

Messunsicherheit praxis- gerecht bestimmen 2017

und

Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2017



VDI-Berichte 2319

VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

VDI

Mess- und
VDE Automatisierungstechnik

Messunsicherheit praxis- gerecht bestimmen 2017

und

Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2017

Erfurt, 15. und 16. November 2017



VDI-Berichte 2319

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.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 <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

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 978-3-18-092319-2

8. VDI-Fachtagung 2017 Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen

	1
--	---

Dimensionelle Messgrößen I

<p><i>B. Hampel,</i> <i>B. Liu,</i> <i>F. Nording,</i> <i>J. Ostermann,</i> <i>P. Struszewski,</i> <i>J. Langfahl-Klabes,</i> <i>M. Bieler,</i> <i>H. Bosse,</i> <i>B. Güttler,</i> <i>P. Lemmens,</i> <i>M. Schilling,</i> <i>R. Tutsch</i></p>	<p>Messunsicherheitsabschätzungen für komplexe Nanosysteme</p>	3
<p><i>E. Helmecke,</i> <i>F. Wohlgemuth,</i> <i>C. Klein,</i> <i>T. Hausotte</i></p>	<p>Numerische Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit mit Hilfe eines virtuellen metrologischen Röntgencomputertomografen</p>	7

Mechanische Messgrößen I

<p><i>S. Osang</i></p>	<p>Kalibrierung von Waagen mit dem Substitutions- verfahren – Anwendung des Substitutionsverfahrens bei der Kalibrierung von Hochlastwaagen mit Betrachtung der Messunsicherheit</p>	19
<p><i>J. van der Grinten</i></p>	<p>Kalibrierung von Gasdurchfluss-Messgeräten</p>	27

Elektrische Messgrößen

<i>C. Mester, J.-P. Braun, C. Ané</i>	Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Power Quality Analysen – Kalibrierung, Prüfung und Zertifizierung von Messgeräten für die Versorgungsqualität	39
<i>R. H. Judaschke</i>	Kalibrierung der Ausgangsleistung von Hochfrequenzgeneratoren	51
<i>J. Leinhos</i>	Messunsicherheitsdarstellung bei Vektornetzwerkanalysatoren – Von der Vision zur Realität	55

Prozessanalytik & Umwelt

<i>A. Schütze, T. Baur, T. Sauerwald</i>	Spurengasmessung für die Luftqualitätsmessung mit Halbleitersensoren	59
<i>C. Tiebe, M. Detjens, T. Hübert</i>	Messunsicherheit coulometrischer Spurenfeuchte-sensoren	63
<i>B. Stegmaier, C. Wilhelm</i>	Messunsicherheiten bei Überwachung der Umwelt-radioaktivität	73

Kalibrier- und Prüfpraxis, Rückführung I

<i>B. Pesch</i>	Festlegung der Kalibrier- oder Nutzungsintervalle von Messmitteln	85
<i>G. Dudek</i>	Die neue ISO/IEC 17025 – Was ändert sich für Prüf- und Kalibrierlaboratorien?	99

Neue Anwendungsgebiete und Herausforderungen der Messunsicherheitsanalyse

<i>B. Naujoks, T. Engler, M. Michaelis, H.-J. Wuensche</i>	Measurement Uncertainty and its Influence on Dynamic Object Tracking in Autonomous Driving	111
<i>S. Marin, T. Fröhlich</i>	Vergleich von FEM-Simulations- und Messergebnissen unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten – Am praktischen Beispiel des Modells einer Fixpunktzelle zur Kalibrierung von Berührungsthermometern	123
<i>F. Schmähling, G. Wübbeler, B. Ruggaber, U. Krüger, C. Elster</i>	Messunsicherheitsbestimmung für Farbkoordinaten und andere integrale Größen aus spektralen Messungen	139

Impulsvortrag zur ISO/EC 17025

<i>M. Czaske, M. Kemper</i>	Die Revision der ISO/IEC 17025 und ihre Auswirkung auf die metrologische Rückführbarkeit und die Ermittlung der Messunsicherheit	145
---------------------------------	--	-----

Kalibrier- und Prüfpraxis, Rückführung II

<i>M. Schalles, M. Hohmann</i>	Einsatz von Monte-Carlo-Methoden zur Bestimmung der Kennlinienunsicherheit – Anwendung auf die Berechnung der Unsicherheit von Thermometerkennlinien	151
<i>M. Galovska, C. Germer, M. Nagat, R. Tutsch</i>	Fortpflanzung der Messunsicherheit in der Virtuellen Messdatenanalyse (VMDA) im Automobilbau	163

Neue Entwicklungen zur Prozess-Messunsicherheit

<i>T. Wilhelm, R. Große-Uhlmann</i>	Ermittlung von Messunsicherheitsbudgets für Prozess- analysesensoren unter Einsatzbedingungen – Eine Frage des Vertrauens	177
<i>C. Einspieler, F. Bleicher</i>	Unsicherheitsbeiträge zur Signalerfassung der Prozess- Verschleissbestimmung beim Tiefbohren – Ein Beispiel aus der praktischen Anwendung	181
<i>P. Vrdoljak, M. Schalles</i>	In situ Einpunktkalibrierung von Thermometern mittels Fixpunkten	197

Dimensionelle Messgrößen II

<i>T. Meß, V. Ullmann, E. Manske</i>	Ganzheitliche Erfassung von Gewinden als Antwort auf gesteigerte Messunsicherheitsanforderungen	207
<i>M. Matus</i>	Konformitätsbewertung von Formabweichungen am Beispiel Parallelendmaße	217

Mechanische Messgrößen II

<i>A. Schäfer</i>	Messunsicherheiten für Messungen sehr großer Kräfte, Drehmomente und Drücke – Anforderungen der Industrie den realisierbaren Messunsicherheiten gegenübergestellt	221
<i>C. Buchner</i>	Messunsicherheiten im Verfahren der Darstellung der Kraft	233
<i>J. Nitsche, D. Röske, R. Kumme, R. Tutsch</i>	Unsicherheitsabschätzung bei der Kalibrierung sechs- achsiger Kraft-Momenten-Sensoren	245

3. VDI-Fachtagung

Prüfprozesse in der industriellen Praxis

3 . VDI-Fachtagung

Prüfprozesse in der industriellen Praxis

Vorwort 259

Plenarvorträge

<i>G. Mihm</i>	Kalibrierung in der Bundeswehr: Organisation der Kalibrierung, Ausbildung des Personals	261
<i>R. Schmitt</i>	Das Internet of Production: Modellbasierte Qualitätssicherung in der digitalisierten Produktion	265

Normen: Anwendungen und Anforderungen

<i>M. Baumeister</i>	Prüfmittelmanagement im regulierten Umfeld	279
<i>M. Hernla</i>	Alternative GPS-Standardspezifikationen und -Auswertemethoden	287

Prüfplanung

<i>F. Lindenlauf</i>	Messunsicherheit und Tolerierung	299
----------------------	----------------------------------	-----

Eignungsnachweis

<i>C. Voigtmann, L. Hou, M. Hernla, G. Reichel</i>	Eignung komplexer Prüfprozesse – Verfahren für den Nachweis der Prüfprozesseignung	311
<i>T. Stößel, J. Weickmann</i>	„Trennschärfe“: Innovatives Abnahmeverfahren für diskret prüfende Systeme	321
<i>M. Wiederhold, J. Greipel</i>	Die virtuelle Großserie – Planung und Steuerung der Einzel- und Kleinserienfertigung	333

G. Reichel Erweiterte Anwendungsmöglichkeiten durch verbesserte
Auswertung von MSA-Typ-3-Daten 337

T. A. Le Validierung von Software für die Messung und
Auswertung geometrischer Merkmale 351

Prüfmittelmanagement

*K. Kniel,
J. Flügge,
H. Bosse* Aktuelle Herausforderungen bei der metrologischen
Rückführbarkeit dimensioneller Messgrößen 355

*R. Klinke,
M.-T. Schablowski* Sensorik in der Fahrzeugsicherheit – Anforderungen,
Lösungen und Rückführung 359

D. Gleichauf Prüfmittelmanagement in kleinen und mittelständischen
Unternehmen 367

Prüfmittelmanagement und Richtlinien

T. Ring Datenaustausch mit dem Kalibrierlabor –
Neues zur VDI 2623 371

K. Koch Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen 385

M. Rieck DIN EN 9100 Spezielle Anforderungen an einen
luffahrttechnischen Betrieb 397

Vorwort

Die 8. VDI-Fachtagung Messunsicherheit 2017 ist, der Tradition der ersten fünf Tagungen folgend, nach Thüringen zurückgekehrt. Inhaltlich ist sie konsequent auf die künftigen Herausforderungen, wie sie insbesondere durch die digital vernetzten Mess- und Sensorsysteme, autonomes Fahren u. a. entstehen, ausgerichtet. Dabei sind die für Praktiker wichtigen Präsentationen von erprobten Beispielen zur Messunsicherheitsermittlung nicht vernachlässigt worden. In diesem VDI-Bericht sind Beiträge zur Berechnung der Messunsicherheit elektrischer, dimensioneller und mechanischer Messgrößen sowie Prozessgrößen zu finden.

Ein signifikanter Teil der Beiträge stammt aus den nationalen Metrologieinstituten Deutschlands, Österreichs und der Schweiz und betrifft überwiegend Messungen und Kalibrierungen sehr hoher Genauigkeit. Zum anderen wird die Betonung von Beispielen aus der Kalibrierpraxis fortgesetzt und damit der aktuelle Zusammenhang hergestellt zwischen der beurteilten Qualität von Messergebnissen in Form der Messunsicherheit sowie der vorschriften- und normkonformen Anwendbarkeit von Produkten und Systemen. Die Tagung und diesen Tagungsband hat der Fachausschuss *Messunsicherheit* der *VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik* zusammengestellt.

Besonders erwähnt sollen hier die in die Zukunft gerichteten und für die technologische Entwicklung wichtigen Beiträge der vier Plenarvorträge:

- Messtechnik für digital vernetzte industrielle Systeme
- Metrologie für dynamische Messungen
- Anforderungen an die Messtechnik aus der autonomen Mobilität
- Bevorstehende Revision des SI-Einheitensystems.

Insbesondere der letztgenannte Beitrag ist von außerordentlicher Bedeutung für künftige stark vernetzte Mess- und Sensorsysteme. Die Festlegung der Werte physikalischer Konstanten ist nicht nur für die Nationalen Metrologieinstitute wichtig, sondern ermöglicht künftige Selbst- und Fernkalibrierungslösungen durch direkten Anschluss von Messsystemen auf der Anwendungsebene.

Ein weiterer Punkt von großem praktischem Interesse ist natürlich die anwendungsrelevante Weiterentwicklung der Dokumente für Kalibrier- und Prüflaboratorien. Das betrifft in besonderem Maße die Norm ISO/IEC 17025.

Der Tagungsort Erfurt in der Mitte Deutschlands mit verkehrstechnischer Nähe zu den Mitveranstaltern TU Ilmenau, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) steht sowohl für die Qualität der Veranstaltung als auch die beabsichtigte Nähe der Teilnehmer zu Lehre und metrologischer Forschung.

Die Autoren der hier veröffentlichten Beiträge kommen aus bekannten Instituten und Einrichtungen.

Sie sind überwiegend international ausgewiesene Experten auf dem Gebiet der Messunsicherheitsanalyse mit großer didaktischer Erfahrung. Ihnen sei für ihre Beiträge zur 8. VDI-Fachtagung Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen ganz herzlich gedankt.

Im Namen des Programmausschusses

Prof. mult. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Sommer

Tagungsleiter

Technische Universität Ilmenau

Messunsicherheitsabschätzungen für komplexe Nanosysteme

**B. Hampel, B. Liu, F. Nording, J. Ostermann,
P. Struszewski, J. Langfahl-Klabes, M. Bieler, H. Bosse,
B. Güttler, P. Lemmens, M. Schilling, R. Tutsch,**
Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig,
Technische Universität Braunschweig

Kurzfassung

Die Abschätzung der Messunsicherheit komplexer Nanosysteme stellt oftmals eine besondere Herausforderung dar, insbesondere bei Systemen mit einer großen Zahl an Freiheitsgraden. In vielen Fällen lassen sich dennoch Abschätzungen der Messunsicherheit durchführen. Eine Strategie ist die Zerlegung des Systems in unabhängige Subsysteme.

1. Methodischer Ansatz für die Unsicherheitsberechnung komplexer Systeme

Der Begriff „komplexes System“ ist nicht scharf definiert, wird aber auf Systeme angewandt, die mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllen: große Zahl von Freiheitsgraden, nichtlineare Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen, die auch im Arbeitspunkt nicht hinreichend linearisiert werden können, sowie Rückkoppelungseffekte, durch die ein System nicht nur von den Eingangsgrößen, sondern auch von Ausgangsgrößen eines früheren Zustandes abhängig sind. Bei der Analyse von Nanosystemen wird häufig ein hoher Grad von Komplexität beobachtet. Konventionelle Methoden zur Messunsicherheitsbestimmung nach GUM kommen hier an Grenzen, zumindest hinsichtlich des zu bewältigenden Rechenaufwandes.

2. Modifizierte Ishikawa-Diagramme

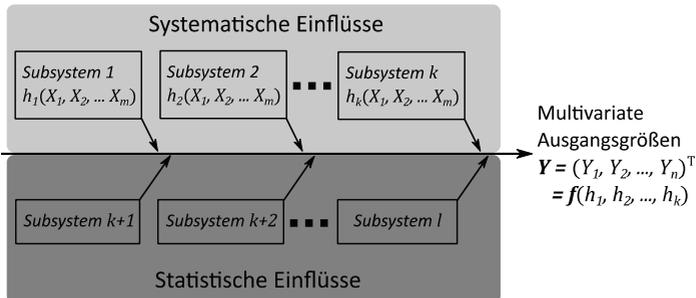


Bild 1: Blockdiagramm eines Systems mit Aufteilung in Subsysteme mit systematischen sowie statistischen Einflussgrößen [1].

Bei vielen Nanosystemen mit einer großen Zahl an Einflussgrößen ist eine Vereinfachung durch Zerlegung in Untersysteme möglich, wofür das Ishikawa-Diagramm ein anschauliches Hilfsmittel ist. Die weitere Modifizierung des Ishikawa-Diagramms zum Blockdiagramm mit systematischen und statistischen Einflussgrößen jeweils über bzw. unter der Hauptachse (Bild 1) wird als zusätzliches Werkzeug auf dem Weg zur Aufstellung der Systemgleichung vorgestellt [1].

2.2 Kovarianzmatrizen und die Monte-Carlo-Methode als Werkzeuge zur Unsicherheitsbestimmung

Unter der Voraussetzung, dass das untersuchte System linear ist, oder im Arbeitspunkt ausreichend genau linearisiert werden kann, kann ein algebraisches Verfahren unter Zuhilfenahme von Kovarianzmatrizen verwendet werden. Durch wiederholte Messungen kann die Kovarianzmatrix der Eingangsgrößen U_X ermittelt werden. Für den Sonderfall unkorrelierter Subsysteme kann U_X in eine Block-Diagonalform gebracht werden, in der die Matrizen auf der Hauptdiagonale den Kovarianzmatrizen der Subsysteme entsprechen:

$$U_X = \begin{pmatrix} U_{h_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & U_{h_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & U_{h_k} \end{pmatrix}$$

Sobald das System ein nichtlineares, nicht linearisierbares Verhalten aufweist, oder nur mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, die nicht im klassischen GUM erfasst sind zu beschreiben ist [2], kann die Monte-Carlo-Methode zur Bestimmung der Messunsicherheit verwendet werden. Bei Anwendung auf das Gesamtsystem ist der Rechenaufwand meist

prohibitiv hoch. Die getrennte Berechnung der relevanten Subsysteme reduziert die Rechenzeit jedoch signifikant.

