsabständen ermittelt [15]. Dabei werden durch die Mittelung beim Antasten der Kugel richtungsabhängige Effekte und daraus resultierende Antastabweichungen unterdrückt (Abschnitt 4). Sowohl Endmaße als auch Kugelstäbe liefern eine Information zur Abweichung im Messvolumen des Koordinatenmesssystems. Aufgrund des unterdrückten Antasteinflusses repräsentiert der Kugelabstand aber keine bidirektionale Längenmessabweichung. Diese kann durch Kombination von Kugelabstandsabweichung und Antastabweichung (s. u.) abgeleitet werden [15].

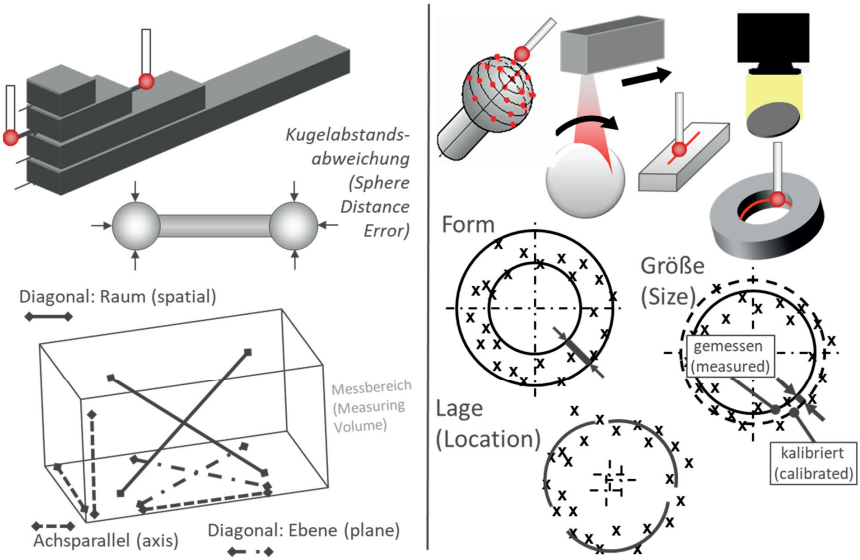


Bild 1: Normale und Kenngrößen zur Bestimmung von Längenmessabweichung, Kugelabstandsabweichung (links) und Antastabweichung (rechts)

Zur Ermittlung der Antastabweichung dienen Prüfkörper, die im Vergleich zum Volumen des Messsystem klein sind und mit denen die besonderen Eigenschaften des Sensors beim Antasten bewertet werden können. Für taktile Sensoren werden Ringe und Kugel [16] verwendet. Kugeln kommen auch bei optischen Abstandssensoren und optischen Koordinatenmesssystemen zur Anwendung [15, 17, 18]. Für Kamerasensoren werden vorwiegend zweidimensionale Kreisschablonen (z. B. „Chrom-Kreise“) verwendet [14].

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

An diesen Prüfkörpern werden üblicherweise Form und Größenmaß (Durchmesser) bestimmt und mit den Kalibrierwerten zur Ermittlung der Antastabweichung verglichen.

Wenn der Sensor die Bestimmung des Prüfkörpers aus verschiedenen Orientierungen oder mit verschiedenen Tastelementen (z. B.: Taststiften) zulässt, werden diese Messungen separat ausgewertet und verglichen. Die wichtigste Kenngröße ist dabei die Lage des Prüfkörpers, die bei der Messung aus verschiedenen Orientierungen oder mit verschiedenen Elementen immer gleichbleiben sollte. Üblicherweise wird diese Prüfung an einer Kugel durchgeführt und der Kugelmittelpunkt betrachtet. Man spricht daher auch vom „Kugelmittelpunkttest“.

4. Bidirektionale, Unidirektionale und mittelnde Antastung bei Längenmessungen

Bild 2 zeigt die beiden möglichen taktilen Antaststrategien bei der Längenmessung an einem Stufenendmaß und ihre Wirkung durch Taststiftbiegung und/oder Hysteresen auf das Messergebnis. Bei der unidirektionalen Antastung wirkt die Taststiftbiegung in die gleiche Richtung und beeinflusst die gemessene Länge nicht. Im Gegensatz dazu wirkt die Taststiftbiegung bei der bidirektionalen Antastung in entgegengesetzte Richtungen und beeinflusst das Ergebnis der Längenmessung.

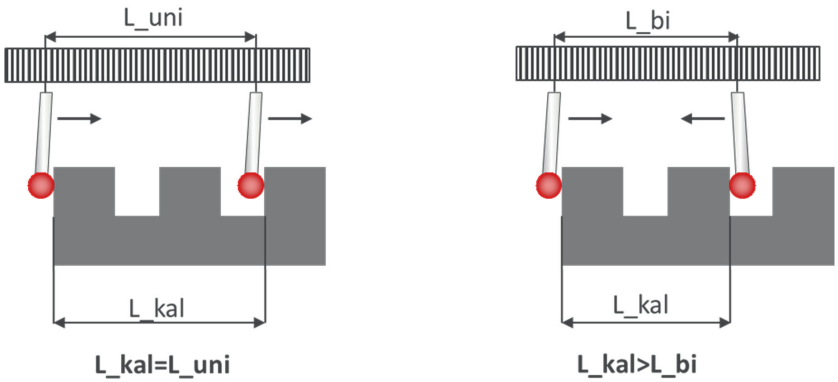


Bild 2: Unidirektional (links) und bidirektional (rechts) Antastung

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bild 3 zeigt die Antasteffekte bei verschiedenen Längenmaßverkörperungen und Sensoren. Bei einem Kugelstab beziehungsweise einer Kugelleiste werden die Kugelmittelpunkte durch ein allseitiges Antasten der Kugel bestimmt. Durch diese „mittelnde“ Antastung werden wie bei der unidirektionalen Antastung Antasteinflüsse unterdrückt, so dass man auch hier von einer unidirektionalen Messung spricht. Bei der bidirektionalen Antastung am Endmaß mit taktiler Sensorik und Kamera-Sensorik beeinflussen dagegen Antasteffekte die Längenmessung, wie es auch bei der Anwendung von Koordinatenmesssystemen üblicherweise zu erwarten ist.

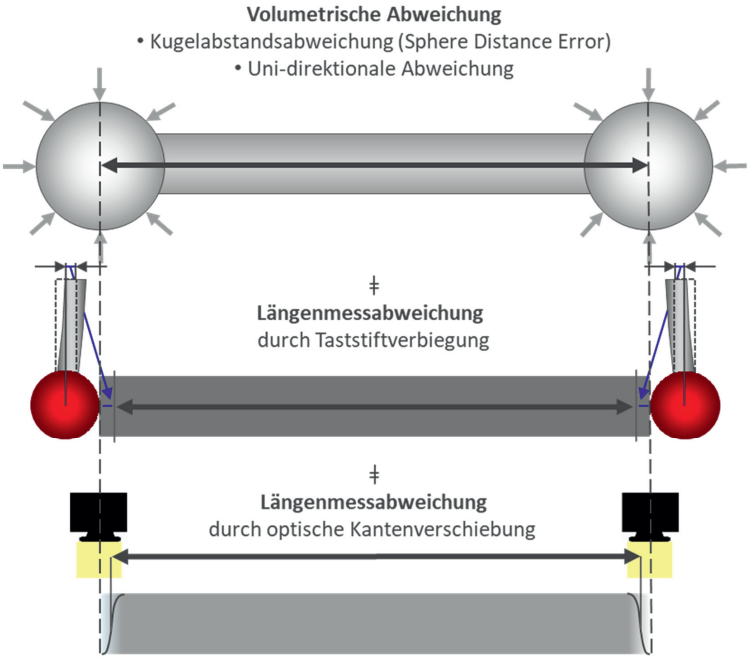


Bild 3: Bidirektional und mittelnde Antastung an verschiedenen Längenprüfkörpern

5. Einzelpunkt- und Vielpunktmessung

Im Vordergrund standen zum Beginn der Standardisierung Koordinatenmessgeräte mit taktilen Sensoren, die vorwiegend nur zur Einzelpunktmessung in der Lage waren. Daher war dieser Betriebsmodus bei der Definition vieler Kenngrößen maßgeblich. Durch die Entwicklung scannender Sensorik und scannender Messsysteme wurde es nötig, zusätzliche Definitionen

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

für Kenngrößen für diesen Betriebsmodus zu entwickeln. Ein Beispiel dafür ist die Scanning-Antastabweichung für taktile Sensoren nach [16]. Auch für optische Sensoren gibt es entsprechende Definitionen, mit denen Maß-, Form und gegebenenfalls Lageabweichungen (Abschnitt 3) bei der Antastung ermittelt werden [15, 17, 18]. Bei diesen Definitionen sind unterschiedliche Vorgehensweise entsprechend der Sensorfähigkeiten zur Erfassung des Prüfkörper, bei dem es sich vorwiegend um eine Kugel handelt, vorgesehen. So sind für taktile Sensoren im Scanning-Betrieb abzufahrende Scanningbahnen definiert [16]. Die optischen Sensoren erfassen Bereiche der Prüfkugel als „Punktwolke“ und bestimmen daraus die Kenngrößen der Antastabweichung [15, 17, 18].

Um die Vergleichbarkeit mit den Einzelpunktkenngrößen der bestehenden Normen [13, 16] herzustellen, sind in den Normen aber weiterhin Kenngrößen auf Basis von Einzelpunktmessungen definiert. Das erfordert besondere Festlegungen für Sensoren beziehungsweise Systeme, die nicht in der Lage sind, direkte Einzelpunkte aufzunehmen (z. B.: Linienscansensor [15], Computertomographiemesssysteme [17], Optische Koordinatenmesssysteme [18]). Dabei wird definiert, wie aus der von einem solchen Sensor aufgenommenen „Punktewolke“ Informationen bestimmt werden, die mit Einzelpunktmessungen vergleichbar sind.

Im Fall der Bestimmung von Längenmessabweichung mit Kugelstäben wird aus den durch Vielpunktmessung ermittelten Kugelmittelpunkten der Kugelmittelpunktsabstand bestimmt, und durch Berücksichtigung der Antastabweichungen die Längenmessabweichung abgeleitet (Abschnitt 3).

Für die Antastabweichungen werden aus der „Punktewolke“ so genannte „repräsentative“ Punkte abgeleitet werden, die mit den Punkten einer Einzelpunktmessung vergleichbar sind [15, 17, 18]. Dabei wird das mit der ISO 10360-2 1994 für taktile Sensoren eingeführte aus 25 Punkten bestehende Antastmuster auf einer Kugel zugrundgelegt. Dieses Muster bedeckt eine Halbkugel gleichmäßig [16]. Es ist allerdings für viele Sensoren nicht vollständig erfassbar ist, weil Punkte am Pol und am Äquator mit ihren senkrecht zueinanderstehenden Normalenrichtungen häufig nicht aus einer Sensorposition erreicht werden können. Daher ist es zulässig, den erfassten Kugelbereich zu variieren. Die 25 Punkte sind gleichmäßig über diesen Bereich zu verteilen. Diese Beschreibung macht deutlich, dass eine einheitliche Festlegung der Vorgehensweise bei der Bestimmung der Antastabweichung aufgrund der

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

technischen Vielfalt der Sensorik nicht möglich ist. Das gilt auch für die Vorgehensweise, mit der die 25 repräsentativen Punkte aus der Punktewolke abgeleitet werden.

Eine Spezifikation der Antastabweichung muss immer die technischen Eigenschaften eines Sensors berücksichtigen. Das ist aufgrund der Vielzahl der technischen Realisierungen schwierig. Der Wunsch nach Vergleichbarkeit sollte nicht die Möglichkeiten eines Sensors beschränken. Der Sensorhersteller sollte immer seine Vorgehensweise bei der Bestimmung von Leistungskenngrößen beschreiben, die den typischen Einsatz des Sensors berücksichtigen.

6. Test- und Prüfwertunsicherheit

Der Vorgang zur Bestimmung der Leistungskenngrößen ist unvermeidbar mit einer Unsicherheit verbunden. Diese Unsicherheit wird nach [9] als Prüfwertunsicherheit beziehungsweise in älteren Normen auch als Testunsicherheit [19, 20] bezeichnet und ist beim Vergleich zwischen den ermittelten Kenngrößen und ihren Grenzwerten, den „MPEs“, gemäß der Entscheidungsregeln [8] zu berücksichtigen. Zur Bestimmung der Unsicherheit bei der Leistungsbewertung gibt es entsprechende Informationen in separaten Normen für Maßabweichungen [19] und für taktile Antastabweichungen [20] sowie bei neueren Normen direkt in den zugehörigen Normen [17, 18].

7. Trends und Zusammenfassung

Die große Bandbreite von Technologie in der Koordinatenmesstechnik hat ein umfangreiches Normenwerk zur Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit hervorgebracht. Es gib heute circa 150 Kenngrößen in den internationalen Normenserien ISO 10360 und den nationalen Normenserien VDI/VDE 2617 in Deutschland und ASME B89.4 in den USA. Die vielen Kenngrößen machen es dem Anwender nicht leicht den Überblick zu behalten. Auch wenn ein Teil dieser Kenngrößen nicht mehr aktuell ist, weil die entsprechenden Normen zurückgezogen sind, spielen sie für Anwender und Hersteller nach wie vor eine Rolle, da viele Systeme, die danach spezifiziert wurde, nach wie vor in Betrieb sind und daher auch regelmäßig gewartet und kalibriert werden.

In diesem Beitrag werden die begrifflichen Grundlagen (Abschnitt 2) und die beiden wesentlichen Kenngrößenkategorien, Längenmess- und Antastabweichung (Abschnitt 3), zu

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

denen sich die meisten Kenngrößen zuordnen lassen, dargestellt. Weiterhin wird der Zusammenhang dieser Kategorien erläutert (Abschnitt 4). Anhand der technologischen Vielfalt und dem Wunsch nach Vergleichbarkeit wird begründet, weshalb so viele Kenngrößen entstanden sind (Abschnitt 5). Jede Spezifikation einer Kenngröße stellt einen Kompromiss zwischen Vergleichbarkeit und Nutzung der individuellen Sensoreigenschaften dar. Die Berücksichtigung der bei der Bestimmung der Kenngrößen auftretenden Prüfwertunsicherheit (Abschnitt 6) ist ein neues Thema, das sicher notwendig ist. Es erhöht aber den Aufwand für die Prüfung weiter.

Literatur

[1] Weckenmann, A. (Hrsg.): Koordinatenmesstechnik: Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen, Carl Hanser Verlag, München 2012.

[2] ASME / American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.): B89.1.12 - 1985 Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines (CMMs).

[3] VDI/VDE Richtlinie 2617 Blatt 2.1 Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Meßaufgabenspezifische Meßunsicherheit; Längenmeßunsicherheit, Dezember 1986.

[4] VDI/VDE-Richtlinie 2617 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung (Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification) 2006 bis 2019.

[5] Wäldele, F.: Die Koordinatenmesstechnik in Normen und Regelwerken, in: Neumann, H. J. (Hrsg.): Präzisionsmesstechnik in der Fertigung mit Koordinatenmessgeräten, Expert Verlag, Renningen, 3. Auflage 2010.

[6] DIN EN ISO 10360-1 (ISO 10360-1: 2000 + Corr 1: 2002) Geometrische Produktspezifikation (GPS), Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG), Teil 1: Begriffe, Juli 2003.

[7] JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) 2008.

[8] DIN EN ISO 14253-1 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen, 2018.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[9] DIN EN ISO 14978 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Allgemeine Begriffe und Anforderungen für GPS-Messeinrichtungen, (English: Geometrical product specifikations (GPS) - General concepts and requirements for GPS measuring equipment) 2018.

[10] VDI/VDE-Richtlinie 2617 Blatt 7 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation September 2008.

[11] VDI/VDE-Richtlinie 2617 Blatt 11 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen, März 2011.

[12] VDI/VDE-Richtlinie 2617 Blatt 8 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten, Oktober 2018.

[13] DIN EN ISO 10360-2 (ISO 10360-2: 2009) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen, Juni 2010.

[14] DIN EN ISO 10360-7 (ISO 10360-7: 2011) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 7: KMG mit Bildverarbeitungssystemen, September 2011.

[15] DIN EN ISO 10360-8 (ISO 10360-8:2013) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) - Teil 8: KMG mit optischen Abstandssensoren, März 2014.

[16] DIN EN ISO 10360-5 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) - Teil 5: Koordinatenmessgeräte (KMG) mit berührendem Messkopfsystem im Einzelpunkt- und/oder Scanningmodus (ISO 10360-5:2020); Deutsche Fassung EN ISO 10360-5:2020.

[17] DIN EN ISO 10360-11 Entwurf (ISO/DIS 10360-11:2021) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 11: Computertomografie, März 2021

[18] DIN EN ISO 10360-13 Entwurf (ISO/DIS 10360-13:2020), Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 13: Optische 3D KMG, Juli 2020.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[19] DIN ISO/TS 23165 (Vornorm) Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Leitfaden zur Ermittlung der Testunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) (Geometrical product specifications (GPS) - Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty) August 2008,

[20] ISO/TS 17865 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Leitfaden zur Ermittlung der Testunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) bei KMGs mit berührenden Einfach- und Mehrfachtastersystemen (Geometrical product specifications (GPS) - Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty for CMMs using single and multiple stylus contacting probing systems) 2016.

[21] Richtlinie DKD-R 4-3 Blatt 18.1, Kalibrieren von Messmitteln für geometrische Messgrößen, Kalibrieren der messtechnischen Eigenschaften von Koordinatenmessgeräten (KMG) nach DIN EN ISO 10360 und VDI/VDE 2617, Deutscher Kalibrierdienst bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, Ausgabe 9/2018. (Internet, 11.04.2021: www.dkd.eu DAkkS: http://www.dakks.de/doc_kalibrier)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Komplexe 3D-Scantrajektorien für die dimensionelle Computertomographie durch Verwendung eines Hexapoden

Lorenz Butzhammer, **Tino Hausotte**,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Kurzfassung

Durch die Fähigkeit der Röntgen-Computertomographie (CT), innere oder schlecht zugängliche Bauteilbereiche zu erfassen, findet sie nicht nur im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, sondern auch zur Konformitätsprüfung für die geometrische Produktspezifikation zunehmend Anwendung. Die standardmäßig durchgeführte 360°-Rotation des Messobjekts während der Röntgenbildaufnahmen birgt jedoch den Nachteil, dass sich Messartefakte aufgrund von schlecht durchstrahlbaren Bereichen und sogenannter Kegelstrahlartefakte nicht vermeiden lassen. Ein Ansatz zur Vermeidung dieser Problematik besteht in der zusätzlichen adaptiven Bauteilneigung während des CT-Scans durch einen Hexapod als Positioniereinheit. In diesem Beitrag werden das Grundprinzip dieser Methodik näher erläutert, thermische Einflüsse auf die Positionierstabillität untersucht und geometrische Messergebnisse für eine Demonstrator-Messobjektanordnung präsentiert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine aufheizbedingte Positionsdrift durch den Hexapod beachtet werden sollte. Für das untersuchte Messszenario ermöglicht die adaptive Bauteilneigung geometrische Messungen, die auf konventionellem Wege nicht auswertbar sind. Gegenüber Vergleichsmessungen konnte keine signifikante Erhöhung der Messabweichungen durch die zusätzlichen Achsen festgestellt werden.

1. Einleitung

CT bietet die Möglichkeit, sowohl äußere als auch innere Strukturen von Objekten komplett zu erfassen. Beim industriellen Einsatz sind Anlagen mit Kegelstrahlanordnung und Flachdetektor am häufigsten vertreten [1]. In Bild 1 wird das Grundprinzip für derartige Geräte bei der Verwendung für geometrische Messungen erläutert. Während einer 360°-Rotation des Bauteils werden Röntgenbilder erfasst. Aus diesen wird anschließend durch einen mathematischen Algorithmus (meist FDK-Algorithmus nach [2]) ein dreidimensionaler Volumendatensatz rekonstruiert. Die Graustufenwerte einzelner Voxel dieses Datensatzes sind proportional zum

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

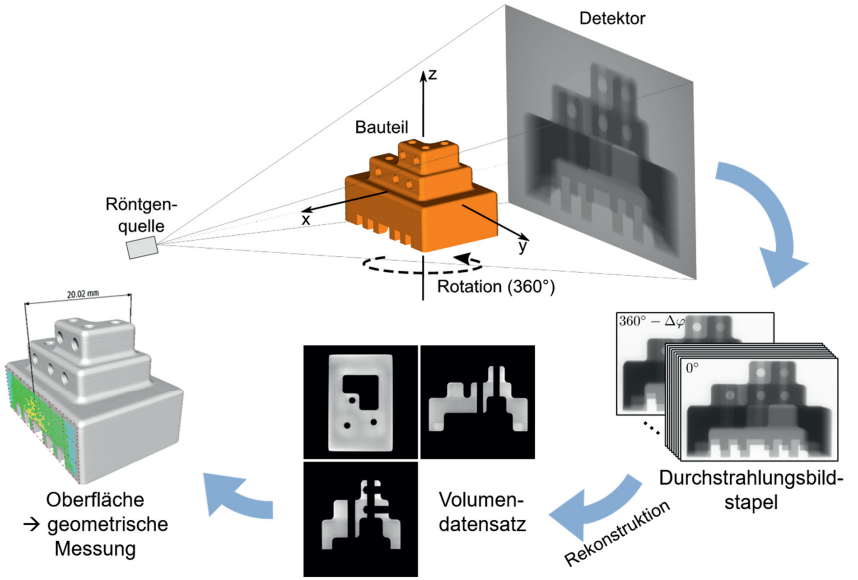


Bild 1: Grundprinzip der konventionellen dimensionellen Computertomographie unter Verwendung einer 360°-Rotation des Bauteils (entsprechend einer planaren, kreisförmigen Scantrajektorie).

Abschwächungskoeffizienten und damit zur Dichte des Materials. Basierend auf diesem Volumendatensatz wird die Bauteiloberfläche bestimmt, die schlussendlich für geometrische Messungen verwendet wird.

In Anlehnung an medizinische CT wird die Relativbewegung beim Scan für die Rekonstruktion oft im Koordinatensystem des Messobjekts beschrieben. In diesem Koordinatensystem ergibt sich aus der 360°-Rotation des Bauteils eine kreisförmige (Scan-)Trajektorie der Röntgenquelle (und des Detektors) um das Messobjekt. Nachteile dieser kreisförmigen Scantrajektorie sind die Ausbildung sogenannter Kegelstrahlartefakte sowie bei bestimmten Messobjekten/-szenarien die Unvermeidbarkeit von ungünstigen Durchstrahlungsrichtungen, z. B. durch hochabsorbierende Komponenten.

Ein potenzieller Ansatz, die Auswirkungen dieser Problematik zu verringern, ist die Anwendung von 3D-Scantrajektorien, was einer zusätzlichen Neigung des Bauteils (oder alternativ von Röntgenröhre und Detektor) entspricht. Zu deren Umsetzung finden sich in der Literatur hauptsächlich prototypenhafte Sonderanlagen, bei welchen Roboterarme zur flexiblen Positionierung von Messobjekt oder Röntgenröhre und Detektor eingesetzt werden (siehe z. B. [3,

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4, 5]). Nach bisherigem Stand ist der Einsatz von Roboterarmen jedoch durch die Positionierungenauigkeit limitiert und hauptsächlich für größer dimensionierte Bauteile geeignet.
In einer kürzlich veröffentlichten Arbeit [6] konnte gezeigt werden, dass sich mit Hilfe eines Hexapoden als parallelkinematische Positioniereinheit für das Messobjekt ein kommerzielles CT-Gerät ohne signifikanten Genauigkeitsverlust für den Einsatz von 3D-Scantrajektorien aufrüsten lässt. Im vorliegenden Beitrag wird das zugrundeliegende Prinzip zur korrekten Berücksichtigung der realen Durchstrahlungsgeometrie (Lage des Messobjekts bzw. eines mitbewegten Koordinatensystems zwischen Röhre und Detektor) vorgestellt. Außerdem werden die bereits veröffentlichten Untersuchungen um die Analyse des thermischen Einflusses der Hexapodantriebe auf die Positionierstabilität und die Betrachtung von geometrischen Messabweichungen für eine Demonstrator-Messobjektanordnung erweitert.

2. Methodik zur Umsetzung komplexer 3D-Scantrajektorien unter Berücksichtigung der realen Trajektoriengeometrie für die Objektrekonstruktion

Zur Realisierung von 3D-Scantrajektorien wird die in Bild 2 abgebildete kombinierte Anordnung aus CT-Gerät (bestehend aus Röntgenröhre, Detektor und Positioniereinheit mit Drehteller) und Hexapod verwendet. Der Hexapod befindet sich auf dem Drehteller des CT-Geräts, welcher eine 360°-Rotation während der Messung ausführt. Abhängig vom aktuellen Rotationswinkel (Scanwinkel) wird das Messobjekt zusätzlich mit Hilfe des Hexapoden um einen aufgabenspezifisch definierten Neigungswinkel um die ortsfeste y-Achse (vergleiche Bild 2 rechts) geneigt. Für die vorgestellten Untersuchungen wurden das CT-Gerät *Zeiss Metrotom 1500 (G2)* sowie der Hexapod *Physik Instrumente H840.G2*, welcher eine maximale Neigung von $\pm 15°$ erlaubt, verwendet. Details zur experimentellen Umsetzung sowie zu der im Folgenden vorgestellten Kalibrierstrategie finden sich in [6].

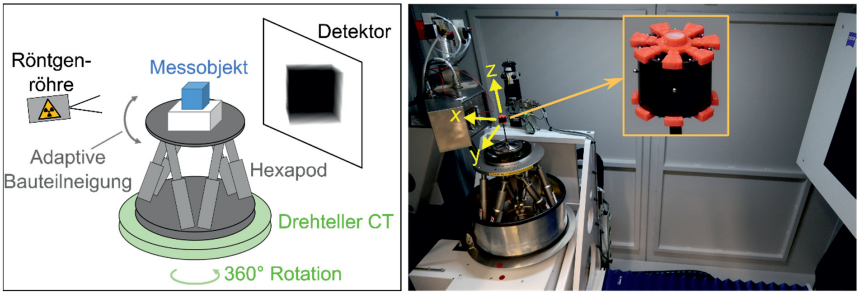


Bild 2: Anordnung des Hexapoden als zusätzliche Positioniereinheit auf dem Drehteller des Computertomographen zwischen Röntgenröhre und –detektor. Im rechten Bild ist der Mehrkugelprüfkörper zu sehen, welcher zur Kalibrierung der Scantrajektorien verwendet wird.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Um die zusätzliche Neigung des Messobjekts bei der Bauteilrekonstruktion korrekt berücksichtigen zu können, ist es notwendig, die Position und Orientierung (Pose bzw. Lage) des Hexapod-Koordinatensystems (oder eines mitbewegten Referenz-Koordinatensystems) im ortsfesten CT-Koordinatensystem für jede einzelne Röntgenbildaufnahme zu kennen. Da dies a priori nicht der Fall ist, ist eine Einmessung notwendig. Theoretisch sind hierfür vor allem zwei unterschiedliche Ansätze denkbar. Einerseits kann durch eine geeignete Einmessstrategie die Lage des initialen Hexapod-Koordinatensystems (ohne Kippwinkel, Drehtisch bei 0°) im Vorfeld bestimmt werden, um dann anschließend alle weiteren Posen des Scans rechnerisch aus der initialen Lage sowie der kombinierten Transformation aus Drehtischrotation und Hexapod-Neigung zu bestimmen. Andererseits kann durch ein kalibriertes Objekt mit röntgentechnisch detektierbaren Referenzmarken für jedes einzelne Röntgenbild des Scans die Lage des Koordinatensystems des Referenzobjekts bestimmt und für die notwendige Beschreibung der Durchstrahlungsgeometrie zur Objektrekonstruktion verwendet werden. Letztere Vorgehensweise wurde für die durchgeführten Untersuchungen angewendet und ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Neben der eigentlichen Bauteilmessung wird der identische Scan (identische Winkel $\varphi_{y,i}$, $\varphi_{z,i}$) mit einem kalibrierten Mehrkugelprüfkörper (siehe auch Foto in Bild 2) durchgeführt. In den Röntgenbildern dieses Scans werden die Mittelpunkte der projizierten Kugeln über Bildverarbeitungsmethoden detektiert. Zusammen mit den Kalibrierwerten für die Kugelkoordinaten in 3D lässt sich über einen Optimierungsansatz die Durchstrahlungsgeometrie in Form von 3x4-Projektionsmatrizen P_i, welche alle relevanten Geometrieparameter beinhalten (vgl. [7], Kapitel 6-7), bestimmen. Diese Projektionsmatrizen liefern die Abbildungsvorschrift

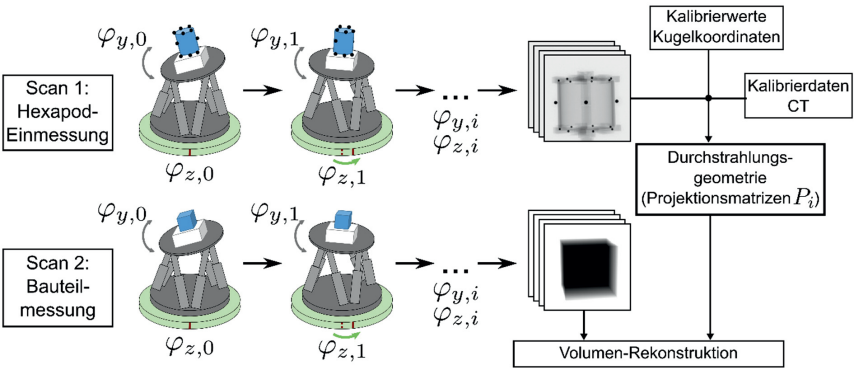


Bild 3: Verwendete Vorgehensweise zur Messung eines Bauteils mittels 3D-Scantrajektorie. Neben der eigentlichen Messung wird ein zusätzlich durchgeführter Einmess-Scan unter Verwendung der identischen Trajektorie verwendet.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

dafür, auf welche 2D-Detektorkoordinaten $(u, v)^T$ Punkte $(x, y, z)^T$ eines mitbewegten 3D-Koordinatensystems projiziert werden:

$$\begin{pmatrix} uw \\ vw \\ w \end{pmatrix} = P_i \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Durch die zusätzliche Verwendung der hinterlegten Kalibrierdaten des CT-Geräts (intrinsische Parameter wie z. B. Quelle-Detektor-Abstand) als Vorwissen reduzieren sich die zu optimierenden Parameter auf die Lageparameter des Kalibrierkörper-Koordinatensystems. Durch die auf diese Weise verringerte Anzahl an Freiheitsgraden lässt sich die Genauigkeit erhöhen. Der Röntgenbildstapel des eigentlichen Mess-Scans wird schlussendlich gemeinsam mit der Geometriebeschreibung der einzelnen Posen in einen iterativen Rekonstruktionsalgorithmus (hier SART-Algorithmus nach [8]) eingespeist um den resultierenden Volumendatensatz zu berechnen.

3. Positionierstabilität des Hexapoden

Während systematische Positionierabweichungen durch die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Methodik zur Einmessung der Scantrajektorie automatisch berücksichtigt werden und damit theoretisch keinen Einfluss auf die Messunsicherheit haben, ist eine ausreichende Wiederholgenauigkeit des Hexapoden eine Voraussetzung. Laut den Herstellerangaben von maximal $\pm 0{,}5\ \mu\mathrm{m}$ für die Position bzw. maximal $\pm 12\ \mu\mathrm{rad}$ für den Drehwinkel ist diese gegeben. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Reproduzierbarkeit über den kompletten Zeitraum von der Einmessung bis zur Bauteilmessung gegeben ist. Insbesondere nach einem Kaltstart kann diese Bedingung durch thermisch bedingte Ausdehnung nicht ausreichend erfüllt sein. Um dies genauer zu analysieren, wurde die in Bild 4 dargestellte Versuchsreihe durchgeführt, um eine mögliche Positionsdrift des Hexapod-Tisches zu ermitteln. An einem der Hexapod-Beine wurde ein Kontakttemperatursensor (Pt100, Genauigkeitsklasse F0,15 nach DIN EN 60751) über Wärmeleitklebeband befestigt. Über diesen wird die Temperatur über einen längeren Zeitverlauf gemessen. Während dieser Messung wird zu bestimmten Zeitpunkten der Hexapod bzw. der Controller zur Ansteuerung aus-/angeschaltet oder eine Referenzierung der Achsen durchgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass das Ziel der Temperaturmessung in der Extraktion eines beispielhaften charakteristischen Verlaufs bestand und nicht in der vollumfänglichen quantitativen Charakterisierung des thermischen Haushalts des gesamten Geräts, wofür ein höherer experimenteller Aufwand notwendig ist. Auf dem Hexapod ist eine, im oberen Bereich hohle, Kunststoffsäule (Material PEEK) befestigt, in deren Hohlraum eine Hartmetallkugel (94 % Wolframkarbid, 8 mm Durchmesser) eingepresst ist. Durch

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

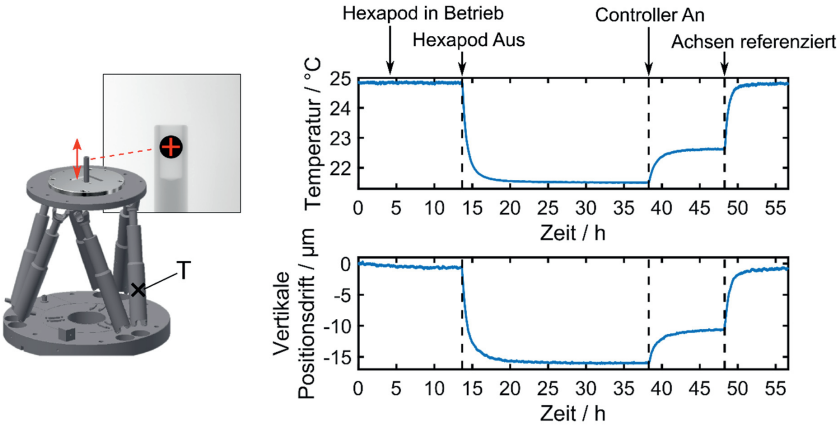


Bild 4: Messreihe zur Untersuchung des thermischen Einflusses der Hexapod-Antriebe nach dem Ein-/Ausschalten auf die vertikale Objektposition (errechnet aus der Position einer projizierten Kugel im Röntgenbild).

laufende Aufnahme von einzelnen Röntgenbildern während der Temperaturmessreihe (bei Stillstand aller mechanischer Achsen) kann über eine Nachverfolgung des projizierten Kugelmittelpunktes im Röntgenbild (Kantenerkennung nach Canny [9] und anschließender Ellipsenfit) eine laterale Bewegung $\vec{t}_{\mathrm{D}}$ im Bild detektiert werden. Über die Vergrößerung (hier $M = 8{,}59$) kann die entsprechende Verschiebung am Ort der Kugel t_{K} über

$$\vec{t}_{\mathrm{K}} = \frac{\vec{t}_{\mathrm{D}}}{M}$$

ermittelt werden

In Bild 4 ist lediglich die vertikale Komponente dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass diese entsprechend der Temperatur verläuft und eine maximale Drift von 16 µm aufweist. In den stationären Phasen hingegen wird die Position stabil gehalten, beispielsweise im Bereich der ersten 13,5 Stunden, in denen die vertikale Position um weniger als 1 µm variiert. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass die Messwerte durch die Genauigkeit der Kugelmittelpunktsbestimmung beschränkt sind und eine Drift auch durch die Komponenten des CT-Geräts verursacht sein kann.

Als Fazit kann gezogen werden, dass vor Verwendung des Hexapoden eine ausreichende Aufwärmphase eingehalten werden sollte (beispielsweise ca. 2 Stunden für eine vertikale Drift < 2 µm). Möglicherweise kann diese Aufwärmphase auch durch eine kontinuierliche Fahrbewegung des Hexapodtisches verkürzt werden, was jedoch auch zu einer insgesamt höheren

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Erwärmung führen könnte. Die Verwendung solcher initialer Fahrbewegungen wurde jedoch bisher nicht untersucht.

4. Messungen

Zur Demonstration potenzieller Vorteile einer 3D-Scantrajektorie wurden Scans einer speziellen Demonstrator-Messanordnung verwendet, die bereits an anderer Stelle [6] vorgestellt wurden und im Folgenden um die Analyse von geometrischen Messabweichungen erweitert werden.

In Bild 5 a) ist die Anordnung aus Messobjekt (Kunststoffbaustein, Lego) und Metall-Störkörper zu sehen. Letzterer verursacht bei einer gewöhnlichen Messung mit Kreistrajektorie bei bestimmten Scanwinkeln eine Verdeckung des Messobjekts mit Stahlkomponenten (siehe obere Projektionsbilderreihe in Bild 5 c). Bei alternierender Neigung um $\pm 15°$ kann dies vermieden werden (siehe untere Projektionsbilderreihe).

Für das vorliegende Messobjekt wurden Vergleichsmessungen mit Kreis- bzw. 3D-Trajektorie sowie mit und ohne Störkörper durchgeführt. Neben diesen Vergleichsmessungen wurde zusätzlich eine gewöhnliche CT-Messung mit höherer Qualität als Referenz durchgeführt (Gekippte Bauteilanordnung, Höhere Vergrößerung, kein Pixel-Binning, höhere Projektionszahl). Abweichungen für geometrische Maße werden im Folgenden gegenüber dieser Referenz angegeben. Als auszuwertende geometrische Merkmale werden die in Bild 6 eingezeichneten Längenmaße und Ebenheiten definiert. Die Oberflächenfindung sowie Auswertung der Maße erfolgte über die automatisierte Anwendung eines Prüfplans in der Software VGStudio Max 3.4 (Volume Graphics).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

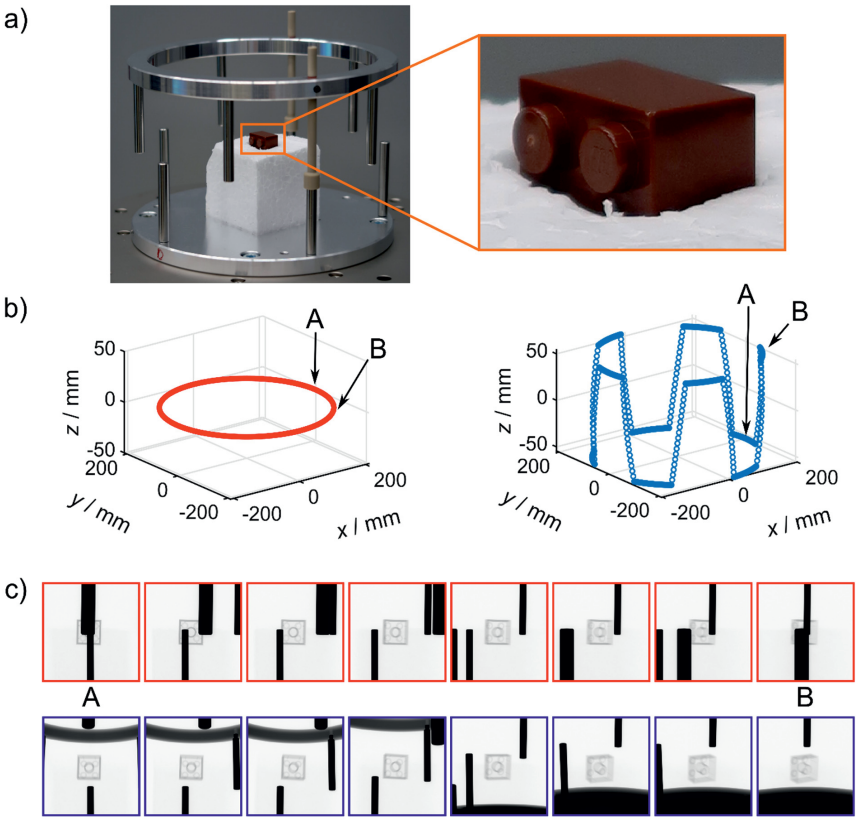


Bild 5: a) Demonstratoranordnung mit Metall-Störkörper und Kunststoff-Baustein als Messobjekt, b) untersuchte Scantrajektorien, c) daraus resultierende exemplarische Röntgenbilder bei der CT-Messung.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

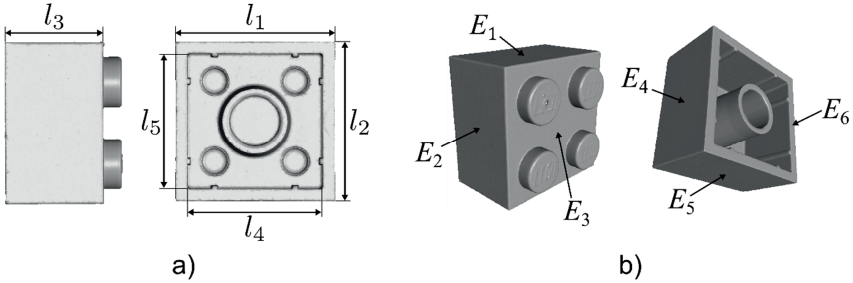


Bild 6: Ausgewertete Längenmaße (a) und Ebenheiten (b) für das Messobjekt (jeweils basierend auf angepassten Ebenen nach dem Assoziationskriterium kleinste Abweichungsquadrate).

5. Ergebnisse

Als qualitative Ergebnisse für die im vorherigen Abschnitt und in Bild 7 beschriebenen Vergleichsmessungen sind in Bild 7 Querschnitte durch die rekonstruierten Volumendatensätze zu sehen.

Während der Kreisscan sowohl mit FDK- als auch mit iterativem SART-Algorithmus rekonstruiert werden kann, kann für die 3D-Trajektorie algorithmenbedingt lediglich letzterer eingesetzt werden.

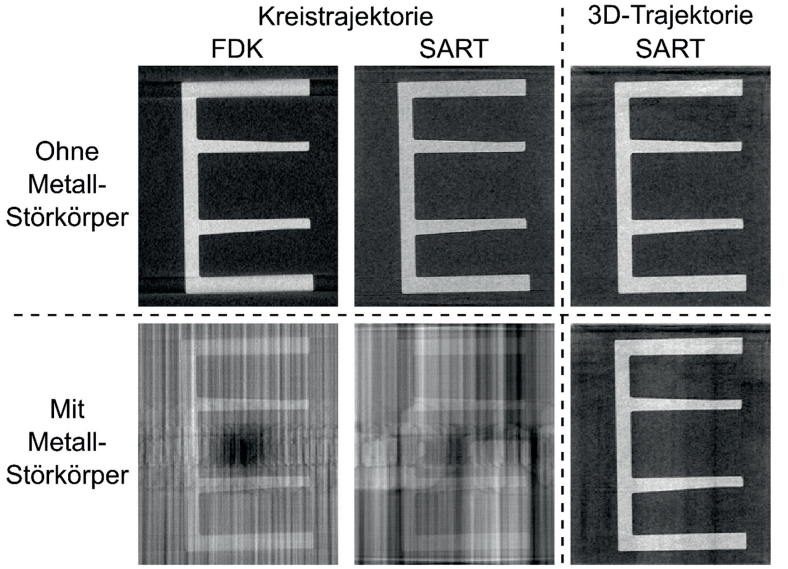


Bild 7: Schnitte durch die rekonstruierten Volumendatensätze.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bei den Messungen ohne Metall-Störkörper sind nur leichte Unterschiede erkennbar. Bei der FDK-Rekonstruktion sind Kegelstrahlartefakte an den oberen und unteren waagrechten Bauteilkanten zu erkennen, welche sich durch eine unscharfe Abbildung des Materialübergangs sowie waagrechte Streifen im Hintergrund bemerkbar machen. Der Kreisscan unter Verwendung des Metall-Störkörpers zeigt deutliche Messartefakte, die auch eine Oberflächenextraktion und damit geometrische Messungen unmöglich machen. Dadurch, dass bei der 3D-Trajektorie für die Röntgenbilder eine Verdeckung des Bauteils durch metallische Komponenten vermieden wird, ist eine Rekonstruktion des Bauteils trotz Störkörper möglich.

In Bild 8 sind quantitative Ergebnisse für die Abweichungen der geometrischen Messungen zu sehen. In den Diagrammen sind dabei nur diejenigen Datensätze aus Bild 7 enthalten, für die auch eine geometrische Auswertung nach automatischer Oberflächenextraktion möglich war. Im Falle der Ebenheiten sind für die Kreistrajektorie und FDK-Rekonstruktion die größten Abweichungen erkennbar. Dies liegt vor allem an den bereits erwähnten Kegelstrahlartefakten. Diese haben Einfluss auf die Ebenheiten E_1 und E_5 (vergleiche Bild 6), welche Ebenen zugeordnet sind, die bei der Messung annähernd waagrecht positioniert waren. Während der Einfluss von Kegelstrahlartefakten beim Kreisscan mit SART-Rekonstruktion vorhanden, aber deutlich schwächer ausgeprägt ist, zeigen die Rekonstruktionen der 3D-Trajektorie, bei welcher die initial waagrecht liegenden Flächen durch die Neigung für bestimmte Scanwinkel scharf abgebildet werden können, die geringsten Abweichungen bezüglich der Ebenheiten.