3. Beispielsystem: Metrologisches UHV-STM

Ein Beispiel für ein komplexes Nanosystem, für das die beschriebenen Verfahren angewendet werden können, ist ein metrologisches Ultrahochvakuum-Rastertunnelmikroskop (UHV-STM), welches sich momentan an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) im Aufbau befindet. Zur Charakterisierung neuartiger Längen- und Stufenhöhennormale wird ein UHV-STM mit interferometrischen Längenmesseinrichtungen ausgerüstet, die eine auf die Definition des Meters rückgeführte, Messung sämtlicher lateraler und rotatorischer Freiheitsgrade des Mikroskops ermöglichen werden. Einflussgrößen auf die Messunsicherheit sind in einem Ishikawa-Diagramm (Bild 2a) und einem Blockdiagramm (Bild 2b) dargestellt und in Subsysteme, bzw. systematische und statistische Einflüsse gegliedert. Bestimmte Subsysteme, speziell die Interferometer, weisen nichtlineares Verhalten auf [3] und können so durch die Anwendung der Monte-Carlo Methode zuverlässig analysiert werden.

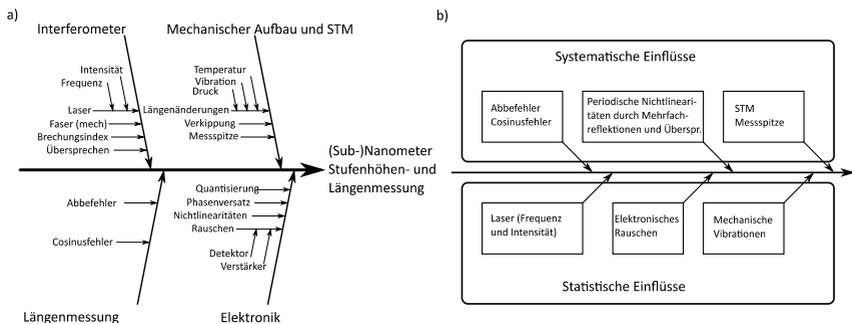


Bild 2: a) Ishikawa-Diagramm und b) Blockdiagramm für Längen- und Stufenhöhenmessung mit einem metrologischen UHV-STM [1].

4. Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Messunsicherheit komplexer (Nano-)Systeme kann es hilfreich sein, die Komplexität des Systems zu reduzieren. Als Werkzeug haben wir die Aufteilung in Subsysteme sowie die zum Blockdiagramm modifizierte Darstellung des Ishikawa-Diagramms vorgestellt. Im Rahmen des Graduiertenkollegs DFG-RTG „NanoMet“ wurden solche Verfahren ausgearbeitet und anhand mehrerer Beispiele behandelt [1], von denen eines in diesem Beitrag Erwähnung findet. Wir danken der DFG für die Förderung der Arbeit im Rahmen des Graduiertenkollegs GrK1952/1 „Metrology for

Complex Nanosystems“ sowie der Braunschweig International Graduate School of Metrology B-IGSM für die Unterstützung.

- [1] Hampel, B., Liu, B., Nording, F., Ostermann, J., Struszewski, P., Langfahl-Klabes, B., Bieler, M., Bosse, H., Güttler, B., Lemmens, P., Schilling, M., Tutsch, R. 2017 Approach to determine measurement uncertainty in complex nanosystems with multiparametric dependencies and multivariate output quantities. (submitted to Measurement Science and Technology)
- [2] IEC, B.I.P.M., ILAC, I.F.C.C., IUPAC, I.S.O., IUPAP und O.I.M.L. 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. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 101
- [3] Manske E., Fröhlich T., und Füll R. 2015 Measurement uncertainty consideration in the case of nonlinear models for precision length measurement. Journal of Physics: Conference Series 588(1):012033

Numerische Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit mit Hilfe eines virtuellen metrologischen Röntgencomputertomografen

Numerical determination of task-specific measurement uncertainty using a virtual metrological X-ray computed tomography system

Eric Helmecke, Florian Wohlgemuth, Christopher Klein,
Prof. Dr.-Ing. habil. **Tino Hausotte**, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Kurzfassung

Die industrielle Röntgencomputertomografie (CT) ist ein noch vergleichsweise junges Verfahren in der dimensionellen Messtechnik. Um von einer gegebenen Messaufgabe zu einem Messergebnis zu kommen, müssen dabei zahlreiche aufwändige Messprozessschritte, welche vielen verschiedenen Einflussfaktoren unterliegen und einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis haben, durchgeführt werden. Um die aufgabenspezifische Messunsicherheit zu bestimmen ist es daher wichtig, alle Einflüsse auf das Messergebnis zu berücksichtigen. Bis heute ist das einzige standardisierte Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit für CT-Messungen die Verwendung kalibrierter Werkstücke, präzise erläutert in der Richtlinie VDI/VDE 2630 Blatt 2.1. Allerdings ist diese Methode sehr zeit- und kostenintensiv. Aus diesem Grund ist eine alternative Bestimmungsmöglichkeit von besonderem Interesse.

Es wird eine vielversprechende numerische Methode zur Ermittlung der Messunsicherheit vorgestellt. Basis für die Simulationen bildet ein virtuelles metrologisches CT (VMCT) im Programm aRTist der BAM, welches an ein real vorhandenes CT angepasst ist. Es werden Einstellungen und Eingangsparameter sowie die Durchführung von Simulationen erläutert und Ergebnisse einer Messunsicherheitsermittlung mittels Simulation vorgestellt.

Abstract

Industrial X-ray computed tomography (CT) is a comparably novel method in dimensional metrology. To obtain a measurement result for a given measurement task, numerous complex process steps have to be performed. All process steps are influenced by multiple factors and

have a significant influence on the measurement result. To obtain the task specific measurement uncertainty, all influences on the measurement result need to be taken into account. Currently, the only standardised procedure for obtaining the task-specific measurement uncertainty of a CT measurement is the use of calibrated workpieces which is precisely explained in the standard VDI/VDE 2630 Part 2.1. However, this method is very time consuming and expensive. An alternative method is therefore of particular interest.

In this paper, a promising numerical method for the determination of the task-specific measurement uncertainty is presented. The method is based on a simulation using the program aRTist by BAM which is adapted to a real CT measurement system – a virtual metrological CT (VMCT). Settings and input parameters as well as the simulation procedure are illustrated and results of simulated measurement uncertainty determination are presented.

1. Einleitung

Die Röntgencomputertomografie ist attraktiv für die dimensionelle bzw. geometrische Messtechnik, da sie in der Lage ist, zerstörungsfrei in einem Messvorgang das komplette Bauteil inklusive innenliegender Strukturen zu erfassen. Dazu sind vier komplexe Prozessschritte notwendig (Durchstrahlung des Bauteils mit Röntgenstrahlung, Rekonstruktion der absorptionsabhängigen Grauwerte des Messvolumens aus den aufgenommenen Einzelprojektionen, Oberflächenfindung, dimensionelle bzw. geometrische Auswertung bzw. Merkmalsbestimmung am Oberflächenmodell). Jeder dieser Prozessschritte beeinflusst das Messergebnis auf vielfältige Weise, weshalb eine Messunsicherheitsbestimmung die komplette Messkette berücksichtigen muss.

Da eine analytische Beschreibung des Messprozesses als funktionaler Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen wegen der Komplexität des Messverfahrens nicht vorliegt, ist die einzige aktuell verfügbare standardisierte Methode zur aufgabenspezifischen Messunsicherheitsermittlung für CT-Messungen das in VDI/VDE-Richtlinie 2630 Blatt 2.1 [1] beschriebene experimentelle Verfahren, bei dem die Messunsicherheit über die statistische Auswertung von 20 CT-Messungen eines kalibrierten Bauteils ermittelt wird. Dieses Verfahren hat sich in der Praxis als sehr zeit- und (auch wegen der Notwendigkeit eines ähnlichen oder gleichen, kalibrierten Bauteils für jede Messaufgabe) kostenintensiv herausgestellt. Daher besteht ein Bedarf für alternative Möglichkeiten zur Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit besonders bei variierenden Messaufgaben. Eine anerkannte Möglichkeit hierzu ist die Monte-Carlo-Simulation nach GUM Supplement 1 [2]. In der VDI/VDE-Richtli-

nie 2630 Blatt 2.1 steht hierzu: „Aktuell sind ausreichend vollständige und validierte Simulationen des Messprozesses bei KMG [Koordinatenmessgeräten] mit CT-Sensoren jedoch noch nicht vorhanden.“ [1]

Der vorliegende Beitrag stellt Arbeiten des Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik [3, 4] zur numerischen Unsicherheitsbestimmung mithilfe von Simulationen nach der Monte-Carlo-Methode im Programm *aRTist* der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) [5] vor. Relevante Vorarbeiten gibt es von Hiller *et al.* [6] und von Reiter *et al.* [7].

2. Numerische Messunsicherheitsermittlung für dimensionelle CT-Messungen

Für die numerische Messunsicherheitsermittlung wird mithilfe des Programms *aRTist* der BAM [5] der CT-Messprozess im Monte-Carlo-Verfahren mehrfach simuliert. Dabei werden per Raytracing von einzelnen Röntgenphotonen realistische Einzelprojektionen berechnet. Die entstehenden Einzelprojektionen werden wie experimentelle Projektionen rekonstruiert und das entstehende Volumen mit dem Programm *VG Studio Max* segmentiert und die Oberflächen ausgewertet. Bild 1 zeigt das Verfahren schematisch im Vergleich zur experimentellen Bestimmung nach [1].

Die Berücksichtigung der verschiedenen Abweichungsquellen der realen Messung erfolgt über eine Eingangsparametervariation. Einflüsse, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden, müssen separat berücksichtigt werden (z. B. Formabweichungen, die nicht im virtuellen Bauteilmodell enthalten sind).

2.1 Ablauf der numerischen Messunsicherheitsbestimmung

Von dem Bauteil, für welches eine aufgabenspezifische Messunsicherheit bestimmt werden soll, wird ein CAD-Modell und Kenntnis von der Materialzusammensetzung benötigt. Mit dem Modell werden in *aRTist* mit realistischer Messstrategie und realistischen Parametern eine ausreichende Anzahl an simulierten Messungen durchgeführt. GUM Supplement 1 [2] schlägt eine Zahl von 100.000 Simulationen vor. Es wird aber auch hervorgehoben, dass die Zahl auch drastisch gesenkt werden kann, wenn die Simulation sehr kompliziert und zeitaufwändig ist (dies liegt bei dem hier besprochenen CT-Messprozess deutlich vor). Die Anzahl der Simulationen sollte dabei so groß gewählt werden, wie es noch praktisch durchführbar ist. Zwischen 50 und 100 Simulationen werden dabei als hinreichend erachtet. Für diese geringe Anzahl an Simulationen wird eine Normalverteilung angenommen, um das Überdeckungsintervall aus den simulierten Messergebnissen zu berechnen.

Für jede simulierte Messung und darin wiederum vor jeder simulierten Projektion werden die Eingangsparameter normalverteilt in bestimmten Intervallgrenzen variiert (Monte-Carlo-Verfahren). Die Normalverteilung ist dabei nach GUM Supplement 1 [2] die korrekte Verteilung für Parameter, von denen nur die Schwankungsbreite bekannt ist.

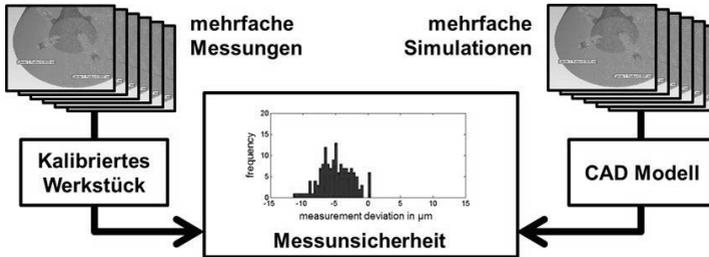


Bild 1: Vergleich der zwei Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit.

Links: Verwendung von kalibrierten Bauteilen;

Rechts: Numerische Messunsicherheitsermittlung.

Nach der Auswertung mit *VG Studio Max* wird in Anlehnung an [1] über die Standardabweichung der Merkmalsauswertung an den simulierten Datensätzen σ_{sim} (zufällige Abweichungen) und die Differenz des arithmetischen Mittelwerts der Merkmalsauswertung an den simulierten Datensätzen \bar{m}_{sim} und des Nennwerts des Merkmals gemessen am CAD-Modell m_{CAD} (systematische Abweichung) die aufgabenspezifische Messunsicherheit für jedes Messmerkmal berechnet [8]. Die erweiterte Messunsicherheit U wird mit $k = 2$ (95% Vertrauensintervall) berechnet (siehe Formel (1)).

$$U = k \cdot \sqrt{\sigma_{sim}^2 + (\bar{m}_{sim} - m_{CAD})^2} \quad (1)$$

2.2 Anpassung der Simulationssoftware

Damit die Simulation die realen Messungen eines spezifischen CT-Systems repräsentiert, müssen die Simulationsparameter und die Streubreiten der Simulationsparameter passend gewählt werden. Das resultierende Simulationssystem wird virtuelles metrologisches CT (VMCT) genannt. Im Rahmen des EMRP-Projekts „Microparts“ wurde *aRTist* an eines der am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik vorhandenen CT-Systeme (Werth Tomocheck 200 3D) angepasst. Im Folgenden sind die berücksichtigten Eingangsparameter beschrieben.

2.2.1 Anordnung und Ausrichtung

Ein CT-System besteht aus einer Röntgenröhre, einem rotatorischen Manipulatorsystem, auf dem sich das Messobjekt befindet, und einem Röntgendetektor. Die Geometrie der Messanordnung (durch die sich auch die Vergrößerung ergibt) muss in der Software reproduziert werden.

2.2.2 Röntgenröhre

Das Spektrum der Röntgenröhre kann in *aRTist* berechnet werden. Diese Berechnung basiert auf diversen Röhrenparametern: Beschleunigungsspannung, Energieauflösung des berechneten Spektrums, Material des Vorfilters sowie dessen Dicke, maximaler Röhrenstrom sowie maximale Leistung, Material und Dicke des Targets, Einfallswinkel der Elektronen sowie Austrittswinkel der genutzten Röntgenstrahlung, Material und Dicke des Vakuumfensters. Außerdem kann eingestellt werden, ob die Röhre in Transmission oder Reflexion betrieben wird. Das auf Basis dieser Parameter, die möglichst realistisch zu wählen sind, berechnete Spektrum kann für die Wiederverwendung gespeichert werden.

Weiterhin muss das Profil des Röntgenspots definiert werden. Zur Bestimmung des Spotprofils kann zum Beispiel die Methode von Fleßner *et al.* [9] verwendet werden.

2.2.3 Physikalische Interaktionen

Um realistische Ergebnisse zu erzielen müssen alle relevanten physikalischen Prozesse berücksichtigt werden. Um die Projektionsbilder zu erzeugen, berechnet *aRTist* dabei die Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit dem Bauteil.

2.2.4 Aufnahmeparameter

Die Aufnahmeparameter (Anzahl der Projektionen, Anzahl gemittelter Detektoraufnahmen pro Projektion und Aufnahmezeit) müssen den Parametern der echten Messung entsprechen.

2.2.5 Detektoreigenschaften

Die Detektoreigenschaften müssen aufgrund ihres Einflusses auf das Messergebnis angepasst an das verwendete Röhrenspektrum eingestellt werden. Neben der Größe des Detektors und der Größe und Anzahl der Pixel müssen folgende Eigenschaften dabei berücksichtigt werden: Die Kennlinie (Grauwert in Abhängigkeit von der Intensität), der Rauschlevel, die Detektorunschärfe durch interne Streueffekte, das Nachleuchten und Prozeduren zur Kennlinienkorrektur (unterschiedliche Empfindlichkeit der Detektorpixel).

2.2.6 Messobjekt / Bauteil

Das Messobjekt inklusive eventuell relevanter Einspannung muss präzise als CAD-Modell repräsentiert sein. Die Materialzusammensetzung muss bekannt sein und wird zusammen mit

dem CAD-Modell als Eingangsparameter verwendet. Eventuelle thermisch bedingte Geometrieabweichungen sowie die Ausrichtung des Modells in der realen Messung müssen korrekt abgebildet werden.

2.2.7 Geometrische Abweichungen

Die geometrischen Parameter des Messaufbaus sind nie exakt bekannt und z. B. durch mechanische Handhabung einer gewissen Schwankung unterworfen. Daher müssen diese stützend auf Expertenwissen mit einem initialen Abweichungsintervall und einem Abweichungsintervall während der Messung zwischen jeder Projektion versehen werden. Aus diesen Intervallen werden dann zufällig Abweichungswerte bestimmt und so die geometrischen Parameter statistisch variiert – sowohl vor Anfang der simulierten Messung als auch vor jeder neuen Projektion.

2.2.8 Unberücksichtigte Abweichungsquellen

In der Simulation unberücksichtigte Einflüsse auf die Unsicherheit müssen anderweitig abgeschätzt werden. Beispielsweise können dies geometrische Produktionsabweichungen des realen Bauteils vom CAD-Modell sein.

3. Überprüfung des Simulationsmodells

Die Verifikation des Simulationsmodells beziehungsweise der numerischen Messunsicherheitsermittlung kann nur über einen Vergleich mit experimentell ermittelten Messunsicherheiten des realen CT-Systems anhand von kalibrierten Probekörpern nach VDI/VDE-Richtlinie 2630 Blatt 2.1 erfolgen [1]. Beispielhaft sollen zwei durchgeführte Untersuchungen nachfolgend vorgestellt werden.

3.1 Beispiel zur Verifikation: Rotorkopf

Um das VMCT zu überprüfen, wurde im Rahmen des EMRP-Projekts „Microparts“ u. a. eine Messreihe mit einem Rotorkopf aus Aluminium (siehe Bild 2), mit jeweils 50 Simulationen, durchgeführt.

Für diese Messreihe wurden als Parameter 30 µm Voxelgröße, 130 kV Beschleunigungsspannung, 300 µA Röhrenstrom, 800 Projektionen und 750 ms Integrationszeit gewählt. Das Bauteil wurde in Bezug auf die Rotationsachse um fast 45° geneigt im Strahlengang angeordnet. Die Merkmale wurden in einem Abstand von 2 mm zur oberen Fläche ausgewertet. Insgesamt wurden vier Durchmesser und sechs Abstände der Kreise zueinander (Mittelpunkt zu Mittelpunkt) gemessen. Das virtuelle Modell des Rotorkopfes wurde aus taktilen Koordinatenmessgerät- und CT-Messungen erstellt.

Tabelle 1: Gemittelte Messunsichertheitswerte für die verschiedenen Arten von Messmerkmalen des Rotorkopfes

Messmerkmal	Gemittelte Messunsicherheit der Simulation in μm	Gemittelte Messunsicherheit nach VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] in μm
Durchmesser	4,3	4,2
Abstand / Distanz	3,1	3,4

Bild 4 vergleicht die Ergebnisse der numerischen und experimentellen Unsicherheitsermittlung eines jeden Messmerkmals der Rotorkopfmessung. Die experimentell ermittelten Messunsicherheiten für die Abstände „Länge B0_B180“ und „Länge B180_B270“ fallen im Vergleich zu den experimentell ermittelten Messunsicherheiten signifikant größer aus. Hierfür gibt es keine spezifische Erklärung, jedoch muss berücksichtigt werden, dass in der Simulation ein ideales virtuelles Modell des Rotorkopfes verwendet wird, welches etwaige Formabweichungen und Materialeinflüsse nicht aufweist. Insgesamt liegen die numerisch und experimentell ermittelten Messunsicherheitswerte auf einem vergleichbaren Niveau.

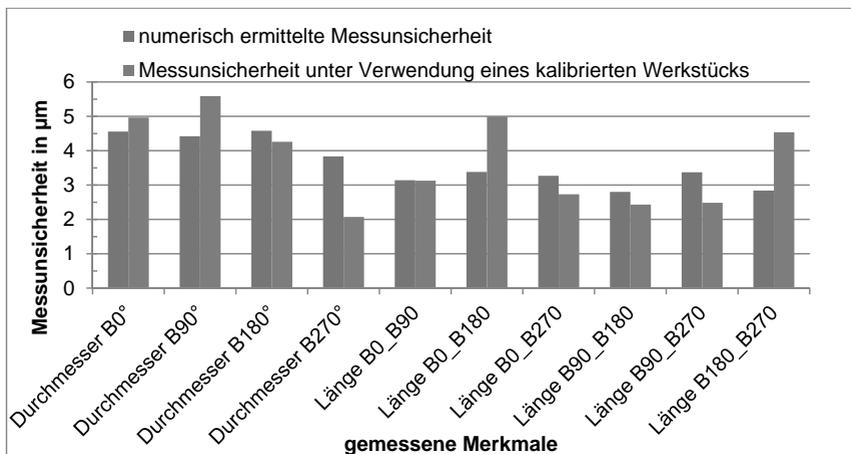


Bild 4: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Messunsicherheitsermittlung mit den Ergebnissen der Messunsicherheitsermittlung mit einem kalibrierten Werkstück für die Messmerkmale des Rotorkopfes.

3.2 Beispiel zur Verifikation: Connector

Ebenfalls im Rahmen des EMRP-Projekts „Microparts“ wurde ein LEGO Connector (Polycarbonat) mittels VMCT untersucht (siehe Bild 5). Die Aufspannung (Polyoxymethylen; in grau/weiß) wurde so gestaltet, dass sie einerseits das Bauteil schützt und andererseits optische und taktile Messungen erlaubt. Die in grün dargestellte Befestigungsröhre besteht aus einem ABS-Polymer. Die Aufnahmeparameter sind 70 kV Beschleunigungsspannung, 300 μ A Röhrenstrom, 1600 Projektionen und 1500 ms Integrationszeit pro Projektion. Wegen der Größe der Aufspannung war es bei dem verwendeten Messsystem nicht möglich, die Voxelgröße kleiner als 30 μ m zu wählen. Es wurden insgesamt 12 bidirektionale Längen an vergleichbar kleinen Geometrien (nominaler Radius von ungefähr 700 μ m) gemessen.

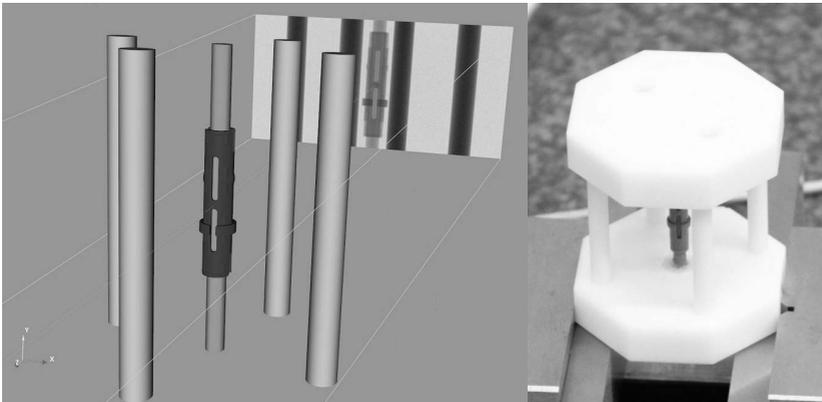


Bild 5: Links: Connector mit Aufspannung in *aRTist*.
Rechts: Reales Bauteil in der Aufspannung

Die Messung des LEGO Connectors weist drei Probleme auf. Erstens ist aufgrund der geringen Ausmaße der Messmerkmale die Anzahl der jeweils zugehörigen Messpunkte relativ gering. Zweitens limitierte die Größe der Aufspannung die Vergrößerung und damit die erreichbare Präzision für die Messung von kleinen Messmerkmalen. Drittens erzeugt die Aufspannung, die einen höheren Absorptionskoeffizienten als der LEGO Connector besitzt, deutliche Streifenartefakte (siehe Bild 6).

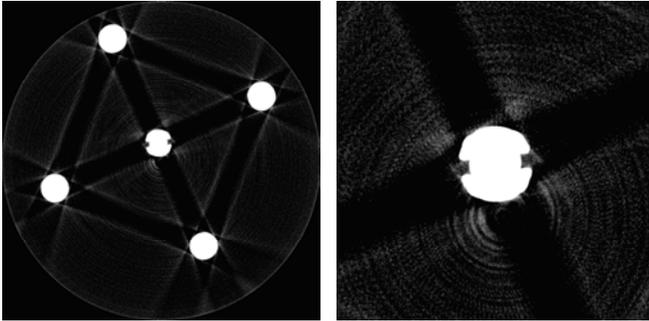


Bild 6: Typisches Schnittbild der Messung (Helligkeit und Kontrast wurden stark angepasst um die Artefakte hervorzuheben). In der vergrößerten Darstellung (rechts) sind die Auswirkungen der Streifenartefakte, hervorgerufen durch die Aufspannung, auf den LEGO Connector gut sichtbar.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die Ergebnisse für den LEGO Connector. Insgesamt sind die numerisch bestimmten Messunsicherheiten im Schnitt um einen Faktor 3 größer als die experimentell bestimmten Unsicherheiten. Eine mögliche Ursache wäre die zu starke Berücksichtigung der Artefakte durch die Simulation.

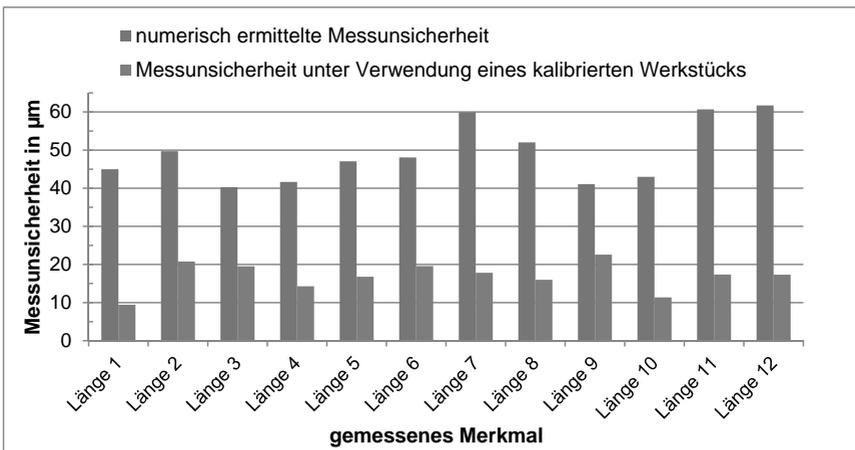


Bild 7: Vergleich der Ergebnisse der numerischen und der experimentellen Messunsicherheitsermittlung für die Abstandsmerkmale des LEGO Connectors

5. Zusammenfassung

Es wurde ein Ansatz zur numerischen Monte-Carlo-Messunsicherheitsermittlung für dimensionelle CT-Messungen mithilfe der Simulationssoftware *aRTist* der Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung vorgestellt. Dieser basiert auf der möglichst realitätsgetreuen Abbildung der Eigenschaften des metrologischen CTs in der Software und einer stochastischen Eingangsparametervariation. Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisse spezifisch für die vorgegebene Messaufgabe (verwendetem CT-System, Aufnahmeparameter, Messobjekte, geometrische Merkmale) gelten. In zwei Anwendungsfällen wurde gezeigt, dass die numerische Messunsicherheitsermittlung damit grundsätzlich möglich ist. Eine sehr hohe Übereinstimmung mit einer experimentellen Messunsicherheitsbestimmung nach VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 konnte allerdings nur in einem Fall erzielt werden. Die Anwendungsfälle zeigen jedoch, dass eine Messunsicherheitsbestimmung mit Hilfe eines Simulationsmodells grundsätzlich vielversprechend und realistisch ist.

Eine GUM-konforme numerische Monte-Carlo-Messunsicherheitsbestimmung könnte für die industrielle Anwendung eine signifikante Kostenreduktion bedeuten und die Verbreitung von CT-Messungen in der dimensionellen bzw. geometrischen Messtechnik deutlich beschleunigen. Zudem ist die numerische Messunsicherheitsbestimmung für innenliegende, verborgene Merkmale ohne Kalibrierung und damit irreversible Zerstörung möglich. Ein weiterer Vorteil ist hierbei auch die Möglichkeit, dass schon vor der Messdurchführung am realen CT-System eine Messunsicherheitsbestimmung, allein mit Hilfe eines virtuellen Modells, durchführbar ist. Die vorgestellte angepasste Simulation ist zu einer realitätsnahen Simulation in der Lage, muss aber im Hinblick auf eine Übereinstimmung der geschätzten Messabweichung mit nach VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 bestimmten Werten für beliebige Messaufgaben noch verfeinert werden. Dafür sind insbesondere systematische Untersuchungen dazu, welche Merkmale, Durchstrahlungsgeometrien und Materialkombinationen in der Simulation momentan noch nicht ausreichend realitätsgetreu abgebildet werden können, nötig. Die Verifikation des VMCT über den Vergleich von Messunsicherheitsbestimmung mittels kalibrierten Werkstücks und die numerische Messunsicherheitsermittlung ist dabei eine geeignete Methode. Allerdings können sich Eigenschaften eines CT-Systems über die Zeit verändern, so dass eine Verifikation und u. U. eine Anpassung des VMCT erfordert.

In den in diesem Beitrag präsentierten Arbeiten wurde die Anpassung der Aufnahmeparameter und ihrer Schwankungsbreiten teils auf Erfahrungswissen bzw. durch langwierige experimentelle Untersuchungen vorgenommen. Hier verspricht eine systematischere Vorgehensweise sowohl bessere Simulationsergebnisse als auch eine leichtere Übertragbarkeit der Ergebnisse für andere Anwender oder andere Röntgencomputertomografen.

6. Literaturangaben

- [1] Verein Deutscher Ingenieure e.V., "VDI/VDE 2630 Blatt 2.1: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik: Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozesseignung von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren," 2015.
- [2] Joint Committee for Guides in Metrology, "Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - propagation of distributions using a Monte Carlo method," 2008.
- [3] E. Helmecke, M. Fleßner, A. Gröschl, A. Staude, and T. Hausotte, "Numerical measurement uncertainty determination for computed tomography in dimensional metrology," in *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry" August 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic*, 2015.
- [4] E. Helmecke, M. Fleßner, M. Kaufmann, A. Staude, and T. Hausotte, "Numerical measurement uncertainty determination for dimensional measurements of microparts with CT," in *6th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria (iCT 2016)*, 2016.
- [5] C. Bellon, A. Deresch, C. Gollwitzer, and G.-R. Jaenisch, "Radiographic simulator aRTist: Version 2," in *18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa*, 2012.
- [6] J. Hiller and L. M. Reindl, "A computer simulation platform for the estimation of measurement uncertainties in dimensional X-ray computed tomography," *Measurement*, vol. 45, no. 8, pp. 2166–2182, 2012.
- [7] M. Reiter and J. Kastner, "Investigation towards simulation-based determination of measurement uncertainties for X-ray computed tomography," in *Proc. 4th Intl. Mtg. on image formation in X-ray CT*, pp. 177–180, 2016.
- [8] F. Härtig and M. Krystek, "Berücksichtigung systematischer Fehler im Messunsicherheitsbudget," in *4. Fachtagung Messunsicherheit - Messunsicherheit praxisingerecht bestimmen*, 2008.
- [9] M. Fleßner, M. Blauhöfer, E. Helmecke, A. Staude, and T. Hausotte, "CT measurements of microparts: Numerical uncertainty determination and structural resolution," in *SENSOR 2015, Nürnberg, 19.-21.05.2015*, 2015.