Im Falle der ausgewerteten Längenmaße sind durchgehend negative Abweichungen zur Referenz sichtbar. Im Mittel ergibt sich für die 3D-Trajektorie eine betragsmäßig um ca. 2,5 µm höhere Abweichung. Die Signifikanz des Unterschieds ist jedoch aufgrund fehlender Wiederholmessungen schwer zu beurteilen. Als weiteres Ergebnis kann festgehalten werden, dass

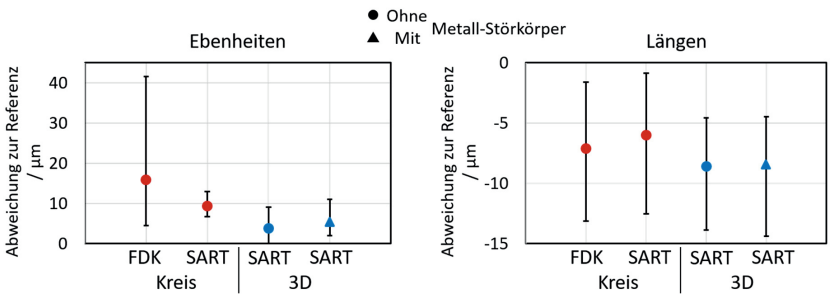


Bild 8: Messergebnisse für die unterschiedlichen Szenarien aus Bild 6. Eingezeichnet sind die Mittelwerte sowie die Spannweite als vertikale Balken.

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

die Differenzen für die Einzelmaße zwischen 3D-Trajektorie mit und ohne Metall-Störkörper betragsmäßig kleiner als 0,5 µm sind.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde dargelegt, wie durch eine zusätzliche Bauteilneigung mittels eines Hexapoden prinzipiell Verbesserungen für geometrische CT-Messungen erreicht werden können. Verbesserungen sind hierbei vor allem dann zu erwarten, wenn sich bei reiner 360°-Rotation des Messobjekts waagrecht liegende Oberflächen oder eine Verdeckung durch stark absorbierende Komponenten nicht vermeiden lassen. Voraussetzung für die vorgestellte Methodik sind neben der Kenntnis günstiger/ungünstiger Neigungswinkel eine präzise Kenntnis der durch die Bauteilneigung veränderten Durchstrahlungsgeometrie. Hierfür wurde eine Methode zur Einmessung der Scantrajektorie basierend auf einem kalibrierten Mehrkugelprüfkörper vorgestellt. Weiterhin wurden Untersuchungen zur Positionierstabilität des Hexapoden angestellt. Hierbei zeigte sich, dass insbesondere die Aufwärmphase nach Inbetriebnahme des Geräts beachtet werden muss.

Vergleichsmessungen einer Demonstrator-Messanordnung zeigten, dass für diesen speziellen Fall bei Vorliegen von metallischen Störkörpern das Messobjekt nur über die Anwendung einer 3D-Scantrajektorie gemessen werden kann. Im Vergleich zur Kreistrajektorien-Messung ohne Störkörper ergaben sich – vor allem durch die Vermeidung von Kegelstrahlartefakten – verringerte Formabweichungen, während die Abweichungen für Längenmaße in derselben Größenordnung lagen, jedoch mit einer leichten Tendenz zur einer Verschlechterung.

Bei Betrachtung der Ergebnisse und unter Einbezug bereits veröffentlichter dimensioneller Messergebnisse für weitere Prüfkörper kann festgehalten werden, dass die Verwendung eines geeigneten Hexapoden als zusätzliche Positioniereinheit bei entsprechender Trajektorieneinmessung und unter Beachtung stabiler Randbedingungen keine signifikante Erhöhung von Messabweichungen mit sich bringt. Vorteile für anwendungsnahe Bauteile sind vor allem bei komplexen Multimaterial-Baugruppen zu erwarten.

[1] S. Carmignato, W. Dewulf, R. Leach, “Industrial X-ray computed tomography”, 2018, *Springer International Publishing*.

[2] L. A. Feldkamp, L. C. Davis, and J. W. Kress, “Practical cone-beam algorithm”, *JOSA A*, vol. 1, no. 6, pp. 612–619, 1984.

[3] P. Klein and F. Herold, “Automatic object position recognition: Increasing the position-accuracy in robot-CT”, in *6th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria (iCT 2016)*.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[4] C. Vienne and M. Costin, “Adapted acquisition trajectory and iterative reconstruction for few-views CT inspection”, in *8th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria (iCT 2018)*.

[5] W. Holub, F. Brunner, and T. Schön, “RoboCT Application for in-situ Inspection of Join Technologies of large scale Objects”, in *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography - DIR2019*.

[6] L. Butzhammer and T. Hausotte, “Complex 3D scan trajectories for industrial cone-beam computed tomography using a hexapod”, *Measurement Science and Technology*, vol. 32, no. 10, p. 105402, 2021.

[7] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed. USA: Cambridge University Press, 2003.

[8] A. H. Andersen and A. C. Kak, “Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): A superior implementation of the art algorithm”, *Ultrasonic Imaging*, vol. 6, no. 1, pp. 81–94, 1984.

[9] J. Canny, “A Computational Approach to Edge Detection”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698, 1986.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Self-X Sensorsysteme:
Robuste Informationspräsentation und -verarbeitung in adaptiver Architektur

Self-X Sensory Systems:
Robust Information Representation and Processing in Adaptive Architecture

Prof. Dr.-Ing. **Andreas König**, Lehrstuhl Kognitive Integrierte Sensorsysteme, Technische Universität Kaiserslautern

Kurzfassung

Die ungebrochen stürmische Entwicklung der Sensor- und Integrationstechnologien erlaubt die Realisierung von immer komplexeren und mächtigeren intelligenten integrierten Systemen [1] [2] [3]. Die Industrie 4.0 und verwandte Anwendungsgebiete erfordern neben intelligenter Funktionalität einen signifikanten Zuwachs an Flexibilität, Zuverlässigkeit, Robustheit und Anpassungsfähigkeit entsprechender Systemlösungen [4], wie Sie von Lebewesen als Vorbild technischer Systeme geboten werden [5]. Gleichzeitig wird es mit modernen Technologien immer schwieriger Elektronikrealisierung mit Amplitudenrepräsentation der Information zu realisieren. Dies impliziert wachsende und neue Herausforderungen vom automatisierten Entwurf intelligenter Systeme der Mess- und Sensortechnik, z.B. zur intelligenten Zustandsüberwachung, bis hin zu Self-X- oder Self-*-Eigenschaften [5] [6] verbunden mit Laufzeitadaptivität und robuster Zeit- bzw. Spike-basierter Informationspräsentation [7] [8] , wie Sie in neuronalen Zellen und Systemen und aktuelleren technischen Abbildern [9] [10] [11] [12] anzutreffen ist. Der Vortrag gibt eine Übersicht über das Feld der Self-X-Aktivitäten und zugehörigen Entwurfsweisen aus dem Blickwinkel der Mess- und Sensortechnik, z.B. hybride vs. neuronale *Deep-Learning* Ansätze zum Entwurf intelligenter Systeme [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] und Anomaliedetektionsmethoden und künstliche Immunsysteme als Inspiration für die Laufzeitadaptivität und -korrekturfähigkeit einzelner Systeminstanzen [20] [21] [22] [23] [24]. Der Übergang von Amplituden- zu Zeit- oder Frequenzrepräsentation in Sensorik [25] [26] und Elektronik ergänzt den Ansatz um das notwendige Maß an Robustheit. Im Schwerpunkt stellt der Vortrag die Erweiterung einer Self-X-Hierarchie auf die physikalische Ebene der Sensoren und der gemischt analog/digitalen, spikenden [7] [8] und adaptiven Sensorelektronik dar [27] [28] [29] [30], die perspektivisch als Neuronale-Analoge-*Front-*

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ends (NAFE) für konventionelle digitale oder aktuelle neuronale Rechen- und Infomationsverarbeitungsysteme [9] [10] [11] [12] dienen können.

Abstract

Increasingly complex and powerful intelligent integrated systems can be realized by the surging advance in sensor and electronics technology [1] [2] [3]. Industry 4.0 and related application domains urgently demand in addition to intelligent functionality for significant increase of flexibility, dependability, robustness, and adaptation capability of system solutions [4], inspired by the findings in natural beings [5]. At the same time it is become increasingly difficult to conceive electronics realizations in leading-edge technologies with amplitude-based representation of information. This gives rise to growing and novel design challenges from automated design of intelligent measurement and sensor systems, e.g., for intelligent condition monitoring systems, to Self-X- or Self-*-capabilities [5] [6] with run-time adaptation and robust time- or spike-based information representation [7] [8], as met in neural cells and systems and their contemporary technical models, e.g. [9] [10] [11] [12]. The presentation surveys the field of Self-X activities and related design approaches, e.g., hybrid vs. neural deep-learning intelligent system design from the perspective of sensor and measurement technology, e.g., hybrid vs. neural deep-learning intelligent system design, [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] and anomaly detection methods and artificial immune systems as inspiration for the run-time adaptation and correction capability of individual system instances [20] [21] [22] [23] [24]. The transition from amplitude to time or frequency representation in sensors [25] [26] and electronics complements the approach with additional required robustness. The talk focuses on extending the Self-X-hierarchy to the physical level of the sensors and the mixed-signal, spiking [7] [8] and adaptive sensor electronics [27] [28] [29] [30], which in perspective can serve as Neural-Analog-*Front-Ends* (NAFE) for conventional digital or contemporary neural computing systems [9] [10] [11] [12] .

References

[1] IEEE (**2021**). *International Roadmap for Devices and Systems - More than Moore*.

[2] IEEE (**2021**). *International Roadmap for Devices and Systems - More Moore*.

[3] Werthschützky, R. (**2018**). *Sensor Technologien 2022*, *AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.*

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[4] Kagermann, H.; Lukas, W. and Wahlster, W. (**2011**). *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*, .

[5] **Brooks, S. and Roy, R.** (**2021**). *An overview of self-engineering systems*, Journal of Engineering Design 32 : 397-447.

[6] Sapozhnikova, K.; Baksheeva, I. and Taymanov, R. (**2020**). *Features and experience of metrological self-check organisation in multichannel measuring system*, : 1-5.

[7] Schrauwen, B. and Van Campenhout, J. (**2003**). *BSA, a fast and accurate spike train encoding scheme*, 4 : 2825-2830 vol.4.

[8] **Petro, B.; Kasabov, N. and Kiss, R. M.** (**2020**). *Selection and Optimization of Temporal Spike Encoding Methods for Spiking Neural Networks*, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems 31 : 358-370.

[9] **Davies, M.; Srinivasa, N.; Lin, T.; Chinya, G.; Cao, Y.; Choday, S. H.; Dimou, G.; Joshi, P.; Imam, N.; Jain, S.; Liao, Y.; Lin, C.; Lines, A.; Liu, R.; Mathaikutty, D.; McCoy, S.; Paul, A.; Tse, J.; Venkataramanan, G.; Weng, Y.; Wild, A.; Yang, Y. and Wang, H.** (**2018**). *Loihi: A Neuromorphic Manycore Processor with On-Chip Learning*, IEEE Micro 38 : 82-99.

[10] **DeBole, M. V.; Taba, B.; Amir, A.; Akopyan, F.; Andreopoulos, A.; Risk, W. P.; Kusnitz, J.; Ortega Otero, C.; Nayak, T. K.; Appuswamy, R.; Carlson, P. J.; Cassidy, A. S.; Datta, P.; Esser, S. K.; Garreau, G. J.; Holland, K. L.; Lekuch, S.; Mastro, M.; McKinstry, J.; di Nolfo, C.; Paulovicks, B.; Sawada, J.; Schleupen, K.; Shaw, B. G.; Klamo, J. L.; Flickner, M. D.; Arthur, J. V. and Modha, D. S.** (**2019**). *TrueNorth: Accelerating From Zero to 64 Million Neurons in 10 Years*, Computer 52 : 20-29.

[11] BrainChip (**2021**). *Akida Neural Processor IP*, .

[12] **Moore, S. K.** (**2021**). *Supersize AI: Cerebra's silicon-wafer-size chip boasts 2.6 trillion transistors]*, IEEE Spectrum 58 : 12-13.

[13] **König, A.; Eberhardt, M. and Wenzel, R.** (**1999**). *QuickCog Self-Learning Recognition System -- Exploiting machine learning techniques for transparent and fast industrial recognition system design*, Image Processing Europe : 10-19.

[14] **K. Thongpull, D. Groben. and König, A.** (**2015**). *A Design Automation Approach for Task-Specific Intelligent Multi-Sensory Systems - Lab-on-Spoon in Food Application*, tm - Technisches Messen 82 : 196-208.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[15] **Thongpull, K. and König, A.** (**2016**). *Advance and case studies of the DAICOX framework for automated design of multi-sensor intelligent measurement systems*, tm - Technisches Messen 83 : 234-243.

[16] Peters, S. and König, A. (**2007**). . In: (Ed.), *Evolutionäre Optimierung zum automatisierten Entwurf von Bildverarbeitungssystemen*, FhG IIS.

[17] **Eberhardt, M.; Roth, S. and König, A.** (**2008**). *Industrial Application of Machine-In-the-Loop-Learning for a Medical Robot Vision System - Concept and Comprehensive Field Study*, Computers and Electrical Engineering (CEE) 34 : 111-126.

[18] **Iswandy, K. and König, A.** (**2009**). *Methodology, Algorithms, and Emerging Tool for Automated Design of Intelligent Integrated Multi-Sensor Systems*, Journal Algorithms (Open Access) 8 : 1-15.

[19] **Zhang, W.; Peng, G.; Li, C.; Chen, Y. and Zhang, Z.** (**2017**). *A New Deep Learning Model for Fault Diagnosis with Good Anti-Noise and Domain Adaptation Ability on Raw Vibration Signals*, Sensors 17.

[20] **Okamoto, T. and Ishida, Y.** (**2009**). *An Immunity-Based Anomaly Detection System with Sensor Agents*, Sensors 9 : 9175-9195.

[21] **Tokumitsu, M.; Hasegawa, K. and Ishida, Y.** (**2016**). *Resilient Sensor Networks with Spatiotemporal Interpolation of Missing Sensors: An Example of Space Weather Forecasting by Multiple Satellites*, Sensors 16.

[22] Alizadeh, E.; Meskin, N. and Khorasani, K. (**2016**). *A sensor fault detection and isolation strategy by using a Dendritic Cell Algorithm*, : 001171-001177.

[23] Zuccolotto, M. (**2014**). *Artificial Immune Intelligent Maintenance System*, : 795-798.

[24] Lu Hong (**2008**). *Artificial Immune System for Anomaly Detection*, : 340-343.

[25] Yurish, S. Y. (Ed.), **2019**. *Proceedings of the 1rst IFSA Frequency & Time Conference (IFTC' 2019), Adeje, Canary Islands (Tenerife), Spain*. IFSA Publishing, .

[26] **Döge, J.; Schonfelder, G.; Streil, G. T. and König, A.** (**2002**). *An HDR CMOS image sensor with spiking pixels, pixel-level ADC, and linear characteristics*, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing 49 : 155-158.

[27] Tawdross, P. and König, A. (**2007**). *Mixtrinsic Multi-Objective Reconfiguration of Evolvable Sensor Electronics*, : 51-57.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[28] **Kammara, A. and König, A.** (**2016**). *SSDCα - Inherently robust integrated biomimetic sensor-to-spike-to-digital converter based on peripheral neural ensembles*, tm - Technisches Messen 83 : 531 - 542.

[29] Kammara, A. and König, A. (**2017**). *Robust & Technology Agnostic Integrated Implementation of Future Sensory Electronics based on Spiking Information Processing for Industry 4.0*, : 177-182.

[30] **Abd, H. and König, A.** (**2021**). *Adaptive Spiking Sensor Electronics Inspired by Biological Nervous System Based on Memristor Emulator for Industry 4.0 Applications*, Sensor and Measurement SMSI Science International (SMSI) .

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Erfahrungen in der Anwendung von Messunsicherheitsbudgets in akkreditierten Werkstoffprüflaboren entsprechend DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Dipl.-Ing. **Stefan Wieler**, QUAISO GmbH, Marl;
Prof. Dr.-Ing. **Holger Frenz**, Westfälische Hochschule, Recklinghausen

Kurzfassung

Entsprechend DIN EN ISO/IEC 17025 „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“ sind sowohl akkreditierte als auch nicht akkreditierte Werkstoffprüflabore gefordert, die Messunsicherheit zu ermitteln und die angewandte Entscheidungsregel im Rahmen von Konformitätsaussagen zu berichten. Die meisten harmonisierten Prüfnormen der mechanisch-technologischen Werkstoffprüfung enthalten informative Modelle, die zur Aufstellung eines Messunsicherheitsbudgets genutzt werden können. In häufiger Praxis werden Prüfungen jedoch beauftragt, ohne dass es eine kundenseitige Vorgabe der anzuwendenden Entscheidungsregel gibt, wie die Messunsicherheit bei der Konformitätsbewertung berücksichtigt werden soll. Ebenso beinhalten viele Produkt- und Prüfnormen keine oder keine angemessene Entscheidungsregel, die zur Bewertung der Spezifikationen berücksichtigt werden kann, um das Risiko einer falschen Konformitätsaussage zu bewerten bzw. zu reduzieren. An dieser Stelle ist also das Prüflabor angehalten, eigenständig eine fachlich angemessene Entscheidungsregel festzulegen und diese dem Auftraggeber mitzuteilen. Im folgenden Beitrag wird anhand eines praktischen Beispiels zur Messunsicherheit in der Härteprüfung an Metallen ein Lösungsansatz aufgezeigt, wie eine pragmatische Entscheidungsregel in den Prüfalltag integriert werden kann. Dazu wird entsprechend des Leitfadens JCGM 106:2012 „Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment“ die statistische Konformitätswahrscheinlichkeit in Betracht gezogen und das damit verbundene Risiko abgeleitet.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Anforderung zur Ermittlung der Messunsicherheit für Werkstoffprüflabore

Prüflabore im Bereich der mechanisch-technologischen Werkstoffprüfung sind seit vielen Jahren gefordert, sich mit der Messunsicherheit ihrer Messwerte auseinandersetzen. Zusätzlich beinhaltet DIN EN ISO/IEC 17025 „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“ [1] weitere Anforderungen zur Ermittlung der Messunsicherheit und deren Anwendung. Somit müssen Prüflabore entsprechende Verfahren und Nachweise zur Ermittlung und Berücksichtigung der Messunsicherheit unter anderem in Konformitätsaussagen bereithalten. Die Norm stellt als international harmonisiertes Regelwerk den Stand der Technik dar und die Anforderungen sind somit auch für nicht akkreditierte Labore relevant. Die Umsetzung stellt Prüflabore jedoch vor eine signifikante Herausforderung und mitunter werden die Informationen aus den Prüfnormen zur Anwendung von Messunsicherheitsbudgets gegensätzlich interpretiert. Im Folgenden werden diese normativen Vorgaben detailliert dargestellt und Lösungsansätze an einem Beispiel aus der Praxis aufgezeigt.

2. Vorgaben zu Konformitätsbewertungen aus den Prüfnormen

Prüflabore, die normativ geregelte Prüfverfahren in der mechanisch-technologische Werkstoffprüfung anwenden, können den meisten Normen harmonisierte Modelle zur Aufstellung eines Messunsicherheitsbudgets entnehmen. Diese befinden sich in der Regel in den informativen Anhängen einer Norm zusammen mit entsprechenden Beispielrechnungen und Vorgaben, wie Ergebnisse inklusive der Messunsicherheit berichtet werden. Ferner beinhalten viele Normen einen Passus, dass die ermittelten Unsicherheitsbeträge nur informativ anzusehen sind und diese im Rahmen von Konformitätsbewertungen nicht mit den Messwerten kombiniert werden dürfen, um die Übereinstimmung von Produktspezifikationen zu beurteilen. Der ausschließlich informative Charakter der Messunsicherheit wird in diesen Regelwerken explizit betont.

3. Vorgaben zu Konformitätsbewertungen aus DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Mit der Veröffentlichung der revidierten DIN EN ISO/IEC 17025 im Jahr 2018 kam dem risikobasierten Ansatz und der Anwendung der Messunsicherheitsbestimmung weitere Bedeutung zu. Wurde in der Vorgängerversion aus dem Jahr 2005 noch von der „Schätzung der Messunsicherheit“ gesprochen, so lautet die aktuelle Anforderung „Laboratorien müssen die Beiträge zur Messunsicherheit ermitteln“. Das Thema Messunsicherheit ist nun an allen relevanten Punkten der prozessorientierten Normstruktur berücksichtigt, von der Auswahl einer geeigneten Mess- und Prüfeinrichtung bis zum Ergebnisbericht.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bild 1: Kapitel der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 mit Bezug zur Messunsicherheit

In Abbildung 1 ist eine Übersicht dargestellt, in welchen Kapiteln der DIN EN ISO/IEC 17025 konkrete Anforderungen zur Berücksichtigung der Messunsicherheit an die Laboratorien gestellt werden. So hat ein Labor bereits vor der Labortätigkeit zu entscheiden, ob das Prüfverfahren und die Entscheidungsregel eine Aussage zur Konformitätswahrscheinlichkeit ermöglichen. DIN EN ISO/IEC 17025 fordert Labore in Kapitel 7.1 „Prüfung von Anfragen, Angeboten und Verträgen“ auf, dass bereits im Vorfeld die anzuwendende Entscheidungsregel festgelegt und mit dem Kunden vereinbart werden muss. Ebenso muss die Messunsicherheit der Ergebnisse in Prüfberichten angegeben werden, wenn diese:

- für die Gültigkeit oder Anwendung der Prüfergebnisse von Bedeutung ist,
- vom Kunden verlangt wurde oder
- die Einhaltung von vorgegebenen Grenzen in Frage stellt.

Insbesondere der dritte Aspekt steht nun in einem Widerspruch zu den Vorgaben aus den angewandten Prüfnormen, wie diese im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurden. Ferner müssen Labore entsprechend DIN EN ISO/IEC 17025 im Rahmen von Konformitätsaussagen die jeweils angewandte Entscheidungsregel berichten, also die Regel, die beschreibt, wie die Messunsicherheit in der Bewertung der Prüfergebnisse hinsichtlich der Einhaltung festgelegter Grenzen berücksichtigt wurde.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Umsetzung der Anforderungen durch (akkreditierte) Prüflabore

Der Ansatz, sich allein auf das „Verbot“ der Prüfnorm zu berufen und aus diesem Grund die Messunsicherheit nicht im Rahmen von Konformitätsaussagen zu berücksichtigen, stellt einen vermeintlich einfachen Weg für Prüflabore dar. Die konkrete Anforderung aus DIN EN ISO/IEC 17025 würde somit umgangen und nicht erfüllt. Dementsprechend findet dieses Vorgehen keine Anerkennung in Akkreditierungsverfahren und lässt keine risikobasierte Entscheidungsfindung des Labors erkennen. Grundlegend ist jeder Messwert mit einer Messunsicherheit verbunden. Ein Messergebnis ist immer nur ein „Schätzer“ für den wahren Wert, der basierend auf einer Messung nie genau bekannt wird. Daher besteht bei jeder Entscheidung auf der Grundlage von Messwerten das Risiko einer falschen Annahme, bedingt durch die Messunsicherheit. Der Umgang mit diesem Risiko ist eine Kompetenzanforderung an alle Prüflaboratorien. Die Quantifizierung des Risikos und praktikable Maßnahmen, um dieses Risiko zu reduzieren, werden im folgenden Beispiel dargestellt. Dazu wird entsprechend des Leitfadens JCGM 106:2012 „Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment“ [2] die statistische Konformitätswahrscheinlichkeit in Betracht gezogen.

Es lassen sich grundlegend fünf mögliche Situationen darstellen, wie ein Messwert und seine erweiterte Messunsicherheit hinsichtlich einer Spezifikationsgrenze liegen können. Diese Möglichkeiten sind in Tabelle 1 zusammengefasst und in den Abbildungen 2 und 3 schematisch dargestellt.

Tabelle 1: Fünf Möglichkeit (A – E) der Lage eines Messergebnisses

A	Der Messwert und die erweiterte Messunsicherheit liegen außerhalb des Spezifikationsbereichs. Es gibt kein Überdeckungsintervall mit dem Spezifikationsbereich.
B	Der Messwert liegt außerhalb des Spezifikationsbereichs. Es gibt teilweise ein Überdeckungsintervall der Messunsicherheit mit dem Spezifikationsbereich.
C	Der Messwert liegt auf der Spezifikationsgrenze. Das Überdeckungsintervall der Messunsicherheit mit dem Spezifikationsbereich liegt bei ca. 50%.
D	Der Messwert liegt innerhalb des Spezifikationsbereichs. Es gibt jedoch teilweise ein Überdeckungsintervall der Messunsicherheit außerhalb des Spezifikationsbereichs.
E	Der Messwert und die erweiterte Messunsicherheit liegen im Spezifikationsbereich. Es gibt kein Überdeckungsintervall der Messunsicherheit außerhalb des Spezifikationsbereichs.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In den Abbildungen 2 und 3 sind beispielhafte Ergebnisse inkl. Messunsicherheit bezüglich ihrer Lage zum Spezifikationsbereich schematisch dargestellt. Der Nichtabnahmebereich wird durch die entsprechende(n) Toleranzgrenze(n) festgelegt.

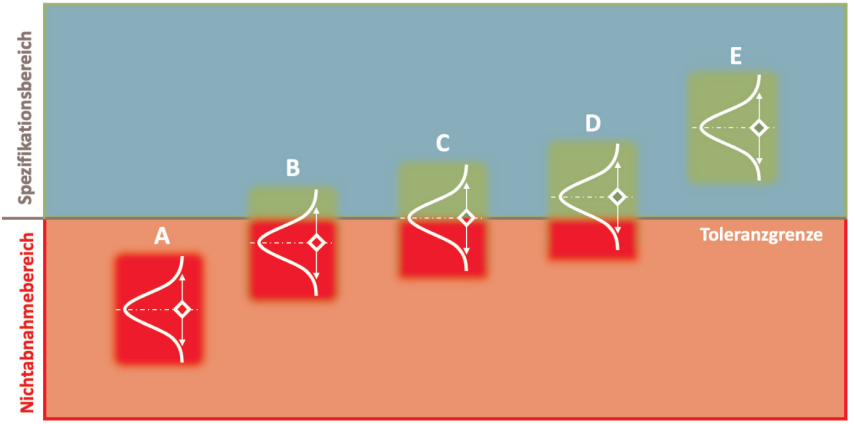


Bild 2: Spezifikation besteht aus einer unteren Toleranzgrenze

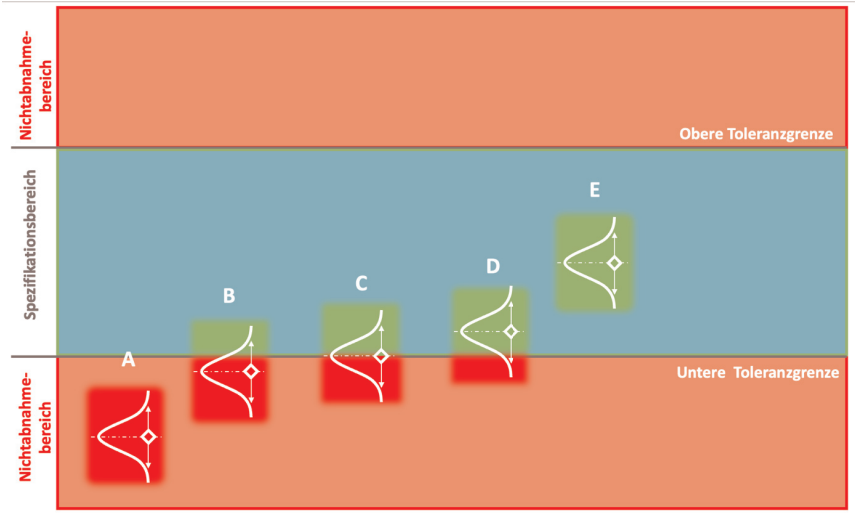


Bild 3: Spezifikation besteht aus einer unteren und einer oberen Toleranzgrenze

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Entsprechend der Darstellungen sind die Situationen A und E eindeutig hinsichtlich des Risikos einer falschen Annahme im Rahmen von Konformitätsaussagen zu bewerten. Die Notwendigkeit einer angemessenen Entscheidungsregel wird für die Situationen B, C und D deutlich. Da C und D jeweils ein Überdeckungsintervall der Messunsicherheit außerhalb der Toleranzgrenze aufweisen, besteht hier das Risiko der positiven Konformitätsaussage für eine nicht konforme Probe. JCGM 106 bezeichnet dieses Risiko als „consumer's risk". Die Situation B hingegen birgt das so genannte „producer's risk", da durch das Überdeckungsintervall der Unsicherheit mit dem Akzeptanzbereich ggf. eine konforme Probe als nichtkonform bewertet werden könnte. Um nun eine angemessene Entscheidung hinsichtlich der drei Möglichkeiten im Rahmen von Konformitätsaussagen zu treffen, muss eine konkrete Entscheidungsregel formuliert werden. Dabei sind die Wahrscheinlichkeit und das damit verbundene Risiko einer falschen Annahme zu berücksichtigen. In Abbildung 4 sind drei Haupteinflussgrößen zusammengefasst, die bei der Festlegung der Entscheidungsregel durch das Laboratorium berücksichtigt werden sollten.

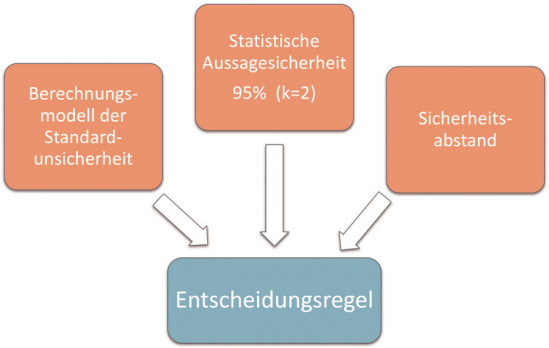


Bild 4: Einflussgrößen auf die Entscheidungsregel

5. Praxisbeispiel aus der Werkstoffprüfung

Anhand der Haupteinflussgrößen (Berechnungsmodell der Standardunsicherheit, Statistische Aussagesicherheit und Sicherheitsabstand) soll im folgenden Praxisbeispiel aus der mechanisch-technologischen Werkstoffprüfung die Entwicklung einer angemessenen Entscheidungsregel und Konformitätsaussagen dargestellt werden. Die Härteprüfung nach Rockwell findet als klassisches Härteprüfverfahren breite Anwendung in Werkstoffprüflaboren und die normative Grundlage DIN EN ISO 6508-1 [3] bietet Prüflaboren pragmatische Modelle zur Aufstellung eines Messunsicherheitsbudgets. Im folgenden Beispiel wird die Ausgangssituation entsprechend Tabelle 1 angenommen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 1: Prüfergebnis nach DIN EN ISO 6508-1 HRC und Spezifikationsvorgabe

Allgemeine Spezifikationsanforderung nach Kundenvorgabe	45,0 ± 2,0 HRC
Ergebnis der Prüfung einer Probe, basierend auf fünf Einzelmesswerten $\bar{X}$	44,0 HRC

5.1 Standardunsicherheit nach DIN EN ISO 6508-1:2016-12

Der informative, nationale Anhang NA aus DIN EN ISO 6508-1 bietet ein pragmatisches Modell zur Bestimmung der Messunsicherheit eines Prüfergebnisses. In die Ermittlung gehen zwei Haupteinflussgrößen ein. Zum einen die Messunsicherheit aus der indirekten Überprüfung der Härteprüfmaschine u_{HTM} und zum anderen die Unsicherheit resultierend aus der Streuung der Messwerte der geprüften Probe u_X.

5.1.1 Messunsicherheit der indirekten Überprüfung der Härteprüfmaschine

Prüflaboratorien sind nach DIN EN ISO 6508-1 gefordert, die Prüfmaschine mit einem zertifizierten Referenzmaterial in Form einer nach DIN EN ISO 6508-3 [4] kalibrierten Härtevergleichsplatte zu überprüfen, um die Leistungsfähigkeit der Prüfeinrichtung festzustellen. Die aus der Streuung der Messwerte bei der Prüfung der Härtevergleichsplatte resultierende Unsicherheitskomponente u_H geht zusammen mit der Unsicherheit des Referenzwertes u_{CRM} und einer weiteren Unsicherheitskomponente u_{ms}, bedingt durch die Auflösung der Messeinrichtung, nach dem Prinzip der Fehlerfortpflanzung in die Berechnung ein. Somit ergibt sich zur Berechnung der kombinierten Messunsicherheit der indirekten Überprüfung der Härteprüfmaschine u_{HTM} die folgende Formel:

$$u_{HTM} = \sqrt{u_H^2 + u_{CRM}^2 + u_{ms}^2} \qquad (1)$$

mit

$$u_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2 \times \sqrt{3}} \qquad (2)$$

Tabelle 2 fasst die Einflussgrößen und die daraus resultierende Messunsicherheit der Härteprüfmaschine u_{HTM} für dieses Beispiel zusammen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 2: Ermittlung der Messunsicherheit der Prüfmaschine u_{HTM}

Parameter	**HRC**
Zertifizierte Härte der Härtevergleichsplatte H_{CRM}	45,5 HRC
Unsicherheit des Referenzwertes u_{CRM} (k=1)	0,20 HRC
Berechnete Unsicherheit aus der Auflösung der Prüfeinrichtung u_{ms}	0,03 HRC
Mittelwert aus der Prüfung der Härtevergleichsplatte (n=5) $\overline{H}$	45,0 HRC
Standardabweichung aus der Prüfung der Härtevergleichsplatte s_H	0,69 HRC
Unsicherheit aus der Prüfung der Härtevergleichsplatte u_H	0,35HRC
Kombinierte Unsicherheit der Härteprüfmaschine u_{HTM} (k=1)	0,40 HRC

Somit beträgt die kombinierte Messunsicherheit der Härteprüfmaschine aus der indirekten Überprüfung u_{HTM}= ± 0,40 HRC mit einer Aussagesicherheit von 68% (k =1). Die Unsicherheit aus der Prüfung der eigentlichen Probe ist an dieser Stelle noch nicht berücksichtigt. Die Größe u_{HTM} kann als Indikator für die Leistungsfähigkeit der Prüfmaschine am Tag der Prüfung angesehen werden.

5.1.2 Messunsicherheit des Prüfergebnisses

Die Streuung der fünf Einzelmesswerte aus der Prüfung des Probenmaterials können als Indikator für die Homogenität des Probenmaterials angenommen werden. Es ist gängige Praxis, diese Unsicherheitskomponente aus der Prüfung der Probe u_X in die Gesamtunsicherheit u einzurechnen. Eine entsprechende Berechnung ist in DIN EN ISO 6508-1 mittels der folgenden Formel aufgeführt:

$$u = \sqrt{u_{HTM}^2 + u_X^2} \qquad (3)$$

Tabelle 3 fasst die Einflussgrößen und die daraus resultierende Messunsicherheit des Prüfergebnisses u unter Berücksichtigung der Inhomogenität der Probe zusammen.

Tabelle 3: Ermittlung der Messunsicherheit des Prüfergebnisses u

Parameter	**HRC**
Kombinierte Unsicherheit der Härteprüfmaschine u_{HTM}	0,40
Mittelwert aus der Prüfung der Probe (n=5) $\bar{X}$	44,0
Standardabweichung aus der Prüfung der Probe s_X	0,87
Unsicherheit aus der Prüfung der Probe u_X	0,45
Kombinierte Messunsicherheit des Prüfergebnisses u (k=1)	0,60

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Somit beträgt die kombinierte Unsicherheit des Prüfergebnisses unter Berücksichtigung der Inhomogenität des Probenmaterials u= ± 0,60 HRC mit einer Aussagesicherheit von 68% (k =1). Es ist zu erwarten, dass 68 von 100 Einzelwerten innerhalb von ± 0,6 HRC liegen. Gängige Praxis ist es, die Messunsicherheit auf eine erhöhte Aussagesicherheit von 95% mit k=2 zu erweitern, entsprechend:

$$U = k \times u$$

Somit liegen nur noch 5% der statistisch zu erwartenden Werte außerhalb der erweiterten Messunsicherheit U, also in diesem Beispiel außerhalb von ± 1,2 HRC. Eine Erweiterung entsprechend k=3 deckt bereits 99% der Werte ab. Das Prüfergebnis kann wie folgt dargestellt werden $\bar{X}$ = 44,0 ± 1,2 HRC (mit k=2; 95 % Aussagesicherheit). DIN EN ISO 6508-1 bietet Prüflaboren im informativen Anhang G entsprechende Methoden an, die Messunsicherheit weiter zu verringern. Dazu kann die systematische Abweichung der Prüfmaschine in Bezug auf den Referenzwert detailliert berücksichtigt werden, um sowohl das Prüfergebnis zu korrigieren als auch die Messunsicherheit zu verringern. Schlussfolgernd sind somit bereits die Auswahl der Berechnungsmethode der Standardunsicherheit und die entsprechende Erweiterung ausschlaggebend, um eine angemessene Entscheidungsregel auswählen zu können und eine Vergleichbarkeit von Konformitätsaussagen zu ermöglichen. In Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen dem gewählten Erweiterungsfaktor und der Aussagesicherheit schematisch dargestellt.

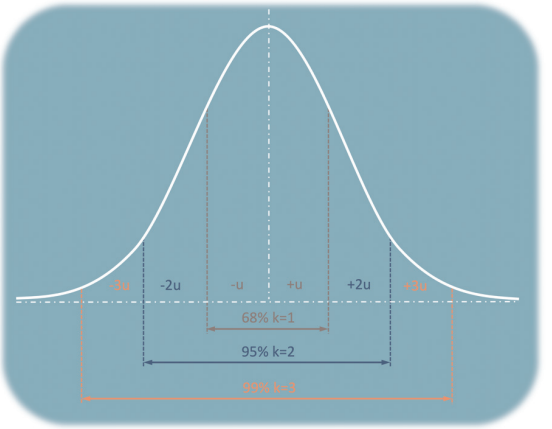


Bild 5: Einfluss des Erweiterungsfaktors auf die Aussagesicherheit

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

6. Schutzabstand und Formulierung der Entscheidungsregel

Um nun das Risiko einer falschen Konformitätsaussage für das Prüflabor zu minimieren, wird ein Akzeptanzbereich der Prüfergebnisse festgelegt. Dieser Akzeptanzbereich kann den vorgegebenen Spezifikationsbereich entsprechen, modifiziert um die erweiterte Messunsicherheit des Prüfergebnisses als Schutzabstand. Dazu wird beispielsweise die obere Toleranzgrenze reduziert, um das Risiko für das Labor zu minimieren, dass eine Konformität für ein nichtkonforme Probe bestätigt werden könnte (consumer's risk). Ebenso kann die obere Toleranzgrenze um den Schutzabstand erhöht werden, um das entsprechende Risiko zu verringern, dass eine Nichtkonformität für eine konforme Probe bestätigt werden könnte (producer's risk). Mit der unteren Toleranzgrenze ist entsprechend gegensätzlich zu verfahren. In dem hier aufgeführten Beispiel wird das Risiko des Prüflabors (consumer's risk) verringert. Dazu werden die untere und die obere Spezifikationsgrenze jeweils um den Betrag der erweiterten Messunsicherheit erhöht bzw. herabgesetzt. Wie in Abbildung 5 dargestellt, werden bei der erweiterten Messunsicherheit (k=2%) 95% der Werte abgedeckt. Anders formuliert liegen jeweils 2,5% außerhalb des Erwartungsbereichs, sowohl in positiver als auch in negativer Richtung. Das statistische Risiko einer daraus resultierenden Fehlentscheidung wird bei einer erweiterten Messunsicherheit (k=2) für min. 97,5% der Messwerte ausgeschlossen bzw. im Umkehrschluss besteht eine statistische Restwahrscheinlichkeit von max. 2,5% der Nichtkonformität. Eine Entscheidungsregel kann nun wie folgt formuliert werden:

„Eine Konformitätsbestätigung beruht auf den Prüfergebnissen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit mit einem Überdeckungsintervall entsprechend min. 97,5% Konformitätswahrscheinlichkeit"

In Abbildung 6 sind die Auswirkungen dieser Herangehensweise schematisch dargestellt. Tabelle 4 fasst die möglichen Konformitätsaussagen auf Basis dieser Entscheidungsregel zusammen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

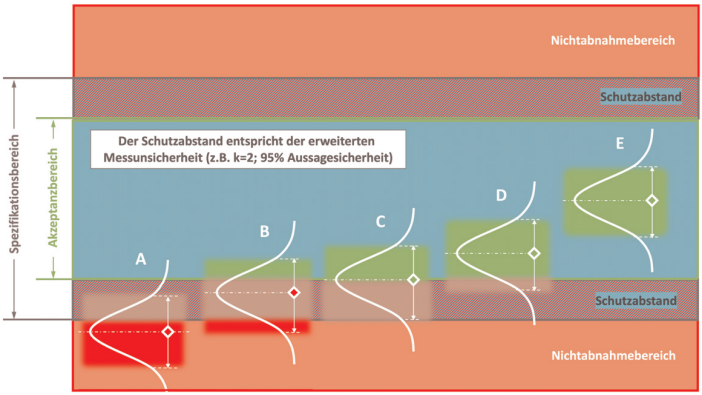


Bild 6: Spezifikationsbereich mit unterer und oberer Spezifikationsgrenze, reduziert um den Schutzabstand

Tabelle 4: Zusammenfassung der möglichen Konformitätsaussagen

A, B	Das Ergebnis erfüllt nicht die Anforderungen an die Spezifikation. Es existiert eine Konformitätswahrscheinlichkeit kleiner 97,5%. Die Konformität wird nicht bestätigt.
C	Das Ergebnis erfüllt die Anforderungen an die Spezifikation. Es existiert eine Konformitätswahrscheinlichkeit von maximal 97,5%. Die Konformität wird bestätigt.
D, E	Das Ergebnis erfüllt die Anforderungen an die Spezifikation. Es existiert eine Konformitätswahrscheinlichkeit von mindestens 97,5%. Die Konformität wird bestätigt.

Anhand des aufgeführten Beispiels aus der Härteprüfung würde somit für das Prüfergebnis 44,0 HRC mit einer erweiterten Messunsicherheit ± 1,2 HRC (95% Aussagesicherheit; k=2) die Konformität hinsichtlich der Spezifikationsvorgaben 45 ± 2 HRC nicht bestätigt werden. Wie für dieses Beispiel in Bild 7 dargestellt, existiert eine Konformitätswahrscheinlichkeit von unter 97,5%.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

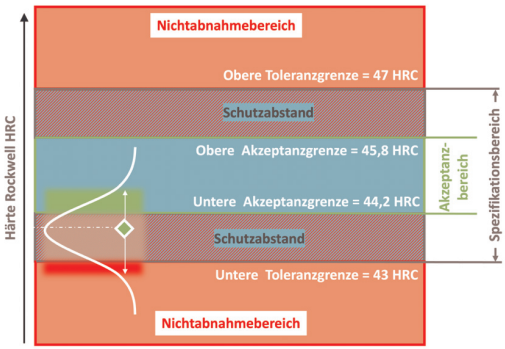


Bild 7: Konformitätswahrscheinlichkeit für das Ergebnis 44 ± 1,2 HRC (95%; k=2)

6 Zusammenfassung

Um Konformitätsbewertungen durchzuführen, muss das Prüflabor eine festgelegte Entscheidungsregel anwenden. Diese Entscheidungsregel beschreibt, wie die Messunsicherheit bei Konformitätsbewertungen der Messergebnisse mit einer festgelegten Spezifikation berücksichtigt wird. Dies wird explizit in DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert und stellt somit eine Anforderung an akkreditierte und nicht akkreditierte Prüflabore dar. In vielen Bereichen der mechanisch-technologischen Werkstoffprüfung werden die Spezifikationen durch Produktnormen oder Kundenvorgaben festgelegt. Eine angemessene Entscheidungsregel, die das Risiko einer falschen Annahme berücksichtigt, ist in den Prüfnormen oft nicht enthalten. Daher muss das Labor eine Entscheidungsregel festgelegen, anwenden und berichten. Die erweiterte Messunsicherheit kann dazu genutzt werden, um Schutzabstände und Akzeptanzbereiche zu definieren. Die statistische Konformitätswahrscheinlichkeit ermöglicht die Bewertung des Risikos einer falschen Annahme und das Festlegen einer angemessenen Entscheidungsregel.

[1] DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“, Beuth Verlag, Berlin, 2018

[2] JCGM 106:2012 „Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment”, Joint Committee for Guides in Metrology, 2012

[3] DIN EN ISO 6508-1:2016-12 „Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Rockwell - Teil 1: Prüfverfahren“, Beuth Verlag, Berlin, 2016

[4] DIN EN ISO 6508-3:2015-06 „Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Rockwell - Teil 3: Kalibrierung von Härtevergleichsplatten“, Beuth Verlag, Berlin, 2015.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Umsetzung der DIN ISO 17025 in Bezug auf die Prüfmittel in Herstellerlaboren (Automotive)

Anforderungen an Technische Dienste und Hersteller

Dipl.-Ing. **Frank Schneider**, TÜV-Verband e.V., Berlin

Kurzfassung

Nachweis der „17025“ auch in Herstellerlaboren?

1. Ausgangssituation EU-Recht (alt & neu)

Müssen Herstellerlabore für Prüfungen im Rahmen der Typgenehmigung, die durch einen Technischen Dienst (TD) beaufsichtigt werden, die Vorgaben der DIN ISO 17025 erfüllen?

Die gesetzliche Grundlage für die Fahrzeugtypgenehmigung wird für alle Beteiligten (Genehmigungsbehörden, Hersteller & Technische Dienste) in den einschlägigen europäischen Richtlinien und Verordnungen geregelt. Sowohl die bis zum 31. August 2020 geltende EU Richtlinie 2007/46 als auch die unmittelbar im Anschluss rechtsgültige EU Verordnung 2018/858 beschreiben die Anforderungen an die Benennung und Notifizierung von Technischen Diensten. Die Technischen Dienste werden hier unterschiedlich kategorisiert, nämlich u.a. in Technische Dienste der Kategorie A und B. Während TD der Kategorie A die Prüfungen gemäß vorgenannter Verordnung/Richtlinie in/auf eigenen Prüfeinrichtungen durchführen, werden die Messungen/Prüfungen in/auf den Einrichtungen des Herstellers oder eines Dritten durch den TD der Kategorie B beaufsichtigt. Für die alte Typgenehmigungsrichtlinie RL 2007/46 (EG) galt demnach: *“Die Technischen Dienste müssen unabhängig der jeweiligen Kategorie einschlägige Fähigkeiten, spezifisches Fachwissen und Erfahrungen in den speziellen Bereichen nachweisen, die von dieser Richtlinie und den in Anhang IV aufgeführten Rechtsakten erfasst werden.*

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Außerdem müssen die Technischen Dienste die in Anhang V Anlage 1 aufgeführten Normen, die für die von ihnen durchgeführten Tätigkeiten relevant sind, einhalten."

Der vorgenannte Anhang V legt für TD der Kategorie A u.a. die Erfüllung der allgemeinen Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierungslaboratorien gemäß der EN ISO/IEC 17025:2005 fest, während der TD der Kategorie B die allgemeinen Kriterien für den Betrieb verschiedener Typen von Stellen, die Inspektionen durchführen, gemäß der EN ISO/IEC 17020:2004 nachweisen muss. Wichtig dabei ist jedoch, dass der TD der Kategorie B vor der Durchführung oder Beaufsichtigung von Prüfungen in den Einrichtungen eines Herstellers oder eines Dritten zu überprüfen hat, dass die Prüfeinrichtungen und Messgeräte den einschlägigen Anforderungen der EN ISO/IEC 17025:2005, entsprechen.

Die seit 1. September 2020 rechtskräftige EU-Typgenehmigungsverordnung 2018/858 hat die Kategorisierung der TD beibehalten und verweist bezüglich des Kompetenznachweises der Technischen Dienste bei der Beaufsichtigung von Prüfungen in den Einrichtungen des Herstellers oder eines Dritten auf folgenden Sachverhalt:

"Vor der Durchführung oder Beaufsichtigung von Prüfungen in den Einrichtungen eines Herstellers oder eines Dritten hat der Technische Dienst zu überprüfen, dass die Prüfeinrichtungen und Messgeräte den einschlägigen Anforderungen der Norm EN ISO/IEC 17025:2005[1] entsprechen".

2. Kompetenznachweis der Technischen Dienste

Die Technischen Dienste können den erforderlichen Kompetenznachweis nach der neuen EU Verordnung 2018/858 auf zwei unterschiedlichen Wege erreichen. Entweder durch Nachweis einer erfolgreichen Akkreditierung durch die nationale Akkreditierungsstelle (für Deutschland: DAkkS) oder über ein sogenanntes Joint Assessment-Verfahren, durchgeführt von mehreren Typgenehmigungsbehörden gemeinsam mit Vertretern der EU Kommission. Um in Deutschland als Technischer Dienst benannt zu werden, bedarf es der Benennung durch die nationale Genehmigungsbehörde, das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Dieses hat dafür "Regeln für die Benennung/Anerkennung von Technischen Diensten" aufgestellt, die unter folgendem Link öffentlich einsehbar sind:

[1] Anmerkung: In der VO (EU) 2018/858 wird auch unverändert Bezug auf die EN ISO/IEC 17025:2005 genommen, obwohl die Umstellung auf die EN ISO/IEC 17025:2017 bereits erfolgt ist

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Benennungsregeln_TD_(A,B,D).pdf (kba.de)

Im Scope der KBA-Benennung sind lediglich Prüfverfahren auf der Basis von EG-Richtlinien/EU-Verordnungen, UNECE-Regelungen und nationalen Vorschriften verzeichnet. Diese gesetzlichen Grundlagen sind auch die Basis für das Benennungsverfahren. Die Bewertung erfolgt unter Anwendung der Norm DIN EN ISO/IEC 17025 und/oder DIN EN ISO/IEC 17020.

Im Gegensatz dazu erfolgt die Akkreditierung der Prüflabore unter direktem Bezug zu den Normen DIN EN ISO/IEC 17025 und/oder DIN EN ISO/IEC 17020 und ermöglicht einen umfangreicheren Scope im Hinblick auf weitere internationale Normen (Brasilien, China, Taiwan, Russland).

Vorliegende Akkreditierungen (auch teilweise) werden im Benennungsverfahren berücksichtigt.

Die wachsende Bedeutung der Akkreditierung und die damit verbundene konsequente Anwendung der DAkkS-Merkblätter zur metrologischen Rückführung / Rückführung auf nationale Normale führt zu höheren Aufwendungen sowohl beim Technischen Dienst als auch bei Herstellern / Dritten, mit deren Prüfeinrichtungen Tests für Genehmigungsprüfungen durchgeführt werden:

- Aufbau von Messmitteldatenbanken (Fristüberwachung), Festlegung von Kalibrierfristen, Kalibrieranweisungen, Verantwortungen, Freigabeprozesse usw.
- Betrachtungen zu Messunsicherheiten, Ringversuche usw.
- Höhere Kosten (Beschaffung, wiederkehrende Kalibrierungen)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung von Messunsicherheiten für die Prüfprozesseignung

Prüfprozesseignung vereinfacht aus Spezifikation und Vergleichpräzision bestimmen

Simplified procedure for determining measurement uncertainties for measurement process capability

Simplified method for measurement process capability from specification and reproducibility

Dr. **Ernst Wiedenmann**, Serious Enterprises, Aalen;
Dr.-Ing. **Thomas Schlüter**, c.a.s. GmbH, Oberhausen

Kurzfassung

Für die Bestimmung der Prüfprozesseignung wird ausschließlich die Toleranz und die Messunsicherheit des Prüfprozesses herangezogen. Aufgrund der Erfahrung in vielen Begutachtungen und Seminaren zur Berechnung von Messunsicherheiten, fällt es z.T. selbst ISO/IEC 17025 akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien schwer, angemessene Messunsicherheiten zu berechnen. Hier soll deshalb erstmalig ein neues, vereinfachtes Verfahren zur Berechnung von Messunsicherheiten für die Prüfprozesseignung vorgestellt werden. Es basiert ausschließlich auf der Berücksichtigung der Messsystemspezifikation (Gerätespezifikationen) und der erweiterten Vergleichpräzision (Präzision mit erweiterten Vergleichbedingungen). Dadurch wird es in der industriellen Praxis wesentlich einfacher eine Prüfprozesseignung zu ermitteln, da Gerätespezifikationen in vielen Fällen vorliegen und die Bestimmung der erweiterten Vergleichpräzision bereits zum Werkzeug vieler Anwender gehört.

Abstract

For the determination of the measurement process capability, only the tolerance and the measurement uncertainty of the test process are used. Based on the experience gained in many assessments and seminars on the calculation of measurement uncertainties, even ISO/IEC 17025 accredited testing and calibration laboratories sometimes find it difficult to calculate appropriate measurement uncertainties. For this reason, a new, simplified method for calculating measurement uncertainties for measurement process capability is presented here for the first time. It is based exclusively on the consideration of the measuring system

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

specification (Device specification) and the reproducibility. This makes it much easier to determine the suitability of a test process in industrial practice, since device specifications are available in many cases and the determination of the reproducibility is already a tool used by many users.

1. Einleitung

Für die Bestimmung der Prüfprozesseignung wird ausschließlich die Toleranz und die Messunsicherheit des Prüfprozesses herangezogen [1], [2]. Zur Ermittlung der Messunsicherheit gibt es verschiedene Umsetzungen, die alle auf dem GUM [3] basieren. Aufgrund der Erfahrung aus vielen Begutachtungen fällt es selbst ISO/IEC 17025 akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien teilweise schwer, angemessene Messunsicherheiten zu berechnen. Da in der industriellen Praxis viele Anwender vom GUM überfordert sind, wurden verschiedene Umsetzungen und Vereinfachungen entwickelt, siehe z.B. [4] und [5]. Aufgrund dieser Vereinfachungen zum GUM, der Ergebnisse von Eignungsprüfungen (umgangssprachlich Ringvergleiche) und auf Basis der Erfahrung mit vielen Messunsicherheitsberechnungen in verschiedenen Branchen und unterschiedlichsten Prüfprozessen, soll hier ein neues, vereinfachtes Verfahren zur Berechnung von Messunsicherheiten für Prüfprozesse vorgestellt werden. Es basiert ausschließlich auf der Berücksichtigung von Gerätespezifikationen und der erweiterten Vergleichpräzision [6]. Dieses neue Verfahren orientiert sich auch an der ISO 21748:2017 [7], in der die Messunsicherheit aus einem analytischen Teil, der hier der Spezifikation entspricht, und einer Laborreproduzierbarkeit, der hier der erweiterten Vergleichpräzision entspricht, besteht.

Zuerst wird in diesem Artikel gezeigt, dass ein spezifikationsbasierter Ansatz zur Berechnung von Messunsicherheiten zu einem modellbasierten Ansatz vergleichbare Ergebnisse liefert. Der modellbasierte Ansatz setzt die Forderung des GUM in seiner reinen Form um. Es wird eine mathematische Gleichung ermittelt, die den funktionalen Zusammenhang zwischen den einzelnen Einflussgrößen und dem ermittelten Messergebnis darstellt. Bei dem spezifikationsbasierten Ansatz werden diese funktionalen Zusammenhänge durch Annahmen, ausgehend von den Gerätespezifikationen (MPE's), vereinfacht. In einem zweiten Schritt wird beispielhaft gezeigt, dass die Spezifikation bzw. der Nachweis davon durch die Messsystemkalibrierung und die erweiterte Vergleichpräzision die wesentlichen Einflussgrößen für die Messunsicherheit sind.

2. Vergleich modellbasierte und spezifikationsbasierte Messunsicherheitsberechnung

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse von Eignungsprüfungen mit taktilen Koordinatenmessgeräten [8] ausgewertet werden. Sie erlauben einen Vergleich zwischen einem spezifi-

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

kationsbasierten Ansatz für die Berechnung von Messunsicherheiten und dem modellbasierten Ansatz. Verglichen werden hier Ergebnisse, bei denen die Messunsicherheiten mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät (VCMM) [9] bzw. nach VDI/VDE 2617 Blatt 11 [10] mit dem Excel-Tool („UKM-Tabellen“) von Dr. Hernla [11] ermittelt wurden. Natürlich basieren beide Verfahren auf dem GUM, eine Modellfunktion für die jeweilige Messgröße liegt beiden Ansätzen zugrunde. Im Rahmen dieses Abschnittes wird der Begriff KMG (Koordinatenmessgerät) anstatt des nun aktuellen Begriff Koordinatenmesssystem (KMS) benutzt, da hier nur spezifisch taktile 3D KMG angesprochen sind.

Beim VCMM liegt eine Modellfunktion des eingesetzten KMG’s vor, welche die Funktionsweise eines kartesischen 3D-Koordinatenmessgerätes unter Berücksichtigung herstellerspezifischer Eigenschaften abbildet. Die Intervallbreiten der Unsicherheitseinflüsse der einzelnen Einflussgrößen werden im Wesentlichen auf Basis einer Kalibrierung des gesamten Messvolumens (Restfehlerbestimmung), der Bestimmung der Tastercharakteristik, des Tasteroffset, von Temperaturgrenzwerten, thermischen Ausdehnungskoeffizienten von KMG-Komponenten sowie Prüfling und Prüflings- und Oberflächenparametern abgeschätzt bzw. ermittelt. Mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation werden die erweiterten Messunsicherheiten der einzelnen Prüfmerkmale im Prüfbericht der KMG-Software ausgegeben. Der große Vorteil des Verfahrens ist, dass der Prüfplan mit den Unsicherheiten eines jeden Messpunktes simuliert wird. Damit wird die Auswertestrategie automatisch in der Messunsicherheit berücksichtigt, ohne dass dies in der Modellfunktion bedacht werden muss. Dieser Ansatz wird in diesem Artikel als modellbasiert klassifiziert, da entsprechend der allgemeinen GUM-Beschreibung der funktionale Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Messwert in der Modellfunktion abgebildet ist [12].

Im Gegensatz dazu werden bei der VDI/VDE 2617 Blatt 11 für verschiedene Prüfmerkmale verschiedene Modellfunktionen gewählt. Die Modellfunktionen berücksichtigen dabei die geometrischen Zusammenhänge beim Messen mit kartesischen KMG. Die Intervallbreiten der Unsicherheitseinflüsse der einzelnen Einflussgrößen werden im Wesentlichen auf Basis von KMG-Spezifikationen, der Streuung der Antastpunkte der Messelemente, von Temperaturgrenzwerten, thermischen Ausdehnungskoeffizienten von KMG-Maßstäben sowie Prüfling und geometrischen Maßen und Verteilungen von Messpunkten abgeschätzt bzw. ermittelt. Der große Vorteil des Verfahrens ist, dass es unabhängig vom KMG und seiner Software eingesetzt werden kann und als Voraussetzung nur ein entsprechend der DIN EN ISO 10360-2 [13] und DIN EN ISO 10360-5 [14] kalibriertes KMG notwendig ist. Dieser Ansatz

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

wird in diesem Artikel als spezifikationsbasiert klassifiziert, da die wesentliche Einflussgröße der Geometrieabweichung des KMG durch seine Spezifikation abgeschätzt wird.

2.1 Ergebnisse Eignungsprüfung

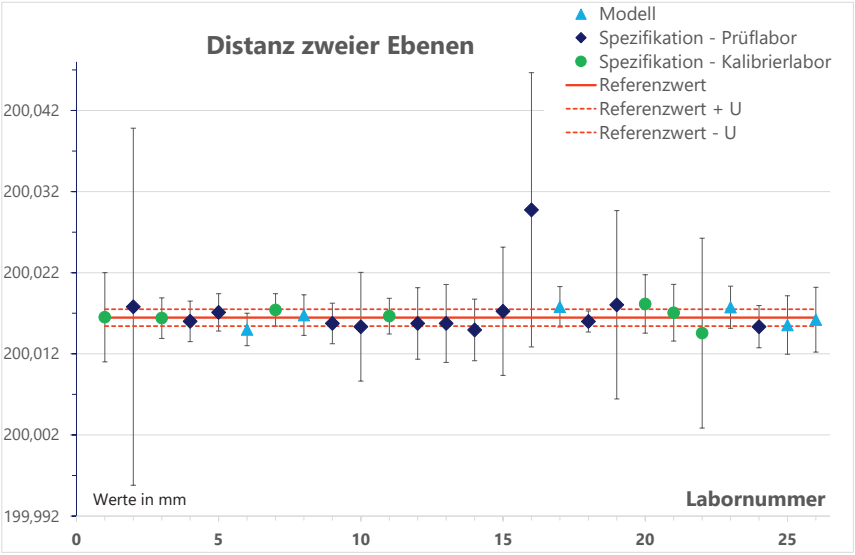


Bild 1: Ergebnisse Eignungsprüfung für Prüfmerkmal Distanz zweier Ebenen

Es werden hier die Ergebnisse von drei Eignungsprüfungen (Ringvergleichen) vorgestellt. Dabei wurden in den Jahren 2018 bis 2021 an zwei verschiedenen Prüfkörpern des Typs Multi-Feature-Check (MFC) [15] in drei Eignungsprüfungen jeweils Ergebnisse mehrerer Prüfmerkmale miteinander verglichen. Bei dem MFC handelt es sich um einen zylindrischen Körper mit einer Länge von 200 mm und einem Durchmesser von 100 mm, aus dem verschiedene geometrische Formen gefräst sind. Damit sind die in der dimensionellen Messtechnik allgemein vorkommenden Prüfmerkmale an einem Körper realisiert und können zur Überprüfung von KMG eingesetzt werden. Die Teilnehmer der Eignungsprüfung waren alle nach DIN EN ISO/IEC 17025 [16] akkreditiert bzw. im Akkreditierungsverfahren. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Teilnehmer wurde mit dem E_n-Score („Error Normiert“, siehe Formel **(1)**) entsprechend ISO 13528 [17] ausgewertet. Der Referenzwert CRV (Comparison Reference Value) wird dabei unter Verwendung des gewichteten Mittelwerts mit cut-off berechnet. Dabei wird der cut-off aus dem Mittelwert aller Messunsicherheiten, die kleiner

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gleich dem Median der Messunsicherheiten sind, berechnet. Alle Messunsicherheiten, die kleiner als der cut-off sind, werden dann durch diesen ersetzt [18]. Y_{Li} sind dabei die Ergebnisse des Labors mit der Nummer *i* und U_{Li} die dazugehörigen erweiterten Messunsicherheiten. U_{CRV} gibt die berechnete erweiterte Messunsicherheit des Referenzwertes an.

$$E_n = \frac{Y_{Li} - CRV}{\sqrt{U_{Li}^2 + U_{CRV}^2}} \quad \textbf{(1)}$$

In Bild 1 sind die Ergebnisse beispielhaft für ein Prüfmerkmal, den Abstand der beiden Seitenflächen des Zylinders, dargestellt. Für die gemeinsame Auswertung der drei Eignungsprüfungen wurden die drei Referenzwerte auf den Mittelwert normiert und die Abweichungen der Teilnehmer entsprechend angepasst.

Tabelle 1: Vergleich der durchschnittlichen Unsicherheiten mit Labortyp

	Anzahl	rel. *U*	$P_{\text{Form.Sph.1×25:SS:Tact,MPE}}$	$E_{0,\text{MPE}}$ @*l* = 200mm
Gesamt	26	1,00	1,60 µm	1,75 µm
modellbasiert	6	0,89	0,70 µm	1,16 µm
spezifikationsbasiert Kalibrierlabor	7	0,71	1,14 µm	1,17 µm
spezifikationsbasiert Prüflabor	13	1,20	2,26 µm	2,33 µm

Alle Labore mussten zu jedem Ergebnis eine erweiterte Messunsicherheit angeben. Alle haben die Messunsicherheitsermittlung entweder mit dem VCMM (modellbasiert, 6 Ergebnisse) oder nach VDI/VDE 2617 Blatt 11 (spezifikationsbasiert, 20 Ergebnisse) durchgeführt. Bei der Auswertung der Ergebnisse hat sich gezeigt, dass es nicht ausreichend ist, die Ergebnisse nur nach modellbasiert und spezifikationsbasiert zu unterteilen. Bei der Akkreditierung werden Labore grundsätzlich nach Kalibrier- und Prüflaboratorien unterschieden. Dies führt so weit, dass es Labore gibt, die zwei Akkreditierungen nach DIN EN ISO/IEC 17025 haben, eine als Kalibrierlabor und eine als Prüflabor. Eine in der praktischen Umsetzung wichtige Unterscheidung der beiden Labore zeigt sich in der Angabe der Messunsicherheit in Ergebnisberichten. Kalibrierlabore müssen immer eine Messunsicherheit angeben, Prüflabore nur

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

in spezifischen Fällen. Typischerweise werden daher in Prüfberichten keine Messunsicherheiten angegeben.

In Tabelle 1 sind die relativen Messunsicherheiten aufgeteilt nach den drei Gruppen modellbasiert, spezifikationsbasiert Kalibrierlabor und spezifikationsbasiert Prüflabor aufgelistet. Die Bezeichnung relative Messunsicherheit wurde gewählt, da die Messunsicherheiten der drei Gruppen in Relation zur mittleren Messunsicherheit aller Labore gesetzt wurden. Dabei waren die Labore mit dem modellbasierten Ansatz für die Messunsicherheitsberechnung (VCMM) bis auf eines alle Kalibrierlabore.

Die relative Messunsicherheit *U* wurde aus dem Mittelwert der relativen Unsicherheiten von acht Prüfmerkmalen berechnet. Dazu wurden zuerst die mittleren Unsicherheiten der einzelnen Prüfmerkmale berechnet und in Relation zur mittleren Messunsicherheit dieses Prüfmerkmals aller Labore gesetzt. In den weiteren beiden Spalten ist der Mittelwert der Spezifikation der eingesetzten KMG für die Antastabweichung ($P_{\mathrm{Form.Sph.1\times25:SS:Tact,MPE}}$) und die Längenmessabweichung ($E_{0,\mathrm{MPE}}$) für eine Länge von 200 mm angegeben. Wie zu sehen ist, haben die Prüflabore im Durchschnitt eine größere Messunsicherheit und auch größere Spezifikationen. Dies ist aufgrund des spezifikationsbasierten Ansatzes zur Messunsicherheitsberechnung zu erwarten. Bei den Kalibrierlaboren mit spezifikationsbasiertem Ansatz zur Messunsicherheitsberechnung und den Laboren mit modellbasiertem Ansatz sind sowohl die erreichten Messunsicherheiten als auch die Spezifikationen der eingesetzten KMG kleiner als im Durchschnitt. Die Messunsicherheiten korrelieren hier auch bei beiden Ansätzen zur Messunsicherheitsberechnung mit den Gerätespezifikationen. Dass Kalibrierlabore Messgeräte mit kleineren Spezifikationen im Vergleich zu Prüflaboratorien einsetzen, könnte sowohl am Wunsch der Kunden nach möglichst kleinen Messunsicherheiten als auch am Anspruch der Labore, möglichst genau zu messen, liegen. Aufgrund der geringen Anzahl an Kalibrierlaboren mit modellbasiertem und spezifikationsbasiertem Ansatz zur Messunsicherheitsberechnung kann keine belastbare Aussage zu dem hier beobachteten Unterschied der Messunsicherheiten gemacht werden. Es ist trotzdem bemerkenswert, dass die angegebenen Messunsicherheiten mit dem VCMM ca. 25 % größer sind als beim Einsatz von VDI/VDE 2617 Blatt 11 und das bei einer größeren Spezifikation für die Antastabweichung. Dies ergibt sich aus der relativen Messunsicherheit im modellbasierten Ansatz (VCMM), die mit 0,89 deutlich größer ist als beim spezifikationsbasierten Ansatz der Kalibrierlabore mit 0,71. Dabei ist die mittlere Spezifikation der Antastabweichung der eingesetzten KMG bei den Laboren mit modellbasierter Messunsicherheitsberechnung mit 0,70 µm deutlich geringer als die 1,14 µm der Kalibrierlabore.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.2 Fazit Vergleich modell- und spezifikationsbasierter Ansatz

Für eine erfolgreiche Teilnahme an einer Eignungsprüfung muss der Betrag des E_n-Scores kleiner Eins sein. Das bedeutet, dass die beiden verglichenen Ergebnisse im Rahmen ihrer erweiterten Messunsicherheiten übereinstimmen. Bei dem in Bild 1 dargestellten Ergebnissen ist dies für alle Labore der Fall. Auch alle anderen Ergebnisse der durchgeführten Eignungsprüfungen waren spätestens nach einer Anpassung der Messstrategie positiv, d.h. alle E_n-Scores waren für alle Prüfmerkmale betragsmäßig kleiner als Eins. Daraus folgt, dass bei KMG beide Ansätze zu ausreichenden Messunsicherheiten führen. Gleichzeitig konnte für beide Fälle gezeigt werden, dass die Messunsicherheit stark mit der Spezifikation der Geräte korreliert.

3. Vergleich Messunsicherheiten vollständig und reduziert

In diesem Kapitel soll beispielhaft an einer Messunsicherheitsberechnung für das Kalibrieren von Drehmomentschlüsseln nach DIN EN ISO 6789-2 [19] gezeigt werden, dass in vielen Prüfprozessen der Unsicherheitseinfluss des Normals und der erweiterten Vergleichpräzision ausschlaggebend für das Ergebnis der Messunsicherheit ist.

Größe	Schätzwert		Unsicherheit Eingangsgröße		Wahrscheinlichkeitsverteilung	Faktor	Sensitivitätskoeffizient		Unsicherheitsbeitrag		Varianz		Anteil
X_i	x_i	Einheit	$a(x_i)$	Einheit		b_i	c_i	Einheit	$u(x_i)=a\cdot b\cdot c$	Einheit	$u(x_i)^2$	Einheit	
W_{md}	1001,23	Nm	5,00E-03		Normal	0,50	1		2,50E-03		6,25E-06		32%
w_r	0	Nm	2,50E-04		Rechteck	0,58	1		1,44E-04		2,08E-08		0%
w_{rep}	0	Nm	1,50E-03		Rechteck	0,58	1		8,65E-04		7,48E-07		4%
w_{od}	0	Nm	1,98E-03		Rechteck	0,58	1		1,14E-03		1,31E-06		7%
w_{int}	0	mm	0,00E+00		Rechteck	0,58	1		0,00E+00		0,00E+00		0%
w_l	0	mm	9,99E-04		Rechteck	0,58	1		5,77E-04		3,33E-07		2%
w_{re}	0	mm	3,33E-03		Normal	1,00	1		3,33E-03		1,11E-05		56%
b_e	0	mm	4,00E-04		Rechteck	0,58	1		2,31E-04		5,33E-08		0%

X	**1001,2**	**Nm**
u (X)	0,0045	
k	2	
***U* (X)**	**0,0089**	
***U* (X)**	**0,89**	**%**

X	=	**1001,2**	**Nm ±**	**0,89**	**%**
X	= (	**1001,2**	**±**	**8,9**	**) Nm**

Eingabeparameter für Berechnung

W_{md}	0,5	%	Erweiterte U aus Kalibrierschein
w_r	0,5	Nm	
w_{rep}	3	Nm	
w_{od}	3,97	Nm	
w_{int}	0	Nm	
w_l	2	Nm	
w_{re}	6,67	Nm	Erweiterte Wiederholpräzision
b_e	0,04	%	

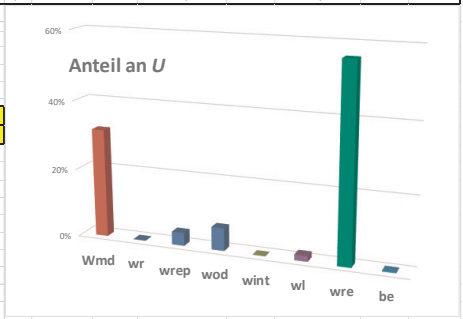


Bild 2: Messunsicherheitsbilanz entsprechend DIN EN ISO 6789-2

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In Bild 2 ist eine Messunsicherheitsbilanz für ein auslösendes Drehmoment-Schraubwerkzeug aufgezeigt. Bei den Daten handelt es sich um ein reales Kundenbeispiel. Die Bezeichnungen sind entsprechend DIN EN ISO 6789-2 gewählt. Die farblichen Markierungen von einzelnen Spalten der Exceltabelle dienen nur der Unterstützung für Schulungszwecke. Wie zu sehen ist, sind zwei Unsicherheitsanteile herausragend. Der grüne Balken repräsentiert die erweiterte Vergleichpräzision. Sie wurde von drei Mitarbeitern je 10mal bei drei Drehmomenten ermittelt. Für die Berechnung wurde der ungünstigste der drei Werte benutzt. Als zweithöchster Balken erscheint die Messunsicherheit der Kalibrierung der Referenz. Alternativ kann anstatt der erweiterten Messunsicherheit auch immer die Spezifikation der Referenz bzw. Messeinrichtung benutzt werden, sofern sie unter Berücksichtigung der Messunsicherheit beim Kalibrieren eingehalten wird. Dies stellt eine konservative Abschätzung der Messunsicherheit nach oben ab, was immer zulässig ist. In Bild 3 ist das Ergebnis gezeigt, wenn alle nicht wesentlichen Unsicherheitseinflüsse zu Null gesetzt werden. Wie man sieht, verringert sich die erweiterte Messunsicherheit gerade einmal um 7 % von 0,89 % auf 0,83 %. Ein Unterschied in diesem Betrag kann sich z.B. allein durch die Durchführung der Messungen zur Ermittlung der erweiterten Vergleichspräzision durch einen anderen Mitarbeiter ergeben.

Größe	Schätzwert		Unsicherheit Eingangsgröße		Wahrscheinlichkeits-verteilung	Faktor	Sensitivitäts-koeffizient		Unsicherheitsbeitrag		Varianz		Anteil
X_i	x_i	Einheit	$a(x_i)$	Einheit		b_i	c_i	Einheit	$u(x_i)=a \cdot b \cdot c$	Einheit	$u(x_i)^2$	Einheit	
W_{md}	1001,23	Nm	5,00E-03		Normal	0,50	1		2,50E-03		6,25E-06		36%
w_r	0	Nm	0,00E+00		Rechteck	0,58	1		0,00E+00		0,00E+00		0%
w_{rep}	0	Nm	0,00E+00		Rechteck	0,58	1		0,00E+00		0,00E+00		0%
w_{od}	0	Nm	0,00E+00		Rechteck	0,58	1		0,00E+00		0,00E+00		0%
w_{int}	0	mm	0,00E+00		Rechteck	0,58	1		0,00E+00		0,00E+00		0%
w_l	0	mm	0,00E+00		Rechteck	0,58	1		0,00E+00		0,00E+00		0%
w_{re}	0	mm	3,33E-03		Normal	1,00	1		3,33E-03		1,11E-05		64%
b_e	0	mm	0,00E+00		Rechteck	0,58	1		0,00E+00		0,00E+00		0%
X	**1001,2**	**Nm**											
u (X)	0,0042												
k	2												
U (X)	**0,0083**												
U (X)	**0,83**	**%**											

X	**=**	**1001,2**	**Nm ±**	**0,83**	**%**
X	**= (**	**1001,2**	**±**	**8,3**	**) Nm**

Eingabeparameter für Berechnung

W_{md}	0,5	% Erweiterte U aus Kalibrierschein
w_r	0	Nm
w_{rep}	0	Nm
w_{od}	0	Nm
w_{int}	0	Nm
w_l	0	Nm
w_{re}	6,67	Nm Erweiterte Wiederholpräzision
b_e	0	%

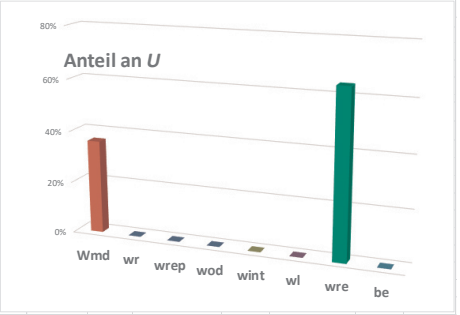


Bild 3: Messunsicherheitsbilanz wie in Bild 2 mit Nullsetzung aller nicht wesentlicher Anteile

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Das hier gezeigte Beispiel begegnet einem Auditor bei sehr vielen Prüfprozessen und auch einigen Kalibrierprozessen bei akkreditierten Laboren. Aus diesen Erfahrungen heraus hat sich der Vorschlag für das im nächsten Kapitel vorgestellte Verfahren zur Bestimmung der Prozessfähigkeit entwickelt.

4. Einfache Bestimmung der Prüfprozesseignung

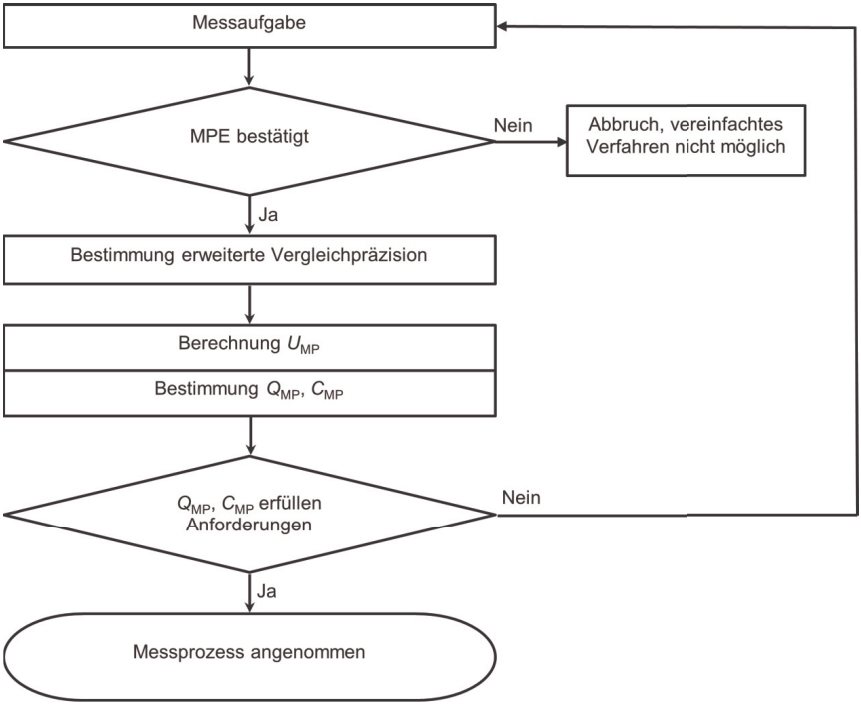


Bild 4: Vereinfachtes Verfahren Messprozessfähigkeit

Die Prüfprozesseignung berechnet sich aus der vorgegebenen Toleranz und der Messunsicherheit. Für den hierbei schwierigeren Teil der Bestimmung der Messunsicherheit soll hier ein Verfahren vorgeschlagen werden, das aus den in Kapitel 2 und 3 beschriebenen Ergebnissen motiviert ist. Dieses Verfahren soll eine einfache Vorgehensweise für den industriellen Alltag darstellen. Das Verfahren wird nicht in allen Fällen ein dem Prüfprozess adäquates Ergebnis liefern, aber immer einen sehr guten Startwert für die Einschätzung der Prüfprozessfähigkeit. In den meisten Fällen wird dieses Verfahren sehr gute Ergebnisse liefern, da

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

es die zwei wesentlichen Komponenten zur Bewertung der Fähigkeit der meisten Prüfprozesse berücksichtigt.

4.1 Verfahren zur Bestimmung der Prüfprozesseignung

Die Grundlage für den hier vorgeschlagenen Ablauf bildet das Bild 1 der E DIN ISO 22514-7 [2] und das Bild 2 aus der VDI/VDE 2600 Blatt 2 [20]. Der Ablauf ist in Bild 4 dargestellt. Der Anwender muss nun nur noch sein Messsystem kalibrieren lassen, was er z.B. aufgrund der Forderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 und anderer typischer Regelwerke so oder so benötigt. Dabei muss die Konformität mit dem Grenzwert / der Spezifikation unter Berücksichtigung der Kalibrierunsicherheit bzw. der Prüfwertunsicherheit [21] bestätigt sein. Falls dies nicht der Fall ist, kann dieses Verfahren nicht angewendet werden. Mit diesem Messsystem und verschiedenen Werkstücken wird dann die erweiterte Vergleichpräzision bestimmt. Damit kann dann die Messunsicherheit des Messprozesses und die Messprozessfähigkeit bestimmt werden.

In dem hier erstmalig vorgestellten Verfahren zur Berechnung der Messunsicherheit für die Prüfprozesseignung berechnet sich die erweiterte Messunsicherheit U_{MP} wie folgt:

$$U_{MP} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{M_{PE}}{\sqrt{3}}\right)^2 + u_{GV}^2} \qquad \textbf{(2)}$$

Hierbei ist M_{PE} der Grenzwert der Messabweichung (MPE: Maximum Permissible Error) und u_{GV} die Standardabweichung der erweiterten Vergleichpräzision. Sie berechnet sich aus der Standardabweichung einer Stichprobe der mindestens n = 30 durchgeführten Wiederholungen entsprechend E DIN ISO 22514-7.

$$u_{GV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; MS\ Excel: STABW.S \qquad \textbf{(3)}$$

Hierbei sind x_i die Ergebnisse der verschiedenen Mitarbeiter und Werkstücke und $\bar{x}$ der Mittelwert der Stichprobe.

Dieses neue Verfahren hat Ähnlichkeiten zur VDI/VDE 2617 Blatt 8 [22], da ebenfalls die erweiterte Wiederholpräzision bestimmt wird. Im Gegensatz dazu wird aber kein kalibriertes Werkstück („Meisterteil“) benötigt. Die Unsicherheitsanteile durch die Kalibrierunsicherheit und die systematische Abweichung des Meisterteils wird vollständig durch die Berücksichtigung der Spezifikation des KMG bei der Messunsicherheitsberechnung abgedeckt. Die weiteren Unsicherheitsanteile in der VDI/VDE 2617 Blatt 8 sind bei ordnungsgemäßem Betrieb

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 16.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

innerhalb der Spezifikationsgrenzen ebenfalls gegenüber der Unsicherheit durch die Spezifikation bzw. die erweiterte Wiederholpräzision vernachlässigbar.

4.2 Restriktionen des Verfahrens

Zusätzlich zur bestätigten Messsystemspezifikation muss das System innerhalb der dafür geltenden Herstellervorgaben betrieben werden. Dies betrifft z.B. die Umgebungsbedingungen, Einmessroutinen und Nutzung von Korrekturverfahren. Wie in der DIN EN ISO/IEC 17025 vorgesehen, ist das Messsystem auch zwischen den Kalibrierungen durch Zwischenprüfungen auf seine Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Weichen die Messsystemparameter stark von den Parametern bei der Kalibrierung des Systems ab, stellt die Spezifikation u.U. keine sinnvolle Abschätzung als wesentlicher Beitrag zur Messunsicherheit dar, so dass hier dieses Verfahren nicht mehr angewendet werden kann.

5. Zusammenfassung

Mit dem hier neu vorgestellten Verfahren zur vereinfachten Bestimmung der Messprozessfähigkeit wird gezeigt, dass es oft ausreichend sein kann, die Spezifikation des Messsystems und die erweiterte Vergleichpräzision zur Berechnung der Messunsicherheit zu benutzen. Dadurch vereinfacht sich die Messunsicherheitsberechnung zu der einfachen Formel **(2)**.

Das Verfahren ist auf kalibrierte Messsysteme mit Spezifikationsangaben beschränkt, was für viele Messsysteme in der Praxis gegeben ist. Aufgrund der Neuheit des Verfahrens sind noch weitere praktische Erfahrungen zu sammeln, um die Einsatzbereiche besser abgrenzen zu können. Hier sind zusätzliche quantitative Vergleiche zwischen den etablierten Verfahren und dem vereinfachten Verfahren durchzuführen.

6. Literaturverzeichnis

[1] „VDA Band 5: Mess- u. Prüfprozesse“, Verband der Automobilindustrie (VDA), Berlin, 2021.
[2] E DIN ISO 22514-7:2020-06, Statistische Verfahren im Prozessmanagement - Fähigkeit und Leistung - Teil 7: Fähigkeit von Messprozessen (ISO/DIS 22514-7:2020)
[3] „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement“, *JCGM 100:2008*.
[4] DIN EN ISO 14253-2:2018-09, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung (ISO 14253-2:2011)
[5] O. Kühn, G. Linß, K.-D. Sommer, und K. Weißensee, „Novel approach to the computer-aided modelling of measurement processes for uncertainty estimation“, gehalten auf der 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement, Annecy, France, Sep. 2008.
[6] *Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007*, 4. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[7] ISO 21748:2017-04, Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation
[8] E. Wiedenmann, „Eignungsprüfung KMG taktil“, *Serious Enterprises*, Sep. 01, 2021. https://www.serious-enterprises.com/home/akkreditierung/eignungsprüfung-kmg-taktil/ (zugegriffen Sep. 01, 2021).
[9] F. Wäldele und H. Schwenke, „Automatische Bestimmung der Messunsicherheit auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis“, *tm - Technisches Messen*, Bd. 69, Nr. 12, S. 550–557, 2002.
[10] VDI/VDE 2617 Blatt 11:2011-03, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen
[11] M. Hernla, *Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen: Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit durch Unsicherheitsbilanzen*, 4., Überarbeitete und Erweiterte Auflage. Tübingen: expert, 2020.
[12] M. Franke, T. Kistner, T. Hausotte, D. Heißelmann, C. Schwehn, und K. Wendt, „Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme“, *tm - Technisches Messen*, Bd. 84, Nr. 5, S. 325–335, 2017.
[13] DIN EN ISO 10360-2:2010-06, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen (ISO 10360-2:2009)
[14] DIN EN ISO 10360-5:2020-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) - Teil 5: Koordinatenmessgeräte (KMG) mit berührendem Messkopfsystem im Einzelpunkt- und/oder Scanningmodus (ISO 10360-5:2020)
[15] eumetron GmbH, „Multi-Feature-Check (MFC)“, *Downloads*. https://cdn.website-editor.net/bd6fcdc3d13846dfa233e2bd57c68f74/files/uploaded/eumetron_MultiFeature-Check_V2.0.pdf (zugegriffen Sep. 01, 2021).
[16] DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017)
[17] DIN ISO 13528:2020-09, Statistische Verfahren für Eignungsprüfungen durch Ringversuche (ISO 13528:2016)
[18] „Guidelines for CCPR Key Comparison Report Preparation“, CIPM Consultative Committee for Photometry and Radiometry, CCPR-G2, 2019.
[19] DIN EN ISO 6789-2:2017-07, Schraubwerkzeuge - Handbetätigte Drehmoment-Schraubwerkzeuge - Teil 2: Anforderungen an die Kalibrierung und die Bestimmung der Messunsicherheit (ISO 6789-2:2017)
[20] VDI/VDE 2600 Blatt 2:2019-10, Prüfprozessmanagement - Ermittlung der Messunsicherheit komplexer Prüfprozesse
[21] DIN EN ISO 14253-5:2016-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 5: Unsicherheit bei der Verifikationsprüfung von anzeigenden Messgeräten (ISO 14253-5:2015)
[22] VDI/VDE 2617 Blatt 8:2018-10, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

VDA-Band 5 Mess- und Prüfprozesse

Innovationen und Verbesserungen der neuen, 3. Auflage 2021

VDA Volume 5 Measurement and Inspection Processes

Innovations and Improvements of the new 3rd Edition 2021

Marcus Hoffmann, Cariad SE, Ingolstadt

Kurzfassung

In diesem Dokument werden wesentliche Neuerungen des VDA-Band 5, 3. Auflage 2021 [1], vorgestellt.

Abstract (optional)

In this document, the important innovations of the VDA Volume 5, 3rd edition 2021 [1], are introduced.

1. Allgemeine Anmerkung

Im April 2019 wurde im Verband der Automobilindustrie (VDA) e. V. eine Projektgruppe ins Leben gerufen, um eines der Standardwerke zur Mess- und Prüfprozesseignung, den VDA-Band 5, damals in 2. Auflage 2011, einer grundlegenden Überarbeitung zu unterziehen. Seit Juli 2021 liegt nun die neue, dritte Ausgabe des VDA-Band 5 mit dem geänderten Titel „Mess- und Prüfprozesse, Eignung, Planung und Management“ vor. Um eine bessere Anwendbarkeit in der Praxis zu erzielen, lag der Fokus vor allem auf einer Verständlichkeit der Methodik. Dank neuer Kapitelstruktur dient der „Rotband“ nun auch als übersichtliches Nachschlagewerk. Zusätzlich wird der VDA-Band 5 gegen Ende dieses Jahres durch zwei weitere Komponenten ergänzt, die eine Implementierung der neuen Inhalte in den Häusern unterstützen sollen: Zum einen wird ein Praxisband mit Fallbeispielen zur Umsetzung aus der Industrie („VDA 5 Praxishandbuch“) veröffentlicht. Zum anderen wird ein neues, anwendungsorientiertes Schulungskonzept des VDA für Anwender*innen und Auditor*innen auf den Markt kommen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Synchronisierung mit Normen und Standards

Eine wichtige Zielsetzung bei der Überarbeitung des VDA-Band 5 war es, die in den bestehenden Normen und Richtlinien enthaltenen Forderungen und Verfahren zu einer einheitlichen und praxisgerechten Vorgehensweise zur Ermittlung und Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit zusammenzufassen. Dabei wurde auch die Integration von bewährten Methoden der Fähigkeitsanalyse beachtet. Im Einzelnen gibt es Berührungspunkte mit folgenden einschlägigen Regelwerken und Instituten:

- Berücksichtigung GUM – ISO/IEC Guide 98-3 (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement)
- Berücksichtigung der anstehenden Revision DIN ISO 22514-7 Statistische Verfahren im Prozessmanagement – Teil 7: Fähigkeit von Messprozessen
- Berücksichtigung DIN EN ISO 14253-1 Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen
- Abgleich mit VDI/VDE 2600 Blatt 1-3 Prüfprozessmanagement – Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozessen
- Ablösung des Leitfadens der Automobilindustrie „Fähigkeitsnachweis von Messsystemen“
- Berücksichtigung der DIN EN ISO 15530-3 Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen
- Intensiver Austausch mit der Physikalischen-Technischen Bundesanstalt (PTB)
- Berücksichtigung der DIN ISO 31000 durch Aufnahme der Risikogerechten Absicherung
- Strategien zur Harmonisierung mit der AIAG bezüglich Core Tool MSA (4th edition)
- Änderungsvorschlag für die nächste Auflage der IATF 16949 zum Kapitel 7.1.5.3.2 Externe Labore
- Abgleich mit DIN EN ISO/IEC 17025 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien
- Synchronisierung mit ISO 7870-8 Regelkarten – Teil 8: Methoden für Regelkarten zu Kleinserien und gemischten Kleinserien

3. Klare Definierung von Messen und Prüfen

Präzision ist beim Messen und Prüfen elementar. Damit auch in der Theorie auf ein einheitliches Verständnis der zugrundeliegenden Begriffe und Definitionen referenziert werden

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

kann, ist auch hier eine präzise Abgrenzung erforderlich. Im neuen VDA-Band 5 wurden daher u. a. die folgenden Termini klar definiert und in einer Abbildung veranschaulicht:

„Messsystem“: Kombination aus Messgeräten und oft anderen Geräten sowie bei Bedarf Reagenzien und Versorgungseinrichtungen, die so angeordnet und angepasst sind, dass sie Informationen liefern, um Messwerte innerhalb bestimmter Intervalle für Größen bestimmter Arten zu erhalten

„Messprozess“: Satz von Tätigkeiten zur Ermittlung eines Größenwertes

„Prüfprozess“: Durchführung der Prüfung und Ermittlung eines Prüfentscheids durch Abgleich des Ergebnisses eines Messprozesses mit einer vorgegebenen Spezifikation unter Berücksichtigung der ermittelten Messunsicherheit

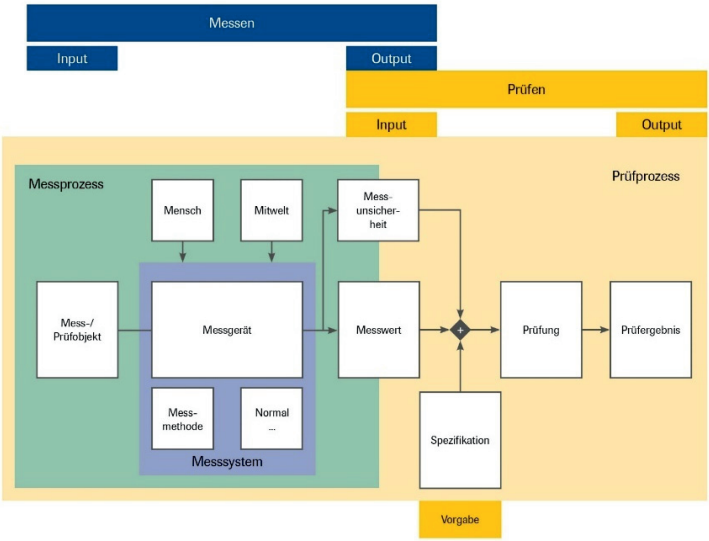


Bild 1: Zusammenhang Messsystem, Messprozess und Prüfprozess in Anlehnung an VIM und ISO 3534

4. Risikobasierter Ansatz

Bei der sog. „Risikogerechten Absicherung“ werden auch wirtschaftliche Anforderungen bei der Absicherung von Prüfentscheiden mitberücksichtigt. Als Basis dient hierbei die Abschätzung des Risikos, das aus einem fehlerhaften Prüfentscheid hervorgehen würde. Durch die Unterscheidung von drei Fällen („Höchstes Risiko“, „Kein Risiko“ und „Alle weiteren Risikobereiche“) kann die weitere Vorgehensweise abgeleitet werden. Beim „Höchsten Risiko“ ist aufgrund der Folgen eines fehlerhaften Prüfentscheides eine vollumfängliche Absicherung

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

des Prüfprozesses erforderlich, wohingegen bei „Keinem Risiko“ weitgehend auf eine detaillierte Absicherung verzichtet werden kann. In allen weiteren Risikobereichen liegt das eigentliche Potenzial im Bereich der risikogerechten Absicherung, welche zwar erforderlich ist, der anzuwendende Aufwand jedoch basierend auf einer detaillierteren Bewertung variieren kann. Hierfür werden sowohl die Folgen eines fehlerhaften Prüfentscheids, als auch dessen Eintrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Das entsprechende Ergebnis determiniert den auf den bewerteten Prüfprozess abgestimmten Absicherungsaufwand (s. VDA-band 5, Kapitel 4.3).