Kalibrierung von Waagen mit dem Substitutionsverfahren

Anwendung des Substitutionsverfahrens bei der Kalibrierung von Hochlastwaagen mit Betrachtung der Messunsicherheit

Application of the substitution procedure for the calibration of highload scales with consideration of measurement uncertainty

Dipl.-Ing. **Steffen Osang**,
Minebea Intec Bovenden GmbH & Co. KG, Bovenden

Kurzfassung

Der Vortrag erläutert die Eigenschaften des Substitutionsverfahrens zur Kalibrierung von Hochlastwaagen. Es wird die Durchführung des Verfahrens sowie dessen Einfluss auf die Messunsicherheit der Kalibrierung dargestellt. Es werden Einflussgrößen auf die Messunsicherheit benannt und praktische Hinweise und Regeln zur Umsetzung gegeben.

Abstract (optional)

The lecture explains the properties of the substitution procedure for the calibration of high-load scales. The procedure and its influence on the uncertainty of the calibration are illustrated. The influencing variables on the uncertainty of measurement are specified and practical hints and rules for implementation are given.

1. Rückführung von Messergebnissen durch Kalibrierung

Moderne Qualitätssicherung erfordert die Sicherstellung der Rückführung von Mess- und Prüfergebnissen auf den nationalen Standard. Dies ist gewährleistet, wenn eine Kalibrierung oder Prüfung gemäß den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 durchgeführt wird.

Die Akkreditierung eines Prüf- oder Kalibrierlabors durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) gewährleistet die Erfüllung der Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 und garantiert somit, dass dieses Labor ausschließlich rückgeführte Prüfungen bzw. Kalibrierungen vornimmt, auf deren Ergebnisse sich der Auftraggeber rechtsverbindlich verlassen kann.

Zur Kalibrierung von nichtselbsttätigen Waagen ist die international anerkannte Kalibrierrichtlinie EURAMET cg-18 vorgesehen.

Die DAkkS erkennt die darin beschriebenen Verfahren an, so dass die meisten DAkkS-akkreditierten Kalibrierlabore rückgeführte Kalibrierungen gemäß EURAMET cg-18 durchführen.

Die im folgenden dargestellten Analysen und Berechnungen zum Substitutionsverfahren bei der Kalibrierung von nichtselbsttätigen Waagen basieren auf dieser Richtlinie.

2. Anwendung des Substitutionsverfahrens zur Kalibrierung von Hochlastwaagen

Der wesentliche Teil der Kalibrierung einer Waage ist die Feststellung der Abweichung des angezeigten Wägewertes vom Wägewert des aufgelegten Referenzgewichtes (Fehler der Anzeige).

Die Kalibrierung sollte den gesamten Wägebereich einer Waage umfassen. Somit sind Referenzgewichte zu verwenden, die den gesamten Wägebereich abdecken (Bild 1).

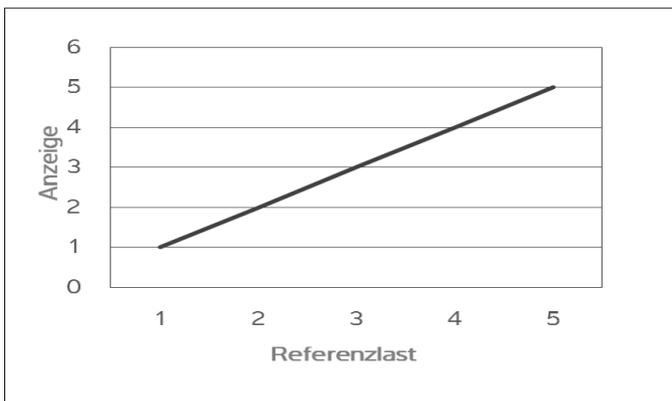


Bild 1: Kontinuierliche Messung der Kennlinie einer Waage mit Referenzgewichten

Die Kalibrierung von Hochlastwaagen stellt den Anwender vor besondere Herausforderungen, da der zu kalibrierende Wägebereich in der Größenordnung >10 t bis zu 100 t sein kann. Das betrifft z.B. Behälterwaagen oder Fahrzeugwaagen mit einem Wägebereich von mehr als 50 t.

Für solche Kalibrierungen stehen oft nicht genügend Referenzgewichte zur Verfügung. Außerdem kann die Platzierung der Referenzgewichte auf der Waage problematisch sein, da der Lastaufnehmer keine ausreichende Stellfläche bietet.

Daher bietet sich zur Kalibrierung von Hochlastwaagen das Substitutionsverfahren [1] an. Dabei wird die Kennlinie durch gestaffelte Substitution mit Hilfe von Ersatzlasten kalibriert (Bild 2).

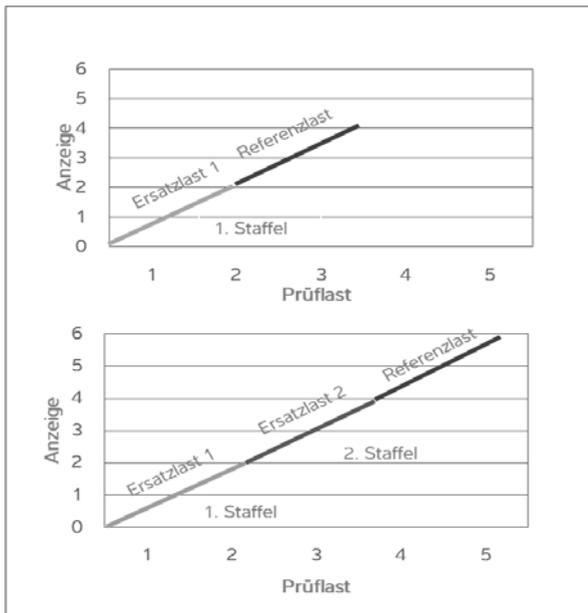


Bild 2: Messung der Kennlinie einer Waage mit Ersatzlasten (Substitutionsverfahren)

[1] EURAMET cg-18 "Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments"

3. Durchführung der Kalibrierung mit Substitutionsverfahren

Die hier beschriebene Prozedur betrifft den wesentlichen Teil der Kalibrierung einer Waage, nämlich die Bestimmung des Fehlers der Anzeige (Richtigkeit).

Folgende Voraussetzungen gelten:

- Die zu verwendeten Lasten bestehen aus Referenzlast und Substitutionslast
- Referenzlast und Substitutionslast sind ungefähr gleich groß
- Die Substitutionslast wird n mal gestaffelt (siehe Tabelle 1) mit $n = \text{Max} / \text{Referenzlast}$
- Die Referenzlast ist gültig und rückgeführt gemäß DIN EN ISO/IEC 17025
- Die Substitutionslast muss geeignet sein

Handlung	Waagenanzeige I	Fehler der Anzeige D
Waage unbelastet	0 kg	
Auflegen Referenzlast	$I1 = I(\text{Ref})$	$D1 = I1 - \text{Referenzlast}$
Abnehmen Referenzlast		
Auflegen Substitutionslast 1	$I(\text{Subst1})$	
Angleichen Substitutionslast 1	$I(\text{Subst1}^*) = I1$	
Auflegen Substitutionslast 1 + Referenzlast	$I2 = I(\text{Subst1}^* + \text{Ref})$	$D2 = I2 - 2 \times \text{Referenzlast}$
Abnehmen Referenzlast		
Auflegen Substitutionslast 1 + Substitutionslast 2	$I(\text{Subst1}+2)$	
Angleichen Substitutionslast 1 + Substitutionslast 2	$I(\text{Subst1}+2^*) = I2$	
Auflegen Substitutionslast 1 + Substitutionslast 2 + Referenzlast	$I3 = I(\text{Subst1}+2^* + \text{Ref})$	$D3 = I3 - 3 \times \text{Referenzlast}$
Waage unbelastet	$I(0)$	$I(0)$

Tabelle 1: Messablauf mit Substitutionsverfahren (Beispiel mit 2 Staffeln) [1], [2]

[1] EURAMET cg-18 "Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments"

[2] GM-P9 NSW "Prüfanweisung für nichtselbsttätige Waagen"

4. Berechnung der Messunsicherheit

Die Messunsicherheit des Fehlers der Anzeige ist abhängig vom jeweiligen Belastungszustand der Waage [1]. Sie setzt sich zusammen aus folgenden Teilunsicherheiten (Tabelle 2):

- Messunsicherheit der Anzeige (Wägung)
- Messunsicherheit der Referenzlast
- Messunsicherheit der Substitutionslast

Zuordnung (Teilunsicherheit)	Einflussgröße
Messunsicherheit der Anzeige (Wäge-Performance)	Reproduzierbarkeit der Waage
	Auflösung der unbelasteten Waage
	Auflösung der belasteten Waage
	Ecklastfehler der Waage
	Kriechen / Hysterese der Waage
Messunsicherheit der Referenzlast	Unsicherheit des Normal
	Drift des Normal
	Luftauftrieb des Normal
	Konvektion an der Oberfläche des Normal
Messunsicherheit der Substitutionslast	Unsicherheit der Ersatzlast
	Luftauftrieb der Ersatzlast
	Konvektion an der Oberfläche der Ersatzlast

Tabelle 2: Einflussgrößen auf die Messunsicherheit des Fehlers der Anzeige [1]

Die in Tabelle 2 aufgeführten Einflussgrößen repräsentieren Messunsicherheitsanteile, die sich quadratisch zur Standardmessunsicherheit des Fehlers der Anzeige addieren [1].

Die erweiterte Messunsicherheit des Fehlers der Anzeige wird durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor k ermittelt [1].

Die Berechnung der Messunsicherheitsanteile sowie des Erweiterungsfaktors k erfolgt gemäß EURAMET cg-18; V 04 Kapitel 7.1.

[1] EURAMET cg-18 "Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments"

5. Darstellung der Erweiterten Messunsicherheit bei bis zu 7 Staffeln

Die Darstellung in Bild 3 zeigt, dass die Anzahl der Staffeln die Messunsicherheit stark beeinflusst. Je öfter substituiert wird, desto höher ist die Messunsicherheit.

Die Einflussgrößen der Messunsicherheit der Wäge-Performance (z.B. Reproduzierbarkeit; Tabelle 2) wirken sich bei jedem Belastungsschritt sowohl bei Referenzlast, als auch bei Substitutionslast aus.

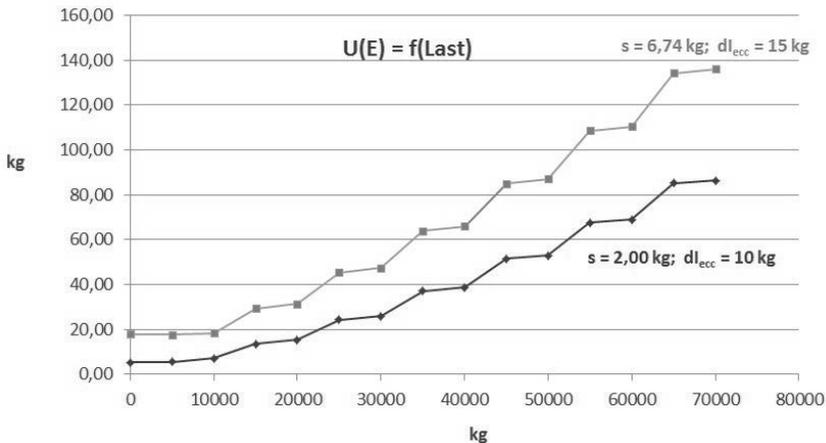


Bild 3: Erweiterte Messunsicherheit des Fehlers der Anzeige einer Waage (Substitutionsverfahren mit 7 Staffeln)

6. Vergleich der Messunsicherheiten

Die kontinuierliche Messung des Fehlers der Anzeige (Bild 1) erzeugt eine deutlich geringere Messunsicherheit als die substituierte Messung (Bild 2).

Die Einflussgrößen der Substitutionslast sowie der Wäge-Performance bei Auflagen der Substitutionslast generieren zusätzliche Messunsicherheiten.

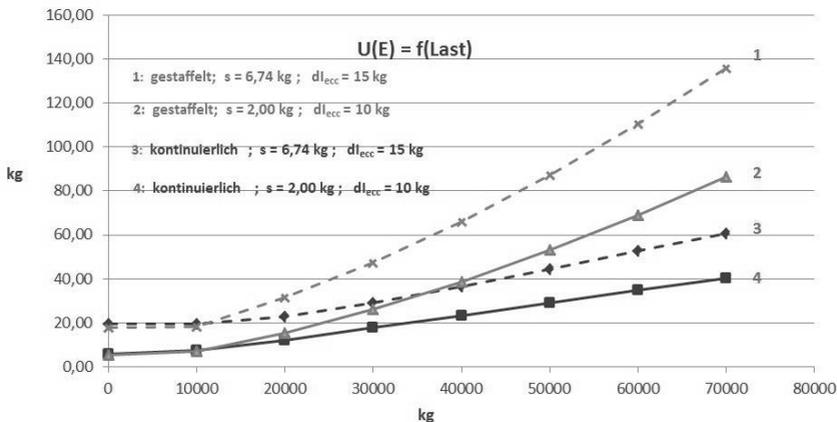


Bild 4: Vergleich der Messunsicherheiten des Fehlers der Anzeige einer Waage bei kontinuierlicher Messung und substituierter Messung

7. Bewertung der Verfahren

Vorteile Staffelfverfahren:

- Anzahl der rückgeführten Normalgewichte ist geringer
- Wägegut kann als Ersatzlast verwendet werden
- Platzbedarf zum Aufbringen der Normalgewichte ist geringer

Nachteile Staffelfverfahren:

- höhere Messunsicherheit
- zusätzliche Fehlergefahr beim Aufbringen der Ersatzlast (z.B. Ecklastfehler)
- höherer Arbeitsaufwand
- Ersatzlast kann sich im Laufe der Messung ändern

Kalibrierung von Gasdurchfluss-Messgeräten

Calibration of gas flowmeters

Dr. Jos van der Grinten

Physikalisch- Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Kurzfassung

Bei Hochdruck-Gaskalibrierungen sind die Unsicherheiten eines Gaszählers aufgrund von Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit in der Regel um eine Größenordnung kleiner als die Unsicherheit aus der Rückführungskette. Diese Situation ermöglicht die Schaffung eines harmonisierten Referenzwerts, der auf den Rückführungsketten verschiedener Länder basiert ist und die eine geringere Unsicherheit aufweist als jedes einzelne Land von sich aus erreichen könnte. Dies funktioniert so lange, wie die stochastischen Beiträge zur Gesamtunsicherheit viel kleiner sind als die Unsicherheit aus der Rückführungskette.

Der Harmonisierungsprozess beruht im Wesentlichen auf den etablierten Verfahren für internationale Ringvergleiche zwischen den Metrologie-Instituten der Länder.

Bei der Auswertung der Daten eines solchen Ringvergleichs wird eine Kurvenanpassung für die Darstellung der Kalibrierkurven benutzt. Bei Turbinen-Gaszählern hat sich die in $\log Re/10^6$ ausgedrückte Polynomgleichung (1) als optimale Wahl für die Anpassung der Kalibrierkurve erwiesen.

Abstract

During high-pressure gas flow calibrations, the uncertainties of a gasmeter due to repeatability and reproducibility are generally an order of magnitude smaller than the uncertainty from the traceability chain. This situation allows the creation of a harmonized reference value based on the traceability chains of different countries, and which has a lower uncertainty than each of the countries could achieve by itself. This works as long as the stochastic contributions to the overall uncertainty are smaller than the uncertainty from the traceability chain.

The harmonization process is essentially based on the established procedures for international key comparisons between the metrology institutes of the countries.

When evaluating the data of such a ring comparison, curve fitting is used for the representation of the calibration curves. For turbine gasmeters, a polynomial equation (1) expressed in $\log Re/10^6$ has proven to be the optimum choice for fitting the calibration curve.

1. Introduction

Despite its relative cleanliness natural gas is experiencing heavy competition from other energy sources like coal. Still investments are made for new pipelines, new metering stations and new high-pressure calibration facilities. Typical uncertainties that can be achieved by these calibration facilities range between 0.13% and 0.30%, while repeatabilities of gasmeters contribute less than 0.01%. The most important uncertainty source is the traceability chain itself and the Holy Grail for high-pressure calibrations is a calibration and measurement capability (CMC) of 0.10%. The first step is to reduce the uncertainties by shortening the traceability chain. This approach was used in the Netherlands where the long traceability chain [1] was replaced by a shorter one [2], [3]. Also in Germany a more solid fundament for high-pressure calibrations was developed [4] and improved [5].