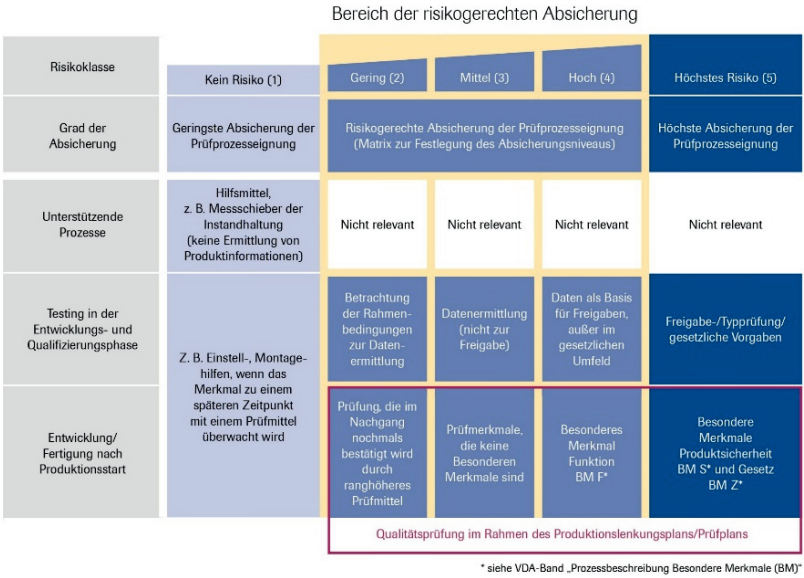


Bild 2: Vorauswahl von Prüfprozessen für die risikogerechte Absicherung

5. Prüfprozessplanung mit definierten Rollen

Die Prüfprozessplanung ist wichtiger Bestandteil des Produktentstehungsprozesses und führt von der Spezifikation eines Merkmals über den Eignungsnachweis bis hin zur Konformitätsaussage. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der zuständigen Bereiche ist dabei erforderlich. Im VDA-Band 5 werden daher die beteiligten Rollen „Prozesseigner Prüfprozessmanagement“, „Produktentwickler“, „Planer (Fertigungsprozess)“, „Planer

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

(Prüfprozess)“, „Beschaffer (Messsystem)“, „Mitarbeiter Kalibrierstelle (intern oder extern)“, „Prüfmittelbeauftragter“, „Prüfmittelbetreiber (z. B. Fertigung/Labor)“ und „Prüfmittelanwender“ mit jeweiligen Beispielen zur Zuständigkeit aufgeführt und beschrieben. Mehrere Rollen können dabei von einer Person wahrgenommen werden bzw. sind die Aufgaben exemplarisch zugeordnet, können aber im Einzelfall in den Unternehmen auch anders zugewiesen werden. Ergänzend ist die Rolle „Prozessauditor (Prüfprozessmanagement)“ beschrieben, der die Einhaltung von Vorgaben überprüfen soll. Darüber hinaus werden im VDA-Band 5 Empfehlungen zu rollenspezifischen Kompetenzen in den Bereichen Qualitätsmanagement, Mess- und Prüftechnik sowie Prüfmittelmanagement gegeben (s. VDA-Band 5, Kapitel 4.2).

6. Beitrag zum Systems-Engineering-Prozess

„Systems Engineering“ bezeichnet den ganzheitlichen Ansatz zur Entwicklung komplexer und vernetzter Prozesse, wobei der Produktprozess systematisch strukturiert und durchgeführt wird. Als Vorgehensmodell wird das V-Modell genutzt, das beim Verständnis der Zusammenhänge des Systems Engineering helfen soll (exemplarisch sei hier auf ein Modell in der VDI 2206 [2] verwiesen).

Ausgangspunkt ist die frühe Phase in der Entwicklung, in der Spezifikationen an das Produkt definiert und Wissen gebündelt werden. Bereits hier, im Produktentstehungsprozess, soll die Prüfprozessplanung eingebunden werden, damit sich Produktentwicklung, Produktionsprozessplanung und Prüfprozessplanung untereinander abstimmen, um fähige Mess- und Prüfprozesse generieren zu können. Deren Kenntnis kann im Gegenzug dazu beitragen, dass rechtzeitig erkannt wird, falls bestimmte Spezifikationen nach Stand der Technik nicht realisierbar sind.

Über die Architektur werden die Anforderungen schrittweise und systematisch auf die Komponenten heruntergebrochen und festgelegt, welche Schritte in welcher Reihenfolge realisiert werden sollen. Durch die Wirkkettenanalyse entsteht eine vertikale Nachvollziehbarkeit: Das funktionale Zusammenwirken der Komponenten wird ersichtlich und die Schnittstellen im Gesamtsystem werden deutlich. Damit können die Anforderungen aus dem Prüfprozessmanagement und der Prüfprozesseignung berücksichtigt werden (s. VDA-Band 5, Kapitel 4.4.2).

7. Übertragbarkeit von Eignungsnachweisen

Sowohl Messsysteme als auch Messprozesse unterliegen inneren und äußeren Einflüssen, die sich auf die zu erwartende Abweichung eines beobachteten Messwertes vom wahren Wert eines Merkmals auswirken. Im VDA-Band 5 wird ein Weg aufgezeigt, diese zu erwartenden

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Abweichungen zu quantifizieren und deren Auswirkung auf die Prüfung eines Merkmals zu bewerten. Hierbei dient das Verhältnis einer ermittelten Messunsicherheit zur Merkmalstoleranz als Kenngröße für die Bewertung. Der Nachweis der Eignung stellt sicher, dass die Unsicherheit des Messprozesses im Verhältnis zur Toleranz hinreichend gering ist. Gleichzeitig wird damit sichergestellt, dass die beobachtete Streuung eines Fertigungsprozesses nicht übermäßig durch den Einfluss des Messprozesses beeinflusst wird. Die ermittelten Unsicherheitskomponenten werden unter Annahme eines additiven Messmodells in einem Unsicherheitsbudget zusammengefasst. Dieses erlaubt zum einen eine Ermittlung der Hauptbeitragsleister zur Messunsicherheit als Basis für eine gegebenenfalls erforderliche Optimierung zum anderen auch Rückschlüsse auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Messprozesse zu ziehen.

Wurde die Messunsicherheit für einen Messprozess ermittelt, stellt sich die Frage, ob die ermittelte Messunsicherheit – bzw. unter Annahme gleicher Toleranzen – der Eignungsnachweis auf weitere, ähnliche Messprozesse übertragen werden kann (s. VDA-Band 5, Kapitel 4.7.4). Generell gilt, dass eine Übertragbarkeit nur dann möglich ist, wenn korrigierbare systematische Abweichungen korrigiert sind und sich die Unsicherheitsbeiträge zwischen den einzelnen Messprozessen nicht signifikant unterscheiden oder wenn der Messprozess im Geltungsbereich des Eignungsnachweises liegt. Um die Signifikanz zu bewerten und Entscheidungen ableiten zu können, müssen die Unsicherheitsbeiträge von einem interdisziplinären Team betrachtet werden.

8. Umgang mit nicht geeigneten Messystemen/-prozessen

In VDA-Band 5, Kapitel 7.4, werden folgende Möglichkeiten dargestellt, wie mit einem nicht geeigneten Messsystem/-prozess umgegangen werden kann, und in jeweils einzelnen Kapiteln näher erläutert:

- Messprozessoptimierung, z. B. durch die Auswahl eines geeigneteren Messgerätes (Kapitel 7.4.1)
- Risikoanalyse und bedingte Freigabe (Kapitel 7.4.2)
- Reflexion und ggf. Anpassung der Grenzwerte (Kapitel 7.4.3)
- Diskussion und ggf. Erweiterung der Merkmalstoleranzen (Kapitel 7.4.4)
- Spezielle Strategien (Kapitel 7.4.5)

Eine besondere „spezielle Strategie“ ist dabei die FT-Regelung für Messprozesse mit kleinen Toleranzen („Fine Tolerances“). Damit kann die Eignung auch bei sehr kleinen Toleranzen nachgewiesen werden. Sie findet auch Anwendung, wenn keine Fähigkeits- und Eignungskennwerte mit der standardmäßigen VDA 5-Auswertung erreichbar sind.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

9. Stand des Wissens zur attributiven Prüfung

In Kapitel 9 des VDA-Band 5 wird ein fundierter Überblick der Methoden zur Bewertung von attributiven Prüfprozessen gegeben, wobei auch auf die Risiken des attributiven Prüfens hingewiesen wird. Alle Methoden sind in Anwendungsbereich, Vorteile und Nachteile gegliedert. Im Einzelnen sind dies für diskretisierte Merkmale die „Signalerkennung“, die „Erweiterte Signalerkennung“ und die „Analytische Methode“. Für diskrete Merkmale werden die „Short Method“, „Effektivität“, der „Bowker-Test“, die „Kappa Methode nach Cohen und Fleiss“ sowie der „Konkordanz-Koeffizient W nach Kendall“ beschrieben. Mit diskreten Merkmalen werden Merkmale bezeichnet, die prinzipiell nicht gemessen und nur attributiv bewertet werden können. Diskretisierte Merkmale sind Merkmale, die zwar gemessen werden können, jedoch attributiv geprüft werden.

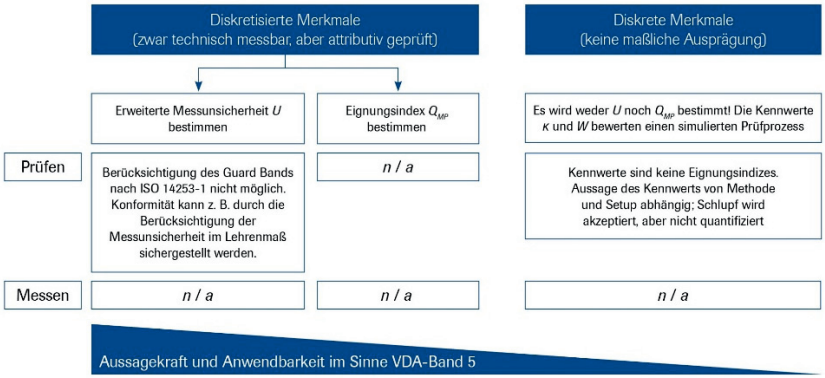


Bild 3: Diskretisierte und diskrete Merkmale

10. Ausblick

Neben dem Praxishandbuch als Ergänzung zum VDA-Band 5 mit Beispielen und Fallstudien zu den einzelnen Themen werden parallel noch weitere VDA-Bände im Umfeld des Themas Messen und Prüfen über- bzw. erarbeitet. Als erstes sei hier die Revision des VDA-Band 5.1 „Rückführbare Inline-Messtechnik im Karosseriebau“ genannt. Des Weiteren ist eine Revision des VDA-Band 5.2 „Prüfprozesseignung für das Drehmoment von Schraubenverbindungen“ geplant. In Kürze soll auch über die Neuerstellung eines VDA-Band 5.3 zu optischen Sensoren und Bildverarbeitung entschieden werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[1] VDA – Verband Deutscher Automobilindustrie (2021). *VDA-Band 5 – Mess- und Prüfprozesse. Eignung, Planung und Management*. Berlin. VDA e. V.

[2] VDI – Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2004). VDI 2206:2004-06: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin. Beuth Verlag.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Praxisgerechte Bestimmung der Messunsicherheit nach VDA 5 (3. Auflage)

Der neue VDA Band 5: Anforderungen und Anwendung

Practice-oriented evaluation of the measurement uncertainty according to VDA 5

The new VDA Volume 5: Requirements and application

Dipl.-Ing. **Stephan Conrad**, Q-DAS GmbH, Weinheim

Kurzfassung

Der VDA Band 5 [1] wurde unter dem Gesichtspunkt entwickelt, sehr praxisorientierte Näherungen in Bezug auf die Anwendung des ISO Guide 98-3 (GUM) [2] für den Eignungsnachweis von Messsystemen und -prozessen anzubieten und darüber hinaus den Anforderungen von DIN EN ISO 14253-1:2018 [3] gerecht zu werden. Das Papier „Measurement System Analysis“ [4] der AIAG ist das Pendant auf dem amerikanischen Markt in Bezug auf IATF 16949 [5], kann aber ebenso wie der „Leitfaden aus der Automobilindustrie“ [6] weder eine Messunsicherheit des Messprozesses bewerten, noch Guard Bands nach DIN EN ISO 14253-1 [3] berücksichtigen. Der VDA Band 5 ist derzeit Richtlinie im Volkswagen Konzern und liegt z. B. dem GS98000 von BMW zugrunde.

Abstract

VDA Volume 5 [1] was developed with the goal to offer very practice-oriented approximations regarding the application of ISO Guide 98-3 (GUM) [2] for the proof of capability of measurement systems and processes. This guideline also to meet the requirements of DIN EN ISO 14253-1:2018 [3]. The paper "Measurement System Analysis" [4] of the AIAG is the counterpart on the American market referring to IATF 16949 [5], but like the “Guideline from the automotive industry” [6], it can neither evaluate a measurement uncertainty of the measurement process nor consider guard bands according to DIN EN ISO 14253-1 [3]. VDA Volume 5 is the guideline of Volkswagen Group and the basis for BMW's GS98000.

1. Anwendungsbereich

Der VDA 5 in der 3. Auflage [1] beschreibt Methoden des Prüfprozessmanagements unter besonderer Berücksichtigung einer risikogerechten Absicherung.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Weiterhin werden Verfahren zur Ermittlung des Eignungskennwertes für Messsysteme und -prozesse auf Basis von Merkmalstoleranz und Messunsicherheit vorgestellt.

2. Voraussetzungen und Grundlagen der Modellbildung

Der VDA 5 [1] wurde ursprünglich für geometrische Messverfahren entwickelt, kann aber auch für weitere Messgrößen verwendet werden, bei denen die dort zugrunde gelegten wesentlichen Randbedingungen für die vereinfachte Ermittlung der Messunsicherheit in Bezug zur GUM [2] erfüllt sind:

- Messprozessmodelle sind additiv
- Sensitivitätskoeffizienten sind vernachlässigbar und werden mit 1 angenommen
- Die Eingangskomponenten (Einflussgrößen) sind weitgehend unkorreliert
- Messsysteme sind justiert
- Korrektionen sind angebracht

Mit den beiden letztgenannten Punkten kann die Diskussion des Schätzwertes als Bestandteil des vollständigen Messergebnisses (Schätzwert und Messunsicherheit) nach GUM [2] vernachlässigt werden. Der Anzeigewert des Messsystems wird in diesem Band als korrigierter Messwert nach GUM [2] bzw. VIM [7] [8] angesehen.

Können die oben genannten Randbedingungen nicht erfüllt werden, besteht alternativ die Möglichkeit, die Messunsicherheit nach GUM [2] oder daran angelehnte Papiere zu berechnen zu berechnen.

3. Bestimmung typischer Unsicherheitskomponenten

Zur Ermittlung der Messunsicherheit nach VDA 5 [1] werden Wiederholmessungen verwendet. Wenn sich dabei zeigt, dass der Messprozess diese nicht zulässt, bestehen weitere Möglichkeiten zur Optimierung:

- Herstellen eines eingeschwungenen Zustandes
- Ersatz der Referenz durch ein höherwertiges Messgerät
- Erzeugung homogener Proben

4. Versuche und Datenquellen

Zur Ermittlung der Messunsicherheit nach VDA 5 [1] können Datenquellen verschiedenster Art verwendet werden. Das beginnt bei offensichtlichen Eigenschaften des Messmittel (Auflösung) und reicht über Datenblätter des Herstellers und Kalibrierscheine bis hin zu eigenen Erfahrungswerten. Diese Berechnung der Unsicherheitskomponenten erfolgt weitestgehend mit Hilfe eine A Priori-Rechteckverteilung.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Dennoch empfiehlt der VDA 5 [1] eine Absicherung der Untersuchung durch Versuche am Messsystem und Messprozess und der Ermittlung der Messunsicherheitskomponenten nach Methode A.

Typischerweise sollten zuerst alle bekannten Einflüsse nach Methode B berücksichtigt werden, um dann abzuschätzen, ob sich der Aufwand für Versuche lohnt. Sind die Erfolgsaussichten auf eine ausreichenden Eignungskennwert gegeben, sollen Versuche geplant werden. Dabei werden Wiederholmessungen verwendet. Zeigt sich, dass der Messprozess Messungen unter Wiederholbedingungen nicht zulässt, bestehen weitere Möglichkeiten zur Optimierung, z. B.

- Herstellen eines eingeschwungenen Zustandes
- Ersatz der Referenz durch ein höherwertiges Messgerät
- Erzeugung homogener Proben

Für alle Versuche werden mindestens Stichprobenumfänge $n \geq 30$ empfohlen, um ausreichend Freiheitsgrade zu haben, so dass der Erweiterungsfaktor $k = 2$ für die Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit angenommen werden kann.

Das Versuchsdesign bestimmt, welche Komponenten aus den Versuchen ermittelt werden können. So kann der „Versuch Messsystem“ durchgeführt werden mit

- einem einzigen Referenzteil zur Bestimmung von Bias und Wiederholbarkeit unter Annahme vernachlässigbarer Linearität (analog dem bekannten Versuch zu Verfahren 1).
- zwei Referenzteilen an den beiden Spezifikationsgrenzen zur Absicherung der Grenze sowie den maximalen Linearitätsabweichungen an den Spezifikationsgrenzen
- drei oder mehr Referenzteilen zur Ermittlung und Trennung der Unsicherheitskomponenten Bias und Linearität (analog dem bekannten Versuch zu den Verfahren der Linearität in der Messsystemanalyse).

Der „Versuch Messprozess“ kann analog den bekannten Verfahren 2 oder 3 durchgeführt werden, um die Wiederholbarkeit mit realen Bauteilen sowie ggf. die Vergleichbarkeit AV der Bediener und die Wechselwirkung IA (Bediener-Teil) zu bestimmen. Der Versuch kann bei Bedarf aber auch zu einem voll- oder teilfaktoriellen (D-optimierten) Versuchsplan ausgebaut werden, um weitere Unsicherheitskomponenten zu bestimmen. Damit wird der Brückenschlag zu den typischen Verfahren der Messsystemanalyse deutlich, wobei aber die dort bekannten Kennwerte (Cg/Cgk, %GRR) weder berechnet noch bewertet werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Eignungsnachweis und spezielle Anwendungsfälle

Der Eignungsnachweis erfolgt für Messsystem MS und Messprozess MP getrennt mit den Eignungsindizes Q_{MS} und Q_{MP}. Der Eignungsindex errechnet sich, wie in VDA 6.1 [9] beschrieben, als Verhältnis von Messunsicherheit zu Toleranz, wobei natürlich berücksichtigt wird, dass die Messunsicherheit eine Halbbreite ist, während die Toleranz eine Gesamtbreite darstellt.

Neu im VDA 5 [1] ist die Berechnung von Eignungsindizes für einseitig begrenzte Merkmale, wobei drei Varianten unterschieden werden:

- Einseitig begrenzte Merkmale mit einer weiteren natürlichen / physikalischen / technologischen Grenze
- Einseitig begrenzte Merkmale mit einem vorgegebenen Arbeitspunkt
- Einseitig begrenzte Merkmale ohne weitere Angaben

Auch auf Besonderheiten, wie

- Merkmale mit sehr kleinen Toleranzen (Fine Tolerances) und
- Klassiervorgänge

wird in der 3. Auflage des VDA 5 [1] explizit eingegangen.

Weiterhin beschreibt das Dokument praxisnahe Vorgehensweisen zum Nachweis der fortlaufenden Eignung von Messprozessen (Stabilität) und der Berücksichtigung der Messunsicherheit bei Konformitätsaussagen nach DIN EN ISO 14253-1 [3].

Nicht zuletzt fasst der VDA 5 [1] auch alle gängigen Methoden zum Nachweis der Eignung attributiver Prüfprozesse zusammen. Diese Methoden werden mit Anwendungsbereich, typischen Vor- und Nachteilen aufgelistet, allerdings werden keine Methoden explizit gefordert, weil diese Methoden immer nur spezielle Aspekte des Prüfprozesses beleuchten. Es wird im Gegenteil ausführlich beschrieben, dass keine universellen und allgemeingültigen Verfahren existieren, sondern dass die Vorgehensweise beim Eignungsnachweis für attributive Prüfprozesse immer der Situation vor Ort angepasst werden muss.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[1] VDA, VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.: *VDA Band 5: Mess- und Prüfprozesse, Eignung, Planung und Management*. 3., überarbeitete Auflage, März 2021. Berlin : Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2021 — ISBN ISSN 0943-9412

[2] ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION: *ISO/IEC Guide 98-3:2008*. Berlin : Beuth Verlag, 2008

[3] DIN, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN ISO 14253-1:2018-07, Geometrische Produktspezifikationen_(GPS)_- Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen_- Teil_1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen (ISO_14253-1:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_14253-1:2017*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018

[4] AIAG: *Measurement Systems Analysis*. 4th Edition. Michigan, USA : A.I.A.G., 2010

[5] IATF, INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE ; VDA, VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: *IATF 16949: Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie*, 2016

[6] Q-DAS GMBH: *Leitfaden zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen*. 2.1. Birkenau : Q-DAS GmbH, 2001

[7] ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION: *ISO/IEC Guide 99:2007 - International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. Berlin : Beuth Verlag, 2007

[8] BRINKMANN, BURGHART: *Internationales Wörterbuch der Metrologie: grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) ; ISO/IEC-Leitfaden 99:2007 Vocabulaire international de métrologie*. Dt.-engl. Fassung, 4., überarb. Aufl. Berlin Wien Zürich : Beuth, 2012 — ISBN 978-3-410-22472-3

[9] VDA, VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.: *VDA Band 6.1 QM-Systemaudit Serienproduktion*, *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie*. 5. Auflage. Berlin : VDA, Qualitätsmanagement Center, 2016

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

VDA Band 5 und ISO 22514-7:2021 „Eignung von Messprozessen“

- **Zielsetzung der ISO 22514-7 „Capability of Measurement Processes“**
- **Inhaltsübersicht und Neuerungen in der Ausgabe 2021**
- **VDA 5 Prüfprozesseignung und MSA Measurement System Analysis**

Dr.-Ing. **Edgar Dietrich**, IconPro GmbH, Aachen

Kurzfassung

Das Thema Eignungsnachweise von Prüfprozessen beziehungsweise die Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit ist zentraler Bestandteil jeder Messung. Mit der Einführung von SPC in den 80er Jahren war schnell klar, dass die Eignung des jeweiligen Messprozesses nachgewiesen werden muss, um überhaupt zwischen der Streuung des Fertigungs- bzw. des Messprozesses unterscheiden zu können. In diesem Zusammenhang sind zunächst mehrere Firmenrichtlinien und später Leitfäden von Verbänden wie AIAG (Automotive Industry Action Group) sowie VDA (Verband Deutscher Automobilindustrie) und ISO (International Standard Organization) Normen entstanden. Der aktuelle Stand wird im Folgenden übersichtsartig dargestellt.

1. Einleitung

Anfang der 80er Jahre sind zunächst mehrere Firmenrichtlinien entstanden, um die Eignung eines Messprozesses nachzuweisen. Als erste Verbandsrichtlinie erschien 1985 die MSA (Measurement System Analysis) [1] der AIAG. Dieser Leitfaden ist mittlerweile weltweit sehr weit verbreitet. Erst 1995 entstand seitens der ISO die GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) [3]. Diese stellt die Grundlage zur Bestimmung der Messunsicherheit dar, wird aber in der Regel nur in Messlaboren verwendet, da die Anwendung der GUM in der industriellen Fertigung zu komplex und für den Anwender in der Praxis nur bedingt brauchbar ist. Daraufhin wurde Anfang der Jahrtausendwende vom VDA der Leitfaden VDA 5 Prüfprozesseignung [5] herausgegeben. Die erste Version, die sich an der GUM orientiert, hat sich in der Praxis nur bedingt bewährt. Daher wurde diese 2010 grundlegend überarbeitet und ähnlich wie bei der MSA die Vorgehensweise zur Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit „kochrezeptartig“ beschrieben. Auch wurde ein Zusammenhang mit der MSA hergestellt, so dass bereits vorhandene Untersuchungen basierend auf der MSA in die Betrachtung mit herangezogen werden können. Der VDA 5 Band wird aktuell grundlegend überarbeitet und in der dritten Version 2021 erscheinen.

Es werden immer mehr Informationen von Fertigungsprozessen und Abläufen über unterschiedlichste Sensoren (Messprozesse) erfasst und darauf basierend Beurteilungen von Sachverhalten vorgenommen. Daher wird die Notwendigkeit die erweiterte Messunsicherheit zu kennen, weiter an Bedeutung zunehmen. Denn nur valide Messdaten (kleine Messunsicherheiten!) können sinnvollerweise für Bewertungen herangezogen werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Entstehung von ISO Normen

Normen hängen naturgemäß der realen Anwendung meistens hinterher. Manchmal sogar um mehrere Jahre. Dies hängt einerseits an der langen Bearbeitungszeit in dem zuständigen Gremium und andererseits muss diesem Gremium die Notwendigkeit für die Erstellung einer Norm überhaupt zugetragen werden. Durch diese Verzögerung entstehen in Firmenrichtlinien oder Leitfäden von Verbänden oft Wildwüchse was Abkürzungen, Definitionen, Vorgehensweise und mathematische Berechnungen anbelangt. Erst wenn zu diesen Themen Normen vorhanden sind, orientieren sich die Firmen und Verbände über die Jahre an diesen.

Wie entstehen eigentlich Normen? Auf Anregungen von Firmen beziehungsweise Verbänden (z. B.: VDA, VDI oder VDMA) können Anliegen über die jeweiligen nationalen Gremien eingebracht werden. Für Deutschland ist dies das DIN als sog. Spiegelgremium zur ISO. Das DIN entsendet zur Mitarbeit in die jeweiligen Gremien entsprechende Experten. Wird ein Vorschlag für eine bestimmte Norm In dem zuständigen TC (Task Committee) als sinnvoll erachtet, wird von einer Arbeitsgruppe (Working Group) zunächst ein Working Draft erstellt. Dieses Dokument wird dann an die stimmberechtigten nationalen Gremien zur Abstimmung verschickt. Die beteiligten Länder stimmen darüber ab, ob die vorgeschlagene Norm als sinnvoll erachtet wird. Bei einer entsprechenden Zustimmung wird von der Working Draft weiterbearbeitet bis letztlich die ISO Norm veröffentlicht wird. Dazwischen finden mit den Ländern immer wieder Abstimmungsrunden statt. Eingehende Kommentare werden in der Arbeitsgruppe bewertet und ggf. in den Text eingearbeitet. Immer Konsens zu finden, ist dabei oft sehr zeitaufwendig.

3. Entstehung der ISO Norm 22514-7:2021 [4]

Nachdem sich abzeichnete, dass die 2. Version des VDA 5 Band erscheinen wird, wurde seitens des DIN vorgeschlagen, die darin enthaltene Vorgehensweise als Grundlage zur Erstellung einer Norm heranzuziehen. Das Anliegen wurde dem ISO Gremium ISO TC 69 SC4 angetragen. Das SC4 ist eigentlich nur für Eignungsnachweise von Fertigungsprozessen und Qualitätsregelkartentechnik zuständig. Allen im SC4 erarbeiteten Normen liegen aber Auswertungen zugrunde, die auf Messwerten basieren. Spiegeln die Messwerte aufgrund einer zu großen Messunsicherheit des Messprozesses die Realität nicht ausreichend genau wieder, sind alle statistischen Betrachtungen konsequenterweise ungenau oder fehlerhaft. Daher haben sich die Mitglieder des SC4 entschlossen, sich dem Thema „Bestimmung der Messunsicherheit bei Messprozessen“ anzunehmen und als Ergebnis die ISO Norm 225147 veröffentlicht. An der Erstellung der ISO Norm waren mehrere Länder beteiligt. In diesem Gremium SC4 hatte ich bis Anfang 2021 den Vorsitz und konnte von daher die Erstellung der Norm weitestgehend mitgestalten. Auch hatte ich bei der Erstellung der 2. Ausgabe des VDA 5 Bandes mitgearbeitet. Von daher ist sowohl die ISO 22514-7 als auch der VDA 5 Band bzgl. der Vorgehensweise, der Berechnung der erweiterten Messunsicherheit und den verwendeten Kennwerten vereinheitlicht.

Seit 2019 wird sowohl die ISO 22514-7 als auch der VDA 5 Band überarbeitet. Beide Neufassungen erscheinen in 2021. Auch bei diesen neuen Ausgaben wurden die Berechnungen zur erweiterten Messunsicherheit und der Kennwerte harmonisiert. Dabei ist der VDA 5 Band wesentlich umfassender und enthält weitere Details zur Vorgehensweise bei der Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit. Darüber hinaus sind zum besseren Verständnis mehrere Fallbeispiele enthalten, die unterschiedliche Messprozesse abbilden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit

In der Folie 3 ist schematisiert dargestellt, wie im Sinne der GUM ein Messprozess modelliert und die erweiterte Messunsicherheit berechnet werden kann. Bei jedem Messprozess wirken immer mehrere Einflusskomponenten, die die Messunsicherheit beeinflussen. Kennt man die sog. Standardunsicherheit einer Einflusskomponente, kann die erweiterte Messunsicherheit berechnet werden. Zur Bestimmung der Standardunsicherheit einer Einflusskomponente kann entweder ein Versuch (Verfahren A) durchgeführt werden oder eine theoretische Abschätzung (Verfahren B) erfolgen. Natürlich spiegelt ein Versuch die Realität in der Regel besser ab. Andererseits ist es manchmal nicht möglich Versuche durchzuführen oder diese sind zu aufwendig und damit wirtschaftlich nicht sinnvoll. Daher bedient man sich Abschätzungen, die entsprechend zu dokumentieren sind.

Die Folie 4 enthält typische Einflusskomponenten, wobei einige Komponenten gezielt dem Messsystem zugeordnet sind. Diese Aufteilung ist sinnvoll, da die erweiterte Messunsicherheit für das Messsystem relativ einfach unter idealisierten Bedingungen bestimmt werden kann und unabhängig vom Anwendungsfall allgemeingültig ist. Somit kann leicht festgestellt werde, ob ein Messsystem für eine vorgesehene Aufgabenstellung prinzipiell geeignet ist. Im realen Einsatz wirken weitere Komponenten, die als Ganzes den Messprozess darstellen. Die Auswirkung aller Komponenten führt dann zum Messergebnis Y, das aus dem angezeigten Wert y_i und der erweiterten Messunsicherheit U_{MP} besteht: $Y = y_i \pm U_{MP}$.

Im Folgenden wird nicht erläutert, wie man für die einzelnen Komponenten die jeweilige Standardunsicherheit bestimmt. Dies ist sowohl im VDA 5 Band als auch in der ISO 22514-7 detailliert beschrieben.

4.1 Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit des Messsystems

Typische Einflusskomponenten, die nur beim Messsystem betrachtet werden, sind:

- Auflösung des Messsystems
- Kalibrierunsicherheit des Normals
- Systematische Messabweichung (Bias)
- Wiederholbarkeit an einem Normal
- Linearitätsabweichung
- Ggf. weitere Komponenten

In Folie 5 ist angeben, wie aus den einzelnen Standardunsicherheiten der jeweiligen Komponenten die Standardunsicherheit des Messsystems u_{MS} bzw. die erweiterte Messunsicherheit U_{MS} berechnet wird.

Ist für eine oder mehrere Einflusskomponenten der sog. MPE-Wert (**M**aximum **P**ermissible **E**rror) bekannt, kann auch daraus die erweiterte Messunsicherheit des Messsystems U_{MS} bestimmt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4.2 Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit des Messprozesses

Da in der Regel mehrere Komponenten sich gegenseitig beeinflussen, kann man für Versuche typische Einflusskomponenten separat betrachten. Diese zusätzlichen Einflusskomponenten, die im praktischen Einsatz auf das Messsystem wirken, sind für einen Messprozess in Folie 6 tabellarisch dargestellt:

- Bedienereinfluss
- Objekteinfluss
- Vergleichbarkeit von Messsystemen
- Temperatureinfluss
- Stabilitätsverhalten über die Zeit
- Ggf. weitere Komponenten

In Folie 7 ist angeben, wie aus den einzelnen Standardunsicherheiten der jeweiligen Komponenten die Standardunsicherheit u_{MP} des Messprozesses bzw. die erweiterte Messunsicherheit U_{MP} berechnet wird.

Ist für eine oder mehrere Einflusskomponenten der sog. MPE-Wert (Maximum Permissible Error) bekannt, kann daraus ebenfalls die erweiterte Messunsicherheit des Messprozesses U_{MPE} bestimmt werden. Um unterscheiden zu können, ob die Messunsicherheit über Versuche oder anhand der MPE-Wertes bestimmt wurde, wird der Index durch ein „E“ ergänzt. Auf jeden Fall ist es sinnvoll, zu dokumentieren, auf welcher Grundlage der MPE-Wert ermittelt wurde.

4.3 Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheit und der Kennwerte

Neben der Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit hat es sich als sinnvoll erwiesen, sowohl für das Messsystem als auch den Messprozess einen Qualitätskennwert einzuführen. Bei den Kennwerten Q_{MS} bzw. Q_{MP} wird jeweils die doppelte erweiterte Messunsicherheit ins Verhältnis zur Toleranz angegeben. Überschreiten Q_{MS} den Grenzwert von 15% bzw. Q_{MP} den Grenzwert von 30%, wird das Messsystem bzw. der Messprozesse als nicht geeignet angesehen und muss verbessert werden.

In Analogie zu den Fähigkeitskennwerten, wie man diese bei der Beurteilung von Fertigungsprozessen kennt, wurde in der Ausgabe von 2021 für das Messsystem der Fähigkeitskennwert C_{MS} und für den Messprozess der Fähigkeitskennwert C_{MU} eingeführt. Deren Berechnung ist in Folie 8 enthalten.

In Folie 9 ist eine schematisierte Vorgehensweise, wie ein Messprozess zu beurteilen ist, in Form eines Flussdiagramms dargestellt.

4.4 Sonderfall: Einseitig begrenzte Merkmale

Neu wurde in der ISO 22514-7 aufgenommen, wie die erweiterte Messunsicherheit bzw. die Kennwerte bei einseitig begrenzten Merkmalen (oben oder unten) bestimmt werden kann, da in diesen Fällen keine Toleranz bekannt ist. In Folie 10 ist die Situation graphisch dargestellt und die Berechnungsformeln angegeben.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4.5 Abweichung zur GUM

Sicherlich gibt es an der einen oder anderen Stelle auch Kritikpunkte an der Bestimmungsmethodik gemäß VDA 5 Band bzw. der ISO 22514-7. Diese kommen insbesondere von Messexperten, die in erster Linie die GUM präferieren. In der GUM werden bei der Berechnung zusätzlich Sensitivitätsfaktoren berücksichtigt, die eine genaue Beurteilung zulassen. Allerdings gilt es zwischen Praktikabilität und der Theorie abzuwägen. Es hilft wenig, wenn aufgrund der Komplexität eine Beurteilung eines Messprozesses erst gar nicht durchgeführt wird. Von daher ist es besser ein einfaches Verfahren zu verwenden, auch auf die Gefahr hin, dass dieses ein nicht ganz so präzisen Ergebnisse liefert, als auf eine Untersuchung ganz zu verzichten. In der Regel führt die im VDA 5 Band bzw. der ISO 22514-7 beschriebene Vorgehensweise eher zu einer Überschätzung. Mit anderen Worten, die so bestimmte erweiterte Messunsicherheit kann größer sein als bei einer Betrachtungsweise gemäß der GUM. Damit kann man aber gut leben, da dadurch sich das Risiko einer Fehlbeurteilung sogar minimiert.

5. Unterschied zwischen ISO 22514-7 und VDA Band 5

Normen sind prinzipiell eher kurzgehalten, beschreiben den Sachverhalt im Sinne der Zielsetzung und enthalten weniger Erläuterungen. Dies ist beim VDA Band 5 anders. Darin sind viele Punkte umfassend erläutert und detaillierte Handlungsempfehlungen vorgeschlagen. Hinzu kommt, dass mit der dritten Ausgabe mit weit über 150 Seiten auch Hinweise zur Planung und zum Management von Messprozessen (s. Folie 9) enthalten sind. Was allerdings die Eignungsnachweise und die damit verbundene Vorgehensweise sowie die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit und die Kennwerte anbelangt, ist diese identisch mit der ISO 22514-7.

6. Hinweise zur MSA Measurement System Analysis

Wie einleitend erwähnt, ist als erster Leitfaden seitens der AIAG das Dokument MSA Measurement Analysis entstanden, das mittlerweile in der 4. Ausgabe publiziert ist. Konsequenterweise werden weltweit viele Eignungsnachweise basierend auf der MSA durchgeführt, zumal auch die IATF 16949 [2] bei Eignungsnachweisen von Messprozessen auf die MSA verweist.

Bei der MSA geht man davon aus, dass in erster Linie der Bediener Einfluss und die Wiederholbarkeit eine zentrale Rolle spielt. Von daher untersucht man bei Messsystemen die so genannte **R**epeatability und die **R**eproducibility. Das Ergebnis dieser Untersuchung führt zu dem Kennwert %GRR (**G**age), wonach das Messsystem beurteilt wird. Gemäß dem Leitfaden sollte dieser Wert nicht größer als 10 % sein, damit das Messsystem als geeignet beurteilt werden kann. Liegt %GRR zwischen 10 und 20 %, wird das Messsystem als bedingt einzustufen. Ist %GRR über 30 %, ist das Messsystem für den konkreten Anwendungsfall nicht geeignet.

Es ist leicht nachvollziehbar, dass aufgrund der vielen Einflussfaktoren die Bestimmung des %GRR Wertes nicht ausreichend ist. Wieso funktioniert die Beurteilung des Messsystems trotzdem? Anhand weiterer Untersuchungen muss sichergestellt werden, dass der Einfluss von anderen Komponenten (z.B. Auflösung, Unsicherheit am Normal, systematische Messabweichung, Linearität, Objekteinfluss, Temperatur, Stabilitätsabweichung usw.), die nicht in die Untersuchung einfließen, ausreichend klein sind. Ist dies nicht gegeben, werden folgende

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Untersuchungen und die Bestimmung des %GRR-Wertes erst gar nicht durchgeführt. Diese zusätzlichen Untersuchungen sind oftmals praxisfremd und werden leicht übersehen.

In der MSA wird auch immer nur von Messsystem gesprochen, obwohl es sinnvoller wäre, zwischen Messsystem und Messprozess zu unterscheiden (s. VDA 5 Band). Um trotzdem für das Messsystem eine praxisrelevante Bewertung vornehmem zu können, wird in vielen Firmenrichtlinien zunächst die Auflösung beurteilt, die kleiner als 5% der Toleranz sein muss. Anschließend werden Wiederholungsmessungen an einem kalibrierten Normal mit bekannter Unsicherheit durchgeführt. Aus diesen Messwerten können die Kennwerts C_g und C_{gk} berechnet werden. Das Messsystem ist geeignet, wenn diese Werte größer als 1,33 sind. Erst danach werden die Untersuchungen zur Bestimmung des %GRR-Wertes vorgenommen. Diese Betrachtungsweise ist in der MSA allerdings nicht enthalten.

Liegen bereits Messwerte vor, mit denen C_g, C_{gk} und %GRR Werte gemäß Firmenrichtlinien bzw. der MSA bestimmt wurden, können diese Daten verwendet werden, um für einige Einflusskomponenten die jeweilige Standardunsicherheit im Sinne des VDA 5 Bandes und der ISO 22514-7 zu berechnen. Um dann die erweiterte Messunsicherheit zu ermitteln, können die noch fehlenden Standardunsicherheiten von nicht berücksichtigten Komponenten leicht ergänzt werden.

7. Unterschiede zwischen der MSA und der ISO 22514-7 bzw. VDA Band 5

Die ISO 22514-7 bzw. der VDA 5 Band haben gegenüber dem Leitfaden MSA AIAG den großen Vorteil, dass diese sich an der GUM orientiert, die einzelnen Unsicherheitskomponenten betrachtet und diese separat ausgewiesen werden. Von daher kann jederzeit festgestellt werden, welche Komponente den größten Einfluss hat. Anhand einer Pareto Analyse kann entschieden werden, welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um den Einfluss der kritischen Komponenten zu minimieren.

Die Folien 13 und 14 weisen auf die wesentlichsten Unterschiede hin. Um Qualitätskennzahlen, wie Q_{MS}, Q_{MP}, C_{MS} oder %GRR zu bestimmen, wird entweder die berechnete erweitere Messunsicherheit U bzw. die ermittelte Streuung GRR mit einer Bezugsgröße verglichen. Bei der MSA können unterschiedliche Bezugsgrößen herangezogen werden, um den %GRR-Wert zu ermitteln. Diese sind einerseits die vorhandene Prozessstreuung, die Streuung aus der Untersuchung selbst oder die spezifizierte Toleranz des zu messenden Merkmals. Genau genommen ist nur die Merkmalstoleranz sinnvoll, da diese einerseits firmenintern eine sehr stabile Größe und andererseits zwischen Kunden und Lieferanten vereinbart ist.

Im VDA5 Band als auch in der ISO 2514-7 wird nur die Toleranz als Bezugsgröße herangezogen. Diese Vorgehensweise hat sich in der Praxis sinnvoll erwiesen. Daher werden in Firmenrichtlinien, die das Messsystem anhand von den die Kennwert C_g und C_{gk} beurteilen, ebenfalls die Toleranz als Bezugsgröße verwendet.

Voraussetzung für die Eignungsnachweise im Sinn des VDA 5 Bandes, der ISO 22514-7 und von vielen Firmenrichtlinien ist die Forderung, dass die Auflösung des Messsystems ausreichend klein ist. Als Richtwert für die Auflösung gilt maximal 5 % der Toleranz. Die MSA berechnet für die Beurteilung, ob die Auflösung ausreichend klein ist, einen ndc-Faktor, der ≤ 5 sein muss.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

8. Ausblick

Je mehr I4.0 in der Fertigung fortschreitet, umso mehr werden über Sensoren (Messprozesse) Informationen gesammelt, in Form von Dashboards visualisiert und für Beurteilung und Bewertung von Sachverhalten herangezogen. Diese Daten speisen künftig immer mehr Systeme, die mittels Verfahren der künstlichen Intelligenz (z.B. Machine oder Deep Learning), zur Regelung und Optimierung von Prozessen herangezogen werden. Valide Daten sind dafür eine grundlegende Voraussetzung.

9. Literatur

[1] A.I.A.G. – Chrysler Corp., Ford Motor Co., General Motors Corp. 2010. MSA Measurement Systems Analysis, Reference Manual. 4. Auflage, Michigan, USA

[2] IATF International Automotive Task Force, IATF 16949:2016. Anforderungen für die Lieferkette.

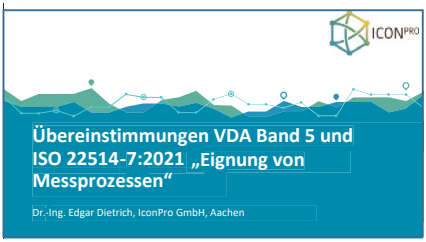
[3] ISO – International Standard Organization. 2008. ISO/IEC: Guide 98-3 (2008). Beuth Verlag, Berlin. www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/ JCGM_200_2012.pdf.

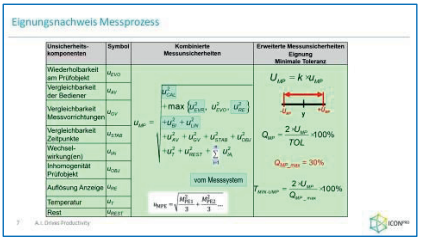
[4] ISO – International Standard Organization. 2021. ISO 22514-7: Capability and performance. Part 7: Capability of Measurement Processes, Genf.

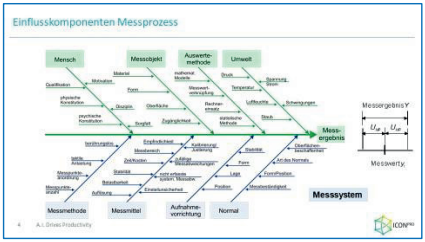
[5] VDA - Verband Deutscher Automobilindustrie. 2021. VDA Band 5, Prüfprozesseignung. VDA e.V., Berlin.

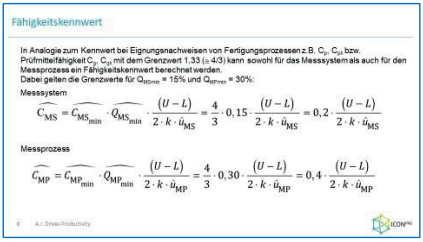
https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

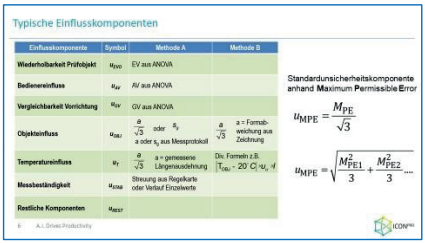
10. Anhang Folien

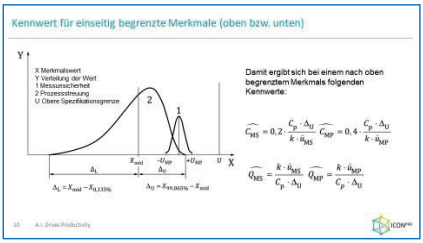


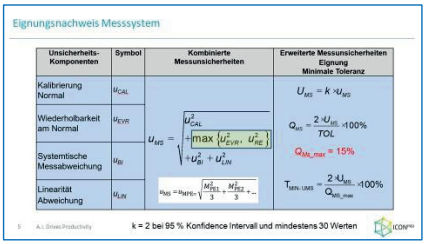


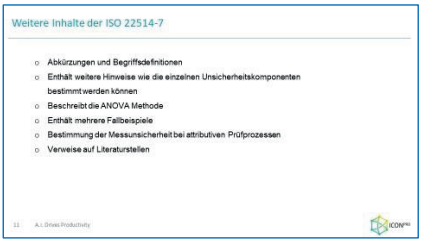




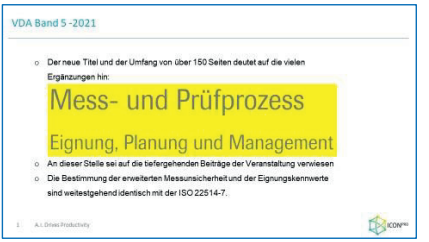


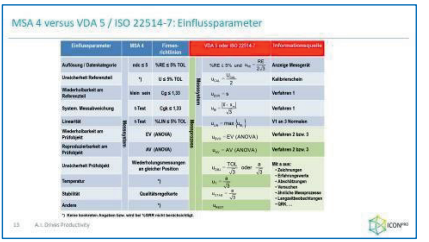


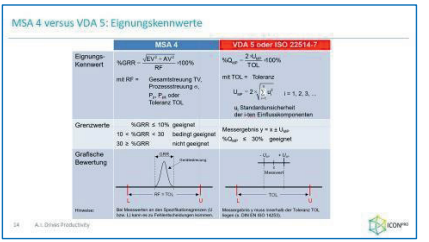




https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.







https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Schraubtechnik im Wandel
Neue Richtlinien und Aktivitäten des VDI/VDE GMA FA 3.63 bieten mehr Klarheit und Freiheiten für Anwender

Fastening technology in transition
New guidelines and activities of the VDI/VDE GMA FA 3.63 offer more clarity and freedom for users

Siegfried Herbold,
STAHLWILLE Eduard Wille GmbH & Co. KG, Wuppertal;
Markus Fischer,
SCS Concept Deutschland GmbH, Loiching/Kronwieden

Kurzfassung

Schon bereits vor 30 Jahren wurden in der Schraubtechnik Messdaten aus der Produktionssteuerung und Qualitätsanalyse aufbereitet und genutzt. Die fortgeschrittenen Möglichkeiten sowie auch Anforderungen dieser speziellen Fügetechnik machen sie auch heute für die Umsetzung von Industrie 4.0 und moderne Datenanalysemethoden zu einem überaus interessanten Anwendungsbereich.

Der VDI Fachausschuss 3.63 hat hierfür in den vergangenen Jahrzehnten wichtige, flankierende Arbeit geleistet, z.B. durch die beiden Blätter der VDI/VDE 2862 [1]. Diese befasst sich mit den Mindestanforderungen an Schraubsysteme und Prozesse in Abhängigkeit zur Relevanz der Verbindung für die Sicherheit des zu montierenden Produktes. Ein weltweit nahezu einzigartiges Richtlinienduo, welches mit dem Übertrag der DIN 25201 [2] für das Schienenfahrzeugsegment in eine Europäische Norm einen starken Partner für dieses spezielle Industriesegment bekommt.

Bei all diesen aktuell interessanten Punkten übersieht man jedoch leicht den Umstand, dass es noch große grundlegende Herausforderungen im Bereich der Metrologie von Drehmoment und Drehwinkel für die Schraubtechnik gibt. Um diese Fundamente zu festigen, arbeitet der VDI FA 3.63 nicht nur fortlaufend an der Aktualisierung weltweit etablierter technischer Regeln, sondern erweitert zielgerichtet die Reihe ihrer Regelwerke, um Anwendern in der Schraubtechnik mehr Sicherheit und Best-Practice in herausfordernden technischen Bereichen zur Verfügung zu stellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Im Folgenden werden daher eine Reihe von aktuellen Aktivitäten des VDI-Fachausschusses *„Messen und Prüfen in der Schraubtechnik“* vorgestellt, um bereits in der Erarbeitungsphase einem breiten Fachpublikum die Möglichkeit zu geben, sich bei dieser wichtigen Arbeit einzubringen bzw. ihr Feedback zu geben.

Abstract

As early as 30 years ago, measured data from production control and quality analysis were processed and used in fastening technology. The advanced possibilities as well as requirements of this special joining technology also make it an extremely interesting area of application today for the implementation of Industry 4.0 and modern data analysis methods.

The VDI Technical Committee 3.63 has done important, accompanying work for this in the past decades, e.g., through the two sheets of VDI/VDE 2862 [1], which deal with the minimum requirements for bolting systems and processes depending on the relevance of the joint for the safety of the product to be assembled. This is an almost unique duo of guidelines worldwide, which, with the transfer of DIN 25201 [2] for the rail vehicle segment into a European standard, will have a strong partner for this special industry segment.

With all these currently interesting points, however, it is easy to overlook the fact that there are still major fundamental challenges in metrology of torque and angle of rotation for fastening technology. To consolidate these foundations, VDI FA 3.63 is not only continuously working on updating globally established technical rules but is also purposefully expanding its series of rules to provide users in fastening technology with more safety and best practice in challenging technical areas.

In the following, several current activities of the VDI Technical Committee "*Measurement and Testing in Fastening Technology"* will be presented to the professional community in order to give a broad professional audience the opportunity to contribute to this important work or to give their feedback already during the development phase.

1. Überblick ausgewählter Richtlinien des VDI GMA Fachausschusses 3.63

Der Fachausschuss beschäftigt sich vornehmlich mit der Fügetechnik Schrauben. Eine Auswahl der aktuell zehn Richtlinien des FA wird im Bild 1 mit Bezug auf ihre Anwendung im zeitlichen Regime eines Produktmontage- und Servicezyklus dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

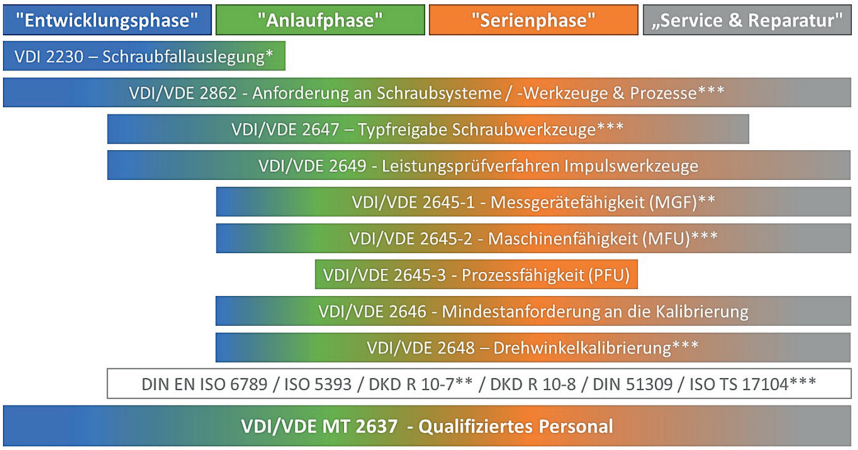


Bild 1: Darstellung einer Auswahl von Richtlinien zur Schraubtechnik entsprechend ihrer Anwendung in unterschiedlichen Produktentstehungs bzw. -lebensphasen (*Erweiterung in Arbeit, **in Arbeit, *** in Überarbeitung) (Quelle: SCS Concept Group).

Neben den ebenso im unteren Teil der Grafik dargestellten Normen aus den Bereichen der Leistungsprüf- und Kalibriernormen stellt die VDI 2230-Reihe *„Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen“* eine Ausnahme dar. Diese VDI-Richtlinie gehört aktuell noch zum eigenständigen FA 812, welcher zeitnah, sinnhafter Weise, mit dem FA 3.63 vereint wird.

Die nach der Konstruktion erfolgende bzw. damit einhergehende Risikoanalyse von Produkten und damit auch ihrer Schraubverbindungen folgt konsequenter Weise die Absicherung der Schraubprozesse über die Anwendung der VDI/VDE 2862 [1]. Dabei stellt die Richtlinie lediglich die allgemeinen Forderungen aus dem internationalen Qualitätsmanagement und den Produktsicherheitsanforderungen in den passenden Sachzusammenhang zur Schraubtechnik. Dazu beschreibt sie Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubsystemen, Werkzeugen und Prozessen. Hier wird aktuell das mehrfach über die Jahre bestätigte Blatt 1 für die Anwendung in der Automobilbranche grundlegend auf den aktuellen Stand der Technik gebracht. Darüber hinaus wird das Anwendungsfeld ausdrücklich auf alle Fahrzeuge und Systeme im zulassungsrelevanten Bereich erweitert.

Schon etwas später - man könnte sagen in der Planungsphase zwischen dem Zeitraum der Entwicklung und dem Produktionsanlauf - kommt für Anwender der Impulsschraubtechnik die

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

VDI/VDE 2649 [3] zum Tragen. Diese Richtlinie wird aktuell nicht vom Fachausschuss weiterbearbeitet oder aktualisiert, jedoch unterstützt er die wieder aufgenommene Arbeit an der ISO/TS 17104 [4]. Für diese speziellen Schraubsysteme, die dynamisch, pulsend Drehmoment in eine Schraubverbindung einbringen, beschreiben die VDI/VDE 2649 ebenso wie die ISO/TS 17104 Leistungsprüfverfahren. Für diese vergleichenden Prüfverfahren werden spezielle, nahezu reibungsstabile, Drehmoment-Vorspannkrafttester genutzt. Ziel ist es hierbei, etwaige, der vergleichenden Messung der Schraubsysteme im Wege stehenden, Reibungseinflüsse weitestgehend zu minimieren. Hervorzuheben ist, dass es für die Überprüfung des Montagedrehwinkels noch keine probate Lösung gibt. Grund hierfür ist, dass wie üblich in der Schraubtechnik die Drehwinkelmessung durch ein Drehwinkelstartmoment initiiert wird, wobei beim Impulsschrauber hinzukommt, dass dieses eben nicht kontinuierlich aufgebracht wird.

Gerade eben auch aufgrund der Betrachtung des Montagedrehwinkels nimmt die VDI/VDE 2647 *„Typprüfung von Schraubwerkzeugen – Drehmoment- und Drehmoment-/Drehwinkelprüfung“* weltweit eine Sonderstellung ein [5]. Die Richtlinie wird aktuell auch weitreichend überarbeitet. Unter anderem werden Toleranzempfehlungen sowie Prüfpunkte überarbeitet und die Zielwerte von Fähigkeitsfaktoren auf Basis weiterer VDI aber auch ISO-Normen abgeglichen, was ihre internationale Akzeptanz und Anwendungsfähigkeit weiter steigern dürfte.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass der FA 3.63 es sich zur Aufgabe gemacht hat, die international anerkannten Vorgaben zur statistischen Bewertung von Fähigkeitsnachweisen in die schraubtechnische Praxis zu überführen, um Anwendern damit deren Nutzung zu erleichtern (Siehe Bild 2).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

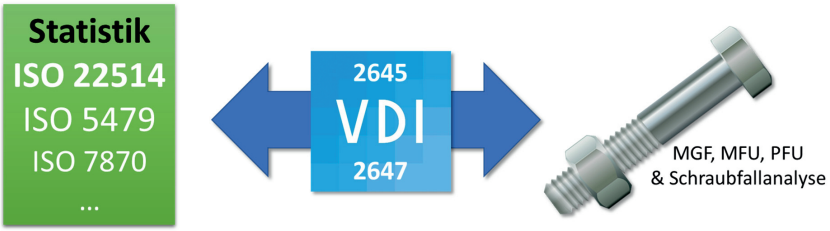


Bild 2: Die Richtlinienreihe der VDI/VDE 2645 und die VDI/VDE 2647 stellen sozusagen die Verbindung zwischen internationalen Anforderungen zu statistischen Fähigkeitsnachweisen und Methoden im Allgemeinen und der Schraubtechnik im Speziellen dar.

2. Die besondere Herausforderung der dynamischen Drehmomentmessung, die eine Winkelmessung initiiert.

Die Grundlage einer jeden Messung ist deren Verlässlichkeit. Die in der Schraubtechnik vorkommenden Größen Drehmoment und Drehwinkel lassen sich mit langjährig erprobten Verfahren gut statisch auf nationale Normale rückführen. In deren Anwendung als dynamische Messgröße ist dies allerdings nur mit vergleichsweise großen Messunsicherheiten zu bewerkstelligen. Aktuell existieren noch keine Richtlinien für dynamische Rückführungen. Darüber hinaus wird eine Drehwinkelmessung in der Schraubtechnik typischerweise durch eine Drehmomentmessung initiiert, die ihrerseits bereits eine zusammengesetzte Größe ist. All dies stellt Messunsicherheitseinflüsse dar, die schnell groß werden können.

Falls diese Abhängigkeiten nicht in Betracht gezogen werden, kann es zu systematischen Fehlern kommen, die sogar deutlich größer sind als die vorgegebenen Toleranzen.

Die Arbeitsgruppe der VDI/VDE/DKD 2648 *„Drehwinkelmessung“* [6] hat sich mit dieser Thematik intensiv befasst und die Ergebnisse auch in die Richtlinienreihe für Fähigkeitsnachweise in der Schraubtechnik (VDI/VDE 2645 Reihe) einfließen lassen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

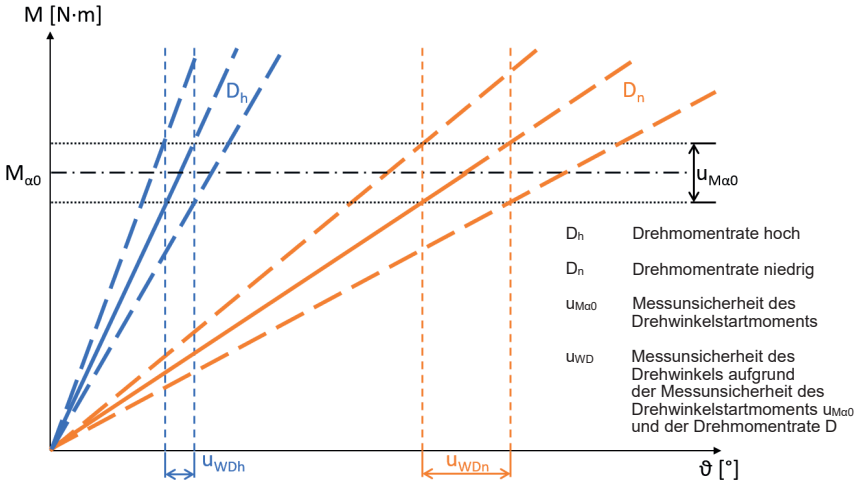


Bild 3: Schematische Darstellung der Auswirkung des Einflusses des Drehwinkelstartmoments $M_{\alpha 0}$ auf den Drehwinkel. (Quelle: SCS Concept Group).

3. Die Messsystemanalyse in der Schraubtechnik

Ein weiteres, bisher nicht geklärtes Gebiet in der Schraubtechnik ist eine Entsprechung für die Messsystemanalyse (MSA).
Die u.a. in Nordamerika verbreitete Methode der MSA kommt im europäischen Kontext nicht oft zur Anwendung. Mit dem VDA Band 5 *„Mess- und Prüfprozess – Eignung, Planung und Management“* [7] gibt es zwar einen Ansatz, die Vorgehensweise in den europäischen Kontext zu stellen. Dieser bezieht sich aber im Wesentlichen auf geometrische Größen.

Der VDI-Fachbereich *Füge- und Handhabungstechnik* möchte daher in seinem Fachbereich *Mess- und Prüfverfahren für die Schraubtechnik* diese Analyse auf die in der Schraubtechnik vorhandenen Besonderheiten erweitern und anwenden. Hierzu werden aktuell für die kommende VDI/VDE 2645-1 die notwendigen Mindestanforderungen, Prozesse und Einflussfaktoren beschrieben.

Der aktuelle VDA Band 5.2 *„Prüfprozesseignung für das Drehmoment von Schraubenverbindungen“* bleibt hinter den Anforderungen aus der Praxis – wie z.B. in der IATF 16949 gefordert – zurück, was den Bedarf einer weiteren Regelung aufzeigt [8].

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die MSA setzt voraus, dass eine Messung wie bei geometrischen Größen möglich ist, indem die Messungen mehrfach wiederholt werden können, ohne das gemessene Objekt dabei zu verändern. Bei einer Schraubverbindung ist dies nicht ohne weiteres möglich. Lediglich bei Verbindungen, die durch Längenmessung geprüft werden, ist dies eine Option.

Bei der MSA werden aus Sicht der VDI-Arbeitsgruppe 5 zur VDI/VDE 2645-1 mehrere Prozesse bereits in der Methode 1 vermischt. Dies ist für die Schraubtechnik nicht zielführend, zumal auch die Methode 2 und die weiteren Methoden der MSA hier nicht anwendbar sind. Die Anwendbarkeit für die Schraubtechnik wird mit den drei Richtlinien der VDI/VDE 2645 geschaffen. Die dabei geschaffene Trennschärfe zwischen den spezifischen Messprozessen der MFU (Blatt 2) und PFU (Blatt 3) sowie die Anwendung findenden Messgeräten (MGF), erlaubt auch eine Zuordnung zum jeweiligen Prozessschritt [9].

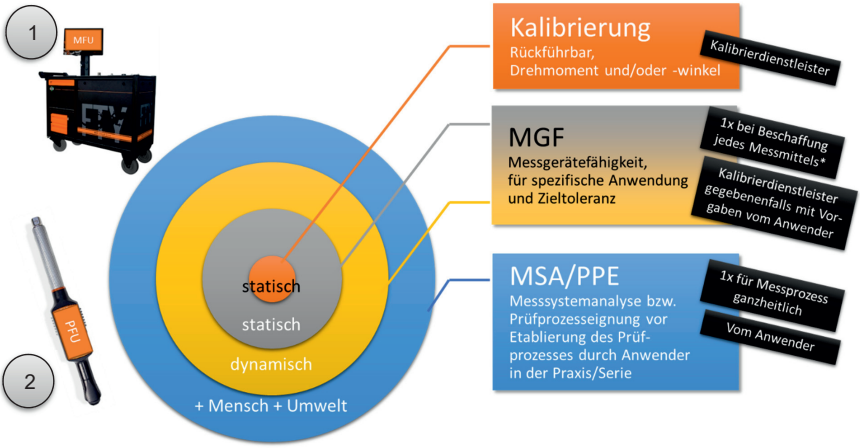
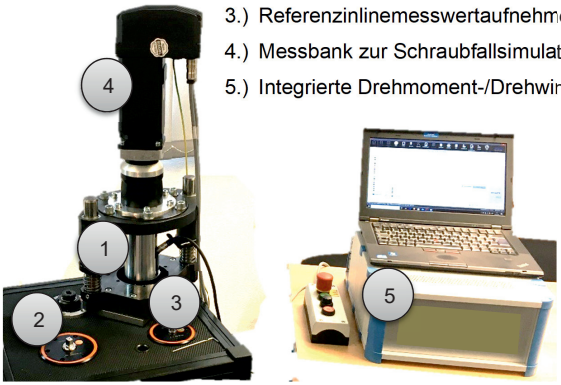


Bild 4: Visualisierung der Ebenen von der grundlegenden Kalibrierung bis hin zur Messsystemanalyse/Prüfprozesseignung in der Schraubtechnik. Dies kann z.B. angewandt werden für 1) dynamische Messbremsen im Zusammenhang mit der Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) von Schraubsystemen. Ein weiterer Anwendungsfall wäre die Ermittlung von sogenannten Weiterdrehmomenten auf Basis der Analyse von Drehmoment-Drehwinkelmessungen beim Weiterdrehen von bereits montierten Schraubverbindungen, z.B. mittels eines „Messschlüssels“, um wenige Winkelgrade im Rahmen einer Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU). (*oder bei Eingriff in die Messkette, z.B.: nach Reparatur oder Firmwareupdate) (Quelle: SCS Concept Group)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Eine der speziellen Herausforderungen ist die dynamische Messgerätefähigkeit für die drehmomentinitiierte Drehwinkelmessung. Hier liegt der Fokus aktuell auf sogenannten Messbremsen, die unterschiedlichste Drehmomentverläufe über den Drehwinkel darstellen können als Simulation von realen Schraubfällen für die allgemein geforderte schraubstellenbezogene MFU. Diese ist der Nachweis, dass das eingesetzte Schraubwerkzeug mit seiner spezifischen Parametrierung von Drehzahlrampen, Umschaltpunkten und Drehmoment/Drehwinkel Steuer- oder Überwachungsparametern auch wirklich fähig ist für den Zielschraubfall in der Produktion. Zurzeit nähert sich die AG 5 dem Thema technisch mit dem in Bild 5 dargestellten Messaufbau im Rahmen verschiedener Ringvergleiche.



3.) Referenzinlinemesswertaufnehmer Drehmoment und Drehwinkel
4.) Messbank zur Schraubfallsimulation
5.) Integrierte Drehmoment-/Drehwinkelsensorik (Prüfling)

1.) Antrieb
2.) Auswertelektronik für Referenzsystem

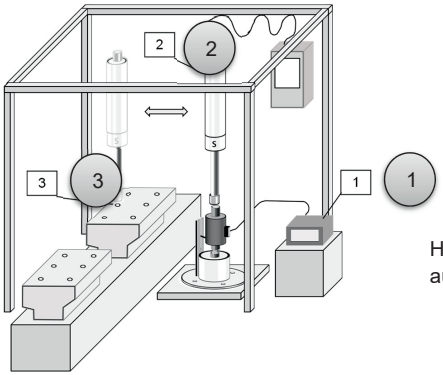
Bild 5: Messaufbau zur dynamischen Vergleichsmessung einer Drehmoment-Drehwinkel Messbremse zur Simulation von Schraubverbindungen über einen Inline-Drehmoment-Drehwinkel-Messwertaufnehmer (Unter Glocke, Punkt 1) angetrieben hier noch über einen Referenzantrieb, der später voraussichtlich durch handelsübliche, gesteuerte Schraubtechnik ersetzt werden kann. (Quelle: VDI GMA FA 3.63 AG 5, Unterausschuss „Dynamische MGF“)

4. Befähigung von Schraubsystemen zu Messmitteln

Im Bereich der PFU findet in der Schraubtechnik die sogenannte Weiterdrehmomentanalyse breite Anwendung. Dabei werden stichprobenartig bereits montierte Schrauben in der Serie mittels eines Drehmoment-Drehwinkelmesssystems, i.d.R. ein elektronischer Drehmomentschlüssel, um wenige Winkelgrade weitergedreht. Die dabei ermittelte Messkurve wird auf Basis von in der VDI/VDE 2645-3 beschriebenen Auswertemethoden analysiert und

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

somit das sogenannte Weiterdrehmoment ermittelt. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad ist eine händische Messung kaum noch möglich bzw. nicht wirtschaftlich. Dem soll mit kombinierten Schraub- und Messspindeln mit Drehmoment/Drehwinkel-Sensorik Rechnung getragen werden. Auf diese Art und Weise soll automatisches Verschrauben und anschließendes Messen in einer Montagestation oder mit einem handgeführten kombinierten Mess- und Schraubsystem (Anwender hat keine taktile Rückmeldung z.B. über das Drehmoment) ermöglicht werden (Beispiel für mögliche Umsetzung siehe Bild 6). In der VDI/VDE 2645-1 werden interessierte Anwender Hilfestellung erhalten, welche Grundvoraussetzungen entsprechende Systeme erfüllen und wie Anwender diese final für die PFU befähigen müssen.



1.) Schraubfallsimulator mit Sensor für Drehmoment und Drehwinkel

2.) Mess-/ Schraubspindel mit Steuerung

3.) Prüfstelle bzw. Werkstück

Hinweis: Punkt 1 u. 2 werden in der Praxis auch als Gegenmesseinrichtung bezeichnet

Bild 6: Kombinierte Schraub- und Messspindel mit Drehmoment/Drehwinkel-Sensorik zum automatischen Messen und Verschrauben in einer Station oder mit einem handgeführten Mess-/Schraubsystem als eine automatisierte Form der PFU wie sie in der kommenden VDI/VDE 2645-1 beschreiben wird.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Abschluss/Ausblick

Eine Aufgabe, die nicht direkt mit der Erarbeitung von Richtlinien zu tun hat, ist die Erstellung eines Fachglossars für die Schraubtechnik in deutscher und Englischer Sprache. Hier steht der Fachausschuss nach drei Jahren Arbeit zwar noch am Anfang, er wird jedoch in naher Zukunft die bisherige Arbeit veröffentlichen, um Anwender u.a. gerade im Bereich der Softwareentwicklung zu unterstützen. Dieses Glossar wird kostenfrei auf dem Internetauftritt des VDI abrufbar sein und in unregelmäßigen Abständen aktualisiert und erweitert werden. Eine Arbeit, die wohl noch viele Jahre in Anspruch nehmen wird, aber von enormer Wichtigkeit ist.

Darüber hinaus steckt in der vermeintlich bereits abgeschlossenen Metrologie zu Drehmoment und Drehwinkel, gerade auch für den Bereich der Schraubtechnik, noch viel Aufbereitungs- und Klärungsbedarf. Der VDI GMA Fachausschuss Messen und Prüfen in der Schraubtechnik wird sich dieser Aufgabe weiter widmen und freut sich hierzu immer über fachlichen Austausch mit interessierten Fachleuten.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur:

[1] N.N.: VDI/VDE 2862 Blatt 1, Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubsystemen und -werkzeugen - Anwendungen in der Automobilindustrie, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012
N.N.: VDI/VDE 2862 Blatt 2, Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubsystemen und -werkzeugen - Anwendungen im Anlagen-, Maschinen- und Apparatebau sowie für Flanschverbindungen an drucktragenden Bauteilen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015

[2] N.N.: DIN 25201, Konstruktionsrichtlinie für Schienenfahrzeuge und deren Komponenten - Schraubenverbindungen - Teil 7: Montage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004

[3] N.N.: VDI/VDE 2649, Drehende Werkzeuge für Verbindungen mit Schraubgewinde - Anweisungen zur vergleichenden Leistungsmessung von hydraulischen Impulsschraubern, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011

[4] N.N.: ISO/TS 17104, Drehwerkzeug für Schraubverbindungen - Hydraulischer Impulswerkzeuge – Leistungstestverfahren, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006

[5] N.N.: VDI/VDE 2647, Typprüfung von Schraubwerkzeugen - Drehmoment- und Drehmoment-/Drehwinkelprüfung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013

[6] N.N.: VDI/VDE 2648 Blatt 1, Sensoren und Messsysteme für die Drehwinkelmessung - Anweisungen für die rückführbare Kalibrierung - Direkt messende Drehwinkelmesssysteme, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
N.N.: VDI/VDE 2648 Blatt 2, Sensoren und Messsysteme für die Drehwinkelmessung - Anweisungen für die rückführbare Kalibrierung - Indirekt messende Drehwinkelmesssysteme, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007

[7] N.N.: VDA Band 5, Mess- und Prüfprozesse - Eignung, Planung und Management, 3. überarbeitete Auflage, Qualitäts Management Center im Verband der Automobilindustrie e.V., Berlin, 2021

[8] N.N.: VDA Band 5.2, Prüfprozesseignung für das Drehmoment von Schraubenverbindungen, Qualitäts Management Center im Verband der Automobilindustrie e.V., Berlin, 2013

[9] N.N.: VDI/VDE 2645 Blatt 2, Fähigkeitsuntersuchung von Maschinen der Schraubtechnik - Maschinenfähigkeitsuntersuchung – MFU, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014
N.N.: VDI/VDE 2645 Blatt 3, Fähigkeitsuntersuchung von Maschinen der Schraubtechnik - Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU), Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Risikobasierte Ansatz zur Absicherung von Prüfprozessen in der Medizintechnik

Dipl.-Wirt.-Ing (FH) **Mike M. Pfeiffer**, Karl Storz SE & Co. KG, Tuttlingen

Kurzfassung

In diesen Beitrag wird beschrieben, wie der risikobasierte Ansatz der VDI/VDE 2600 Blatt 1: 2013-10 zur Absicherung der Prüfprozesse in der Medizintechnik umgesetzt werden kann. Dabei wird auf die unterschiedliche Risikoklassifizierung von Medizinprodukten in der EU und den USA eingegangen, sowie die Prüfprozesseignung an einem Praxisbeispiel durchgeführt.

Abstract

This article describes how the risk-based approach of VDI/VDE 2600 Part 1: 2013-10 can be implemented to safeguard testing processes in the medical device industry. The different risk classification of medical devices in the EU and the USA is discussed and the capability of the test processes is carried out using a practical example.

Einleitung

In der Medizintechnik werden hohe Anforderungen an die Produkte und Prozesse gestellt. Dieses beinhaltet auch ein gut aufgestelltes Qualitätsmanagementsystem. Die Anforderungen hierfür ergeben sich im allgemeinen aus der DIN EN ISO 9001: 2015-11 „Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen“ und spezifisch aus der DIN EN ISO 13485: 2016-08 „Medizinprodukte – Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen für regulatorische Zwecke“, sowie regulatorisch aus der Verordnung (EU) 2017/745 „Medical Device Regulation“ und der FDA 21 CFR Part 820 „Quality System Regulation“. Eine der gemeinsamen Anforderungen ist, dass die Konformität der erstellten Produkte und Dienstleistungen sichergestellt und hierfür geeignete Überwachungs- und Messtätigkeiten vorhanden sind. Anlagen und Geräte müssen dokumentiert, qualifiziert und die hinterlegten Prozesse sowie Methoden validiert sein. Daraus wird auch ein Prozess benötigt, welcher die Eignung der Prüfprozesse sicherstellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Gliederung VDI/VDE 2600 Blatt 1: 2013-10

Als Grundlage für die risikobasierte Prüfprozesseignung dient die VDI/VDE 2600 Blatt 1: 2013-10 Prüfprozessmanagement. Vom Ablauf gliedert diese sich in die folgenden Schritte:

- Schritt 1: Identifizierung
- Schritt 2: Risikoklassifizierung
- Schritt 3: Methodenauswahl
- Schritt 4: Ermittlung der Messunsicherheit
- Schritt 5: Wahl U/T (Eignungsgrenzwert)
- Schritt 6: Eignungsnachweiß
- Schritt 7: Berücksichtigung Messunsicherheit

Hierbei sind die Schritte an die spezifischen Anforderungen des Unternehmens und des hinterlegten QM-Systems anzupassen. Der Schritt der Risikoklassifizierung bekommt dabei eine besondere Bedeutung. Denn aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ist eine vollumfängliche Qualifizierung von allen im Unternehmen vorhandenen Prüfprozessen mit wiederum allen zugeordneten Prüfmerkmalen nicht realisierbar. Nur eine Risikoklassifizierung schafft Abhilfe.

2. Risikoklassifizierung

Die DIN EN ISO 14971:2020-07 „Medizinprodukte – Anwendung des Risikomanagements auf Medizinprodukte“ umfasst das Risiko als die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens und den Auswirkungen dieses Schadens. Für die Risikoklassifizierung der Prüfprozesseignung wird dies leicht abgewandelt in die Eintrittswahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Prüfentscheids und dessen Folgen. Zur Ermittlung dieser Faktoren wird ein Risikomanagement empfohlen. Dieses sollte mindestens aus den Schritten Risikoanalyse, Risikobewertung und Risikobeherrschung bestehen.

Für die Risikoanalyse werden in der VDI/VDE 2600 Blatt 1: 2013-10 zu den Folgen eines fehlerhaften Prüfentscheids 3 Risikostufen benannt. Auch der VDA Band 5: 2021-07 orientiert sich mit Beispielen an diesen 3 Stufen. Der Focus liegt jedoch sehr stark auf dem Produktrisiko und möglichen Funktionsstörungen. Verletzungen von Personen finden keine genauere Unterteilung, sondern sind komplett in „Gefahr für Leib und Leben“ zusammengefasst. In der Medizintechnik wir hier jedoch stärker auf diese Risiken, dem Patientenrisiko, eingegangen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 1: Vergleich Folgen eines fehlerhaften Prüfentscheids

	VDI/VDE 2600 Blatt 1: 2013-10	VDA Band 5: 2021-07
Folge H (hoch)	Eine Fehlentscheidung führt zu einer Gefahr für Leib und Leben, Umwelt oder Nichterfüllung von gesetzlichen Vorgaben bzw. es entstehen hohe interne und externe Folgekosten.	Eine Fehlentscheidung führt zu - einer Gefahr für Leib und Leben - einer Gefahr für die Umwelt - eine Nichterfüllung von zulassungsrelevanten, gesetzlichen und behördlichen Vorgaben - einer Nichterfüllung der Konformität (Produkteigenschaft) im Auslieferungszustand - einer Kundenrelevanten Funktionsstörung des Produktes - hohen internen und externen Folgekosten
Folge M (mittel)	Eine Fehlentscheidung führt zu einer Funktionsstörung des Produkts, zu Prozess-störungen bzw. zu überschaubaren internen Folgekosten.	Eine Fehlentscheidung führt zu - einer intern erkennbaren Funktionsstörung des Produktes - behebbaren Prozessstörungen - überschaubaren Folgekosten
Folge G (gering)	Eine Fehlentscheidung führt zu Einschränkungen in der wahrgenommenen Produktqualität bzw. zu geringen internen Folgekosten.	Eine Fehlentscheidung führt zu - keine Abweichung von den Spezifikationen (z.B. Messungen, welche nicht zum Nachweis der Konformität dienen) - keiner Freigabe von Produkten (z.B. im Rahmen von Tests) - geringen Folgekosten

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Risikoklassifizierung von Medizinprodukten EU

Mit dem in Kraftretten der EU-Verordnung 2017/745 „Medical Device Regulation“ müssen Medizinprodukte, für den Verkauf in der EU, festen Risikoklassen zugeordnet werden. Die Klassifizierung und deren Regeln sind dabei in Anhang VIII der Verordnung beschrieben. Ausschlaggebend ist dabei immer die Zweckbestimmung des Medizinproduktes.

Tabelle 2: Vergleich EU-Risikoklassen

Klasse I	Klasse IIa	Klasse IIb	Klasse III
Geringes Risiko	Mittleres Risiko	Erhöhtes Risiko	Hohes Risiko
Nicht-invasiv	Invasiv oder nicht-invasiv zur kurzfristigen Anwendung	Implantierbar und/oder invasiv zur langzeitigen Anwendung	Implantierbar und/oder hochinvasiv zur langfristigen Anwendung
Beispiele: Lesebrille, Rollstühle, Stützstrümpfe, Verbandmittel	Beispiele: Einmalspritzen, Ultraschall, Röntgenfilm	Beispiele: Beatmungsgeräte, Defibrillatoren, Infusionspumpen	Beispiele: Herzkatheter, Stenz, Künstliche Gelenke, Implantate

4. Risikoklassifizierung von Medizinprodukten USA

In den USA erfolgt die Risikoklassifizierung von Medizinprodukten aufgrund der Anforderungen durch die FDA (Food and Drug Adminstration). Diese Anforderungen sind in sogenannten CFR‘s (Code of Federal Regulations) beschrieben (z.B. FDA 21 CFR xxx). Jedes Medizinprodukt ist dabei einer von 3 Klassen zuzuordnen. Die Zuordnung erfolgt dabei dem „Verwendungszweck“ (intendet use) und dem „Anwendungsgebiet“ (indication for use). Zu beachten ist, dass ein und dasselbe Medizinprodukt mit gleichen Anwendungszweck, jedoch unterschiedlichen Anwendungsgebieten, in verschiedene Klassen eingeteilt sein kann.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Vergleich Risikoklassifizierung EU / USA

Tabelle 3: Vergleich Risikoklassifizierung EU / USA

	EU (MDR)	USA (FDA)
Klassifikation	Ein Medizinprodukt wird nach einer Reihe von risikobasierten Regeln klassifiziert.	Ein Medizinprodukt wird klassifiziert nach seinem Verwendungszweck und Anwendungsgebiet.
Festlegung von Sicherheits- und Wirksamkeitskriterien	Nachweis der Einhaltung wesentlicher Anforderungen (MDA Anhang I).	Nachweis der substanziellen Gleichwertigkeit mit einem bestehenden Medizin-produkt.
Sicherheits- und Wirksamkeitsnachweise	Die Prüfung basiert auf der Liste der anwendbaren Normen, welche den aktuellen Stand der Technik darstellen, sowie auf der Anwendung klinischer Bewertungen.	Es wird anhand stichhaltiger wissenschaftlicher Beweise nachgewiesen, dass das neue Medizinprodukt die gleiche klinische Leistung hat wie das vorherige Produkt.
Medizinprodukte Freigabeprozess	Selbstzertifizierung für Medizinprodukte Klasse I, IIa und IIb. Überprüfung der technischen Unterlagen zu den bei Prüfungen (Audits) erforderlichen Stichproben. Überprüfung durch „Benannte Stelle“ (Notified Body) und Genehmigungen für Klasse III Medizinprodukte.	FDA Überprüfungen und Genehmigungen.

6. Klassifizierung Folgen fehlerhafter Prüfentscheide

Es ist ersichtlich, dass Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen in der Medizintechnik eine reine 3 stufige Klassifizierung (siehe Kapitel 2) für die Folgen eines fehlerhaften Prüfentscheidung nicht ausreicht. Um alle Fälle zu berücksichtigen, empfiehlt sich daher eine 5 stufige Aufteilung.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 4: Folgen fehlerhafter Prüfentscheids

Stufe	Risiko-Bezeichnung	Patientenrisiko
1	Niedrig	Keine Verletzung Unannehmlichkeiten, Belästigung. Keine Schädigung von Patienten, Anwendern oder Dritten, z. B. keine oder vernachlässigbare Verletzungen, z.B. Kopf-schmerzen.
2	Gering	Geringfügige Verletzung Geringfügige und vorübergehende Verletzungen des Patienten, Anwenders oder Dritter, die keinen invasiven medizinischen Eingriff erfordern, z.B. leichte Verletzungen, Schnittwunden, Muskelschmerzen.
3	Mittel	Mittelschwere Verletzung Mäßige und vorübergehende, nicht lebensbedrohliche Verletzungen des Patienten, des Anwenders oder Dritten, die einen fachgerechten medizinischen Eingriff erfordern, z. B. mittelschwere Verletzung, Knochenbruch, verlängerte Operationsverzögerung, Gewebereaktion, allergische Reaktion, starke Schmerzen. Kann einen medizinischen Eingriff erfordern, einschließlich zusätzlicher oder verlängerter Krankenhausaufenthalte.
4	Hoch	Schwerwiegende Verletzung Schwere und/oder dauerhafte Beeinträchtigung einer Körperfunktion, dauerhafte Schädigung einer Körperstruktur oder lebensbedrohliche Verletzung des Patienten, des Anwenders oder Dritter Dritten mit notwendiger medizinischer Intervention, Nervenverletzung, schwere Verletzung, Unterbrechung einer Operation, Revision, elektrischer Schlag (Netzspannung).
5	Sehr Hoch	Tod Tod des Patienten, Anwenders oder Dritter verursacht oder Tod bereits eingetreten.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

7. Klassifizierung Eintrittswahrscheinlichkeit fehlerhafter Prüfentscheide

Neben den Folgen eines fehlerhaften Prüfentscheides gibt es dessen Eintrittswahrscheinlichkeit. Die VDI/VDE 2600-1: 2013-10 benennt diesen Sachverhalt, geht aber nicht tiefer darauf ein. Im VDA Band 05: 2017-07 ist hierfür, ebenso wie bei den Folgen, eine 3 stufige Unterscheidung vorgenommen. Ähnlich wie bei den Folgen empfiehlt sich für eine Risikoanalyse eine größere Unterteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit. In Tabelle 5 ist hierzu eine passende Klassifizierung dargestellt.

Tabelle 5: Wahrscheinlichkeit fehlerhafter Prüfentscheide

Stufe	Eintrittswahrscheinlichkeit	Quantitativ
1	Unwahrscheinliches Auftreten	Weniger als 0,002%
2	Geringes Auftreten	Zwischen 0,002% und 0,02%
3	Gelegentliches Auftreten	Zwischen 0,02% und 0,2%
4	Wahrscheinliches Auftreten	Zwischen 0,2% und 1%
5	Häufiges Auftreten	Mehr als 1%

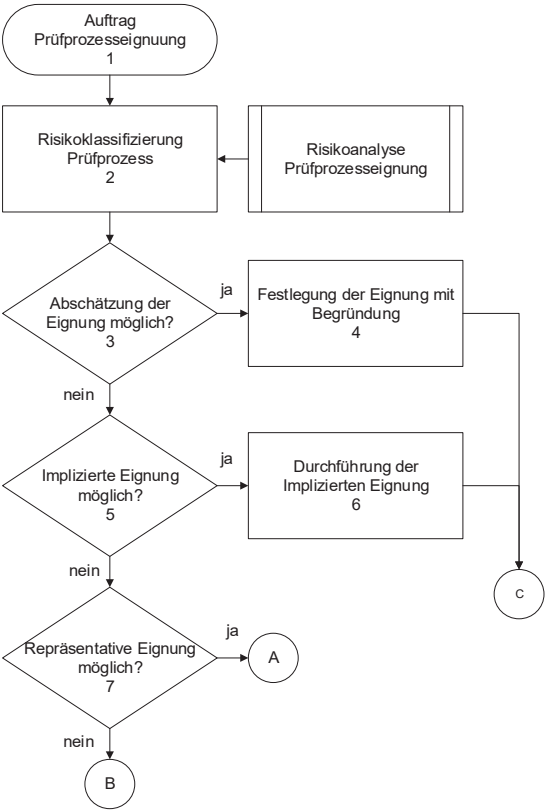
8. Umsetzung Prozess

Zur praktischen Umsetzung und Einführung der risikobasierte Prüfprozesseignung ist in der Medizintechnik zuallererst ein passender Prozess zu definieren. Exemplarisch kann dieser Prozess wie folgt beschrieben werden.