A further complication is that different countries have different traceability chains. In the early nineties substantial differences were observed in cross border gas metering between the Netherlands and Germany. In order to reduce these cross-border metering differences an intercomparison was started and a new reference value was developed based on an averaging procedure where the results were weighed with weighing factors that were inversely proportional to the squared uncertainties [6]. This new harmonized m^3 was established by bilateral agreement between the national standards institutes of the Netherlands and Germany in 1999. The French national institute joined in 2004 and a new intercomparison was reported [7]. In 2013 the international cooperation was extended with the Danish designated institute and this year the new intercomparison is on its way. One of the side effects of these intercomparisons is the improvement of the respective traceability chains of the different countries.

2. Calibration model

The calibration of a gasmeter is the comparison of a meter under test with a reference meter through which the same gas flows. This is achieved by applying a stationary mass flow through both reference and meter under test. The process is schematically depicted in Fig. 1. As the meters are volume flow meters which produce pulses proportional to a certain volume increment. At the meter the pressure is measured and behind the meter there is a thermowell

in which the temperature is measured. The volume flow can be converted to mass flow using pressure, temperature and a real gas factor that compensates for the non-ideal behaviour of the gas flowing through the meter. The real gas factor is depending on pressure, temperature and the gas composition. These are complex algorithms like AGA-8 [9] or GERG2008 [10].

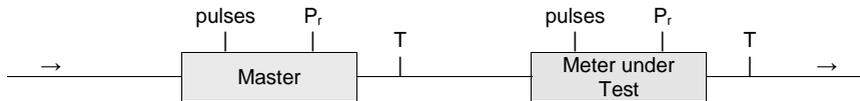


Fig. 1: Schematic drawing of the calibration process. P_r is the pressure reference point at which the pressure is measured. T is the temperature measurement point. Pulses are directly collected from the turbine wheel of the gasmeter.

Objective of the calibration is the evaluation of the deviation of the gasmeter, which is defined as the relative deviation $e_i = Q_i/Q_{ref} - 1$ [%] of the indicated volume flowrate Q_i and the reference volume flowrate Q_{ref} . The calibration is performed in the operating range of the gasmeter, which is minimally 1:20 for a turbine gas meter and which can be as much as 1:100 for an ultrasonic meter.

Table 1: Order of magnitude uncertainty contributions of the calibration of a high-pressure volume flow gasmeter compiled from [8].

Input quantities	Order of magnitude uncertainty
Reference flow	10^{-3}
Pressure and temperature	10^{-4}
Repeatability of the meter under test	$10^{-4} \sim 10^{-5}$
Pulse counting	10^{-5}
Time interval measurements	10^{-6}
Gas composition	$10^{-7} \sim 10^{-8}$

The mathematical description of the calibration process, based on the integral formulation of the mass conservation law, can be found in [8]. Although not the main subject of the paper, the authors present an extensive uncertainty evaluation utilizing Monte Carlo methods of a calibration of a gas meter using two reference meters in parallel. In the paper 44 uncertainty contributions are listed: reference flowrate, pressures, temperatures, pulse counting, time interval measurement and gas composition. The input parameters have been categorized by the order of magnitude they contribute to the overall uncertainty. The result is displayed in

Table 1. Note that the reference flowrate is the most important contribution. The repeatability of the meter is an order of magnitude better than the traceability. Please observe that this situation is different from other metrological fields where the repeatability of the calibrated instrument gives a much higher uncertainty contribution than the uncertainty of the reference.

3. Traceability chains

The German is schematically depicted in Fig. 2. The primary device is the piston prover (blue) in which a free moving piston travels through a honed cylinder, which is approximately 250 mm in diameter. The piston can travel at a maximum speed of 3 m/s over a length of 6 m. Due to inertia effects of the piston the effective measurement length is 3 m. The motion of the piston is detected by switches that are mounted in the wall of the prover. The dimensions of the prover are calibrated every 5 years, which makes it traceable to the meter (red). Two G250 reference turbine gasmeters (green) are calibrated simultaneously using the piston prover. With the reference meters four parallel G250 working standards (turbine master meters, yellow) are calibrated. With the four master meters a G1000 transfer turbine gasmeter (green) is calibrated, which is used to calibrate four parallel G1000 turbine master gasmeters. The meters under test (MuT) are calibrated using a combination of master meters that matches the desired flowrate. The whole facility can operate between 16 and 51 bar absolute pressure. For special purposes the piston prover and the two references (Ref) can be operated down to 8 bar.

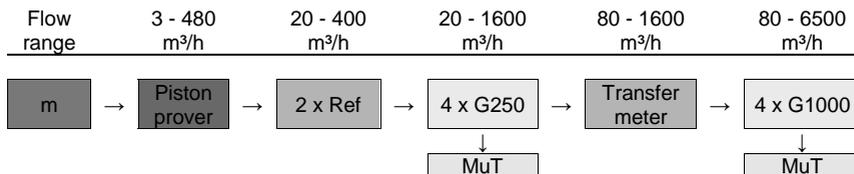


Fig. 2: Schematic representation of the German traceability chain for high-pressure gas flow measurement. The master meters (yellow) are traceable via transfer standards (green) to the piston prover (blue) and the meter (red). The meter under test is calibrated by using a combination of master meters.

Other European countries have organized their traceability in a similar way. Table 2 gives an overview of the primary devices used in France, The Netherlands, Germany and Denmark. The respective traceability chains are mutually independent.

Table 2: Primary devices of different European metrology institutes.

Country	Institute	Primary device	Traceable to
France	LNE	Constant volume tank (pVTt)	Mass
Netherlands	VSL / EuroLoop	24" Gas Oil Piston Prover	Length
Germany	PTB / Pigsar	10" Piston Prover	Length
Denmark	Force	26" Twin Piston Prover	Length

4. Curve fitting

Before discussing intercomparisons a few words need to be mentioned about curve fitting as this plays a vital role in the processing of intercomparison data. Turbine gasmeters are the metrologist's choice to use for reference purposes in intercomparisons. These meters offer good stability and demonstrate excellent repeatability during calibrations. The shape of the calibration curve is generally expressed as:

$$e = a_0 + a_1x^p + a_2x^q + a_3x^r + a_4x^s \quad (1)$$

In this equation e is the deviation of the meter, x the flowrate Q or the non-dimensional flowrate Q/Q_{max} or the Reynolds number Re , a_i the curve fit coefficients and p, q, r, s are the powers. An overview of parameters used in practice is given in Table 3. The effect of the different parameters is demonstrated for a turbine meter that was calibrated at 14 different flowrates. The result is depicted in Fig. 3. For each curve fit the associated uncertainty is displayed in the legend. The simple power equation (biggest dashes) gives the highest uncertainty (0.12%) and the bending points that are characteristic for higher grade polynomials are visible. For a lower number of degrees of freedom, i.e. the difference between the number of data points and the number of coefficients that are fitted, this type of polynomials becomes unstable. The combination of both positive and negative integer powers results in a smooth curve fit with a much lower uncertainty (0.04%). The so-called Straatsma polynomial was based on modelling the characteristics of a turbine meter [11]. It may become unstable at low flowrates and has the second highest uncertainty contribution (0.10%). The work performed by PTB in the past two decades on modelling the physical behaviour of turbine gasmeters was aggregated in [13]. This paper tells the upper range of flowrates is best described by an n^{th} degree polynomial using $\log Re/10^6$, where the degree n ranges between 1 and 4. Like for any curve fit it is not necessary to use all powers listed in Eq. (1). Reduction of the number of coefficients will increase the number of degrees of freedom ν and may lower the uncertainty of the fit. The extreme case is $\nu = 0$, which will result in an infinite uncertainty. When calibrating at constant conditions the polynomial can be expressed in $\log Q/Q_{max}$. The use of logarithms makes the

curves both smooth and stable. This results in the lowest uncertainty contribution (0.03%) from the fit.

Table 3: Overview of commonly used parameters in Eq. (1) for fitting the calibration curves of turbine gasmeters and ultrasonic gasmeters. Not all parameters are required. ν is the number of degrees of freedom.

x	p	q	r	s	Remarks
Q	1	2	3	4	unstable, especially for low ν [12]
Q	-2	-1	1	2	smooth, used in ultrasonic gasmeters
Q/Q_{max}	-0.2	-0.33	-2		Straatsma [11], may be unstable at low Q [12]
$\log Re/10^6$	1	2	3	4	smooth, Mickan et al. [13]
$\log Q/Q_{max}$	1	2	3	4	Re is proportional to Q , ceteris paribus

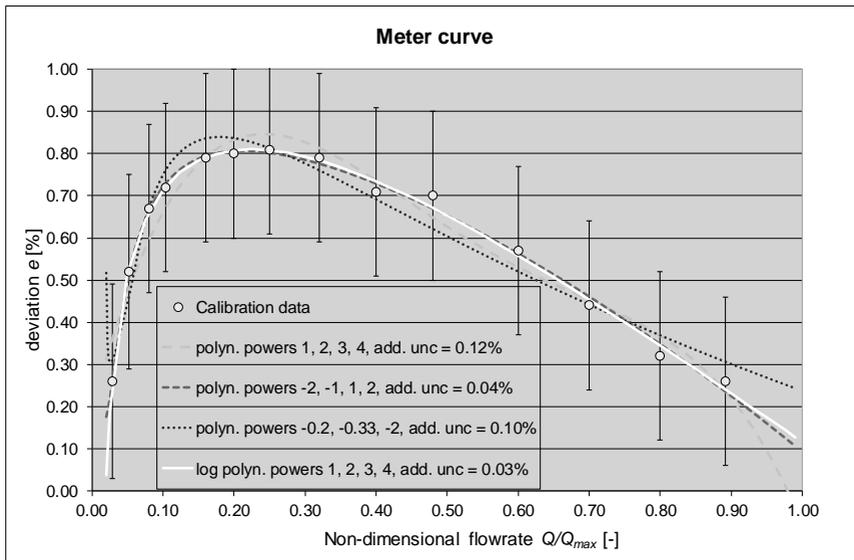


Fig. 3: Calibration curves obtained for a turbine gasmeter using the parameters from Table 3. The meter deviation e is displayed versus the non-dimensional flowrate Q/Q_{max} . The vertical bars represent the overall uncertainties ($k=2$) of the calibration results.

5. Intercomparisons

From a quality perspective intercomparisons are necessary as additional check on the laboratory's accuracy and corresponding CMC claims. In this case the intercomparison is used to compare the high-pressure gas flow traceability chains of the different countries. To this end several meter packages are used consisting of a flow conditioner, a five-diameter or ten-diameter upstream pipe spool (10D or 5D inlet), a turbine gasmeter and downstream a 3D or 4D outlet spool. For each intercomparison two of these packages are put in series. The diameter of the packages range between 100 mm and 400 mm. With the increased flowrates of the high-pressure facilities there is now a discussion to build packages up to 600 mm.

Specific calibration conditions differ from one lab to another, i.e. the actual pressure, temperature and gas composition, which determine the density and viscosity of the gas. As the performance of a turbine meter is depending on the actual gas density ρ and viscosity η , the Reynolds number (Re) is used to convert the laboratories' calibration conditions into a domain where they can be compared. The Reynolds number is defined as

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\eta} = \frac{4\rho Q}{\pi D \eta} \quad (2)$$

where \bar{v} is the average gas velocity in a cylindrical pipe with internal diameter D and Q the volume flowrate of the gas.

The intercomparison is performed according to the following stepwise procedure.

- a. Calibration of the meters at the agreed matrix of 3 pressures, 7 flowrates and 5 repetitions. The meter deviations e are plotted versus the Reynolds number Re .
- b. For every pressure the calibration curve is fitted using polynomial equation Eq. (1) with $x = \log Re/10^6$. The grade is optimized such that the residual standard deviation is minimized. For the details of the curve fitting the reader is referred to [13]. The curve and the residuals are plotted in order to allow a visual inspection of the results.
- c. For each separate meter and each pressure the maximum and minimum Reynolds numbers from the dataset are taken. The 5 Reynolds numbers between these two values are computed assuming a logarithmic series. The previously obtained fits are used to compute for each laboratory the deviation of the curve at each of the seven Reynolds numbers.
- d. For each Reynolds number Re_j the weighted average $e(Re_j)$ of the interpolated deviations $e_i(Re_j)$ of lab_{*i*} ($i = 1..M$) is computed as follows:

$$e(Re_j) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^M w_i \cdot e_i(Re_j) \quad \text{with} \quad w_i = \frac{1}{u_i^2} \quad \text{and} \quad W = \sum_{i=1}^M w_i \quad (3)$$

where for each lab i the uncertainty u_i is the root-sum-square of the uncertainty of the calibration result and the uncertainty due to the long-term stability of the meter (which is typically of the order of 0.05%).

- e. The uncertainty $u(Re_j)$ of $e(Re_j)$ is computed

$$\frac{1}{u^2(Re_j)} = \sum_{i=1}^M \frac{1}{u_i^2} \quad \text{which is equivalent to} \quad u(Re_j) = \frac{1}{\sqrt{W}} \quad (4)$$

Please observe that $u(Re_j)$ is always smaller than u_i .

- f. The next step is to compute the curve of the weighted results. Again, a polynomial equation Eq. (1) with $x = \log Re/10^6$ is chosen. The grade is limited to 2.
- g. Now, the normalized difference of the calibration curves and the weighted average curve are determined.
- h. The last step is that the uncertainties of the laboratories are evaluated when they use harmonized reference values. Here the reproducibility of the turbine gasmeter plays an important role. The uncertainty $U_{tot,HRV,i}$ of the harmonized calibration result of Lab i is:

$$U_{tot,HRV,i}^2 = 2(1 - r_i)U_{tot,i}^2 + (2r_i - 1)U_{HRV}^2 \quad (5)$$

in which r_i is the correlation coefficient for Lab i between the common mode uncertainties and the total uncertainty, i.e. $r_i = U_{CMC,i}^2/U_{tot,i}^2$, see Annex A of the final Key Comparison report [7]. For $r_i > 1/2$ the laboratory benefits from the harmonization exercise, which means that repeatability and reproducibility are much smaller than the CMC.

This process is repeated for each meter and each pressure.

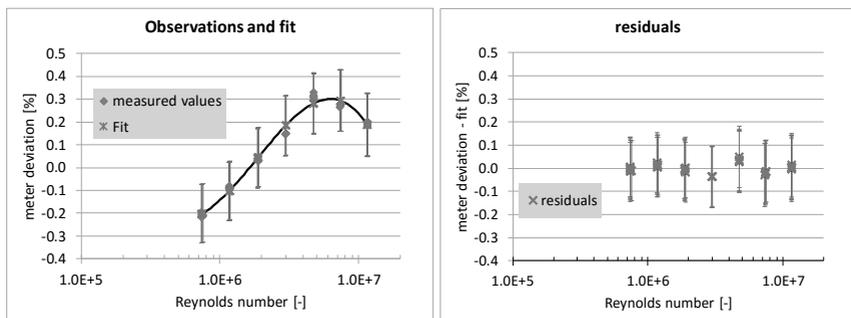


Fig. 4: Example of the calibration of a G1600 DN250 turbine gas meter at 50 bar by Lab 1. The observed meter deviation and the least squares fit (left) and the residual (right) is plotted as a function of the Reynolds number.

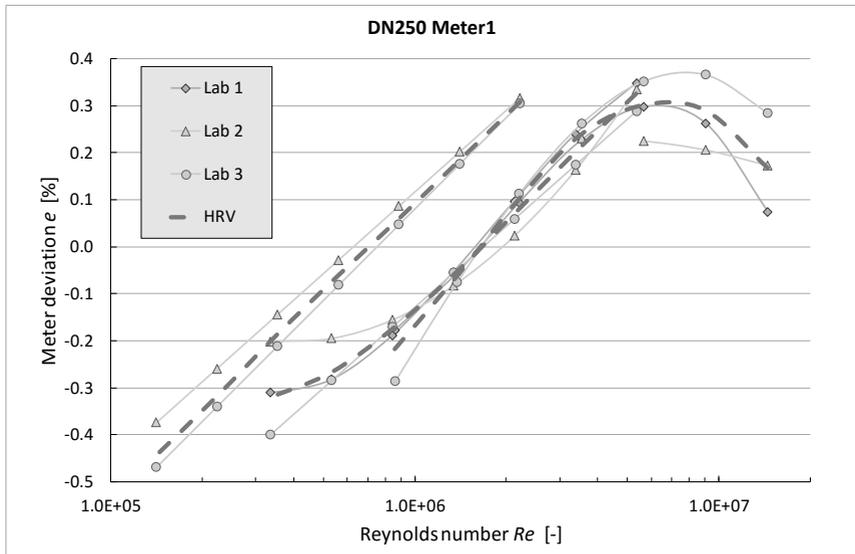


Fig. 5: Interpolation curves obtained for a G1600 turbine gasmeter by Labs 1, 2 and 3. The meter deviation e is plotted as a function of the Re number for three gas pressures: 8, 20 and 50 bar, which correspond to the left, middle and right curves in the Re range. The HRV curves are plotted separately for each pressure.

6. Harmonized Reference Values

When the previous procedure is followed between national metrology laboratories the result is that the traceability chains averaged the uncertainty of the average is lower than each of the laboratories would achieve by its own efforts. In the world of high-pressure gas measurements this average of the traceability chains has been announced as harmonized reference values or – unofficially – harmonized m^3 (cubic meter).

An example of such a procedure is shown in Fig. 4 and 5. Fig. 4 corresponds to the process steps a and b. The left-hand-side shows the 50 bar calibration results for a G1600 turbine gasmeter with a nominal diameter of 250 mm (DN250) together with the fit. The meter is the first from a package of two meters. The right-hand-side of Fig. 4 shows the residuals.

Fig. 5 shows the result of the procedure steps c – f. Here the results of all labs obtained at all pressures are collected for one meter, in this case the first G1600 DN250 turbine gasmeter M1. The data points shown in the graph are interpolated values using the fits like the one

shown in Fig. 4. The 8 bar pressure was not available at Lab 1. Please observe that the results obtained at 20 bar and 50 bar are practically coinciding. The harmonized reference values (HRV) are the red dashed lines. The uncertainty of the HRV is depending on the Reynolds number: $u_{HRV}(Re_j) = u(Re_j)$.

Section 0 of the procedure listed in chapter 5 promises a lower uncertainty for the participating laboratories. However, there are restrictions as already elucidated in procedure step h. After applying the intercomparison procedure, the question is how much the uncertainties of the participating labs have been improved. To this end Table 4 gives an overview of the calibration results before and after the harmonization process. The Table shows for meter M1 (G1600, DN250) calibrated by Lab 1 at 50 bar, the results at different Reynolds numbers. The leftmost column shows the Reynolds number. Then columns 2 – 4 show the original interpolated results shown in Fig. 4 and 5. The fifth column shows the correlation coefficient r from step g. Columns 6 – 8 show the results after harmonization. The HRV is the harmonized reference value, which equals the deviation of the meter for all laboratories after the harmonization process. U_{HRV} is the corresponding uncertainty, which is basically a kind of CMC. $U_{tot,HRV,1}$ is the total uncertainty of the meter under test obtained using Eq. (5). This also means that the relationship between $U_{tot,HRV,1}$ and U_{HRV} is not as simple as the root-sum-square relationship between $U_{tot,1}$ and CMC_1 . In practice U_{HRV} can be treated as a CMC with a margin of error in $U_{tot,HRV,1}$ of approximately 0.01%.

Looking at Table 4 it is clear that $U_{tot,HRV,1}$ is not only smaller than $U_{tot,1}$ but also smaller than CMC_1 . The correlation coefficients are all 0.85, which is clearly above $\frac{1}{2}$. Also the other laboratories benefit from this harmonization procedure in a similar way.

Table 4: Overview of the calibration results of meter M1 (G1600, DN250) calibrated by Lab 1 at 50 bar, before and after the harmonization process.

Re [-]	Original, interpolated			r_1 [-]	harmonized		
	e_1 [%]	CMC_1 [%]	$U_{tot,1}$ [%]		HRV [%]	U_{HRV} [%]	$U_{tot,HRV,1}$ [%]
1.5E+7	0.07	0.14	0.15	0.85	0.17	0.10	0.12
9.1E+6	0.26	0.13	0.15	0.85	0.29	0.10	0.12
5.7E+6	0.30	0.13	0.14	0.85	0.30	0.10	0.11
3.5E+6	0.23	0.13	0.14	0.86	0.24	0.10	0.11
2.2E+6	0.09	0.13	0.14	0.85	0.10	0.11	0.12
1.4E+6	-0.06	0.13	0.14	0.85	-0.06	0.11	0.12
8.6E+5	-0.18	0.13	0.14	0.86	-0.22	0.11	0.12

One point of discussion remains and that is the implementation of the HRV curves in the quality systems of the respective laboratories, which needs to be explained to the respective accreditation bodies. A further complication is that the HRVs may not cover the entire range of flowrates and pressures, which may introduce discontinuities in the curves of the meters under test when only part of the range is covered by the HRV. However, the most important point is that using the information available by different traceability chains results in a lower uncertainty.

7. Conclusions

In high pressure gas flow measurements the uncertainties of a gasmeter due to repeatability and reproducibility are generally an order of magnitude smaller than the uncertainty from the traceability chain. This situation is different from other fields of metrology.

For turbine gasmeters, a polynomial equation (1) expressed in $\log Re/10^6$ has proven to be the optimum choice for fitting the calibration curve. It is therefore well suited to be used in intercomparisons of high-pressure gas flow facilities. The degree of the polynomial is maximally 4.

The current procedure for intercomparisons is based on the practice of key comparisons. This procedure allows to adapt the reference values of the individual traceability chains, which is called the harmonization process. For gasmeters it is possible to reduce the uncertainties of gasmeters that are calibrated. However, this procedure is only possible as long as the uncertainty resulting from repeatability and reproducibility of a gasmeter is much smaller than the uncertainty from the traceability chain.

References

- [1] P.F.M. Jongerius, M.P. van der Beek, and J.G.M. van der Grinten (1993): [Calibration facilities for industrial gas flow meters in The Netherlands](#), Flow Meas. Instrum. 1993, 4 No 2, pp 77-84.
- [2] M. P. van der Beek, R. van den Brink, I. J. Landheer (2003): [“Gas-Oil Piston Prover”, a new concept to realize reference values for High-Pressure Gas-Volume in the Netherlands](#), Flomeko 2003, Groningen, the Netherlands.
- [3] M. P. van der Beek, I. J. Landheer (2003): [“NMI TraSys”, The ultimate carrier & multiplier for the unit of volume for High Pressure Natural Gas](#), [Flomeko 2003](#), Groningen, The Netherlands.
- [4] B. Mickan, R. Kramer, H.J. Hotze, D. Dopheide (2002): [Pigsar- The Extended Test Facility and new German National Primary Standard for High-Pressure Natural Gas](#),

- 5th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM) 2002, Arlington, USA.
- [5] B. Mickan, R. Kramer, D. Vieth and H.-M. Hinze (2007): The Actual Results of Recalibration and Improvements of the Traceability Chain as well as the Uncertainty for Measurement in High Pressure Natural Gas in Germany, Proceeding of the 14th Flomeko 2007, Johannesburg, South Africa, Sept. 2007.
- [6] B. Mickan, M.P. van der Beek, I.J. Landheer, R. Kramer, D. Dopheide (2003), [Unit of volume for Natural Gas at operational conditions, PTB and NMI VSL disseminate Harmonized Reference Values](#), Flomeko 2003, Groningen, The Netherlands.
- [7] D. Dopheide (2006): [CCM.FF-K5.a: Comparison of flow rates for natural gas at high pressure](#), Metrologia 43, Technical Supplement, p. 07001.
- [8] J.G.M. van der Grinten and A.M. van der Spek (2013): [Conformity Assessment using Monte Carlo Methods](#), paper presented at the 16th International Flow Measurement Conference Flomeko 2013, 24-26 September 2013, Paris, France.
- [9] AGA 8 (1992): Compressibility factors of natural gas and other related hydrocarbon fluids, by K.E. Starling and J.L. Savidge, AGA Transmission Measurement Committee Report No. 8, American Petroleum Institute MPMS Chapter 14.2, 2nd edition 1992, 2nd printing 1994, Catalog No. XQ9212
- [10] O. Kunz and W. Wagner (2012): [The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An expansion of GERG-2004](#). J. Chem. Eng. Data 57 (2012), 3032-3091.
- [11] Straatsma, H. (1978): Fitting van ijkcurves van turbinemeters (Fitting of calibration curves of turbine gas meters, in Dutch), Rijksuniversiteit Groningen, Afdeling Technische Scheikunde, December 1978.
- [12] Jos van der Grinten (2017): [Urban legends in Gasmetering](#), Lecture presented at the Force Recalibration Workshop, 8-9 June 2017, Vejen, Denmark.
- [13] B. Mickan, R. Kramer, D. Dopheide (2007): The Linking of the CIPM Key Comparisons CCM.FF-KC5a (for Natural Gas) and CCM.FF-KC5b (Compressed Air/Nitrogen) Using Model Based Analysis of the Data, proceedings of the 14th International Flow Measurement Conference Flomeko 2007, 14-17 September 2007, Johannesburg, South Africa.

Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Power Quality Analysern

Kalibrierung, Prüfung und Zertifizierung von Messgeräten für die Versorgungsqualität

Calibration of power quality analysers: measurement uncertainty

Calibration, testing and certification of power quality analysers

Dr. **Christian Mester**, Dipl.-Ing. **Jean-Pierre Braun**,
Dipl.-Ing. **Charles Ané**, Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS,
Bern-Wabern, Schweiz

Kurzfassung

Das Eidgenössische Institut für Metrologie METAS verfügt über ein Kalibriersystem für Power Quality Analyser, das auf das Internationale Einheitensystem SI zurückgeführt ist. Es wird für die Kalibrierung, Prüfung und unabhängige Zertifizierung von Power Quality Analysern verwendet. In diesem Artikel wird zunächst das Themenfeld Versorgungsqualität betrachtet, wobei die normierten Kenngrößen kurz erklärt werden. Anschließend wird das Kalibriersystem des METAS erklärt und eine Messunsicherheitsberechnung am Beispiel der Kenngröße *Flicker* durchgeführt.

Abstract

The Federal Institute of Metrology METAS in Switzerland operates a calibration system for power quality analysers. This system is traceable to the International System of Units SI. It is used for calibration, testing and independent certification of power quality analysers. This article introduces the basic concepts of power quality and the standardised power quality parameters. The METAS's calibration system is explained. As an example, the uncertainty budget for the parameter *flicker* is established.

1. Kurzeinführung Power Quality

In den ersten Jahrzehnten elektrischer Wechselspannungsnetze waren die Verbraucher rein passive Geräte. Zur Erzeugung wurden induktive Generatoren eingesetzt. Bereits damals wurde die Versorgungsqualität gemessen. Es war und ist beispielsweise wichtig, dass die Höhe der Versorgungsspannung und die Netzfrequenz ein definiertes Toleranzband einhal-

ten. Seit dem Ende der 1970er-Jahre wird Leistungselektronik in immer größerem Maße eingesetzt. Heute sind die meisten Verbraucher einschließlich der Schaltnetzteile und LED-Lampen im Privathaushalt nichtlinear. Auch bei der Erzeugung kommt Leistungselektronik zum Einsatz, beispielsweise in Wechselrichtern für Photovoltaikanlagen.

Während der durch einen linearen Verbraucher verursachte Strom keine Frequenzanteile enthalten kann, die nicht auch in der Netzspannung vorhanden sind, erzeugen nichtlineare und ganz besonders geschaltete Verbraucher zahlreiche Oberschwingungen und Zwischenharmonische. Hinzu kommt, dass Leistungselektronik nicht die von mechanischen Systemen bekannte Trägheit aufweist und daher empfindlicher auf Störungen der Versorgungsqualität reagiert.

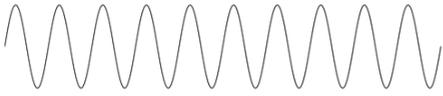
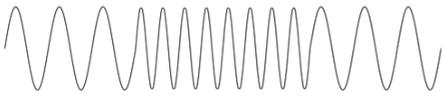
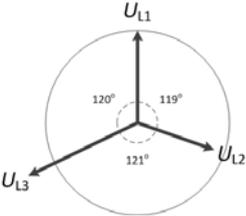
Die Versorgungsqualität, engl. Power Quality, setzt sich zusammen aus der Spannungsqualität, die vom Netz vorgegeben wird, und der Stromqualität, die vom Verbraucher wesentlich beeinflusst wird. Über die Netzimpedanz beeinflusst der Strom die Spannung, während die Spannung den Strom abhängig vom Verbraucher beeinflussen kann; der Strom einer traditionellen Glühlampe reagiert anders auf Spannungseinbrüche als der eines Schaltnetzteilens.

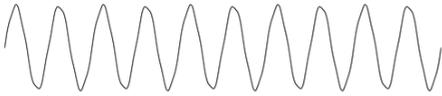
Um den zuverlässigen Betrieb verschiedener Geräte sicherzustellen werden üblicherweise Grenzwerte für die Emission von Störungen jedes Gerätes und Grenzwerte für die Immunität gegenüber Störungen, die von außerhalb kommend auf das Gerätes einwirken, vereinbart. Diese Grenzwerte sind ein Kompromiss zwischen den gegensätzlichen Interessen des Betreibers eines gegebenen Gerätes – unbegrenzte Emissionen des eigenen Gerätes und keinerlei Störungen von außen – und denen des Netzbetreibers – keinerlei Emissionen der angeschlossenen Geräte und keinerlei Anforderungen an die Spannungsqualität. In Europa wird in der Regel die Norm EN 50160 [1] zur Festlegung der Anforderungen an die Versorgungsqualität in Mittel- und Niederspannungsnetzen herangezogen.

Die Kenngrößen der Versorgungsqualität und ihre Messung sind in den Normen IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7 und IEC 61000-4-15 [2 bis 4] festgelegt. Sie können abhängig von ihrer Dauer in zwei Kategorien eingeteilt werden. Dauerhafte Abweichungen vom Nennwert sind nicht getriggerte Merkmale. Ereignisse sind zeitlich begrenzte, getriggerte Merkmale. Die Kenngrößen der Tabellen 1 und 2 sind durch die Norm IEC 61000-4-30 definiert. Im Gegensatz zur Vorgängerversion von 2008 deckt die IEC 61000-4-30:2015 auch die

Stromqualität ab. Alle Merkmale der Stromqualität sind analog zu den entsprechenden Merkmalen der Spannungsqualität definiert. Daher werden hier nur diese betrachtet.