Beginn ist der Auftrag für eine Prüfprozesseignung. Der Auslöser hierfür kann z.B. die Anschaffung eines neuen Mess-/Prüfmittels oder die Erstellung eines neuen Prüfplans sein. Ist ein Auftrag erstellt, beginnt der Prüfprozessverantwortliche mit der Risikoklassifizierung. Auf Basis der Risikoabschätzung wird geprüft, ob für Prüfprozesse mit geringen o. mittleren Risiko eine Abschätzung der Eignung möglich ist (ein hohes Risiko empfiehlt immer einen Einzelnachweis). Wenn JA kann mit dieser fortgefahren werden. Bei Nein, ist zu prüfen ob eine Implizierte Eignung möglich ist. Hier findet ebenfalls eine Prüfung auf Durchführbarkeit statt. Ermittelt werden kann dies z.B. mit einem Entscheidungsbaum. So ist auch zu einem späteren Zeitpunkt nachvollziehbar, wie es zu den Entscheidungen gekommen ist. Ist eine Implizierte Eignung möglich, wird mit dieser fortgeführt. Bei Nein geht es zur Entscheidung für die Repräsentative Eignung. Ist eine Repräsentative Eignung prinzipiell möglich, ist zu klären, ob ein Parameterraum bereits vorhanden und geeignet ist. Ist dies nicht der Fall, ist dieser zu definieren und auf Anwendbarkeit zu untersuchen. Dies kann z.B. mit diversen statistischen Methoden erfolgen. Zulässige Methoden sollten in einem separaten Dokument beschrieben

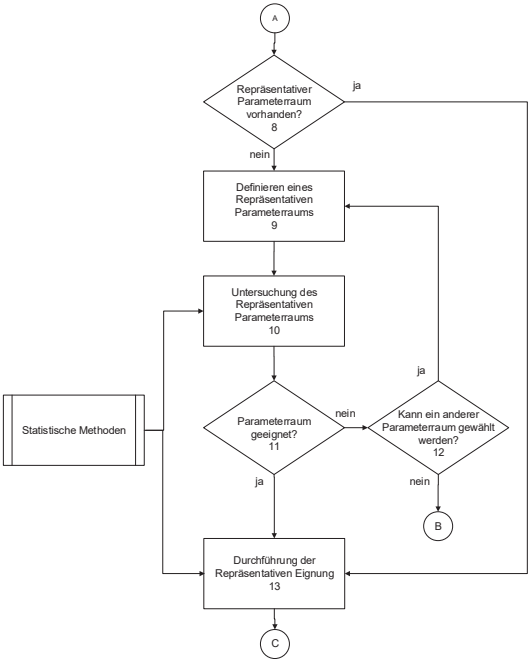
https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

sein. Ergibt die Prüfung des Parameterraumes, dass dieser nicht geeignet ist, ist ein anderer zu wählen (und zu nochmals zu untersuchen) oder mit einem Einzelnachweiß fortführen. Die Durchführung eines Einzelnachweises sollte in Abhängigkeit der Risikoklassifizierung erfolgen. So sind statistische Methoden den Risikoklassen zuzuordnen. Am Ende der Durchführung der Eignungsprüfung (Abschätzung, Impliziert, Repräsentativ oder Einzelnachweiß) ist festzustellen ob der Prüfprozess für den Zweck geeignet ist. Möglichkeiten zum Umgang mit nicht geeigneten Prüfprozessen sind in der VDI/VDE 2600-1: 2013-10 und dem VDA Band 5: 2021-07 beschrieben. Geeignete Prüfprozesse sind mit einer freigegebenen Eignung, einer Risikoabschätzung, einen Entscheidungsbaum und gegeben falls der statistischen Untersuchungen zu dokumentieren.

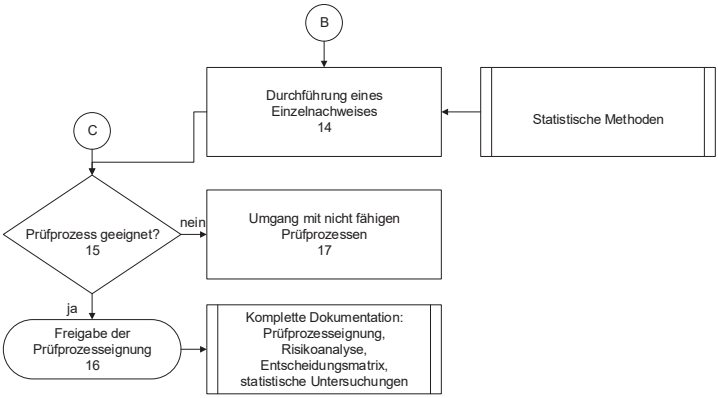


Ablaufdiagramm 1: Prüfprozesseignung Teil 1

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.



Ablaufdiagramm 2: Prüfprozesseignung Teil 2



Ablaufdiagramm 3: Prüfprozesseignung Teil 3

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

9. Beispiel Objektivfassung

Die Firma Karl Storz ist Spezialist in der Herstellung von Endoskopen. Im vorderen Verlauf dieser befinden sich sogenannte Objektivfassungen. In diesen werden die einzelnen Optikelemente (Linsen etc.) verbaut. Aufgrund der großen Produktvielfalt gibt es bei Karl Storz weit über 300 verschiedene Varianten dieser Objektivfassungen. Unterschiede sind dabei z.B. Länge, Durchmesser, Öffnungswinkel. Ein wichtiges Merkmal der Objektivfassungen ist der Innendurchmesser. Kleine Innendurchmesser liegen z.B. bei 1,78mm mit Toleranzen von 10µm. Gleichwohl handelt es sich bei den Objektivfassungen um preisgünstige Bauteile externer Lieferanten.

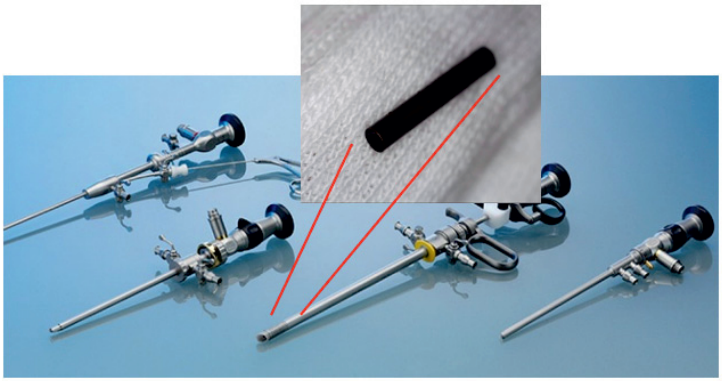
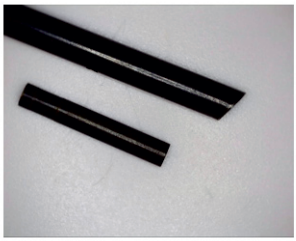
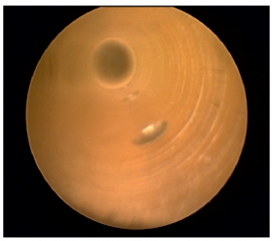


Bild 1: Endoskope mit Objektivfassung





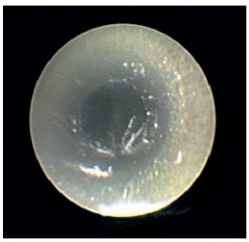


Bild 2: Vergleich Durchmesser und Öffnungswinkel

Bild 3: Innenansicht Objektivfassung innere Gradbildung

Bild 4: Innenansicht Objektivfassung innere Verschmutzung

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Prüfaufgabe:
In der Wareneingangsprüfung sind die Innendurchmesser der Objektivfassungen mit Stichprobenprüfung auf Konformität zu prüfen, da eine Passgenauigkeit mit den Objektivelementen benötigt wird.

Besonderheiten:

- Prüfung des Innendurchmessers über die vorgegebene Länge
- Kleine Toleranzen von 10µm
- Schwer zu erreichende Messtellen
- Benötigte Formstabilität (Trichterbildung, Wölbungen, Quetschungen etc.)
- Verschmutzungen (Hautpartikel, Öl etc.)
- Ergebnisse stark Prüferabhängig (subjektives Empfinden von Schwergängigkeit)
- Geringe Stückzahlen
- Preisgünstige Zukaufteile (Objektivelemente dagegen teuer)

Spezifikationen:
Merkmalsart = Durchmesser Ø
Nennmaß = 1,78mm
OSG = 1,78mm; USG = 1,77mm
Prüfmittel = Prüfstift Toleranzklasse I, Ø 1,78mm +/-1µm

Risikobewertung:
Folgen eines fehlerhaften Prüfentscheids:
Die Objektivfassungen werden zu 100% vor dem Zusammenbau auf Passgenauigkeit mit den Objektivelementen geprüft. Sollte eine Passung von Innendurchmesser Objektivfassung zu Außendurchmesser Objektive nicht gegeben sein, wird die Objektivfassung als nicht konformes Bauteil betrachtet (selbst wenn dieses die eigentlichen Spezifikationen einhalten würde). Wirtschaftlich ist kosteneffizienter eine i.O. Fassung zu verschrotten, als eine passende Fassung für die einzelnen Objektive zu suchen oder gar diese zu beschädigen. Hierdurch kommt es zu einem hohen Mehrbedarf von ca. 10% der Objektivfassungen. Da es sich um verhältnismäßig günstige Bauteile handelt, sind die Mehrkosten überschaubar. Die Einführung alternativer Prüfverfahren könnten einen Mehrbedarf nur reduzieren, jedoch nicht generell vermeiden und würde in keinem Verhältnis der Prüfkosten stehen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ein Patientenrisiko besteht nicht, da eine nicht Konformität des Innendurchmessers im weiteren Produktionsprozess (Passung mit Objektiven) sicher festgestellt wird (da nicht verbaut werden kann). Des Weiteren wird jedes Endoskop vor Auslieferung zu 100% auf Funktionalität geprüft.
Die geringen Teilekosten der Objektivfassungen und der kalkulierbare Mehrbedarf, sowie das Nichtbestehen eines Patientenrisikos führt zu „geringe Folgen“ eines fehlerhaften Prüfentscheids.

Eintrittswahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Prüfentscheids
Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Prüfentscheids wird mit größer als 1% und damit als „häufiges Auftreten“ abgeschätzt. Ursache für diese Häufigkeit ist, dass die Unsicherheit des Prüfstiftes im Verhältnis zur Merkmalstoleranz recht groß ist und die Prüfprozesseinflüsse (Prüfer und Objekt) weitere große Unsicherheiten darstellen.

Risikoabschätzung
Die „geringen Folgen“ und die „hohe Eintrittswahrscheinlichkeit“ ergeben ein mittleres (aber beherrschbares) Gesamtrisiko für den Prüfprozess.

13. Literaturangaben

[1] DIN EN ISO 9001:2015-11 *Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen*
[2] DIN EN ISO 13485:2016-08 *Medizinprodukte – Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen für regulatorische Zwecke*
[3] DIN EN ISO 14971:2020-07 *Medizinprodukte – Anwendung des Risikomanagements auf Medizinprodukte*
[4] VDI/VDE 2600-1:2013-10 *Prüfprozessmanagement - Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozess*en
[5] VDA Band 05:2021-07 *Mess- u. Prüfprozesse, VDA-QMC*
[6] MSA: 2010-06 *Measurement System Analysis, AIAG*
[7] Taylor, Wayne (2017) *Statistical Procedures for the Medical Device Industry. Taylor Enterprises, Inc.,* www.variation.com
[8] (EU) 749/2017 *Medical Device Regulation – MDR*
[9] FDA – *U.S. Food & Drug Administration,* https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-H

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Festlegung von Prüffristen in der Praxis

Dipl.-Phys. **Rogér Ernst**, Ernst Quality Consulting, Stuttgart

Kurzfassung

Immer wieder gibt es Diskussionen, welche Prüffrist oder Kalibrierintervall für ein Prüfmittel angemessen ist. Dabei existieren nur in einzelnen Fällen verlässliche Daten und Empfehlungen für die Festlegung der Kalibrierintervalle. Je nachdem, welche Person gefragt wird, erhält man stark divergierende Aussagen, die oft von wirtschaftlichen Aspekten geprägt und damit aus metrologischer Sicht nur begrenzt brauchbar sind. Der vorliegende Aufsatz stellt die unterschiedlichen Ansätze aus den verschiedenen Quellen vor. Ihre Eigenschaften und Ihre Vor- und Nachteile in der Praxis werden zusammengetragen und diskutiert.

1. Situation

Die Grundnorm zum Qualitätsmanagementsystem, DIN EN ISO 9001 [1] stellt in dem Kapitel 7.1.5.2 a) eine klare und deutliche Anforderung an den Eigentümer bzw. Anwender eines Messmittels: „Wenn die messtechnische Rückführbarkeit eine Anforderung darstellt oder von der Organisation als wesentlicher Beitrag zur Schaffung von Vertrauen in die Gültigkeit der Messergebnisse angesehen wird, muss das Messmittel a) in bestimmten Abständen oder vor der Anwendung gegen Normale kalibriert oder verifiziert oder beides werden, die auf international oder nationale Normale rückgeführt sind; …".

In der DIN EN ISO 10012:2004 [2] wird in Kapitel 7.1.2 „Intervalle der metrologischen Bestätigung" gefordert, das die für die Festlegung oder die Änderung der Intervalle zwischen den metrologischen Bestätigungen verwendeten Methoden in dokumentierten Verfahren beschrieben werden müssen. Diese Intervalle müssen überprüft und ggf. angepasst werden, um die fortgesetzte Übereinstimmung mit den festgelegten metrologischen Anforderungen sicherzustellen. In der ergänzenden Anleitung wird dazu auf die ILAC-G24/OIML D 10 [3] verwiesen. Zum Schluss fordert die Norm, dass bei jeder Reparatur, Justage oder Veränderung eines Prüfmittels das Intervall für die metrologische Bestätigung bewertet werden muss. Das Kapitel 7.3.4 „Zeitpunkte und Intervalle für Prüfung und Kalibrierung" in der dritten, rein deutschen Norm zur Prüfmittelüberwachung, DIN 32937:2018 [4] beinhaltet:

Die Prüfung (Zustand, Funktion und Merkmal) erfolgt nach Bedarf oder festgelegten Intervallen. Das Intervall wird nach unterschiedlichen Kriterien festgelegt, z. B. in Form einer Zeitspanne (Monate, Jahre) oder der mit dem Prüfmittel geprüften Anzahl von Produkten.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Es muss sichergestellt sein, dass die Prüfung vor dem Überschreiten der Fehlergrenzen durchgeführt wird. Aus Protokollen und Statistiken der laufenden Prüfmittelüberwachung kann sich eine Änderung des Prüfintervalls ergeben. Es sollte unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen und messtechnischen Gesichtspunkten festgelegt werden.

2. Definition des Kalibrierintervalls

Das Kalibrierintervall ist ein festgelegter, üblicherweise zeitlicher Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kalibrierungen eines Prüfmittels [6]. Hier ist nicht explizit nur von einem Zeitintervall die Rede, so dass durchaus auch die „Anzahl der Benutzungen“ ein Kriterium darstellen kann [4]. Allgemein verbindliche Festlegungen über den Zeitpunkt einer Rekalibrierung bestehen nicht. Im Einzelfall gibt es durchaus Vorgaben und Festlegungen von Kalibrierfristen, wie nachfolgende Tabelle 1 zusammenfasst.

Prüfmittel	Dokument	Intervall
Härtevergleichsplatte	Vickers: ISO 6507-3:2018 Rockwell: ISO 6508-3:2015 Brinell: ISO 6506-3:2015 Knoop: ISO 4545-3:2018 Leeb: ISO 16859-3:2016	Zweijährlich
Drehmoment-Schraubwerkzeuge	DIN EN ISO 6789-2:2017	... je nachdem, welcher Wert zuerst erreicht wird, entweder eine Gebrauchsdauer von 12 Monaten oder die Absolvierung von 5000 Lastwechseln als Vorgabewert für das Kalibrierungsintervall angesetzt werden.
Drehmomentmessgerät für statische Drehmomentkalibrierung	DIN 51309:2005	Maximal 26 Monate
Personendosimeter, jederzeit ablesbar	DIN 25425-4:2019-12	Alle zwei oder alle sechs Jahre mit Kontrolleinrichtung der Gerätehersteller gemäß Baumusterprüfung
Dosis- bzw. Dosisleistungsmessgeräte	DIN 25425-4:2019-12	Alle zwei Jahre
Kontaminationsmessgeräte	DIN 25425-4:2019-12	Mindestens einmal jährlich z. B. nach DIN VDE 0493-100
Normale für Radioaktivitätsmessung	DIN ISO 8769:2021-01	Abhängig von Klasseneinteilung max. 2 — 4 Jahre
Kolbenhubpipetten	DIN EN ISO 8655-1:2002	Vierteljährlichen Abstand, mindestens jährlich
Referenzmessgeräte	PTB *Leitfaden zu messtechnischen Kontrollen von Medizinprodukten mit Messfunktion*	3 Jahre
Diagnostikdosimeter	§ 14 der Medizinprodukte-betreiberverordnung	5 Jahre
Verschiedene	Gesetzliches Messwesen – Allgemeine Regelungen GM-AR 20.03.2018	Diese beträgt für Bezugsnormale 5 Jahre und für Gebrauchsnormale 1 Jahr, sofern nicht in Normen, Regeln, Verwaltungsvorschriften oder in Anhang A andere Prüffristen geregelt sind.

Tabelle 1: eine Auswahl von Empfehlungen für Kalibrierintervalle

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In 2017 wurde die DIN 27201-9 [6] für Eisenbahnfahrzeuge veröffentlicht, die in tabellarische Form im Anhang A über sieben Seiten zu üblichen verwendeten Prüfmittel die maximalen Prüffristen angibt.

Im Rahmen der Prüfmittelüberwachung ist der Prüfmittelnutzer verpflichtet, ein Intervall für die Überprüfung der Prüfmittel festzulegen. Das Intervall muss so festgelegt werden, dass der Prüfgegenstand nach allgemein zugänglichen Erkenntnisquellen und betrieblichen Erfahrungen im Zeitraum zwischen zwei Kalibrierungen sicher angewendet werden kann. Im allgemeine ist der Zweck einer Kalibrierung:

- Die Abweichung des Prüfmittels von dessen Referenzwert zum Zeitpunkt seiner Verwendung sowie die Unsicherheit dieser Abweichung besser abschätzen zu können;
- Die Messunsicherheit, die unter Verwendung des Prüfmittels erreicht werden kann, über den Zeitraum absichern zu können;
- Abschätzen zu können, ob durch eine mögliche Veränderung des Werts des verwendeten Prüfmittels die Richtigkeit von bereits durchgeführten Messungen allenfalls in Frage gestellt werden muss

3. Kosten

Die Festlegung der Intervalle hat einen direkten Einfluss auf die anfallenden Kalibrierkosten. Zu häufiges Kalibrieren belastet das Budget und verursacht zusätzliche Ausfallzeiten, ein zu großes Intervall birgt hingegen die Gefahr von schwer kalkulierbaren Risiken.

Diese Risiken sind vielfältigster Art, von unentdeckten Fehlmessungen über Geräteausfall, Produktionsausfall, notwendiger Nacharbeit, Auswirkungen auf das Produkt, finanzieller Schaden und letztendlich ggf. ein Sicherheitsrisiko für den Kunden. Eine Kosten-Nutzen-Analyse in Form einer Risikobewertung kann hilfreich sein, sie ist aber nicht die Stellgröße, um verordnete Sparzwänge umzusetzen.

4. Methoden zur Bestimmung von Prüffristen

Die verschiedenen derzeit bekannten Verfahren können in fünf methodische Ansätze eingeteilt werden: fixe Intervalle; geborgte Intervalle; technische Analyse Methode; reaktive Methode und statistische Methode. Jeder dieser Ansätze wird im Folgenden in kurzer Form vorgestellt und erörtert werden.

4.1 Fixe Intervalle

Diese Intervalle werden einmal festgelegt und – sofern keine Änderungen der Randbedingungen erfolgen – über einen sehr langen Zeitraum unverändert gelassen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Diese Methode ist unkompliziert, die Auslastung der Kalibrierstelle ist planbar, nachteilig ist, dass die Kalibrierkosten deutlich erhöht sind im Vergleich zu den (re)aktiven Methoden.

4.2 „Geborgte“ Intervalle, RP-1:2010 [7]

Anstatt sich auf ein einziges gemeinsames Intervall festzulegen, können Kalibrierintervalle verwendet werden, die von einer externen Organisation festgelegt wurden. In diesem Fall ist, ist es wichtig, dass die externe Organisation in Bezug auf Zuverlässigkeitsziele, Kalibrierverfahren, Verwendung, Handhabung, Umgebung usw. vergleichbare Anforderungen hat. Bei Unterschieden in diesen Bereichen müssen möglicherweise Modifikationen an die „geborgten" Intervalle durchgeführt werden. Bspw. existieren in den USA dazu mit GIDEP (Government - Industry Data Exchange Program) oder MIDAS zwei Datenbanken, die dazu verwendet werden können. Nachteilig ist das Vorwissen in Bezug auf die Qualität und Relevanz der Daten vorhanden sein muss, um diese Methode für die eigene Organisation angemessen einsetzen zu können.

4.3 Technische Analyse Methode, NCSL RP-1:2010 [7]

Die Betrachtungen verschiedener technischer Aspekte können dazu verwendet werden, um Intervalle festzulegen und anzupassen. Diese technischen Aspekte können unterschiedlichster Natur sein, wie in den zwei folgenden Beispielen dargelegt wird.

4.3.1 Einfache Berechnung von Prüffristen

Prof. Keck hat in seinem Aufsatz in der QZ in 1999 [8] ein einfaches Rechenmodel vorgestellt bei der aufgrund der dreistufigen Bewertung von vier verschiedenen Einflussfaktoren wie Einsatzklasse K, Einsatzort O, Einsatzart A und Einsatzhäufigkeit H eine Intervallfestlegung erfolgt.

$$\text{Nutzungsgrad } N = K \cdot O \cdot A \cdot H \tag{1}$$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Einsatzklasse K	Niedrig	1
	Mittel	2
	Hoch	3
Einsatzort O	Labor	1
	Werkstatt	2
	Fertigung	3
Einsatzart A	Schonend	1
	Mittel	2
	Verschleiß	3
Einsatzhäufigkeit H	Selten	1
	Normal	2
	Oft	3

Tabelle 2: vier Einflussfaktoren und mögliche Bewertungsstufen

Sie ermöglicht so aufgrund einiger wenigen Informationen eine einfache Zuordnung von berechnetem Nutzungsgrad zu unterschiedlichster Kalibrierintervalle.

Nutzungsgrad N	Intervall Δt in Monate
1	24
2	23
3	22
4	21
6	18
8	16
9	15
16	11
18	10
24	8,5
27	8
36	6
54	3,5
81	1

Tabelle 3: das Kalibrierintervall in Abhängigkeit vom Nutzungsgrad N

Hierbei ist von Vorteil, dass man die Intervalle nach eigenen Vorstellungen und lokalen Gegebenheiten anpassen kann.

Es ist dabei zu berücksichtigen dass unterschiedliche Kombinationen (K = 1; O = 1; A = 3; H = 3 und K = 3; O = 3; A = 1; H = 1) zum gleichen Wert für den Nutzungsgrad führen und damit das gleiche Kalibrierintervall liefern, obwohl sie technisch differenziert zu betrachten wären.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist das diese vier Informationen für die Berechnung verfügbar und im System aktuell gehalten werden müssen.
In einer umfangreicheren Variation auch als OPPERET Methode aus der AFNOR-Norm FD X 07-014:2016 [9] bekannt.

4.3.2 Periodizitätsverhältnismethode, FD X 07-014:2016 [9]

Bei dieser Methode aus der AFNOR-Norm wird das Periodizitätsverhältnis von $u_{Prüfmittel}$ zu $u_{Prüfprozess}$ bestimmt.

$$\mathrm{R}_{per} = \frac{u^2_{Prüfmittel}}{u^2_{Prüfprozess}} \tag{2}$$

Dieser berechnete Wert kann dann durch eine geeignete mathematische Funktion einem Intervallwert Δt zugeordnet werden, wie das Beispiel in der Tabelle 4 zeigt.

Periodizitätsverhältnis R_{per}	Intervall Δt in Jahre
0 %	5
50 %	1
100 %	0

Tabelle 4: eine Kalibrierfrist in Abhängigkeit vom Periodizitätsverhältnis R_{per}
Vorteil: Die Periodizität ist an die Nutzung des Prüfmittels gekoppelt.
Nachteil: Die individuelle Messunsicherheit muss bestimmt werden; bestimmte qualitative Parameter (Umgebungsbedingungen) werden nicht angemessen zeitnah berücksichtigt.

4.4. Reaktive Verfahren

Bei diesen Verfahren wird der neue Intervallwert als Reaktion auf das vergangene Kalibrierverhalten bestimmt, ohne das versucht wird, das Messzuverlässigkeitsverhalten im Lauf der Zeit zu modellieren oder vorherzusagen. Das variable Intervall wird auf Kundenwunsch und bei Bedarf angewendet (z. B. stark schwankende Produktion, Kalibrierung jeweils vor dem Einsatz). Diese Methode ist nicht planbar und bedarf einer flexiblen und schnellen Kalibrierstelle.

4.4.1 Stufenmethode; M1, ILAC-G24 [3]

Bei der Stufenmethode erfolgt die Anpassung des Kalibrierintervalls basierend auf das einzelne Kalibrierergebnis. Jedes Mal, wenn ein Prüfmittel kalibriert wird, wird das nachfolgende Intervall verlängert, wenn es innerhalb des für die Messung erforderliche maximal zulässige Fehlergrenze (MPE) liegt, oder verkürzt, wenn es außerhalb dieses MPE liegt. Diese Grenzen

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Vorteile: Datenbasierte Intervalle; einfach zu implementieren; wenig Know-how für das Personal erforderlich.
Nachteil: Intervallanpassungen sind Reaktionen auf einzelne Kalibrierungsereignisse; unausgewogene Arbeitsbelastung; schwer zu verfolgenden Fristen; „Nicht kalibrierte" Geräte werden möglicherweise verwendet; Testberichte/Produkte müssen möglicherweise zurückgerufen werden; Geräte werden möglicherweise zu oft kalibriert = zusätzliche Kosten.

Eine Variante der Stufenmethode:
Das dynamisch angepasste Intervall richtet sich hauptsächlich nach dem Verhalten des Prüflings über eine größere Anzahl von Kalibrierintervallen in der Vergangenheit. Auf Grund der Historie wird das Intervall jedes Mal neu bestimmt. Eine aufwändige Auswertung ist notwendig, die Kalibrierung ist nicht regelmäßig und nur bedingt planbar.
Die einzelnen Kalibrierintervalle werden, basierend auf dem bei der Kalibrierung erhaltenen Zustand, zusammen mit einer historischen Gewichtung gemäß der Formel (3) gewichtet zusammengefasst. Die letzte Kalibrierung hat die höchste Gewichtung und die beiden vorherigen Kalibrierungen haben jeweils eine niedrigere Gewichtung.

$$\Delta t_{n+1} = \Delta t_n \cdot (W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + W_3 \cdot X_3) \quad (3)$$

Gewichtungsfaktor		
W_1	Letzte Kalibrierung	0,8
W_2	Vorletzte Kalibrierung	0,3
W_3	Drittletzte Kalibrierung	0,1

Tabelle 5: ein Vorschlag für die Gewichtungsfaktoren der drei vergangenen Kalibrierintervalle

Multiplikator X_1, X_2, X_3	
In Toleranz	1
Außerhalb Toleranz < 1 x Toleranz	0,8
1 x Toleranz < außerhalb Toleranz < 2 x Toleranz	0,6
2 x Toleranz < außerhalb Toleranz < 4 x Toleranz	0,4
4 x Toleranz < außerhalb Toleranz < 6 x Toleranz	0,3

Tabelle 6: ein Vorschlag für die Multiplikatoren eines Kalibrierergebnisses

Generell ist es angebracht, die Intervalländerung erst mit der anstehenden Kalibrierung zu dokumentieren und umzusetzen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4.4.2 Qualitätsregelkarten-Methode; M2, ILAC-G24 [3]; Drift Methode, FD X 07-014:2016 [9]

Aus der Historie der Kalibrierwerte des Prüfmittels wird die Streuung und der Drift berechnet und daraus ein optimales Kalibrierintervall abgeleitet.

Vorteil: Gute Planbarkeit; kann auf ein einzelnes oder ein Ensemble von Prüfmittel angewendet werden.

Nachteil: Unterschiedliche Kalibrierintervalle für Prüfmittel gleicher Art sind in der Praxis schwierig zu organisieren; Änderungen in der Nutzungshäufigkeit kann die Drift nachteilig verändern.

4.4.3 Nutzungsdauermethode; M3, ILAC-G24 [3]

Kalibrierintervalle werden in Betriebsstunden statt in Kalenderzeit ausgedrückt.

Vorteil: Die Methode der Wahl, wenn die Alterung des Prüfmittels von der Benutzungsdauer abhängt.

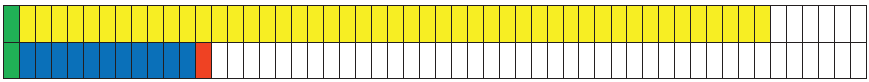
Nachteil: Die Methode ist nicht für alle Prüfmittel anwendbar.

Eine Variante der Nutzungsdauermethode:

Wie die jüngere Vergangenheit gezeigt hat, kann die Prüfmittelverwaltung durch äußere Einflüsse wie z. B. ein deutlicher Produktionsvolumenrückgang oder auch Werkstilllegung aufgrund von Pandemien oder andere unvorhergesehen Katastrophen vor großen Herausforderungen gestellt werden. Die Anpassung der Kalibrierintervalle durch geeignete Berücksichtigung von eventuell anfallenden Lagerzeiten ist eine praktikable Lösung. Allerdings darf dabei die vorab festgelegte Prüffrist nicht einfach additive durch die Lagerdauer verlängert werden. Die üblicherweise vorgebrachte Begründung, das Prüfmittel bei der Lagerung kein Verschleiß unterliegen, ist nur bedingt zutreffend. Bei einer Lagerung ist zu beachten, dass bei bestimmten Prüfmitteln substanziell relevanten Veränderungen an der Funktion und damit dem Zweck des Prüfmittels erfolgen können. Beispielhaft sind hier Prüfmittel zu nennen, die mit Batterien ausgestattet sind, geometrischen Lehren aus Metall oder andere Materialien oder radioaktiver Referenzstrahler. Gerade bei Prüfmitteln mit normativen festgelegten Prüffristen könnte diese Verlängerung dazu führen, dass die zulässige Höchstdauer überschritten wird.

Folgende Beispiele dienen zur besseren Veranschaulichung: Lagerdauer 48 Monate, Nutzungsdauer zwölf Monate,

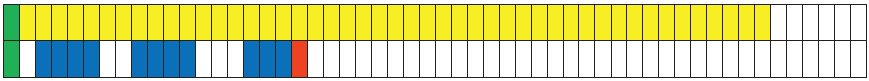
nach der Ausgabe wird das Prüfmittel durchgängig zwölf Monate benutzt =>



https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

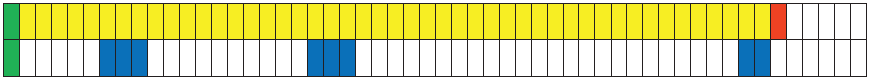
Die nächste Prüfung findet zwölf Monate nach der Ausgabe statt.

Nach der Ausgabe wird das Prüfmittel 3x vier Monate benutzt und dann wieder eingelagert =>



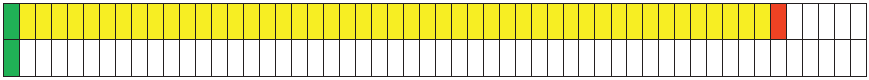
Die nächste Prüfung findet statt, wenn die Summe der Nutzung zwölf Monate erreicht hat:

Nach der Ausgabe wird das Prüfmittel 2x drei Monate benutzt und dann wieder eingelagert, letzte Ausgabe 2 Monate vor Ablauf der Lagerdauer =>



Die nächste Prüfung wird durch die Lagerdauer bestimmt.

Prüfmittel ist durchgängig eingelagert =>



Die nächste Prüfung wird durch die Lagerdauer bestimmt.

Erklärung	
Letzte Prüfung	
Lagerdauer	
Nutzungsdauer	
Nächste Prüfung	

Zusätzlich muss im Prüfmittelmanagementsystem zwei verschiedenen Fristen berücksichtigt werden, das bei dem Anwender und in Audits immer wieder zur Verwirrung führt.
In der Richtlinie VDI/VDE/DGQ/DKD 2618 Blatt 1.1 [5] steht dazu der Hinweis, dass selten benutzte Prüfmittel erst vor dem Einsatz zu kalibrieren sind. Dabei ist zu beachten, dass diese Vorgehensweise für komplexe Prüfstände mit einer Kalibrierdauer von 8 h und mehr nicht einfach umzusetzen ist und einer Planung bedürfen.

4.4.4 „Black Box“ Methode; M4, ILAC-G24 [3]

Diese Methode stellt eine Variation von M1 & M2 aus der ILAC-G24 dar. Vorher festgelegte kritische Parameter des Prüfmittels werden regelmäßig geprüft. Bei einer Grenzverletzung erfolgt eine vollständige Kalibrierung.
Vorteil: Anwendbar für komplexe Prüfmittel oder -stände an entfernte Standorte.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Nachteil: Vorab ist die Bestimmung der kritischen Parameter erforderlich.

4.5. Prüffristberechnung anhand statistische Ausfallverhalten; M5, ILAC-G24 [3]; NCSL RP-1:2010 [7]

Bei diesem Verfahren wird der neue Intervallwert anhand von statistischen Eigenschaften bestimmt. Nimmt man an, dass die Ausfallrate $\mathrm{F}(\Delta t)$ mathematisch modellierbar ist, greift man bei einem exponentiellen Verhalten zu folgender Formel:

$$\mathrm{F}(\Delta t) = 1 - \mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{MTBF}} \tag{4}$$

MTBF (Mean Time Between Failure) bezeichnet den Erwartungswert der Betriebsdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen (DIN EN 61709:2012).

Die Zuverlässigkeitsrate $\mathrm{R}(\Delta t)$ beschreibt den Anteil der Prüfmittel, die nach einem bestimmten Zeitraum immer noch die Spezifikation erfüllen.

$$\mathrm{R}(\Delta t) = 1 - \mathrm{F}(\Delta t) = \mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{MTBF}} \tag{5}$$

Das neue Kalibrierintervall Δt_{n+1} kann gemäß Formel 6 auf Basis der ermittelten Zuverlässigkeitsrate R_n und einer gewünschten Zuverlässigkeitsrate R_{n+1} für das folgende Intervall berechnet werden.

$$\Delta t_{n+1} = \Delta t_n \frac{ln(R_{n+1})}{ln(R_n)} \tag{6}$$

$$R_{n+1} = e^{\left(\frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n} \cdot ln(R_n)\right)} \tag{7}$$

Annahme: Die Ausfallrate lässt sich anhand einer mathematischen Funktion darstellen, und die MTBF verändert sich nicht über den Zeitraum. Alternativ kann auch das statistische Ausfallverhalten mit einer Weibull Funktion neben acht andere Funktionen abgebildet werden.

Vorteil: Die Methode ist für elektronische Prüfmittel sehr gut anwendbar.

Nachteil: Lokale und zeitliche Störungen einzelne Geräte werden nicht berücksichtigt; größere Datensammlung erforderlich

4.6 Vergleich der Methoden

In den meisten Fällen gibt es keine Methode, die in allen Aspekten für die gesamte Bandbreite an einem Standort vorhandenen, verschiedenartigen Prüfmitteln geeignet ist (Tabelle 7).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

	Zuverlässigkeit	Aufwand	Arbeitslastverteilung	Anwendbarkeit	Verfügbarkeit
M1 Stufenmethode	Mittel	Niedrig	Mittel	Mittel	Mittel
M2 Qualitätsregelkarte	Hoch	Hoch	Mittel	Niedrig	Mittel
M3 Nutzungsdauer	Mittel	Mittel	Schlecht	Hoch	Mittel
M4 “Black Box”	Hoch	Niedrig	Mittel	Hoch	Hoch
M5 Statistische Methode	Mittel	Hoch	Schlecht	Niedrig	Mittel

Tabelle 7: die Bewertung der Methoden im Vergleich

Darüber hinaus können es noch andere Faktoren geben, die die Wahl der Methode durch das Labor beeinflussen können.

5. VDA 5

Die inzwischen erfolgte Aktualisierung der VDA 5 [10] verknüpft in Kapitel 4.3.2.3 exemplarisch die Zuordnung eines Prüfmittels zu einem von drei Risikoklassen (“Gering”, “Mittel” oder “Hoch”) mit einer Änderung (“Verlängerung”, “Standard” oder “Verkürzt”) des vorab festgelegten Kalibrierintervalls. Eine hilfreiche Detaillierung findet nicht statt.

Bemerkenswert ist, dass die Festlegung des Kalibrierintervalls durch den Planer erfolgen soll, wobei dieser in der Empfehlung zur rollenspezifischen Qualifikation im Prüfprozessmanagement im Vergleich zum Mitarbeiter der Kalibrierstelle nur über Basiswissen verfügen muss.

6. Eichpflichtige Prüfmittel

In seltenen Fällen ist ein verwendetes Prüfmittel gleichzeitig eichpflichtig. Hierbei wird die Eichfrist durch einsprechende Vorordnungen vorgegeben und ist durch die Organisation nicht änderbar. Wie bereits am Anfang dargelegt hat die Kalibrierung einen retrospektiven Aspekt, während die Eichung eine vorausschauende Komponente beinhaltet.

Ein Hinweis an dieser Stelle: Die Norm zu den Anforderungen an die Kompetenz von Kalibrierlaboratorien, DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [11], legt in Kapitel 7.8.4.3 fest, dass ein Kalibrierschein oder eine Kalibriermarke keine Empfehlung über das Kalibrierintervall enthalten darf, es sei denn, dies geschieht mit Zustimmung des Kunden.

7. Fazit

- Sofern noch nicht geschehen, führen Sie ein eigenes Programm als Prozess zur Kalibrierung ihrer Prüfmittel ein und überwachen Sie die Intervalle kontinuierlich.
- Es existiert keine einzelne Methode, die man für alle oder die meisten Fälle ohne Weiteres anwenden kann.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

- Lösen Sie sich von Herstellerspezifikationen und legen Sie ihre eigenen Anforderungen an das Messmittel fest.
- Individualisieren Sie „Ihre“ Prüfmittel, indem Sie es möglichst mit real ermittelten Daten beschreiben

8. Ausblick

Es ist zu hoffen, dass die anstehende Überarbeitung der ISO 10012 und der ILAC-G24 dazu führt, einige Punkte klarzustellen wie z. B. die geeignete Berücksichtigung von der Lagerzeit als auch der Verwendung von prädiktiven Methoden, die auf Künstliche Intelligenz (KI) basieren.

[1] DIN e.V. (Hrsg.), DIN EN ISO 9001:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen, Beuth Verlag, Berlin, 2015
[2] DIN e.V. (Hrsg.), DIN EN ISO 10012:2004-03, Messmanagementsysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel, Beuth Verlag, Berlin, 2004
[3] ILAC-G24/OIML D 10, Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments
[4] DIN e.V. (Hrsg.), DIN 32937:2018-04, Mess- und Prüfmittelüberwachung - Planen, Verwalten und Einsetzen von Mess- und Prüfmitteln, Beuth Verlag, Berlin, 2018
[5] VDI e.V. (Hrsg.), VDI/VDE/DGQ/DKD 2618 Blatt 1.1:2021-07, Prüfmittelüberwachung - Anweisungen zur Überwachung von Messmitteln für geometrische Größen – Grundlagen, Beuth Verlag, Berlin, 2021
[6] DIN e.V. (Hrsg.), DIN 27201:2017-06, Zustand der Eisenbahnfahrzeuge – Grundlagen und Fertigungstechnologien – Teil 9: Messen, Beuth Verlag, Berlin, 2017
[7] NCSL International (Hrsg.), NCSL RP-1:2010 Establishment and Adjustment of Calibration Intervals – Recommended Practice-1
[8] Keck, Roland, 1999. Prüfmittelüberwachung als Teilaufgabe von CAQ Systemen. In: Qualität und Zuverlässigkeit (QZ) 44(3), S. 335-341 Carl Hanser Verlag
[9] FD X 07-014:2016 Metrology - Optimisation of measuring equipment calibration frequencies (metrological confirmation)
[10] VDA Band 5 Mess- und Prüfprozess, Eignung, Planung und Management, 3. überarbeitete Auflage 2020
[11] DIN e.V. (Hrsg.), DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien, Beuth Verlag, Berlin, 2018

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Dynamische Kraft- und Druckkalibrierung – Verfahren und Rückführung

C. Sander, **A. Pejak**, Testo Industrial Services GmbH, Kirchzarten

1. Einführung

Dynamische Messungen von mechanischen Größen sind in vielen Branchen wie der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, Windkraftanlagen, Fertigung, Medizin, Industrieautomation weit verbreitet und werden konsequent angewandt. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser Messungen haben direkte Auswirkungen auf die Produktqualität und -sicherheit sowie auf die preisliche Wettbewerbsfähigkeit durch Energie- und Materialeffizienz, z.B. bei der Optimierung der Leistung von Verbrennungsmotoren.

Obwohl viele Messungen der beiden Größen Kraft und Druck unter dynamischen Bedingungen durchgeführt werden, werden aktuelle Aufnehmer und Verstärker i.d.R. statisch kalibriert. Zudem gibt es sehr wenige spezifische Normen oder Richtlinien für die dynamische Kalibrierung dieser Größen. Es ist bekannt, dass verschiedene mechanische Sensoren ein dynamisches Verhalten aufweisen, bei dem die Empfindlichkeit unter dynamischer Belastung vom statischen Fall abweicht. Auch die elektrischen Komponenten der Messkette haben einen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Systems, welcher für zuverlässige Messungen berücksichtigt werden muss.

Derzeit sind das Fehlen einer metrologischen SI-Rückverfolgbarkeit und geeigneter Kalibrier- und Messverfahren sowie geeigneter Referenz-Sensoren die größten Hindernisse für Fortschritte.

Die folgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht der Themen und Aktivitäten der Testo Industrial Services GmbH mit dem Ziel zukünftig metrologisch rückgeführte dynamische Kalibrierungen für Kraft und Druck anzubieten.

2. Dynamische Kraft

Piezoelektrische Kraftsensoren sind robuste messtechnische Teile mit hervorragenden Eigenschaften, die für Messungen dynamischer und quasistatischer Kräfte wie Betätigung, kontinuierliche Druck- und Zugkräfte, Vibrationen oder Stöße eingesetzt werden. Durch ihre Eigenschaften wie hohe Steifigkeit, schnelle Signalanstiegszeit, Robustheit und großer Dynamikbereich (hohe Resonanzfrequenzen) sind sie ideal geeignet für

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Materialbruchprüfungen, Pressenüberwachung, Crash- oder Falltests. Die geringen Maße und die anpassbare Form des Kristallkerns (Abbildung 1) ermöglichen den Einsatz von Miniaturaufnehmern an Stellen, an denen herkömmliche Dehnungsmessstreifen nicht einsetzbar sind, und können die Anwendungen für den Endbenutzer erleichtern. Geringes Eigengewicht (in der Regel weniger als 20 Gramm) und ihr kompaktes Gehäuse ermöglichen genaue Messungen, da die gemessene Gesamtkraft in dynamischer Umgebung durch die Masse des Aufnehmers direkt beeinflusst wird.
Das Messprinzip beruht auf dem piezoelektrischen Effekt. Unter Belastung eines piezoelektrischen Materials erfolgt eine Ladungspolarisierung im Kristall, die über einen Ladungsaustausch messbar wird. Die Größe der elektrischen Ladung ist proportional zum Belastungsfall. Wenn sich die mechanische Belastung nicht ändert, ist keine elektrische Ladung messbar. Daher sind piezoelektrische Sensoren nur bedingt geeignet für statische Messungen. Die erzeugte elektrische Ladung wird in der Regel mit Hilfe eines Signalkonditionierers in eine messbare Spannung umgewandelt.
Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von quasi-dynamischen Kraftsensoren auf Basis von Dehnungsmessstreifen (DMS). Diese Sensoren unterliegen dem piezoresistiven Effekt, welcher auch im statischen Belastungsfall ein nutzbares Ausgangssignal aufweist.

Bislang ist kein nationales Normal für die Kundenkalibrierung von dynamischen Kraftaufnehmern in Betrieb. Aktueller Standard für die Kalibrierung von dynamischen Kraftsensoren ist eine kontinuierliches Kalibrierung nach DIN EN ISO 376. Für dynamische Kraftsensoren auf DMS-basis ist dieses Verfahren geeignet, wohingegen piezoelektrische Kraftsensoren nur bedingt für ein Kalibrierverfahren nach DIN EN ISO 376 geeignet sind. Die Rückführung erfolgt i.d.R. über Referenz-DMS-Kraftmessdosen, die statisch über z.B. ein Primärverfahren kalibriert werden.
Für eine echte dynamische Kalibrierung der Kraftsensoren kommen zwei Arten von Erregung in Betracht, zum einen die sinusförmige Anregung, zum anderen die Stoßanregung.

Die Kalibrierung mit Stoßanregung bietet den Vorteil der einfachen Erzeugung von größeren Kräften und Spektralanteile bei höheren Frequenzen. Primäreinrichtungen für Stoßkräfte gibt es bisher nur sehr wenige. Das Funktionsprinzip basiert auf zwei Massekörpern, die gegeneinanderstoßen. Der zu kalibrierende Aufnehmer ist an einem Massekörper befestigt. Die Rückführung erfolgt über ein Laservibrometer, welches die Beschleunigung der beiden Massekörper in eine Bewegungsachse misst. Für eine Sekundärkalibrierung ist bereits die Firma SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH akkreditiert.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Für die Kalibrierung mit sinusförmigen Kräften, wird i.d.R. ein elektrodynamischen Schwingerreger und einer Lastmasse, die auf dem zu kalibrierenden Aufnehmer sitzt, verwendet (Siehe Bild 1). Wenn dieses mechanische System schwingt, erzeugt die Masse eine dynamische Kraft gemäß dem zweiten Newtons zweitem Gesetz.