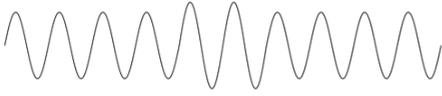
Tabelle 1: Dauerhafte, nicht getriggerte Merkmale

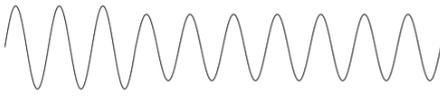
<p>Höhe der Versorgungsspannung</p> 	<p>Effektivwert der Versorgungsspannung. Die Höhe der Versorgungsspannung schwankt, weil die Last schwankt und die Netzimpedanz endlich ist.</p>
<p>Netzfrequenz</p> 	<p>Tatsächliche Frequenz des Netzes. Die Netzfrequenz weicht vom Nennwert ab, wenn die Momentanwerte von erzeugter und verbrauchter Leistung nicht übereinstimmen.</p>
<p>Flicker</p> 	<p>Maß für die durch Menschen empfundene Lästigkeit der Leuchtdichtenänderung einer Glühlampe, wenn die Spannung fluktuiert. Die Definition stützt sich auf eine normierte Glühlampe und ein normiertes, komplexes Modell von Auge und Gehirn. Flicker ist nur für die Spannungsqualität, nicht aber für die Stromqualität definiert, weil der Strom hier von der Spannung vorgegeben wird.</p>
<p>Spannungsunsymmetrie</p> 	<p>Spannungsunsymmetrie tritt in Drehstromsystemen auf, wenn die Höhe der Versorgungsspannung der Phasen oder die Winkel zwischen den Phasen ungleich sind. Spannungsunsymmetrie kann in Motoren eine Umkehr des Drehmoments verursachen.</p>

<p>Oberschwingung</p> 	<p>Frequenzanteil, dessen Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz ist.</p>
<p>Zwischenharmonische</p> 	<p>Frequenzanteil, dessen Frequenz kein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz ist. Beispiel: Störungen durch Schalt- netz- teile, die von der internen Schalt- frequenz abhängen.</p>
<p>Rundsteuersignal</p> 	<p>Zwischenharmonische, die in Verteil- netzen künstlich erzeugt wird, um Tarif- umschaltungen in Elektrizitätszählern vorzunehmen. Die Frequenz wird meist so zwischen 250 Hz und 3000 Hz ge- wählt, dass das Rundsteuersignal zwi- schen zwei Oberschwingungen fällt. Rundsteuersignale können bestehende Resonanzen in Verteilnetzen anregen.</p>

Die Kenngrößen für Ereignisse basieren auf der Messung des Effektivwertes des Spannung oder der Stromes über eine Periode. Der Messwert wird zwischen den Nulldurchgängen der Grundschwingung gebildet und jede Halbperiode erneuert. Somit können Ereignisse mit einer Mindestdauer von einer halben Periode erkannt werden.

Tabelle 2: Ereignisse, getriggerte Merkmale

<p>Spannungsüberhöhung</p> 	<p>Vorübergehende Erhöhung der Höhe der Versorgungsspannung über einen vereinbarten Schwellwert. Die Dauer beträgt höchstens von 60 s.</p>
--	--

<p>Spannungseinbruch</p> 	<p>Vorübergehende Absenkung der Höhe der Versorgungsspannung unter einen vereinbarten Schwellwert. Die Dauer beträgt höchstens von 60 s.</p>
<p>Spannungsunterbrechung</p> 	<p>Spannungseinbruch unter einen vereinbarten Grenzwert, der üblicherweise niedriger ist als der Grenzwert über einen Spannungseinbruch, von einer halben Sekunde bis drei Minuten Dauer. Eine Spannungsunterbrechung kann zur Abschaltung von Systemen oder zu Schäden bei empfindlichen Prozessen und Systemen führen, beispielsweise in der Halbleiterfertigung.</p>
<p>Schnelle Spannungsänderung</p> 	<p>Schneller Wechsel der Höhe der Versorgungsspannung von einem stationären Zustand in einen anderen. Häufige Ursachen sind das schnelle Ein- und Ausschalten großer Lasten und das Umschalten von Leistungstransformatoren. Eine schnelle Spannungsänderung kann sichtbar sein, wenn sie Beleuchtung betrifft. Da sie unregelmäßig ist, wird sie jedoch nicht wie Flicker wahrgenommen.</p>

Einzelheiten zu den verschiedenen Merkmalen und zur Auswertung in verschiedenen, normierten Zeitintervallen sind der Literatur zu entnehmen [2 und 7].

Sollen die Messwerte nur für statische Erhebungen verwendet werden, so reichen Messgeräte der Klasse S nach IEC 61000-4-30 [2]. Zwei einwandfreie Messgeräte der Klasse S, die dasselbe Signal messen, liefern nicht zwingend dieselben Messergebnisse. Beispielsweise in Streiffällen oder zum zweifelsfreien Nachweis der Einhaltung von Vereinbarungen sind daher Messgeräte der Klasse A nach IEC 61000-4-30 einzusetzen, an die wesentlich strengere Anforderungen bezüglich Genauigkeit und Synchronisation gestellt werden. Darüber

hinaus gibt es auslaufend eine Klasse B für Messgeräte, die vor der Einführung der Klassen A und S entwickelt wurden. Für diese gelten keine einheitlichen Anforderungen; die Hersteller legen sie im Einzelfall fest.

2. Kalibrierung, Prüfung und Zertifizierung

Das Kalibriersystem des Eidgenössischen Instituts für Metrologie METAS besteht aus einer aufwendig charakterisierten und regelmäßig kalibrierten dreiphasigen Strom- und Spannungsquelle. Diese erzeugt die verschiedenen Power-Quality-Szenarien.

Besonders ist bei Power-Quality-Analysen und beispielsweise auch Phasor Measurement Units (PMUs), dass Algorithmen einen sehr großen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Diese Algorithmen sind in Software implementiert. Zwei verschiedene, baugleiche Instrumente, mit derselben internen Software betrieben werden und deren Eingangsgrößen nach der Digitalisierung identisch sind, liefern daher dieselben Messergebnisse. Ebenso betrifft Alterung die Algorithmen nicht. Daher ist es zweckmäßig, wenige Instrumente einer Bauart sehr gründlich zu untersuchen, um die Algorithmen auf Herz und Nieren zu prüfen. Diese aufwendige Prüfung kann dann für alle anderen Instrumente derselben Bauart mit derselben Software als Grundlage dienen. Für jedes einzelne Instrument reicht dann eine vereinfachte, regelmäßig zu wiederholende Kalibrierung aus, die insbesondere die größtenteils analogen Eingangsstufen charakterisiert.

Die Anforderungen an Power-Quality-Analysen sind in verschiedenen IEC-Normen festgelegt. Zertifizierungen sollten dem Verwender erlauben, leicht zu prüfen, ob ein Gerät dem Stand der Technik entspricht und ob zwei verschiedene Geräte dieselben messtechnischen Anforderungen erfüllen – ein Blick auf das Konformitätszertifikat sollte ausreichen. Die Zertifizierung ist nach Definition der ISO 17000 [5] die Bestätigung durch eine unabhängige Stelle, dass Produkte, Prozesse, Systeme oder Personen spezifizierte Anforderungen erfüllen, wobei die Anforderungen hier durch Verweis auf die relevanten IEC-Normen spezifiziert werden. Indem die Zertifizierung zwangsläufig von einer unabhängigen Stelle wie das METAS durchgeführt wird, soll die Vergleichbarkeit von Konformitätszertifikaten sichergestellt werden. Allerdings sind die Anforderungen der Power-Quality-Normen recht vielfältig und komplex. Der Interpretationsspielraum für Zertifizierungsstellen ist recht groß, d. h. zwei verschiedene Zertifizierungsstellen könnten die Anforderungen unterschiedlich interpretieren und damit unterschiedlich prüfen. Außerdem ist der Ermessensspielraum nahezu unbegrenzt. Es ist den Zertifizierungsstellen überlassen, festzulegen, wie gründlich geprüft wird. Diese Situation ist unbefriedigend, denn während der Verwender früher die Vergleichbarkeit von Bestätigungen durch verschiedene Hersteller bewerten musste, muss er nun die Ver-

gleichbarkeit von Zertifizierungen durch verschiedene Zertifizierungsstellen bewerten. Abhilfe schafft hier die 2017 veröffentlichte Norm IEC 62586-2 [6], die Prüfungen zur Konformitätsbewertung von Produkten mit den Anforderungen der IEC 61000-4-30 festlegt. Somit ist die Vergleichbarkeit gegeben, sofern die Zertifizierung nach den Vorgaben dieser Norm durchgeführt wurde.

3. Rückführung des Kalibriersystems

Durch die Rückführung des Kalibriersystems wird gewährleistet, dass durch verschiedene Institute durchgeführte Kalibrierungen vergleichbar sind. Für den Verwender wird die Kalibrierung dadurch ungleich wertvoller. Wird die Einhaltung gewisser Anforderungen vertraglich festgehalten, so wird eine nicht rückführbare Messung in Streitfällen mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer der beteiligten Parteien angezweifelt werden. Eine rückführbare Messung hingegen ist in der Regel gerichtsverwertbar. Die Norm IEC 62586-2 empfiehlt die Rückführbarkeit zwar nur und fordert sie nicht, allerdings sollte der Prüfbericht Informationen über die Rückführbarkeit enthalten.

Die Rückführung stationärer, sinusförmiger Signale ist etabliert. Eine Herausforderung ist hingegen die Rückführung der übrigen Power-Quality-Szenarien. Mit einem Präzisions-Digitalmultimeter, welches im Abtastmodus betrieben wird und mit der Quelle synchronisiert ist, wird das Ausgangssignal der Quelle digitalisiert (Bild 1). Ströme werden zuvor mit Nebenwiderständen in Spannungen umgewandelt. Im PC werden aus den Abtastwerten die Referenzwerte der Power-Quality-Kenngrößen berechnet.

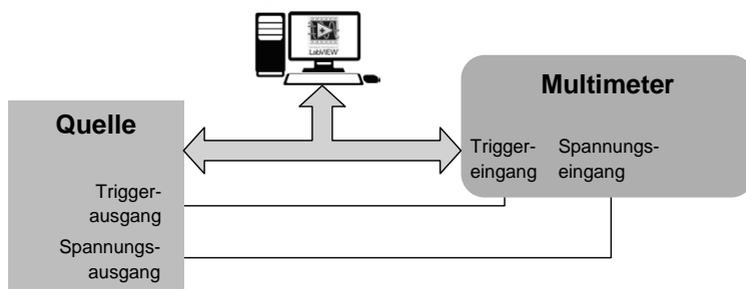


Bild 1: Power-Quality-Kalibriersystem des METAS: Rückführung der Quelle

4. Messunsicherheitsbudget: Beispiel Flicker

Häufig sind Messunsicherheitsbudgets recht einfach aufzustellen, weil die Messgröße direkt gemessen werden kann. Power-Quality-Kenngrößen sind hingegen ein Beispiel für Messgrößen, die rechnerisch auf Grundlage anderer Größen bestimmt werden. Die Bestimmung von Empfindlichkeitskoeffizienten und Korrelationen ist daher vergleichsweise aufwendig. Beispielhaft sei hier die Messunsicherheitsberechnung für die Kenngröße Flicker mit Rechteckmodulation betrachtet.

Flicker (Bild 2) wird beschrieben durch die Modulationsfrequenz, die Form des Modulationsignals und den Modulationsgrad k , der Differenz von U_1 , der Höhe der Spannung im hohen Zustand, und U_2 , der Höhe der Spannung im niedrigen Zustand, normalisiert auf die mittlere Höhe der Spannung:

$$k = \frac{U_1 - U_2}{\frac{U_1 + U_2}{2}}. \quad (1)$$

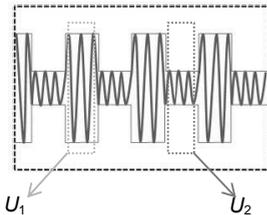


Bild 2: Flicker mit Rechteckmodulation

Da die Abtastung durch das Multimeter mit der Quelle synchronisiert ist, entsteht keine Schwebung zwischen Multimeter und Quelle (Bild 3). Für Referenzsysteme, die in Metrologieinstituten eingesetzt werden, ist dies möglich und sinnvoll. Für einen Prüfling, der im Feldeinsatz nicht synchronisiert sein kann, ist es auch bei der Prüfung oder Kalibrierung im Labor nicht sinnvoll und in der Regel auch nicht möglich, die Abtastung des Prüflings extern zu synchronisieren.

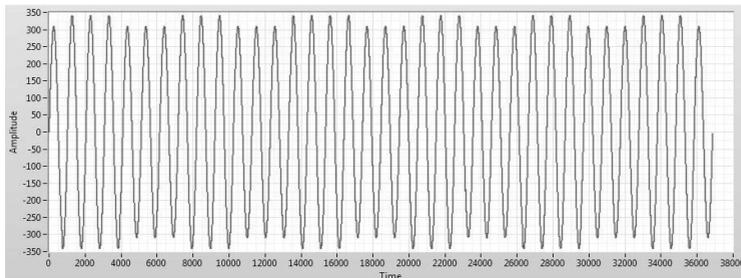


Bild 3: Flicker mit 8 Hz-Rechteckmodulation, $k = 10\%$: Rekonstruktion des Signals aus den Abtastwerten

Aus den Abtastwerten in jedem hohen Zustand wird jeweils die Höhe der Versorgungsspannung $U_{1,i}$ berechnet, aus denen in jedem niedrigen Zustand $U_{2,j}$. Aus den einzelnen Werten $U_{1,i}$ bzw. $U_{2,j}$ werden die Mittelwerte U_1 bzw. U_2 und die Standardabweichungen $\sigma(U_1)$ bzw. $\sigma(U_2)$ gebildet. In den Standardabweichungen sind die durch Typ-A-Auswertung ermittelten Unsicherheitsbeiträge der Quelle und der Messgeräte enthalten. Alle anderen Unsicherheitsbeiträge werden durch Typ-B-Auswertung bestimmt. Hier sind unkorrelierte Beiträge $u_B(U_1)$ bzw. $u_B(U_2)$, die vom Zustand – hoch (U_1) oder niedrig (U_2) – abhängen, und gleiche Beiträge $u_{B,const}$, die nicht von Zustand, teilweise aber vom Arbeitspunkt abhängen, zu unterscheiden.

Die kombinierten Standardunsicherheiten werden durch Addition der Quadrate berechnet: $u_C^2(U_1) = \sigma^2(U_1) + u_B^2(U_1) + u_{B,const}^2$ und $u_C^2(U_2) = \sigma^2(U_2) + u_B^2(U_2) + u_{B,const}^2$.

Hiermit wird die Unsicherheit $u(k)$ auf dem Modulationsgrad k berechnet

$$u^2(k) = \frac{\partial k}{\partial U_1} \cdot u_C^2(U_1) + \frac{\partial k}{\partial U_2} \cdot u_C^2(U_2) + 2 \frac{\partial k}{\partial U_1} \cdot \frac{\partial k}{\partial U_2} \cdot \text{cov}(U_1, U_2). \quad (2)$$

Die analytische Bestimmung der Kovarianz $\text{cov}(U_1, U_2)$ ist aufwendig. Durch eine äquivalente Betrachtung des Problems lässt sich diese umgehen. U_1 und U_2 können in je einen korrelierten Summanden U'_1 und U'_2 sowie eine Konstante U_0 zerlegt werden. Damit ergibt sich

$$k = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = 2 \frac{(U'_1 + U_0) - (U'_2 + U_0)}{(U'_1 + U_0) + (U'_2 + U_0)} = 2 \frac{U'_1 - U'_2}{U'_1 + U'_2 + 2U_0}. \quad (3)$$

Die Unsicherheitsberechnung vereinfacht sich, weil die Größen U'_1 , U'_2 und U_0 unkorreliert sind. Damit gilt

$$u^2(k) = \frac{\partial k}{\partial U'_1} \cdot u_C^2(U'_1) + \frac{\partial k}{\partial U'_2} \cdot u_C^2(U'_2) + \frac{\partial k}{\partial U_0} \cdot u_C^2(U_0). \quad (4)$$

Mit $U_0 = 0$ und $u(U_0) = u_{B,const}$ vereinfacht sich (4) zu

$$u(k) = \sqrt{\left[\left(1 + \frac{k}{2}\right) \cdot \frac{u_C(U_1)}{U_1 + U_2} \right]^2 + \left[\left(1 - \frac{k}{2}\right) \cdot \frac{u_C(U_2)}{U_1 + U_2} \right]^2 + \left[k \cdot \frac{u_{B,\text{const}}}{U_1 + U_2} \right]^2}. \quad (5)$$

Die spannungsabhängigen Beiträge $u_B(U_1)$ bzw. $u_B(U_2)$ werden durch die Nichtlinearität des Multimeters dominiert. Dem Kalibrierzertifikat ist zu entnehmen, dass diese über den ganzen Eingangsspannungsbereich $5 \mu\text{V/V}$ nicht überschreitet. In der Praxis ist der Modulationsgrad k sehr klein, häufig kleiner als 1 %, so dass $U_1 \approx U_2$. Folglich sind $u_B(U_1)$ bzw. $u_B(U_2)$ um den Arbeitspunkt herum in der Praxis wesentlich kleiner als $5 \mu\text{V/V}$.