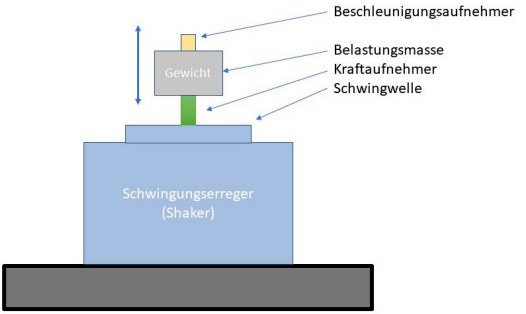


Bild1: Schematische Darstellung einer Kaliriereinrichtung für sinusförmige Kräfte

Die Messung dieser Trägheitskraft, die auf die Oberseite des Aufnehmers wirkt, liefert die Referenzmessgröße. Diese Messung basiert auf der Bestimmung der Masse und die Messung der Beschleunigung mit einem Laservibrometer oder, wie in Abbildung 1 dargestellt, eines Beschleunigungsaufnehmers. Somit kann die metrologische Rückführbarkeit durch ein primäres oder sekundäres Verfahren erreicht werden. Das Ergebnis der sinusförmigen Kalibrierung ist der Frequenzgang der komplexen Empfindlichkeit (Betrag und Phase), definiert als das Verhältnis zwischen den Ausgangssignalen des kalibrierten Aufnehmers und der Referenzkraft, welche proportional zu der ermittelten Beschleunigung ist.
Das dynamische Verhalten des Systems kann durch ein Masse-Feder-Dämpfer-System beschrieben werden (Siehe Bild 2).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

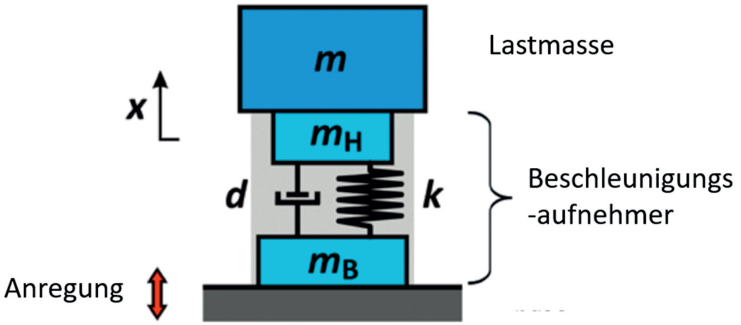


Bild 2: Feder-Masse-Modell für einen Kraftaufnehmer unter sinusförmiger Anregung.

Das Modell basiert auf einer starr montierten Lastmasse m. Der Aufnehmer besteht aus zwei Punktmassen (mH und mB), die durch eine elastische Feder der Steifigkeit k und einen Dämpfer mit der Dämpfungskonstanten d verbunden sind. Das Ausgangssignal des Aufnehmers ist proportional zur Dehnung der Feder.

Die vom Deutschen Kalibrierdienst (DKD) herausgegebene Richtlinie DKD-R 3-10 legt die Grundlagen für die dynamische Sensorkalibrierung fest. Das Blatt 2 "Dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Sinusverfahren" beschreibt das vorgestellte Kalibrierprinzip. Vor der Montage der Lastmasse und des Beschleunigungsaufnehmers muss die Gesamtmasse einschließlich des Kabels mit einer Präzisionswaage bestimmt werden. Um die Validität der Übertragungskoeffizienten zu sichern, muss zudem vor der Durchführung der Frequenzgangkalibrierung die Kopfmasse des Kraftaufnehmers bestimmt werden. Es können dazu verschiedene Gewichte auf den Kraftaufnehmer montiert und die Übertragungskoeffizienten im unteren Frequenzbereich bestimmt werden Die Kopfmasse des Aufnehmers wird durch Extrapolation auf den Frequenzpunkt Null berechnet. Die Kalibrierung wird mit zwei unterschiedlichen Massen in dem Frequenzbereich durchgeführt.

Bild 3 zeigt den Messaufbau bei der Testo Industrial Services GmbH.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

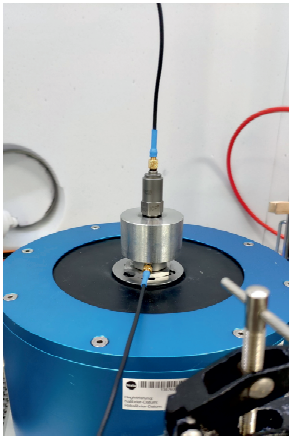


Bild 3: Messaufbau bestehend aus SE-10 Schwingungserreger der Fa. SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH, Kraftaufnehmer, Lastmasse und Beschleunigungsaufnehmer zur Referenzwertermittlung.

Die dynamische Kalibrierung nach dem Sinusverfahren ist anspruchsvoller und aufwändiger als das kontinuierliche Verfahren nach DIN EN ISO 376. Es stellte jedoch eine echte dynamische und metrologisch rückgeführte Kalibrierung dar, zudem werden die anwendungstypischen dynamischen Effekte berücksichtigt.

2. Dynamischer Druck

Dynamische Drucksensoren werden heute kontinuierlich oder quasistatisch kalibriert. Eine Akkreditierung für eine dynamische Kalibrierung ist aktuell nicht vorhanden. Eine vielversprechende Methode für die primäre dynamische Druckkalibrierung besteht in dem Fallgewichtsverfahren. Bei dieser Methode wird ein Druckimpuls durch das Fallenlassen eines Massekörpers aus einer bestimmten Höhe auf ein Kolben-Zylinder-System erzeugt. Die Aufprallkraft treibt den Kolben in einen mit Hydraulikflüssigkeit gefüllten Hohlraum und erzeugt so einen Druckimpuls. Die zu kalibrierenden Sensoren sind mit diesem Hohlraum verbunden. In der PTB-Anordnung wird der Druck durch Messung des Brechungsindexes der Flüssigkeit in einem Kolben-Zylinder mit Hilfe eines Laservibrometers bestimmt. Der Ansatz von VTT

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

MIKES basiert auf der Messung der Beschleunigung des fallenden Gewichts. Mit der Fallgewichtsmethode werden Druckimpulse von wenigen Millisekunden erzeugt. Es können sowohl Druckanstieg als auch Druckabfall während der gleichen Messung ermittelt werden. Die Form des Impulses ähnelt den Druckimpulsen der Anwendung von dynamischen Druckaufnehmern.

Bei sekundäre Kalibrierverfahren erzeugt ein Impulsgeber die notwendige Aufprallkraft auf ein Kolben-Zylindersystem. Kalibrierte Referenzsensoren ermöglichen die metrologische Rückführung. Eine Konzeptskizze für einen sekundären dynamischen Druckkalibrator ist in Bild 4 dargestellt.

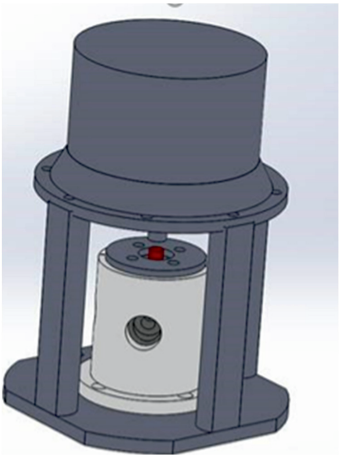


Bild 4: Schematische Darstellung eines dynamischen Druckkalibrators für sekundäre Kalibrierungen

Die Testo Industrial Services GmbH entwickelt aktuell mit dem finnischen metrologischem Nationalinstitut ein sekundären Kalibrator mit einem Messbereich von 10 bar bis 350 bar. Zudem ist der mit Hydraulikflüssigkeit befüllte Hohlraum bis zu 200 °C beheizbar. Damit können nicht nur anwendungsspezifische Anforderungen an den Druckimpuls bei der Kalibrierung abgebildet werden, sondern auch die typischen Umgebungsbedingungen in einem weiten Temperaturbereich, wie z.B. der Druckmessung im Zylinder eines Verbrennungsmotors. Eine typische Kalibrierkurve ist in Bild 5 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

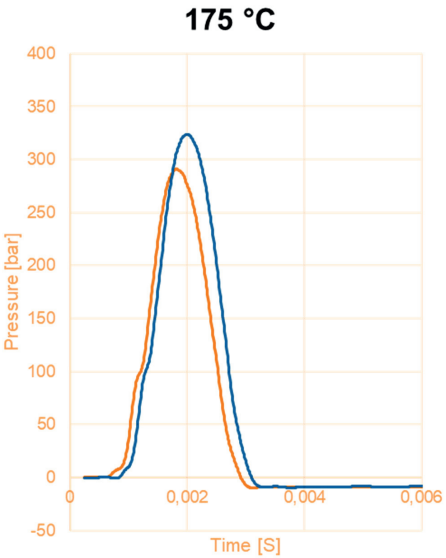


Bild 5: Kalibrierung eines dynamischen Druckaufnehmers bei 175 °C. Die blaue Kurve repräsentiert den Referenzaufnehmer.

Bislang kann die metrologische Rückführung nur für die Spitzendrucke hergestellt worden. Eine Rückführung des gesamten Druckimpulses ermöglicht eine noch dezidiertere Analyse der dynamischen Eigenschaften von piezoelektrischen Drucksensoren.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Das Digital Calibration Certificate (DCC)

Siegfried Hackel, **Frank Härtig**, **Thorsten Schrader**,
Alexander Scheibner, **Jan Loewe**, **Benjamin Gloger**,
Justin Jagieniak, **Daniel Hutzschenreuter**,
Gamze Söylev-Öktem, **Lutz Doering,**
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig

Schlüsselwörter: DCC, D-SI, digitale Signatur

Kurzfassung

Ziel dieser Veröffentlichung ist es, einen Überblick über den Prototyp des digitalen Kalibrierungszertifikats zu geben. Im Abschnitt 1 wird die Rolle von Kalibrierzertifikaten erläutert und es werden die Unterschiede zwischen papierbasierten und digitalen Kalibrierzertifikaten beschrieben. Alle Spezifikationen des digitalen Kalibrierzertifikats werden in Abschnitt 2 angegeben; Sicherheitsaspekte werden in Abschnitt 3 erörtert; und schließlich werden in Abschnitt 4 Schlussfolgerungen gezogen.

Der Prototyp des digitalen Kalibrierscheins (DCC) wurde erstmals 2017 in den PTB Mitteilungen [1] beschrieben.

Abstract

The aim of this publication is to provide an overview of the prototype digital calibration certificate. The role of calibration certificates is explained and the differences between paper-based and digital calibration certificates are described in Section 1. All specifications of the digital calibration certificate are given in Section 2; security aspects are discussed in Section 3; and finally, conclusions are drawn in Section 4.

The prototype of the digital calibration certificate (DCC) was first described in the PTB-Mitteilungen [1] in 2017.

1. DIE ROLLE DER KALIBRIERUNG UND DER KALIBRIERZERTIFIKATE

Kalibrierzertifikate spielen in der Welt der Metrologie eine sehr wichtige Rolle. Doch abgesehen vom Zertifikat selbst haben die Unternehmen bisher nur selten einen Mehrwert aus ihren analogen Kalibrierzertifikaten gezogen. Das liegt daran, dass die Wiederverwendung der bei der Kalibrierung gewonnenen Daten zeitaufwändig und fehleranfällig ist. Das digitale Kalibrierzertifikat (DCC) soll diesen entscheidenden Nachteil seines analogen Pendants kompensieren. Ziel ist es, ein DCC-Format zu schaffen, das international anerkannt wird. Das Format soll als Austauschformat etabliert werden, das in allen Bereichen der Metrologie verwendet

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

werden kann. Auf der Grundlage des DCC werden Austauschformate im Bereich des gesetzlichen Messwesens sowie für digitale Baumusterprüfbescheinigungen, für den digitalen Zwilling und für weitere Projekte in vielen anderen Bereichen entwickelt. DCC-Anwendungen werden die elektronische Speicherung, die authentifizierte, verschlüsselte und signierte Übertragung sowie die harmonisierte Interpretation von Kalibrierergebnissen umfassen. Dabei muss der DCC maschinenlesbar und interpretierbar sein. Um eine breite Akzeptanz des DCC zu gewährleisten, haben sich die Entwickler mit vielen verschiedenen Interessengruppen beraten. Das DCC richtet sich in erster Linie an Institutionen weltweit, die einen Nachweis der metrologischen Rückführbarkeit ihrer Messergebnisse benötigen, um diese in den modernen Produktionsprozessen, die das IIoT / Industrie 4.0 ermöglichen, einzusetzen. Dazu gehören Metrologieinstitute, benannte Institute, nationale Kalibrierzentren, Kalibrierlaboratorien und viele industrielle Einrichtungen, die die Konformität ihrer Qualitätsmanagementsysteme nachweisen müssen. Eine weitere verwandte Anwendung der DCC-ähnlichen Struktur ist die Notfallrettung von verletzten Personen in der unmittelbaren Umgebung von Sensoren wie Smart Cars oder Smartwatches [2]. In diesem Zusammenhang wurde das Projekt International Standard Accident Number (ISAN) ins Leben gerufen, um eine systemgestützte Unterstützung der Notfallrettung zu entwickeln und zu etablieren. Die Unfalldaten werden von den Sensoren mit dem höchstmöglichen Automatisierungsgrad erfasst. Aus den Daten wird dann ein digitaler Unfallbericht (engl. Digital Accident Report D-AR) erstellt. Der D-AR hat eine ähnliche Struktur wie das DCC und verwendet das D-SI Format zur Speicherung der Sensordaten.

2. GRUNDLAGEN DES DCC

2.1 Metrologische Grundnormen und Standards

Für die Darstellung von Messwerten wurde im europäischen Forschungsprojekt SmartCom 17IND02 [3], [4] ein Datenmodell auf Basis der SI-Einheiten entworfen und ein prototypisches XML-Datenaustauschformat entwickelt, das die Maschinenlesbarkeit gewährleistet. Das DCC ermöglicht die eindeutige und globale Identifizierung und Speicherung der Eigenschaften eines Kalibrierobjekts und leistet mehr als nur die Überprüfung der metrologischen Rückführbarkeit. Für die Darstellung der Messwerte wurde ebenfalls ein SI-basiertes Datenaustauschformat in XML entwickelt. Dieses Format, bekannt als D-SI [5], [4], wird als Grundlage für die Speicherung von Messdaten im DCC verwendet. Das DCC ist offen für die Verwendung anderer SI-basierter Formate in der Zukunft, wenn diese von einer größeren Gemeinschaft akzeptiert werden, einschließlich der Entwicklungen der CIPM-Arbeitsgruppe für "Digital-SI". Die Darstellung der metrologischen Daten basiert auf bestehenden, international anerkannten Dokumenten. Die wichtigsten davon sind ISO IEC 17025 [6], die SI-Broschüre des BIPM [7], das

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Internationale Vokabular für Metrologie (VIM) [8], der Leitfaden zur Angabe der Messunsicherheit (GUM) [9] und die Liste der physikalischen Grundkonstanten (CODATA) [10]. Alle Daten können direkt und automatisch vom DCC in alle digitalen Prozesse übernommen werden. Siehe unten im Abschnitt „2.9 Dokument (zusätzlicher Bereich, nicht geregelter Bereich)“. Die Möglichkeit der Verwendung kryptografischer Signaturen gewährleisten die Integrität und Authentizität von DCCs.

2.2 XML als Datenaustauschformat

Das DCC wird in der Extensible Markup Language (XML) erstellt. Seit der Entwicklung durch das World Wide Web Konsortium (W3C) und der Veröffentlichung im Web [11] hat sich das XML-Dateiformat international als ein weithin akzeptiertes Datenaustauschformat etabliert. Die Konvertierung in andere Datenaustauschformate wie JSON ist leicht möglich. Kryptografische Verfahren können robust und sicher auf XML-Datenstrukturen [12], [13] angewendet werden. Weitere Informationen über XML sind in der Literatur zu finden, z. B. [14]. Ein sehr fortschrittlicher Ansatz zum Datenaustausch wurde bereits vom VDI/VDE [15] formuliert. Obwohl es sich hierbei um einen nationalen Standard (Deutschland) handelt, wird er auch in verschiedenen anderen Ländern angewendet. Der Ansatz des VDI/VDE berücksichtigt den industriellen Workflow, in den sich das DCC leicht integrieren lässt. Ein großer Vorteil von XML ist seine Maschinenlesbarkeit. Darüber hinaus kann XML auch von Menschen gelesen werden. Ein weiterer entscheidender Punkt besteht darin, dass das XML-Format eine langfristige Datenspeicherung ermöglicht. Dies ist besonders wichtig, da die Dateien noch mehrere Jahrzehnte lang lesbar sein müssen. Weitere Informationen zu langzeitspeicherfähigen Datenformaten finden sich z. B. in [12] und [16].

Die Vorschrift IEC TS 62720, "Identification of units of measurement for computer-based processing" [17] beschreibt die Handhabung von SI- und abgeleiteten Einheiten in XML. Diese Einheiten sind im Common Data Directory auf der IEC-Website [18] verfügbar.

Die Gründe für die Wahl von XML sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Vergleich von XML und JSON

Vorteile XML	Vorteile JSON
• Erprobt und bewährt, seit fast 20 Jahren im IT-Bereich im Einsatz. • Die Syntax kann mit Hilfe von Schemadateien leicht validiert werden. • Unterstützt Namespaces und Dialekte. • Individuelle Datentypen erlaubt.	• kompakt (benötigt nur wenige Zeichen). • Einfache Syntax. • Wird in vielen Webanwendungen und modernen Datenbanksystemen bevorzugt. (z. B. JavaScript, MongoDB).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

• XML-Objekt-Parser sind in fast allen Programmiersprachen vorhanden. • Die XML-Syntax ist viel umfangreicher als die JSON-Syntax. • XML wurde ursprünglich als Dokumentenformat entwickelt und ist daher ideal für Dokumente wie das DCC. • XML wird häufig auch als Datenaustauschformat verwendet. • Die Übertragung in andere Formate ist ohne Informationsverlust gewährleistet.	• JSON-Objekt-Parser sind in der Regel schnell und werden als Bibliotheken in fast allen Programmiersprachen verwendet. • JSON wurde als reines Datenaustauschformat entwickelt.
Nachteile XML	**Nachteile JSON**
• Verbraucht für dieselben Informationen mehr Speicherplatz als JSON. Allerdings ist die typische Dateigröße in der Regel kleiner als 1 Megabyte, so dass eine Komprimierung nicht erforderlich ist, die zu Problemen bei der maschinellen Lesbarkeit führen könnte. • XML-Objektparser sind in Bezug auf die Rechenleistung aufwändiger als JSON-Objektparser.	• JSON ist nicht für Dokumente gedacht, aber ein Kalibrierschein ist ein Dokument. • Bislang gibt es nur eine Version des "JSON Schema" (Version 0.7). • Unterstützt nur wenige Datentypen und erlaubt keine eigenen Datentypen, die für das SI-Datenformat notwendig sind. • Keine Unterstützung von Kommentaren. • JSON unterstützt von Haus aus keine binären Daten (aber es gibt BSON). • Die Komplexität von XML kann nicht vollständig abgebildet werden

2.3 SI-basiertes Datenaustauschformat (D-SI)

In einem digitalen Netz, in dem bestehende und neue Anwendungen miteinander kommunizieren, gewinnt die Rolle des SI-Systems (Système international d'unités [7]) noch mehr an Bedeutung. Die Möglichkeit, mit dem SI alle physikalischen Vorgänge mit nur sieben Grundeinheiten [7] zu beschreiben, führt zu einer bisher nicht gekannten Klarheit. Diese Klarheit ist grundlegend für einen sicheren, harmonisierten und wirtschaftlichen Austausch von Messwerten, der notwendig ist, um die Digitalisierung der Metrologie voranzutreiben. Es ist wichtig, zwischen den Mensch-zu-Mensch- und den Maschine-zu-Maschine-Schnittstellen zu unterscheiden. Die hier vorgestellten Spezifikationen beziehen sich in erster Linie auf die

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

automatisierte Kommunikation zwischen Maschinen. Eine solche Automatisierung ist für die Kommunikation zwischen Maschinen und Algorithmen in einer innovativen digitalisierten Wertschöpfungskette unerlässlich. Bei der M2M-Kommunikation dürfen nur SI-Einheiten verwendet werden. Das DCC erlaubt es, Einheiten, die im SI-Einheitensystem nicht verfügbar sind, in der für Menschen lesbaren Version darzustellen. Ein Beispiel ist die Messung des Blutdrucks in der Medizin, der in Millimeter Quecksilbersäule (mmHg) und nicht in Pascal, der abgeleiteten SI-Einheit des Drucks, gemessen wird. Die Kalibrierdaten werden in Pascal oder in kg / (m * s²) gemessen und im maschinenlesbaren Teil gespeichert, während im menschenlesbaren Teil des Dokuments die Messwerte weiterhin in mmHg erscheinen. Die Umrechnung von Pascal in mmHg wird von Spezialisten im Kalibrierlabor durchgeführt, so dass die vom DCC-Benutzer empfangenen Werte nicht umgerechnet werden müssen. Dadurch werden Umrechnungsfehler reduziert oder vermieden.

2.4 Grundstruktur des D-SI

Das Metadatenmodell des D SI umfasst die folgenden Grundannahmen (Tabelle 2):

Tabelle 2: Metadatenmodell des D-SI

Atom	Daten vom Typ "Atom" stellen die Grundelemente dar. Obligatorische Elemente: sie beinhalten einen numerischen Wert und eine Maßeinheit. Optionale Elemente: die Messunsicherheit, eine Bezeichnung und einen Zeitstempel.
Klarheit	Die Einheiten werden in SI-Basiseinheiten ausgedrückt. Diese Darstellung ermöglicht einen klaren, fehlerfreien und wirtschaftlichen Austausch von digitalen Messdaten.
Zahlen	Zahlen (numerische Werte) werden im Dezimalsystem gespeichert. Auch die Exponentialdarstellung ist zulässig. Als Trennzeichen für Nachkommastellen wird nur der Punkt verwendet. Leere Daten wie NaN und INF sind nicht zulässig, da sie keine metrologische Bedeutung haben.
Zeichendarstellung	Die Zeichen werden im UTF8-Format [19] dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht das eindeutige Schreiben und Lesen von Zeichen in verschiedenen Softwareumgebungen.
Genauigkeit	Beim Austausch von Daten ist die Genauigkeit der Zahlen von größter Bedeutung. Daher sind für Winkel und Zeiten zusätzlich einige Nicht-SI-Einheiten zulässig. Am Beispiel des Winkels kann ein Kreis sowohl als 360 Grad (°) als auch als 2 pi Radiant ausgedrückt werden. Radiant ist sowohl aus metrologischer als auch aus mathematischer Sicht die geeignete Form. Da es sich bei der Zahl pi (π)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

	jedoch um eine irrationale Zahl handelt, deren Darstellung auf eine endliche Genauigkeit beschränkt ist, kann die genaue Darstellung eines vollständigen Kreises nur in "Grad" erfolgen.
Repräsentation	Die Repräsentation messtechnischer Daten erfolgt auf Basis bestehender international anerkannter Dokumente. Die wichtigsten davon sind die SI Broschüre des BIPM [20] das Internationale Wörterbuch für Metrologie (VIM) [21], der Leitfaden zur Angabe der Messunsicherheit (GUM) [9] und die Liste der fundamentalen physikalischen Konstanten (CODATA) [22].

2.5 Aufbau des digitalen Kalibrierungszertifikats

Die allgemeine Struktur eines DCC ist in vier Bereiche unterteilt:

- Verwaltungsdaten (regulierter Bereich),
- Messergebnisse (teilweise regulierter Bereich),
- Kommentare (nicht geregelter Bereich), und
- Menschenlesbares Dokument (zusätzlicher Bereich).

Das DCC wird im XML-Datenformat mit den entsprechenden Schemadateien bereitgestellt.

2.6 Verwaltungsdaten (regulierter Bereich)

Verwaltungsdaten enthalten Informationen von zentralem Interesse. Die Datenfelder sind fest vorgegeben. Die Angaben befinden sich in der Regel auf der ersten Seite eines analogen Kalibrierscheins. Die Daten dienen der eindeutigen Identifizierung des Kalibrierlaboratoriums, des Kalibriergegenstandes, des Kundendaten usw.

In der Tabelle 2 in [23], Seite 77, sind die von PTB und DAkkS festgelegten Felder aufgeführt. Sie gelten für das DCC entsprechend. Die Bezeichner sind definiert. Die Daten, wie z. B. "Datum der Kalibrierung", werden nach internationalen Standards formatiert. Buchstaben sind in Form von UTF 8-kodiertem Unicode erlaubt. Zahlen werden in Form von arabischen Ziffern dargestellt. Die Hauptsprache wird vom Benutzer festgelegt. Andere Sprachen können zusätzlich verwendet werden.

2.7 Messergebnisse (teilweise regulierter Bereich)

Die Darstellung der Messergebnisse ist eine der anspruchsvollsten Aufgaben, die bei der Implementierung des DCC zu lösen sind. Der Grund liegt in der Vielfalt der unterschiedlichen Kalibriergegenstände (Akustik, Gase, Optik, etc.). Darüber hinaus müssen bestehende und etablierte Datenaustauschformate, wie sie in [15] beschrieben sind, in das Konzept integriert werden. Gleichzeitig kann für diejenigen, die noch nicht über ein bestehendes Datenaustauschformat verfügen, eine einfache Struktur dargestellt werden. Dieser Bereich kann also nicht vollständig geregelt werden. Unbedingt geregelt ist jedoch, dass die Messergebnisse in

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Anlehnung an das SI [4] dargestellt werden müssen. Sie können als Skalar, Vektor, Matrix oder Tensor dargestellt werden. Ein vollständiges skalares Messergebnis könnte zum Beispiel folgende Daten enthalten:

- Kennung
- Messwert
- erweiterte Messunsicherheit
- Erweiterungsfaktor
- Überdeckungswahrscheinlichkeit
- Verteilungsfunktion
- Maßeinheit
- Uhrzeit
- Standortkoordinaten

Die Angabe der Uhrzeit ist fakultativ, wird aber empfohlen, wenn diese Information verfügbar ist. Die Bezeichner bestehen aus UTF-8-Buchstaben. Die Zahlen- und Zeitformate sind gemäß den bestehenden Normen definiert. Die Darstellung des Erweiterungsfaktors und der Einheit ist angegeben. Die Richtlinien orientieren sich an den Normen des BIPM. Es können auch Einheiten dargestellt werden, die außerhalb des SI liegen (z. B. Seemeilen, Millimeter Quecksilbersäule, Grad Oechsle). Sie sind nur in der menschenlesbaren Darstellung zu verwenden, um Verwechslungen bei der Datenübermittlung zu vermeiden. In allen Fällen gelten jedoch die Daten in SI-Einheiten. Die Verwendung einer benutzerdefinierten Datenstruktur ist möglich, sofern die Ergebnisse vollständig sind und dem SI Rechnung tragen. Bei der Verwendung benutzerdefinierter Datenstrukturen ist zu bedenken, dass beschreibende Komponenten und Informationen über Messunsicherheiten oft nicht verfügbar sind. In solchen Fällen müssen Anpassungen vorgenommen werden. Darüber hinaus müssen Werkzeuge zur Visualisierung des Inhalts bereitgestellt werden. Die universelle Datenstruktur ist eine lineare Struktur. Sie besteht aus Textblöcken und Blöcken mit Messergebnissen. Die Textblöcke erläutern die Messergebnisse und können in jeder Amtssprache ausgefüllt werden. Der Vorteil der universellen Datenstruktur ist die einfache und universelle Verwendbarkeit. Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wird die PTB Beispielwerkzeuge zur Visualisierung des DCC bereitstellen.

2.8 Kommentare (nicht geregelter Bereich)

Der Kommentarbereich enthält spezifische Informationen zu einem Messvorgang, die zur weiteren Erläuterung der Messergebnisse dienen. Einträge in diesem Bereich sind optional und nicht erforderlich.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.9 Dokument (zusätzlicher Bereich, nicht geregelter Bereich)

In diesem Bereich kann auf Wunsch eine für Menschen lesbare Version des DCC gespeichert werden. Dies kann z. B. in Form einer PDF-Datei oder einer HTML-Seite erfolgen. Die Nutzer des DCC können so ein digitales Abbild des bekannten analogen Kalibrierscheins sehen. Unter Verwendung des Base64-Kodierungsschemas [24] kann die menschenlesbare Version zusammen mit dem oben genannten Informationssatz in XML gespeichert werden.

3. KRYPTOGRAFISCHE SCHUTZMETHODEN

Die Verwendung elektronischer Signaturen, elektronischer Siegel und elektronischer Zeitstempel gewährleistet die Integrität und Authentizität des DCC, sofern die gesetzlich vorgeschriebenen Verfahren eingehalten werden. Auch die langfristige Aufbewahrung kryptografisch signierter Dokumente kann gewährleistet werden [25]. In Europa müssen dazu die Bedingungen der eIDAS-Verordnung [26] eingehalten werden. So geschützte elektronische Dokumente sind rechtlich gleichwertig mit handschriftlich unterzeichneten Dokumenten. Die nach den eIDAS-Regeln erzeugten elektronischen Signaturen sind in allen EU-Mitgliedstaaten und darüber hinaus in nahezu allen Ländern Europas (z. B. Großbritannien, Schweiz, Liechtenstein) gültig. Elektronische Signaturen mit einem qualifizierten Zertifikat werden als qualifizierte elektronische Signaturen (QeS oder QES) bezeichnet. Qualifizierte Zertifikate werden von Vertrauensdiensteanbietern erstellt. Die EU-Kommission identifiziert diese Vertrauensdienste und veröffentlicht eine Liste für die verschiedenen Länder [27].

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Es ist nicht möglich, alle Aspekte des Transformationsprozesses von analogen zu digitalen Kalibrierscheinen in dieser Veröffentlichung zu behandeln. Bei der Entwicklung des XML-basierten Datenaustauschformats wurde insbesondere auf die maschinelle Lesbarkeit und die maschinelle Interpretierbarkeit geachtet. Zurzeit sind die Arbeiten am DCC noch nicht vollständig abgeschlossen. Über den aktuellen Stand des Projekts können Sie sich auf der Website der PTB [28] informieren. Im Rahmen unserer Öffentlichkeitsarbeit haben wir im Oktober 2020 die erste internationale DCC-Konferenz durchgeführt. Die Konferenz wurde vollständig online abgehalten und begrüßte mehr als 700 Teilnehmer aus über 100 Nationen aller Kontinente. Ein öffentliches Einführungsvideo zum DCC kann auf der Konferenzwebsite [29] ohne Anmeldung angesehen werden. Die zentrale Webseite des DCC finden Sie unter der Adresse https://www.ptb.de/dcc. Hier können Sie viele weitere Informationen wie z. B. den Zugang zur Entwicklungsplattform, Downloads oder Videos finden (Abbildung 1).

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

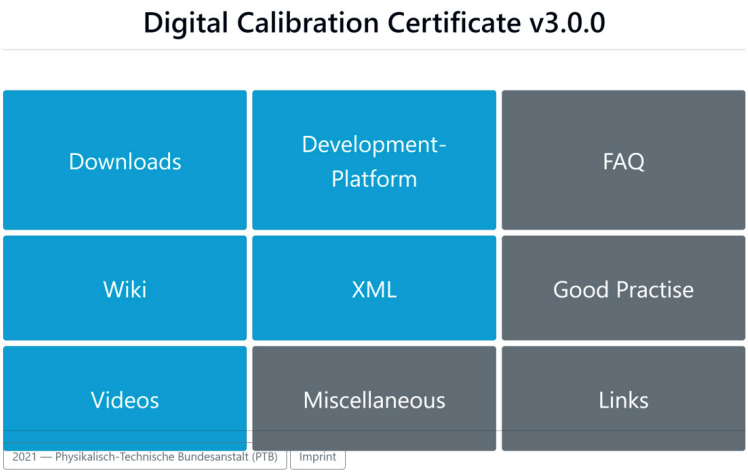


Abbildung 1: Bildschirmfoto der Webseite https://www.ptb.de/dcc [30]

Die zum Zeitpunkt der Abgabe dieses Manuskripts noch grau dargestellten Felder werden sukzessive mit weiteren Inhalten gefüllt. Sie sind herzlich eingeladen, einen Beitrag zu dem Projekt zu leisten.

5. DANKSAGUNGEN

Das Projekt GEMIMEG II wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), unter dem Förderkennzeichen GEMIMEG 01 MT20001E gefördert.

Literaturhinweise

[1] Hackel, Siegfried Gustav, Härtig, Frank, Hornig, Julia, und Wiedenhöfer, Thomas, „The Digital Calibration Certificate“, *PTB-Mitteilungen. Volume 127 (2017)*, Bd. Issue 4, S. 7, Dez. 2017, doi: 10.7795/310.20170403. [Online]. Verfügbar unter: https://oar.ptb.de/resources/show/10.7795/310.20170403. [Zugegriffen: 16-März-2021]

[2] PLRI, „The ISAN Project“. [Online]. Verfügbar unter: https://aei.plri.de/de/projects/the-isan-project. [Zugegriffen: 11-Nov-2019]

[3] PTB, „17IND02 - SmartCom“, 15-Mai-2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ptb.de/empir2018/smartcom/project/. [Zugegriffen: 18-Juni-2019]

[4] D. Hutzschenreuter *u. a.*, „SmartCom Digital-SI (D-SI) XML exchange format for metrological data version 1.3.1“, Mai 2020, doi: 10.5281/zenodo.3826517. [Online]. Verfügbar unter: https://zenodo.org/record/3826517. [Zugegriffen: 01-Juni-2021]

[5] D. Hutzschenreuter *u. a.*, „SmartCom Digital System of Units (D-SI) Guide for the use of the metadata-format used in metrology for the easy-to-use, safe, harmonised and unambiguous digital transfer of metrological data“, Nov. 2019, doi: 10.5281/zenodo.3522631. [Online]. Verfügbar unter: https://zenodo.org/record/3522631#.YFEBvZ1Kg_4. [Zugegriffen: 16-März-2021]

[6] „DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC_17025:2017); Deutsche und Englische

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Fassung EN_ISO/IEC_17025:2017“, Beuth Verlag GmbH [Online]. Verfügbar unter: https://www.beuth.de/de/-/-/278030106. [Zugegriffen: 24-Sep-2021]
[7] „SI Brochure - BIPM“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/. [Zugegriffen: 23-Apr-2021]
[8] BIPM, „VIM_JCGM_200_2012“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1. [Zugegriffen: 23-Apr-2021]
[9] „Guide to Specifying Measurement Uncertainty (GUM)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6. [Zugegriffen: 23-Apr-2021]
[10] „Fundamental Physical Constants from NIST“. [Online]. Verfügbar unter: https://physics.nist.gov/cuu/Constants/. [Zugegriffen: 14-Apr-2021]
[11] „Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.w3.org/TR/xml/. [Zugegriffen: 09-Sep-2019]
[12] P. C. Johannes, J. Potthoff, A. Roßnagel, B. Neumair, M. Madiesh, und S. Hackel, *Beweissicheres elektronisches Laborbuch: Anforderungen, Konzepte und Umsetzung zur langfristigen, beweiswerterhaltenden Archivierung elektronischer Forschungsdaten und-dokumentation*. Nomos Verlagsgesellschaft, 2013.
[13] PTB, „ArchiSafe“, 03-Mai-2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ptb.de/cms/archisafe/startseite.html. [Zugegriffen: 16-Apr-2020]
[14] H. Vonhoegen, *Einstieg in XML: Grundlagen, Praxis, Referenz*. Galileo Press, 2013 [Online]. Verfügbar unter: https://books.google.de/books?id=tqInmwEACAAJ
[15] *VDI/VDE 2623 - Format für den Austausch von Daten im Prüfmittelmanagement - Definition des Calibration Data Exchange-Format (CDE-Format)*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2623-format-fuer-den-austausch-von-daten-im-pruefmittelmanagement-definition-des-calibration-data-exchange-format-cde-format-1. [Zugegriffen: 07-Jan-2020]
[16] „nestor - Publikationen“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.langzeitarchivierung.de/Webs/nestor/DE/Publikationen/publikationen_node.html. [Zugegriffen: 16-Apr-2020]
[17] „IEC TS 62720:2017 - IEC-Normen - VDE VERLAG“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vde-verlag.de/iec-normen/224233/iec-ts-62720-2017.html. [Zugegriffen: 16-Apr-2020]
[18] „IEC 61360“. [Online]. Verfügbar unter: https://cdd.iec.ch/. [Zugegriffen: 16-Apr-2020]
[19] F. Yergeau, „UTF-8, a transformation format of ISO 10646“, RFC Editor, RFC3629, Nov. 2003 [Online]. Verfügbar unter: https://www.rfc-editor.org/info/rfc3629. [Zugegriffen: 09-Sep-2019]
[20] „BIPM - SI Brochure“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/. [Zugegriffen: 09-Sep-2019]
[21] „BIPM - International Vocabulary of Metrology (VIM)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html. [Zugegriffen: 09-Sep-2019]
[22] „Fundamental Physical Constants from NIST“. [Online]. Verfügbar unter: https://physics.nist.gov/cuu/Constants/. [Zugegriffen: 09-Sep-2019]
[23] Eichstädt, Sascha *u. a.*, „Metrologie für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft“, *PTB-Mitteilungen. Band 127 (2017)*, S. 110, Dez. 2017, doi: 10.7795/310.20170499. [Online]. Verfügbar unter: https://oar.ptb.de/resources/show/10.7795/310.20170499. [Zugegriffen: 16-März-2021]
[24] „hjp: doc: RFC 4648: The Base16, Base32, and Base64 Data Encodings“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hjp.at/doc/rfc/rfc4648.html. [Zugegriffen: 16-März-2021]
[25] „BSI TR-03125 Beweiswerterhaltung kryptographisch signierter Dokumente Version 1.2.2“, *Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik*. [Online]. Verfügbar unter:

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03125/BSI_TR_03125_V1_2_2.html?nn=132646. [Zugegriffen: 16-März-2021]
[26] „Amtsblatt der Europäischen Union. L 257/73“. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2014:257:FULL&from=CS. [Zugegriffen: 05-Apr-2021]
[27] „EU Trusted Lists | Shaping Europe’s digital future“. [Online]. Verfügbar unter: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/eu-trusted-lists. [Zugegriffen: 23-Apr-2021]
[28] „Digital Calibration Certificate - DCC“, 14-Apr-2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ptb.de/cms/en/research-development/into-the-future-with-metrology/the-challenges-of-digital-transformation/kernziel1einheitlichkeitim/digital-calibration-certificate-dcc.html. [Zugegriffen: 23-Apr-2021]
[29] „dcc-international-conference-portal“, *dcc-international-conference-portal*. [Online]. Verfügbar unter: https://dcc-conference-2020.ptb.de/account/login. [Zugegriffen: 31-März-2021]
[30] „DCC“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ptb.de/dcc/v3.0.0/. [Zugegriffen: 18-Sep-2021]

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Investigation of the measurement uncertainty in the 2D-instrument transfer function (ITF) characterization of areal surface topography measuring instruments

M.Sc. **Z. Jiao,** Dr.-Ing. **G. Dai**, Prof. Dr. -Ing. **R. Tutsch**,
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird eine Simulationsmethode zur Messunsicherheitsbestimmung der 2D-ITF-Charakterisierung vorgestellt. Mehrere Fehlerbeiträge zur 2D-ITF, wie das Rauschen der optischen Messung und die Datenauswertungssoftware, werden erfolgreich untersucht.

1. Introduction

Surface topography plays an important role in manufacturing and research, as it defines the functional properties of a surface. Various optical techniques such as phase shift interference microscopy, white light interference microscopy, confocal microscopy and focus variation microscopy have been widely applied for surface metrology with advantages of fast and noncontact measurements. However, the measurement fidelity of these optical tools remains a big challenge [1]. There are three major issues which may lead to deviations in optical surface measurements: geometrical issue, bandwidth characteristics and light-surface interaction [2].

To characterize bandwidth characteristics of the optical measuring tools, a new type of material measure, referred to as a circular calibration standard (CCS), has been recently developed at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) [2]. Several innovative ideas are implemented in its design. Firstly, the pattern has a rotational symmetric shape for characterizing the instrument transfer function (ITF) in different angular directions, thus for characterizing angular-dependent asymmetries of instruments. Secondly, different types of patterns are designed: circular chirp (CC) pattern and circular discrete grating (CDG) pattern. They represent different kinds of spatial signals applicable for characterizing ITFs. A material measure consists of 25 different circular patterns with radii from 30 µm to 300 µm, and wavelengths from 0.1 µm to 150 µm. These patterns can be applied complementary and combinedly, offering high application flexibility for calibrating a variety of instruments, e.g., with different optical objectives from 5× to 100× and with different sizes of field of view (FOV).

The principle of using CCS for ITF characterizing is illustrated in Fig. 1. Before the CCS is being applied, its structure patterns are calibrated using a high-resolution metrology tool, e.g., the metrological large range atomic force microscopy (Met. LR-AFM) available at PTB [3], and

https://doi.org/10.51202/9783816023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

a set of calibration data can be obtained. After the CCS sample is measured by an optical tool to be calibrated, a set of measurement data is obtained. The 2D-ITF of the optical tool is calculated by comparing the spectra of measurement data and calibration data [2] as:

$$ITF(\theta, f) = \frac{F_m(\theta,f)}{F_c(\theta,f)} = \frac{FFT\{V_m(r,\theta)\}}{FFT\{V_c(r,\theta)\}} \quad (1)$$

where, $ITF(\theta, f)$ represents the ITF in polar coordinates with the angular orientation θ and spatial frequency f. The Fourier transformation $F_m(\theta, f)$ and $F_c(\theta, f)$ are calculated by the radial profiles from the measurement data set $V_m(r, \theta)$ and the calibration one $V_c(r, \theta)$ respectively.

Though the concept of ITF was derived from sinusoidal signals, our reference material contains binary patterns. This makes series production using lithographic techniques quite easy and cost-efficient. To reduce the influence of ripples presented in the frequency spectrum of the binarized CCS feature, the raw data of evaluated ITF curves in Eq. (1) is fitted by a function:

$$ITF(f) = \frac{K}{1+(m \cdot f)^n} \quad (2)$$

where three parameters *K*, *m* and *n* are introduced to define the vertical scaling factor, the maximal bandwidth, and the attenuation rate of the ITF, respectively [2].

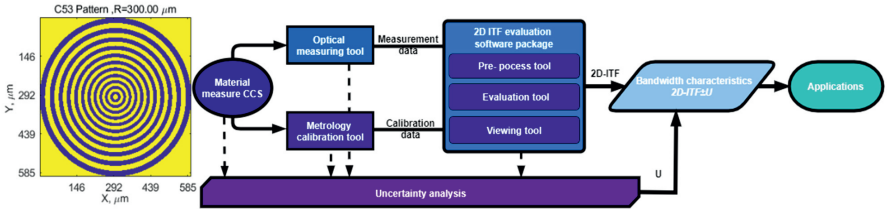


Fig. 1: 2D-ITF characterization procedures using the material measure CCS.

Recently, PTB has developed and optimized methods for manufacturing and calibration of CCS, and an own developed software for ITF evaluation, which make the ITF characterization a routine procedure [2]. To ensure the accuracy and reliability of the characterized 2D-ITF, a 2D-ITF measurement uncertainty investigation is indispensable and discussed in this paper.

2. Concept of the simulation method

The GUM (guide to the expression of uncertainty in measurement) and Monte-Carlo simulation method introduced as supplement 1 to the GUM are the two most often applied methods for the estimation of measurement uncertainty today. GUM method is based on a mathematic model of a measurement, where the sensitivity coefficient of an error source has to be

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

evaluated from its partial derivative. Due to the complex mathematics involved in the 2D-ITF characterization procedure, it makes the setup of its mathematical model and consequently the application of GUM very difficult. Monte-Carlo method is widely applied for estimating measurement uncertainty where complex algorithms are involved. However, it is usually computing intensive. Here, a simulation method is applied for investigating the measurement uncertainty in 2D-ITF characterization.

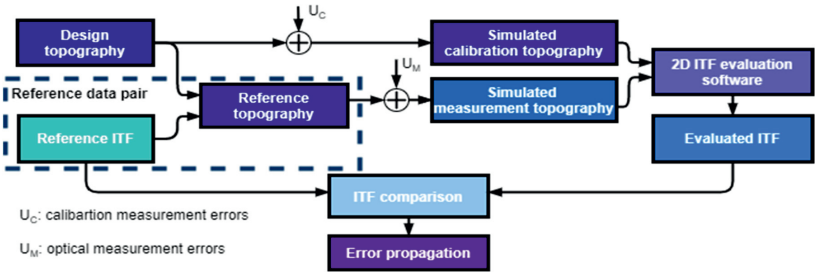


Fig. 2: Principle of the simulation method using reference data pair [3]

The simulation method is illustrated in Fig. 2. It is based on a virtual instrument with a given reference ITF. If the CCS with the design topography is measured by the virtual instrument, its output topography can be calculated as a reference topography. By introducing measurement errors (U_M and U_C) into the design and the reference topographies, respectively, the calibration and measurement topographies can be simulated. They are then inputted to the 2D-ITF evaluation software, leading to an evaluated ITF result. By comparing the evaluated and reference ITFs, the propagation of the introduced measurement errors to the ITF result can be investigated numerically. For better quantitative comparison, we evaluated the measurement uncertainties of the fitted parameters K, m and n as detailed in Eq. (2). Several error contributions to the 2D-ITF were during this study investigated. In this paper, two main uncertainty sources, the data evaluation software and the optical measurement noise will be discussed in detail.

3. Simulation result

The simulation method is inspired by the concept of reference data pair, which is originally developed for software verification [3]. Here, it can be also applied for estimating the uncertainty contribution from 2D-ITF evaluation software. That is, when no additional measurement errors (U_M and U_C) are introduced to the topographies, the deviation between

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

the reference and evaluated topographies can be regarded as the component of measurement uncertainty solely attributed to the algorithm/software. Considering the real sampling frequency of the calibrating and measuring tools, several reference topographies based on different reference ITFs are generated by applying the simulation method. Their ITFs are then evaluated and compared with the reference ITFs. The comparison results are presented in Table 1. The relative measurement uncertainty attributed to the evaluation software is below 3.0% for the parameter *n,* and below 2.1% for parameters *K* and *m*.

Table 1: 2D-ITF evaluation software verification (optical sampling frequency: 3.88 1/µm calibrating sampling frequency: 200 1/µm).

Fitted ITF parameters	**Reference m**	**Evaluated m**	**Reference n**	**Evaluated n**	**Reference K**	**Evaluated K**
Experiment 1	1.0500	1.0593	3.0000	2.9102	0.8000	0.8089
Experiment 2	1.9500	1.9816	3.0000	2.9178	0.8000	0.8105
Experiment 3	1.5000	1.5120	3.6000	3.5287	0.8000	0.8080
Experiment 4	1.5000	1.5171	2.4000	2.3540	0.8000	0.8089
Experiment 5	1.5000	1.5119	3.0000	2.9368	1.0000	1.0112
Experiment 6	1.5000	1.5119	3.0000	2.9368	0.6000	0.6067

The optical measurement noise, known by its randomness, is one of the dominant error sources in ITF characterization. To investigate its uncertainty contribution, we have experimentally investigated the measurement noise of optical tools, and then investigated its error propagation used the simulation method.

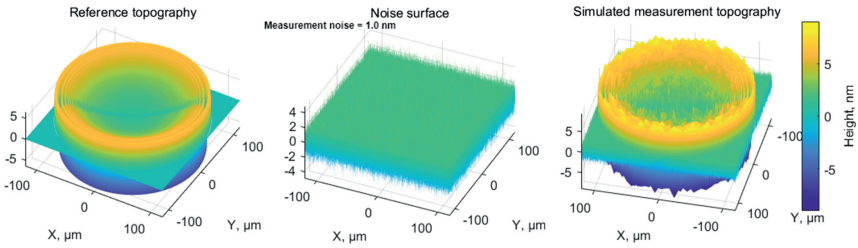


Fig. 3: 3D illustration of a reference topography (left) adding a simulated noise surface (middle) for generating a simulated measurement topography (right).

The noise level of a phase shift interferometer type SneoX is calibrated as 0.112 nm by applying 50x Mirau objective (NA=0.55, FOV 350.88 µm x 264.19 µm) and an optical light source wavelength of 530 nm. The definition and evaluation method of optical measurement noise introduced by P. De Groot [5] was applied. As illustrated in Fig. 3, the measurement

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

topography is simulated by adding a simulated noise surface based on a parameterized white Gaussian measurement noise [5] to a reference topography. The propagation of the added noise to the ITF can be obtained by comparing the reference and evaluated ITFs. In the study, 10 noises added measurement topographies based on the same reference topography and different noise surface generated with the same noise parameter are simulated. The standard deviations of ITF fitting parameters of 10 simulations are calculated and listed in Table 2. The result shows that the measurement noise has a strong influence on the ITF result, particularly on the parameter *n*. It is due to decreased signal to noise ratio when the measurement noise is present, particularly in the high-frequency region.

Table 2: The propagation of the calibrated optical measurement noise

Optical measurement noise level (RMS value)	**Std. m**	**Std. n**	**Std. k**
0.112 nm	0.87%	1.57%	0.75%
0.260 nm	1.73%	3.03%	1.13%

In this study a measurement uncertainty budget of the ITF characterization is finally set up. The relative extended measurement uncertainties (k=2) of ITF parameters m, n, K are evaluated as 3.1%, 4.4% and 2.9%, respectively. The main error sources are the measurement noise and the evaluation algorithm/software.

4. Experimental verification

To check if the estimated measurement uncertainty well describes the performance of real measurements, ITFs from 10 repeated experimental measurements were evaluated and plotted in Fig. 4. The measurement deviation is well within the estimated uncertainty, approving the plausibility of the evaluated measurement uncertainty.

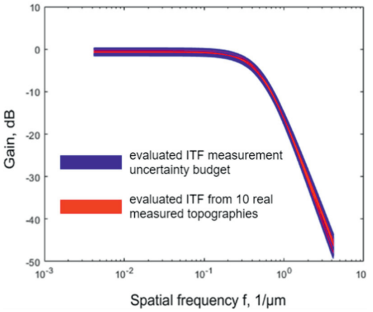


Fig. 4: Measurement uncertainty (blue) vs. stability of 10 repeated measurements (red)

5. Conclusion

A simulation method for measurement uncertainty estimation of 2D-ITF characterization is presented. Several error contributions to the 2D-ITF, including the optical measurement noise and the data evaluation software, are successfully investigated.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[1] Leach, R. et al: Open questions in surface topography measurement: a roadmap (2015) Surf. Topogr.: Metrol. Prop. **3** 013001

[2] Dai, G et al: A novel material measure for characterising two-dimensional instrument transfer functions of areal surface topography measuring instruments (2020) Surf. Topogr.: Metrol. Prop. **8** 045025

[3] Dai, G et al: High-speed metrological large range AFM (2015) Meas. Sci. Technol. **26** 095402

[4] Kok, G. et al: Reference data sets for testing metrology software (2016) Metrologia **53** 1091

[5] De Groot, P et al: Definition and evaluation of topography measurement noise in optical instruments (2020) Optical Engineering 59(6): 0641101-1-0641101-12

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Prüf‘ ich noch – oder mess‘ ich schon?

Ein Konzept für die Prüfunsicherheitsbestimmung von zerstörungsfreien Prüfsystemen

Dr.-Ing. **D. Kanzler,** Dr.-Ing. **V. K. Rentala,**
Applied Validation of NDT, Berlin;
Dr. Marija Bertovic, T. Heckel, M. Rosenthal,
Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung, Berlin;
Prof. **S. Keßler, R. Stolz, F. Dethof,**
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg;
Dr.-Ing. **A. Jüngert,** Materialprüfanstalt, Stuttgart;
Dr.-Ing. **J. Vrana,** Vrana GmbH, Rimsting

Kurzfassung

Häufig stellt sich die Frage, ob eine Materialinhomogenität kritisch für die strukturelle Integrität eines Bauteils ist. Dies ist häufig abhängig von der Größe und der Geometrie dieser Materialinhomogenität. Während die korrekte Bestimmung einer Defektgröße zweifelsfrei eine Messaufgabe darstellt, ist die Detektion eines Materialdefekts die Hauptaufgabe eines Prüfsystems. Allerdings sind manche Defekte zu klein, um detektiert zu werden. Es ist jedoch schwierig, etwas zu bemessen, was nur schwer gefunden werden kann, stellen sowohl die Detektion als auch die Fähigkeit den Defekt zu bemaßen, Teile der der Bewertung eines Prüfsystems dar.
Die vorliegende Publikation beschäftigt sich zum einen mit der Notwendigkeit, die Auffindwahrscheinlichkeit von Prüfverfahren zu bewerten, und zum anderen mit den Schritten, mit denen das Konzept der Prüfunsicherheitsbewertung national und international vorangetrieben wird. Final werden die Methoden evaluiert, die den Schulterschluss zwischen Prüf- und Messunsicherheitsbestimmung ermöglichen. Ergänzt wird der Artikel mit Beispielen aus der Industrie, welche die aktuelle Relevanz des Themas untermauern.

1. Von der Messunsicherheit zur Prüfunsicherheit

Schon in der Schulzeit wird man bei der Durchführung der ersten Experimente mit der Messunsicherheit konfrontiert und somit in die wissenschaftliche Arbeitsweise bei experimentellen Versuchsdurchführungen eingeführt. Der erste Kontakt mit fortschrittlichen Prüfverfahren während des Studiums, ist meist auf den Kreis der Ingenieur:innen begrenzt. Von der Prüfunsicherheit hingegen haben die meisten Personen noch nie gehört. Aus diesem Grund ist es zunächst nachvollziehbar, die bewährten und langgelernten Methoden der Messunsicherheit

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

auf die Prüfung anwenden zu wollen. Dieser Ansatz ist jedoch nicht zielführend. Im Folgenden soll nun gezeigt werden, was Mess- und Prüfverfahren unterscheidet und was sie eint. Außerdem wird ein Vorschlag dargelegt, welcher die Bewertung von Prüfverfahren und deren Unsicherheit auf den gleichen Prinzipien, wie die Messunsicherheit, herleitet.

2. Zuverlässigkeit bei Prüfverfahren

Die Prüfverfahren, auf die sich dieser Artikel fokussiert, werden häufig im Ingenieurwesen in den Bereichen eingesetzt, in denen Entscheidungen getroffen werden müssen, z.B. ob eine Komponente ausreichend designt und produziert wurde, oder um den physikalischen (z.B. Druck, Torsionskräfte, Spannungen) oder chemischen Anforderungen (z.B. Korrosion) standzuhalten. Eine besondere Auswahl von Prüfverfahren stellen hierbei die zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) dar, durch die eine 100%-Prüfung von Komponenten auf Materialfehler möglich ist. Besonders in den Fällen von hohen Ausfallfolgekosten und in sicherheitsrelevanten Bauteilen wird die ZfP häufig angewendet. Mit physikalischen Wirkungsweisen kann so auf einen Materialfehler geschlossen werden. Ein Prüfverfahren verhält sich ähnlich wie ein Messsystem, beide können physikalische Einheiten liefern (eine Ultraschallwelle wird in Sekunden gemessen, die Induktion im Wirbelstromsensor in A). Jedoch ist das erste Resultat eines Prüfsystems: „Indikation“ oder „keine Indikation“. Indikation oder Anzeige sagen dabei noch nicht aus, ob tatsächlich ein Defekt vorliegt oder nicht. Auf die Messunsicherheit bezogen bedeutet dies: „Wie soll ich etwas messen, wenn ich nicht sicher sein kann, ob das, was gemessen wird, wirklich ein Defekt ist?“ Die Prüfunsicherheit muss demzufolge eine Stufe vor der Messung angesetzt werden.

Aus gerade beschriebenen Gründen wurde im zweiten amerikanisch-europäischen Workshop über ZfP-Zuverlässigkeit Folgendes definiert [1], dass die Zuverlässigkeit von ZfP-Systemen der Fähigkeitsgrad ist, nach dem das ZfP-System seine Anforderung bezüglich Detektion, Charakterisierung und Fehlalarmen erfüllt. Im nun Nachfolgenden sollen vor allem die Detektion und die Charakterisierung von Materialinhomogenitäten im Vordergrund stehen.

Soll eine Risslänge mit einem Lineal gemessen werden, stellt die Ausrichtung eines Defekts kaum ein Problem dar. Jedoch können bereits die kleinsten Positionsabweichungen eines Risses in der Ultraschallprüfung dazu führen, dass ein Defekt nicht gefunden werden kann, wie beispielsweise die Untersuchung eines Zugunglücks in Deutschland zeigte [2].

Es steht also außer Frage, dass die Prüffähigkeit untersucht und die Prüfunsicherheit bestimmt werden muss, beginnend mit der Fähigkeit eines Prüfverfahrens einen Defekt zu finden bzw. nicht zu finden. Hier wird von der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection: POD) gesprochen. Die POD gibt an, welcher Defekt von der prüfenden Person nicht gefunden

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

wird, bezogen auf den größten Defekt, der vielleicht unentdeckt bleibt. Die POD basiert auf statistischen Modellen und wird aufgrund einer wissenschaftlich entwickelten Versuchsplanung anhand von Experimenten durchgeführt.

Der Unterschied zeigt sich bei genauerer Betrachtung der Zuverlässigkeitsforderung hinsichtlich der Defektcharakterisierung. Nach erfolgreicher Wahrnehmung einer Anzeige kann noch nicht gesagt werden, ob es sich wirklich um einen Defekt handelt. Selbst wenn vorerst ein Fehlalarm ausgeschlossen ist, stellt sich immer noch die Frage, ob die Inhomogenität, die detektiert wurde, tatsächlich den Kriterien eines Defekts entspricht. Hier wird demzufolge von der Charakterisierung gesprochen. Wird zum Beispiel eine runde Pore in einer Schweißnaht gefunden, so hat die Inhomogenität (die Pore) eine Anzeige hervorgerufen. Jedoch ist möglicherweise eine runde Pore an dieser Stelle, in dieser Größe für die Anforderungen an die Schweißnaht deutlich unkritischer als ein deutlich kleinerer Riss. Für die Charakterisierung sind also nach der Detektion Kritikalitätsannahmen zu bewerten. Hierzu zählen die Art des Defekts, die Position des Defekts sowie die Defektgröße. An dieser Stelle vermischen sich Prüf- und Messunsicherheit. Ein logisches Vorgehen wäre, dass nach der Bestimmung der Auffindwahrscheinlichkeit, die Charakterisierungswahrscheinlichkeit hinsichtlich des Defekttyps (*Probability of Characterisation / Identification*) bestimmte werden wird. Basierend auf der Abgrenzung, dass der Defekt gefunden und hinsichtlich seiner Defektart charakterisiert wurde, kann nun die Messunsicherheit des Prüfverfahrens bestimmt werden (hier wird auch von *Probability of Correct Sizing* gesprochen).

Die wesentlichen Aufgaben der Prüfung kommen leider in der Messunsicherheitsbetrachtung zu kurz. Aus diesem Grund haben sich vor allem die POD-Ansätze in vielen Industriebereichen durchgesetzt, da diese genau wie die Messunsicherheit, auf wissenschaftlichen Betrachtungen sowie statistischen Modellen aufbauen.

3. Beispiel aus der Praxis

Der aktuelle Trend in der Akkreditierung von Prüflaboren (nach DIN EN ISO/IEC 17025) ist, dass die Bestimmung der Messunsicherheit und die Reduzierung der Einflüsse über die Rückführbarkeitsbestimmung von jeglicher Art von Messequipment durchgeführt wird.

Während der Aufwand hierfür sehr groß ist, steht der Nutzen dazu häufig nicht im Verhältnis. So zeigt beispielsweise einer Untersuchung bei der visuellen Prüfung [3], dass zwar die normativen Anforderungen (in diesem Fall die Einhaltung einer Beleuchtungsstärke von 500 lux auf der Oberfläche) eine wichtige Rolle spielen, dass jedoch auch die Bestimmung in höchster Genauigkeit eher dazu führt, dass wesentlichere Einflüsse (Verständnis der Prüfanweisung) aus dem Fokus geraten und einen deutlicheren Einfluss haben könnten.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Lösung hierfür ist die Bestimmung der Fähigkeit eines Prüfverfahrens mit dem oben-genannten Mittel der Zuverlässigkeitsbewertung. Wird es notwendig, dass eine Komponente mit der Rückführbarkeit überwacht werden muss, so ergibt auch diese höchste Genauigkeit wiederum Sinn. Sowohl die Mess- als auch die Prüfunsicherheit sollen daher Hand in Hand gehen und sich ergänzen.

4. Zusammenspiel zwischen Mess- und Prüfunsicherheit

Häufig ist die Einteilung zwischen Prüfung und Messung nicht scharf abgrenzt. Eine Dickenmessung für die Korrosionsüberprüfung mit Ultraschall ist somit mehr ein Messsystem als ein Prüfsystem, da die kritische Messgröße eher dem physikalischen Prinzip entspricht und eine Detektion nicht Teil der Messaufgabe ist. Doch genau dieser Übergang wird durch das oben vorgestellte Vorgehen deutlich klarer. Darüber hinaus ist die statistische Auswertung von experimentellen Daten nur ein Teil der Unsicherheitsbetrachtung. Die Erfassung von Einflussgrößen auf die Messung / Prüfung und deren Abschätzung auf das Ergebnis, z.B. mit Hilfe des Unsicherheitsbudgets, ist wesentlich. Aus Sicht der Prüfung hat sich bei der Untersuchung der Einflussgrößen das modulare Modell der Zuverlässigkeitsbewertung etabliert.

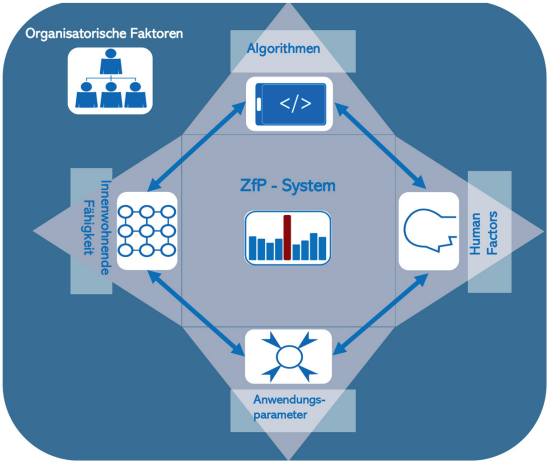


Bild 1: Modulares Modell für die Zuverlässigkeit von Prüfverfahren im Rahmen der ZfP 4.0 [4]

Das aktuelle modulare Modell beschreibt, die Einflüsse, die aus der innewohnenden Fähigkeit, aus deren Anwendung in der Umwelt, durch den Einfluss von menschlichen Faktoren, durch den Einsatz von Algorithmen (z.B. künstliche Intelligenz bei der Auswertung) und in organisatorischen Kontext (z.B. als Schnittstelle mit dem Management) resultieren. Das Modell

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

bildet die Möglichkeit, weitergehende Auswertungen (z.B. mit Hilfe eines Ishikawa-Diagramms für die FMEA-Analyse) zu strukturieren und durchzuführen.
Um sich tatsächlich auch in der Akkreditierung der Prüfunsicherheit als Methode zu etablieren, ist jedoch das Normenwerk anzupassen und bereits international anerkannten Methoden in das normative Regelwerk zu überführen. Dieser Aufgabe haben sich die Autor:innen gewidmet. Durch die erfolgreiche Einführung der Zuverlässigkeitsbewertung kann eine sinnvolle Diskussion der Fähigkeit der Prüfverfahren stattfinden. Ein erster Entwurf ist für das kommende Jahr geplant.

5. Anerkennung:

Das Projekt „normPOD“ wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Namen „Normung für die probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit für zerstörungsfreie Prüfverfahren“ gefördert und verzeichnet das Förderkennzeichen 03TN0006A.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Des Weiteren möchten die Autor:innen an dieser Stelle der Deutschen Gesellschaft der zerstörungsfreien Prüfung (DGZfP), für die hilfreichen Diskussion hinsichtlich der Akkreditierung (Hr. Steffen Bessert) und der gemeinsamen Durchführung der visuellen Prüfung, die hier als Beispiel diente (Hr. Michel Blankschän), danken.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

6. Literaturverzeichnis

[1] C. Müller, T. Fritz, G.-R. Tillack, C. Bellon und M. Scharmach. „Theory and Application of the Modular Approach to NDE Reliability Bridging the Gab Between Safety Requirements and Economy“. In: https://www.ndt.net/article/v06n09/mueller/mueller.htm, Vol.06, Nr.09 (2001)

[2] U. Zerbst, S. Beretta, G. Köhler, A. Lawton, M. Vormwald, H.Th. Beier, C. Klinger, I. Cerny, J. Rudlin, T. Heckel, D. Klingbeil. „Safe life and damage tolerance aspects of railway axles – A review”. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 98, S. 214-271 (2012). https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.09.029

[3] Blankschän, D. Kanzler, M. Bertovic, M. Rosenthal, S. Lindt. „Untersuchung der Einflussgrößen auf die Anzeigenerkennbarkeit bei der visuellen Prüfung“. *ZfP-Zeitung* 171, S. 48-52. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP): (2020)

[4] D. Kanzler, V. Rentala “Reliability Evaluation of Testing Systems and Their Connection to NDE 4.0”, In N. Meyendorf, N. Ida, R. Singh, & J. Vrana (Eds.), *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*. Springer, Cham. (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-48200-8_3-1

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

„Remote-leaded“ Annahmeprüfung für Koordinatenmessgeräte

„Remote-leaded“ Acceptance for Coordinate Measuring Machines (CMMs)

Dr.-Ing. **D. Imkamp**, Dipl.-Ing. (FH) **R. Friedel**, **D. Smolik**,
V. Greifzu, Carl ZEISS Industrielle Messtechnik, Germany, Oberkochen;
S. Maruyama, Tokyo Seimitsu Co., LTD (ACCRETECH), Japan
S. Miyazaki, ASANUMAGIKEN Co., LTD, Japan

Kurzfassung

Eine Annahmeprüfung eines Koordinatenmessgerätes durch eine Kalibrierung erfordert, besonders im Fall der Anerkennung der Vorgehensweise durch eine Akkreditierungsstelle, die Durchführung der Messung durch geeignet qualifiziertes Personal am Aufstellort des Gerätes. Aufgrund von Reisebeschränkungen ist ein solcher Vor-Ort Besuch mit großem Aufwand verbunden oder in einzelnen Fällen nicht möglich. Daher besteht die Notwendigkeit unter Nutzung moderner digitaler Kommunikationsmittel geeignetes Personal zu qualifizieren und bei der Durchführung der erforderlichen Messungen zu überwachen. Anhand eines Beispiels wird das Vorgehen zur ferngesteuerten („Remote-leaded“) Annahmeprüfung eines hochgenauen Koordinatenmessgerätes vorgestellt. Dazu gehören die Ausbildung und Prüfung des Personals vor Ort, die Bereitstellung geeigneter Normale, die Durchführung und Überwachung der Messung am Gerät und schließlich die Auswertung der gelieferten Messdaten. Dabei wird auch diskutiert, welche Maßnahmen erforderlich sind, um die zu erzielende Testunsicherheit bei der Annahmeprüfung einzuhalten.

Abstract

An acceptance test of a coordinate measuring machine by a calibration requires, especially in case of approval of the procedure by an accreditation body, that the measurement is carried out by suitably qualified personnel at the installation site of the machine. Due to the travel restrictions, such an on-site visit is associated with great effort or in single cases not possible. Therefore, there is need to qualify suitable personnel using modern digital techniques for communication and to monitor the personnel while the necessary measurements are performed. Using an example, the procedure for the "remote-leaded" acceptance test of a high-precision coordinate measuring machine is presented. This includes the training and

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

testing of the staff on site, the provision of suitable standards, the implementation and monitoring of the measurement on the machine and finally the evaluation of the measurement data supplied. It will also be discussed which actions are necessary in order to comply with the test uncertainty to be achieved during the acceptance test.

1. Introduction

The technical methods for acceptance testing of coordinate measuring machines (CMMs) by calibrating the devices are defined in the international series of standards DIN EN ISO 10360 [1]. Further details can be found in the German series of guidelines VDI/VDE 2617 [2]. Depending on the type and the equipment, different parts of the standard are used. The information on the measurement errors of coordinate measuring systems can be broken down into information on the length measurement error and the probing error (Fig. 1). The characterizing parameter for a coordinate measuring system is the length measurement error, which considers volumetric influences and typical influences from the probing process. In addition, the probing error determines the performance of the sensors in various forms of applications. What all measurement deviations have in common is that they are determined from a comparison between the indicated measurement value and the calibration value of a standard. To determine conformity, the determined measurement error must not exceed the permitted measurement error specified by the manufacturer (abbreviated: MPE = Maximum Permissible Error) taking into account the test uncertainty [3] of the test procedure [4, 5].

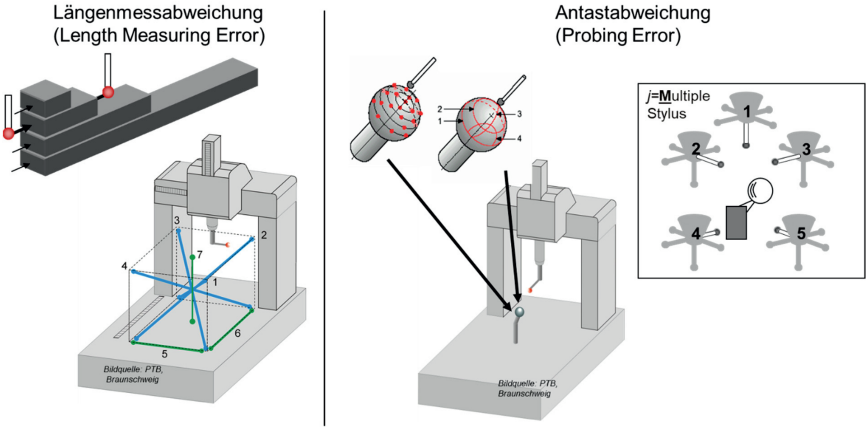


Fig. 1: Parameters for calibrating coordinate measuring machines with tactile sensors

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

The requirements for the competencies of a laboratory to perform a calibration are defined in DIN EN ISO/IEC 17025 [6]. They form the basis for laboratory's accreditation by an accreditation body. These requirements are divided into four areas: structural requirements, requirements for resources, requirements for processes and requirements for the management system. The management requirements can be met by a management system in accordance with DIN EN ISO 9001 [7].

The standard DIN EN ISO/IEC 17025 underlies laboratory's responsibility for the measurement results. In order to meet this responsibility, the laboratory must control the resources used for all measurements that are required for the calibration. This is mainly achieved using its own resources. In case of coordinate measuring machines, which are usually not transportable, these resources are deployed at the installation site of the measuring machine. This procedure is known as "on-site calibration". In case of travel restrictions, however, this is not possible for the resource “Personnel”. Here, on-site staff must be used.

The use of on-site personnel who do not belong to the laboratory is an externally provided service. Requirements for such externally provided services are explicitly defined in DIN EN ISO/IEC 17025. The same requirements apply to external personnel on site as to own personnel. It is crucial that the defined processes performing the measurement are implemented by external personnel as well as by in-house personnel.

The basis for this is an appropriated qualification of the external personnel. It is advisable to use personnel from a laboratory that is accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025 in this area, so that the staff is familiar with the basic processes. In that case the qualification can largely be limited to the application of the process documentation for the measurement tasks to be carried out. In case of foreign personnel, the documentation must be translated and checked as part of the qualification process.

2. Equipment and technical prerequisites

In contrast to the personnel, the required standards like step gages and reference spheres can be transported to the machine installation location. This means that the requirements to the traceability can still be met.

In case of program-controlled measuring devices, like CMMs, the same measuring programs (CNC-programs) are always used, in order to ensure that the procedures of the process

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

descriptions are implemented correctly. The use of these measuring programs by external personnel is trained before the calibration. The application of the measuring programs is monitored by remote access to the measuring machine's computer via Internet connection. The machine controller can also be accessed via this connection in order to check settings and parameters [8]. In addition, the work of the personnel during the measurement is monitored by cameras over the Internet. A voice connection available in parallel enables answering questions that arise during measurements and, if necessary, corrective action to be taken (Fig. 2).

Fig. 2: Remote monitoring of the calibration

3. Example

The "remote-leaded" acceptance test was carried out overseas for a high-precision coordinate measuring machine with tactile sensors, as described in [9, 10], because manufacturer's personnel were not allowed to enter due to travel restrictions. The local service partner operates a laboratory that calibrates coordinate measuring machines and is also accredited by the local accreditation body to calibrate coordinate measuring machines on site. However, the possibilities for the high-precision machines are not sufficient.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

To prepare the calibration, the required standards (step gauge for the length measurement error and reference sphere for the probing error) and the associated measurement programs were delivered to the local laboratory. The personnel were trained, and the procedure was tested on a similar machine in the local laboratory. The communication technologies described above were used for image and voice transmission as well as remote access to the measuring machine computer.

The calibration on user's machine, that is also used to calibrate supervision gages [11], was carried out in the same way. The same communication technologies were used as in the previous training. These were sent to user's site, installed and tested before the actual calibration. The calibration could then be carried out successfully (Fig. 3). Due to the measures described above, such as the use of standards from the accredited laboratory and the same procedure, the same test uncertainty can be assumed for the "remote-leaded" acceptance test.

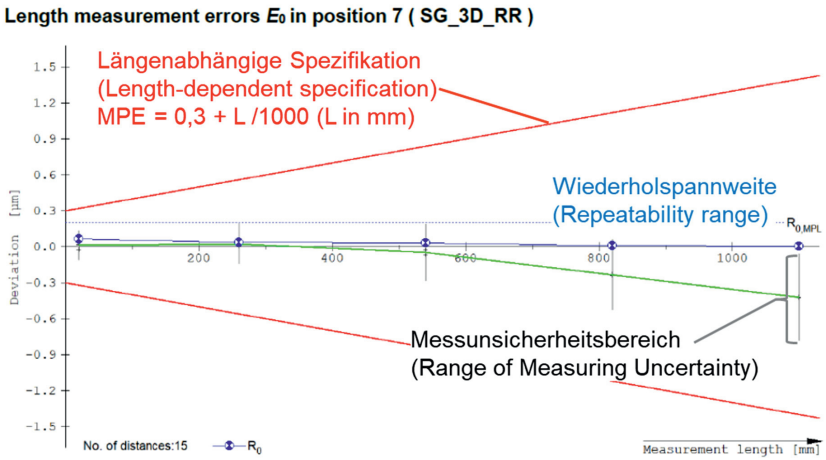


Fig. 3: Presentation of the length measuring errors in the length measuring error diagram with measuring uncertainty bars, showing the uncertainty range that must be within the specification limits

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Summary and Outlook

The effort involved in carrying out a “remote-leaded” acceptance test is large, since the required personnel must be available twice. During the qualification as well as during the actual calibration, personnel from the accredited laboratory as well as from the external service provider are required. Furthermore, suitable communication technology is necessary for image and voice transmission over the Internet, which must be set up and tested individually at the installation site of the measuring machine. In contrast, there are savings in travel time and travel expenses. Compared to a calibration with personnel from the accredited body on site, the effort in this example was higher, which can be attributed to the initial effort for qualifying the service provider’s personnel and the communication equipment that has not been tested before. However, the quality of the results is comparable and cost advantages can be expected if this calibration is carried out more frequently. Especially when the travel restrictions are long-term and the travel risks increase, the "remote-leaded" acceptance test is the only way to fulfill regular calibration intervals for such installations.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[1] DIN EN ISO 10360 Geometrische Produktspezifikation (GPS), Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) / Koordinatenmesssysteme (KMS), (Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) / coordinate measuring systems (CMS)) Teil 1-13, 2003 - 2021.

[2] VDI/VDE-Richtlinie 2617 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung (Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification) 2006 bis 2019.

[3] DIN ISO/TS 23165 (Vornorm) Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Leitfaden zur Ermittlung der Testunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) (Geometrical product specifications (GPS) - Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty) August 2008, ISO/TS 17865 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Leitfaden zur Ermittlung der Testunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) bei KMGs mit berührenden Einfach- und Mehrfachtastersystemen (Geometrical product specifications (GPS) - Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty for CMMs using single and multiple stylus contacting probing systems) 2016.

[4] DIN EN ISO 14253-1 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen (Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications) 2018.

[5] Richtlinie DKD-R 4-3 Blatt 18.1, Kalibrieren von Messmitteln für geometrische Messgrößen, Kalibrieren der messtechnischen Eigenschaften von Koordinatenmessgeräten (KMG) nach DIN EN ISO 10360 und VDI/VDE 2617, Deutscher Kalibrierdienst bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, Ausgabe 9/2018. (Internet, 11.04.2021: www.dkd.eu DAkkS: http://www.dakks.de/doc_kalibrier)

[6] DIN EN ISO/IEC 17025 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); (General requirements for the competence of testing and calibration laboratories) 2018.

[7] DIN EN ISO 9001 Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen (Quality management systems – Requirements) 2015.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[8] Imkamp, D., Grieser C.: Onboard Diagnostics - Ein innovatives System zur Maschinenüberwachung, in: Sensoren und Messsysteme 2004, Tagung Ludwigsburg 15.-16.3.2004 (VDI-Berichte 1829), VDI-Verlag, Düsseldorf 2004, S.785-789.

[9] Bernhardt, R., Imkamp, D., Werner, K., Gabbia, A., Bendzulla, K.: Recent Results for Length, Form and Gear Measurement on a New CMM Design for Precision Engineering,
in: proceedings of euspen's 17th International Conference &Exhibition, Hannover, Germany, May 2017.

[10] Neugebauer, M., Franke, M., Heißelmann, D., Kniel, K., Bernhardt, R., Bendzulla, K.: Metrological traceability of an ultra-accurate CMM XENOS, in: proceedings of euspen's 19th International Conference &Exhibition, Bilbao, Spain, June 2019.

[11] Europäisches Patent (European Patent) 1189020: Inspektionseichblock und dessen Produktion (Englisch: Inspection master block and method of production the same) 2001. (http://www.asanuma-g.jp/service/cmm/qm/index.html)

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Erstellung des Messunsicherheitsbudgets eines Torsionsprüfstandes und dessen Eignungsuntersuchung als Basis der funktional-geometrischen Korrelation

S. Schiefer, Q-DAS GmbH, Chemnitz;
M. Gerlach, HS Mittweida;
J. Seewig, Technische Universität Kaiserslautern

Kurzfassung

Zur Entwicklung geometrisch funktionaler Kenngrößen für die Oberflächenbeschreibung ist die Kenntnis über die Zusammensetzung und Wirkung der Bauteilfunktion entscheidend, welche von vielen verschiedenen Einflussfaktoren abhängt. Für die gezielte Analyse und Optimierung reibschlüssiger Verbindungen, ist das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Fertigung, Oberflächenstrukturen und der resultierenden Funktion existentiell. Basis dieser funktionalen Korrelation bildet die Analyse der Einflussfaktoren, Messunsicherheitsbestimmung für die Haftreibwertprüfung sowie weiterführend der Auswirkungen auf die geometrische Oberflächenbeschreibung mittels neuer Kenngrößen.

Abstract (optional)

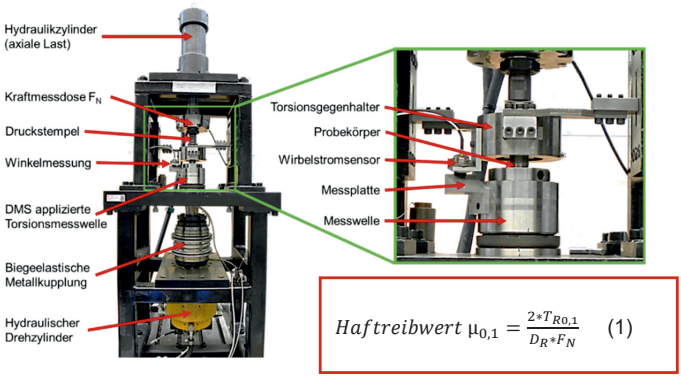
For the development of geometric and functional parameters to describe surfaces the knowledge about the composition and the impact of a component function, which depends on several different influencing factors, is required. To evaluate and improving the function of frictionally engaged surfaces it is important to have a deep understanding of the correlation between processing, surface texture and the resulting function. The standard of a functional correlation is an analysis of the different influencing factors, the uncertainty of measurement for the friction coefficient testing and the impact for the geometrical characterization of surfaces with new parameters.

1. Erstellung des Messunsicherheitsbudgets für einen Torsionsprüfstand

Grundlage der Messunsicherheitsbetrachtung ist ein Referenzprüfstand zur Bestimmung des Haftreibwertes $\mu_{0,1}$ für Stirnkontakte unter Torsionsschub (Bild 1). Die Ermittlung der Reibwertrelevanten Einflussgroßen erfolgte anhand eines Ishikawa-Diagramms, einer anschließenden Prozess-FMEA und der Komponenten der Berechnungsformel (1) für den

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Haftreibwert. Die systematischen und zufälligen Fehler sind dabei den drei Hauptkomponenten D_R, $T_{R0,1}$, F_N und den entsprechenden Teilbudgets zugeordnet.



$$Haftreibwert\ \mu_{0,1} = \frac{2*T_{R0,1}}{D_R*F_N} \quad (1)$$

Bild 1: Aufbau des Torsionsreibwertprüfstandes mit Winkelmesseinrichtung

In den nachfolgenden Teilbudgets in Tabelle 1 sind neben den Linearität-, Auflösungs- und Genauigkeitsabweichungen der Sensoren, Anzeigeabweichungen, Abweichungen durch das graphische Ermittlungsverfahren anhand von Torsions- Verdrehwinkel-Diagrammen zur Bestimmung des Torsionsmomentes bei relativer Verdrehung von 0,1° und die fertigungs- sowie konstruktiv bedingten Abweichungen enthalten. Die Datenbasis bildeten Herstellerangaben, Kalibrierscheine sowie Messungen unter Wiederholungsbedingungen. Es wurden additive Modelle und unkorrelierte Eingangsgrößen dabei unterstellt.

Tabelle 1: Erstellung der Teilbudgets

Einflussgrößen:	δD_a	Abweichungen von D_a durch Fertigung
	δD_i	Abweichungen von D_i durch Fertigung
	$D_{R\Delta T}$	Ausdehnung infolge der Temperaturänderung
	D_{RV}	Versatz der beiden Probekörper zueinander
	δD_{RAV}	Fehler aus der Annahme der Flächenkonstanz
	$\delta\varphi_L$	Linearitätsabweichungen bei der Winkelmessung
	$\delta\varphi_A$	Auflösungsabweichungen bei der Winkelmessung
	$\delta\varphi_G$	Genauigkeitsabweichungen bei der Winkelmessung
	δAw_{TR}	relative Anzeigeabweichung T_R
	δSw_{TR}	relative Spannweitenabweichung T_R
	δDMS	Abweichungen der Dehnungsmessstreifen

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

	δRa_{TW} Restanzeige T_W δAa_{TW} Anzeigeauflösung T_W $\delta V_{TR0,1}$ Abweichungen aufgrund des Ermittlungsverfahrens für $T_{R0,1}$ δAw_{FN} relative Anzeigeabweichung F_N δU_{FN} relative Spannweitenabweichung F_N δA Abweichung der Auswertecharakteristik δU_{KMD} relative Spannungsabweichung der Kraftmessdose δS_{KMD} relative Signalabweichung der Kraftmessdose $\delta\alpha$ winkelbezogene Abweichung der Krafteinleitung
Modellgleichungen:	$D_R = D_R - \delta D_a - \delta D_i - D_{R\Delta T} - D_{RV} - \delta D_{RAV}$ (2) $T_{R0,1} = T_R - \delta D_{RV} - \delta D_{RAV} - \delta\varphi_L - \delta\varphi_A - \delta\varphi_G - \delta Aw_{TR} - \delta Sw_{TR} - \delta DMS - \delta Ra_{TW} - \delta Aa_{TW} - \delta V_{TR0,1}$ (3) $F_N = F_N - \delta Aw_{FN} - \delta U_{FN} - \delta A - \delta U_{KMD} - \delta S_{KMD} - \delta\alpha$ (4)
Sensitivitäts-koeffizienten c_i:	$\frac{\partial D_R}{\partial D_a} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3D_a^2 \cdot (D_a^2 - D_i^2) - 2D_a \cdot (D_a^3 - D_i^3)}{(D_a^2 - D_i^2)^2}$ (5) $\frac{\partial D_R}{\partial D_i} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2D_i^2 \cdot (D_a^3 - D_i^3) - 3D_i \cdot (D_a^2 - D_i^2)}{(D_a^2 - D_i^2)^2}$ (6) $\frac{\partial D_R}{\partial A} = -\frac{2\pi}{3A^2}\left(\left(\frac{D_A}{2}\right)^3 - \left(\frac{D_i}{2}\right)^3\right)$ (7) $\frac{\partial T_R}{\partial A} = -\frac{2\pi F_N}{3A^2}\left(\left(\frac{D_A}{2}\right)^3 - \left(\frac{D_i}{2}\right)^3\right)$ (8)
Teilbudgetgleichungen:	$u_{(D_R)} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_R}{\partial D_a} u_{(D_A)}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_R}{\partial D_i} u_{(D_i)}\right)^2 + \left(u_{(D_{R\Delta T})}\right)^2 + \left(u_{(D_{RV})}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_R}{\partial A} u_{RAV}\right)^2}$ (9) $u_{(T_{R0,1})} = \sqrt{\left(u_{(D_{RV})}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_R}{\partial A} u_{RAV}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{\varphi L}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{\varphi A}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{\varphi G}\right)^2 + \left(\frac{\delta Aw_{TR}}{a_n}\right)^2 \ldots$ $\ldots + \left(\frac{\delta Sw_{TR}}{a_n}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{DMS}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{Ra\,TW}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{Aa\,TW}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} u_{V_{TR0,1}}\right)^2}$ (10) $u_{(F_N)} = \sqrt{\left(\left(\frac{\delta Aw_{FN}}{a_n}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_{FN}}{a_n}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} u_A\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{U_{KMD}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{S_{KMD}}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} u_\alpha\right)^2}$ (11)

Die komplette Messunsicherheitsberechnung für die Haftreibwertermittlung $\mu_{0,1}$ basiert auf der quadratischen Fortpflanzung der Teilbudgets, und wird mit einem Vertrauensniveau von 95% für die Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit U festgesetzt.

$$\boldsymbol{U_{0,95} = 2 \cdot u_{\mu 0,1} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \mu_{0,1}}{\partial T_{R0,1}} * u_{(T_{R0,1})}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mu_{0,1}}{\partial D_R} * u_{(D_R)}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mu_{0,1}}{\partial F_N} * u_{(F_N)}\right)^2} = 0,005999}$$

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Eignungsbeurteilung

Für die Beurteilung der Messwerte auf Basis des Prüfstandes, der Analyse funktionaler Einflüsse (Oberflächenstruktur, Form, Lage etc.) sowie deren Auswirkung und Quantifizierung bedarf es einer Eignungseinschätzung des Prüfprozesses. Auf Basis der berechneten erweiterten Messunsicherheit $U_{95\%}$ wird ein Eignungskennwert ermittelt (12). [9] Eines toleranzähnlicher Wertes TOL wurde anhand einer Statistikreihe, ausgehend vom Mittelwert, die Spanne vom Maximal- zum Minimalwert bestimmt (Tabelle).

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{0,95}}{TOL} \cdot 100\% \quad (12)$$

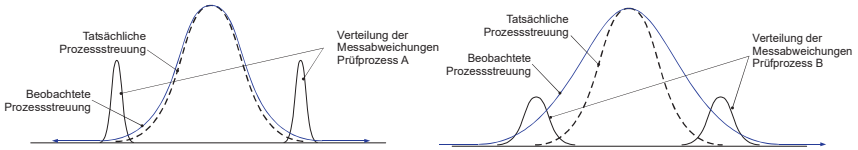
Tabelle 2: Werte aus der Statistikserie

Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert	MW ± toleranzähnlicher Bereich
0,215	0,27	0,16	0,215 ±0,055

Der Eignungswert beträgt **10,90%,** welcher unterhalb des von der VDA 5 Band empfohlenen Richtwertes von 15 % liegt. Dies gilt als Nachweis für die Eignung des Prüfprozesses.

3. Ausblick

Zur weiteren Untersuchung der Korrelation zwischen Haftreibwert, Oberflächentexturen und Form- und Lageeigenschaften dient die ermittelte Messunsicherheit des Haftreibwertprüfprozesses zur Einschätzung der tatsächlichen Prozessstreuung (Bild 2). Dadurch können die verantwortlichen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Form- und Lageabweichung sowie Oberflächenparameter quantifiziert werden.



$$\sigma_{beobachtet}{}^2 = \sigma_{tatsächlich}{}^2 + \sigma_{Messystem}{}^2 \quad (13)$$

Bild 2 Zusammenhang zwischen beobachteter und tatsächlicher Prozessstreuung in Abhängigkeit vom Prüfprozess

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Dafür stehen die statistischen Auswertungen gleicher Oberflächenstrukturen, unterschiedlicher Oberflächenstrukturen sowie unterschiedlicher Materialien und die Variation des Lastkollektives bei gleichbleibender Oberflächenstruktur zur Verfügung, welche alle unter Vergleichsbedingung Reibwertgeprüft wurden. Zusätzlich wird aktuell für die Entwicklung geometrischer Parameter ein Unsicherheitsbudget für jede neue Kenngröße erstellt.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Literaturangaben:

[2] ISO/IEC Guide 98-3:2008-09: Messunsicherheit - Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, 2008.

[3] ISO/IEC Guide 99:2007-12: Internationales Wörterbuch der Metrologie - Grundlegende und allgemeine Konzepte und zugehörige Begriffe (VIM),2007.

[4] Krystek, M.: Berechnung der Messunsicherheit; Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung; 2. Auflage; Berlin; Wien; Zürich; Beuth Verlag, 2015.

[5] Persch, B.: Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM, Grundlagen der Metrologie; Norderstedt: Books on Demand 2003.

[6] Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R, 13. Aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer -Verlag, Berlin, Heidelberg 2009.

[7] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Prüfprozesseignung, Eignung von Messsystemen, Eignung von Mess- und Prüfprozessen, Erweiterte Messunsicherheit, Konformitätsbewertung; 2. vollständig überarbeitete Auflage, 2010.

[8] Conrad, S; Pfeilsticker, T.: Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM und Praxisübungen mit solara.MP®, Foliensatz 029-FMT, Eigentum der Q-DAS GmbH.

[9] Dietrich, E.; Schulze, A: Eignungsnachweis von Prüfprozessen, Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld; 5. Aufl.; München: Hanser-Verlag, 2017.

[10] Graf, Henning, Stange, Wilrich: Formel und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik; 3., völlig neu bearbeitete Auflage von P.-Th. Wilrich und H.-J. Henning, Springer -Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo 1987.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 19.01.2026, 13:20:08. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:06. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

VDI VDE Mess- und Automatisierungstechnik

ISBN 978-3-18-092390-1

Bildquelle: © Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH

https://doi.org/10.51202/9783181023907 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 13:20:06. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.