Beispiel:

Im Rahmen einer Prüfung wird Flicker mit einer Rechteckmodulation mit einem Modulationsgrad $k = 0.2 \%$ erzeugt. Der Mittelwert $(U_1 + U_2)/2$ sei $230.000\ 000 \text{ V}$. Durch Messung werden die Standardabweichungen $\sigma(U_1) = \sigma(U_2) = 115 \mu\text{V}$ ermittelt. Die spannungsabhängigen Unsicherheitsbeiträge $u_B(U_1) = u_B(U_2) = 23 \mu\text{V}$ seien ebenfalls gleich. Die Typ-B-Unsicherheitsbetrachtung liefert $u_{B,\text{const}} = 1.15 \text{ mV}$. Durch Einsetzen in (5) unter Verwendung von $u_C^2(U_1) = \sigma^2(U_1) + u_B^2(U_1)$ und $u_C^2(U_2) = \sigma^2(U_2) + u_B^2(U_2)$ ergibt sich

$$u(k) = \sqrt{(1.001^2 + 0.999^2) \cdot \left[\left(\frac{115 \mu\text{V}}{230 \text{ V}}\right)^2 + \left(\frac{23 \mu\text{V}}{230 \text{ V}}\right)^2 \right] + \left(0.002 \times \frac{1.15 \text{ mV}}{230 \text{ V}}\right)^2} \quad (6)$$

$$\approx \sqrt{2 \times \left(\frac{115 \mu\text{V}}{230 \text{ V}}\right)^2 + \left(10^{-3} \times \frac{2.30 \text{ mV}}{230 \text{ V}}\right)^2} \approx \sqrt{(0.7 \times 10^{-6})^2 + (10 \times 10^{-9})^2} \approx 0.7 \times 10^{-6}. \quad (7)$$

Obwohl $u_{B,\text{const}}$ um einen Faktor 10 bzw. 50 grösser als die übrigen Unsicherheitsbeiträge ist, kann der Beitrag zur kombinierten Unsicherheit $u(k)$ vernachlässigt werden, da der Modulationsindex k sehr klein ist. Die spannungsabhängigen Unsicherheitsbeiträge $u_B(U_1) = u_B(U_2)$ sind zwar nur um einen Faktor 5 kleiner als $\sigma(U_1) = \sigma(U_2)$, haben aber ebenfalls kaum Auswirkungen auf die kombinierte Unsicherheit $u(k)$. Dies die eine absolute Standardunsicherheit. Für die relative Standardunsicherheit gilt

$$\frac{u(k)}{k} \approx \frac{0.7 \times 10^{-6}}{0.002} = 0.35 \times 10^{-3}. \quad (8)$$

Durch Multiplikation mit einem Erweiterungsfaktor wird die erweiterte Unsicherheit für ein Vertrauensintervall von 95 % berechnet. Der Erweiterungsfaktor hängt von den Verteilungsfunktionen der Unsicherheitsbeiträge und der Anzahl der effektiven Freiheitsgrade ab. Im vorliegenden Fall ist das Übersprechen vom 50 Hz-Versorgungsnetz durch den Messaufbau so minimiert, dass es vernachlässigbar ist. Die verbleibenden Beiträge sind in guter Nähe-

rung normalverteilt und die Anzahl der Freiheitsgrade ist hinreichend groß, so dass mit einem Erweiterungsfaktor 2 gearbeitet werden kann.

5. Literatur

- [1] EN 50160:2010: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems
- [2] IEC 61000-4-30:2015: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods
- [3] IEC 61000-4-7:2009: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurement techniques and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto
- [4] IEC 61000-4-15:2010: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications
- [5] ISO 17000:2004: Conformity assessment — Vocabulary and general principles
- [6] IEC 62586-2:2017: Power quality measurement in power supply systems – Part 2: Functional tests and uncertainty requirements
- [7] Braun, J.-P. u. Mester, C.: Power-Quality- und Synchrophasormesstechnik. Arzberger, M., Kahmann, M. u. Zayer, P. (Hrsg.): Handbuch Elektrizitätsmesstechnik, 3. Auflage. VDE Verlag GmbH u. EW Medien und Kongresse GmbH 2017

Kalibrierung der Ausgangsleistung von Hochfrequenzgeneratoren

Dr.-Ing. Rolf H. Judaschke,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Kurzfassung

Bei der Kalibrierung von Hochfrequenzmessgrößen kann der Messfehler aufgrund von Fehl-anpassung zwischen den einzelnen Komponenten des Messaufbaus erheblich zur Gesamt-messunsicherheit beitragen, wobei dieser Anteil mit der Messfrequenz kontinuierlich ansteigt. Dies gilt auch für die Kalibrierung der Ausgangsleistung von Hochfrequenz-generatoren, deren Ausgangsimpedanz (Quellenimpedanz) im Idealfall als komplexwertige Größe für die Fehler-korrektur und die Messunsicherheitsanalyse bekannt sein muss.

Bei der Messung der komplexwertigen Impedanz haben vektorielle Netzwerkanalysatoren (VNA) in der letzten Dekade eine dominierende Rolle eingenommen, wobei die ihnen zugeordneten Messgrößen der Reflexionsfaktor, das Stehwellenverhältnis, die Reflexionsdämpfung oder die Streuparameter sind. Das Messprinzip der Netzwerkanalyse beruht darauf, eine elektromagnetische Welle auf die zu messende Impedanz einzustrahlen und die vom Messobjekt reflektierte Welle in Relation zur eingestrahlten Welle zu messen. Es ist leicht nachvollziehbar, dass dieses Messprinzip bei pegelgeregelten Quellen, die im Betrieb ihrerseits ein Signal emittieren, nicht anwendbar ist.

Bei den Verfahren zur Messung der Ausgangsimpedanz aktiver Quellen unterscheidet man einerseits, ob das Messergebnis als skalare [1], [2] oder komplexwertige Größe [4]–[6] angegeben wird. Andererseits kann eine Klassifizierung auch in der Weise vorgenommen werden, dass man zwischen aktiven [1]–[3] und passiven [4]–[6] Methoden unterscheidet. Bei ersteren wird in den aktiven Generator ausgangsseitig ein Hilfssignal injiziert, während bei letzteren die Überlagerung von Generatorausgangssignal und Mehrfachreflexionen desselben im Zeit- und Frequenzbereich durch skalare Leistungsmessung analysiert wird.

Nach erfolgter Bestimmung des Generatorausgangsreflexionsfaktors Γ_G und des Leistungsmessereingangsreflexionsfaktors Γ_L ergibt sich die Ausgangsleistung eines Hochfrequenzgenerators, d.h. die an die Bezugsimpedanz Z_0 abgegebene Leistung aus

$$P_{Z0} = \frac{P_{anz}}{\eta_{cal}} \cdot |1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2 ,$$

wobei η_{cal} den Kalibrierungsfaktor des Leistungsmessers und P_{anz} die vom Leistungsmessgerät angezeigte Leistung bezeichnet (s. Bild 1).

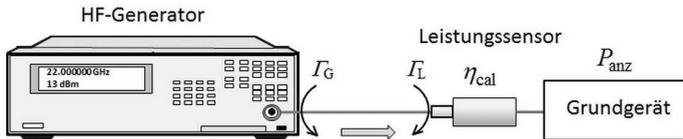


Bild 1: Messung der Ausgangsleistung durch direkten Anschluss eines Leistungsmessers.

Der mit dem in Bild 1 dargestellten Messaufbau kalibrierbare Pegelbereich wird durch den Dynamikbereich des Leistungssensors bestimmt. Dieser liegt für Leistungsmesser basierend auf Diodentechnologie im Bereich von ca. +23 dBm bis -65 dBm und für thermische Leistungssensoren im Bereich von ca. +20 dBm bis -40 dBm. Für höhere Leistungspegel ist der Messaufbau um ein kalibriertes, in Serie geschaltetes Dämpfungsglied zu erweitern, während die Kalibrierung für kleine Leistungspegel mit einem frequenzselektiven, hochlinearen Spektrumanalysator (SA) bzw. Messempfänger (ME) bis -80 dBm und vorgeschaltetem, rauscharmem Vorverstärker bis ca. -120 dBm durchgeführt werden kann. Die Linearität des Spektrumanalysators ist vorab mittels hochlinearer thermischer Leistungssensoren bzw. schaltbarer Dämpfungsglieder zu kalibrieren. Es ist zu beachten, dass der Quellenreflexionsfaktor des HF-Generators aufgrund interner schaltbarer Dämpfungsglieder und Verstärker nicht nur frequenz-, sondern auch pegelabhängig ist.

In Tabelle 1 sind die bei der Messunsicherheitsberechnung prinzipiell zu berücksichtigenden Einflussgrößen zusammengefasst.

Tabelle 1: Einflussgrößen bei der Kalibrierung der Ausgangsleistung von HF-Generatoren.

Einflussgröße	Bemerkung
Ausgangsreflexionsfaktor des Generators	pegelabhängig, Betrag oder komplexwertig
Temperaturabhängigkeit der Generatorleistung	
Kalibrierungsfaktor des Leistungssensors	
Eingangsreflexionsfaktor des Leistungssensors	komplexwertig aus VNA-Messung
Linearität des Leistungssensors	pegelabhängig
Einfluss von Harmonischen auf das Messergebnis	abhängig von spektraler Reinheit des Generatorsignals, Pegel und Sensortyp (insbesondere bei Diodensensoren)
Einfluss des Breitbandrauschens des Generators auf den Leistungssensor	
Temperaturabhängigkeit des Leistungssensors	
Drift des Kalibrierungsfaktors des Leistungssensors	zeit- und frequenzabhängig
Abweichung des Leistungsmessgrundgerätes	entfällt bei Sensoren mit interner Messwertbildung
Auflösung des Leistungsmessgrundgerätes	
Kurzzeitwiederholbarkeit bestehend aus Reproduzierbarkeit des HF-Verbinders, Nullpunktabweichung, Kurzzeitstabilität des Generators	
Streuparameter des Dämpfungsgliedes	nur bei Hochpegelkalibrierung
Temperaturabhängigkeit des Dämpfungsgliedes	nur bei Hochpegelkalibrierung
Pegelabhängigkeit des Dämpfungsgliedes	nur bei Hochpegelkalibrierung
Auflösebandbreite des SA/ME	nur bei Niederpegelkalibrierung
Einfluss des intern gewählten Dämpfungsgliedes des SA/ME	nur bei Niederpegelkalibrierung
Einfluss des Eigenrauschens als Nullpunktabweichung des SA/ME	nur bei Niederpegelkalibrierung

Anmerkung: Die Messunsicherheitsbeiträge aufgrund von Fehlanpassung ergeben sich aus den Messunsicherheiten der Reflexionsfaktoren der jeweils verwendeten Baugruppen (HF-Generator, Leistungssensor, SA, ME, Dämpfungsglied).

Literatur:

- [1] Roberts, P.: Measuring Output VSWR for an Active Levelled Source. Measurement Science Conference, Anaheim, USA, 2008.
- [2] Förster, H.-J.: Measurement of Source Match for Broadband Synthesizers and Amps, Microwave Engineering in Europe, 1993, S. 41-46.
- [3] Reichel, T., Neidhardt, S., Leibfritz, M.: Verfahren und Messgerät zum Charakterisieren eines emittierenden Messobjekts, Patentschrift DE 10 2013 213 296 A1, 2013.
- [4] Reichel, T.: Messverfahren für den äquivalenten Reflexionsfaktor von HF-Leistungsteilern. PTB-Bericht, E-58, 1998, S. 1-13.
- [5] Török, A., Janik, D., Peinelt, W., Stumpe, D., Stumper, U.: Efficient Broadband Method for Equivalent Source Reflection Coefficient Measurements, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 50, Nr. 2, 2001, S. 361-36.
- [6] Egelhofer, T.: Entwicklung und Charakterisierung von VSWR-Messern zur Bestimmung der Ausgangsimpedanz von Mikrowellengeneratoren. Bachelor-Arbeit, Hochschule Kempten, 2013.

Messunsicherheitsdarstellung bei Vektornetzwerkanalysatoren

Von der Vision zur Realität

Dipl.-Ing. **Jens Leinhos**, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München

Kurzfassung

Das lineare Verhalten von aktiven und passiven Schaltungen im Hochfrequenzbereich wird zumeist mithilfe von Streuparametern beschrieben. Am häufigsten wird für diese Messaufgabe ein Vektornetzwerkanalysator (VNA) eingesetzt, da mit diesem Messgerät sehr geringe Messunsicherheiten erzielt werden können. In diesem Beitrag wird ein VNA-Konzept zur direkten Darstellung von Messunsicherheiten vorgestellt, das erstmals auch alle Anforderungen der neuen Richtlinie EURAMET cg-12 (Version 3.1) erfüllt.

1. Einleitung

Ein VNA wird in der Hochfrequenztechnik eingesetzt, um Streuparameter an elektrischen Toren als Funktion der Frequenz zu messen. Vor der Nutzung eines VNAs muss eine Systemfehlerkorrektur mit Kalibriernormalen durchgeführt werden, um systematische Messabweichungen zu korrigieren. Hierbei ist jeder Kalibrier- und Messvorgang mit einer Unsicherheit behaftet. Zur vollständigen Angabe eines Messergebnisses ist daher immer eine Angabe der ihm beizuordnenden Messunsicherheit erforderlich, um die Qualität und Zuverlässigkeit der Messung einschätzen zu können. Die Bewertung der Messergebnisse ist z.B. zwingend erforderlich, um die Einhaltung von Normen, Richtlinien und gesetzlichen Vorgaben überprüfen zu können. Die mathematische Grundlage zur Behandlung und Berechnung von Messunsicherheiten wird im „Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ [1] beschrieben.

2. Stand der Technik

Die Richtlinie EURAMET cg-12 (Version 2.0 und früher) beschreibt eine genauere Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheiten, die nur bedingt mit den Ausführungen des GUM in Einklang steht. Die Überarbeitung dieser Richtlinie beinhaltet zahlreiche *Fehlerkorrekturen*. Darüber hinaus vollzieht sich allerdings auch ein *Paradigmenwechsel*, da nun ein strikt GUM-konformer Weg zur Unsicherheitsberechnung aufgezeigt wird. Diese Um-

stellung kann gegenüber bestehenden Methoden zu differierenden Ergebnissen führen, die in [2] näher beschrieben werden. Ein wesentlicher Vorteil der neuen Methode besteht darin, dass die Korrelation zwischen den in das Fehlermodell einfließenden Eingangsgrößen berücksichtigt werden können. Hierbei erhöht sich allerdings der Aufwand, so dass die Messunsicherheiten nur noch mit einem Rechner effizient bestimmt werden können. Die Berechnung kann mithilfe der automatischen Differentiation [3-5], der finiten Differenzen [6] und/oder analytisch [7] erfolgen. Die Berechnungen werden zu konsistenten Ergebnissen führen, wenn die jeweils verfahrensbedingten Einschränkungen (z.B. Linearitätsbedingung) beachtet werden [8]. Derzeit ist allerdings kein Vektornetzwerkanalysator auf dem Markt verfügbar, der eine unmittelbare Berechnung und Darstellung der Messunsicherheiten unter Einhaltung der neuen Richtlinie EURAMET cg-12 (Version 3.1) ermöglicht. Auf eine entsprechende Lösung soll im Folgenden näher eingegangen werden [9].

3. Messunsicherheitsdarstellung von S-Parametern mithilfe des METAS VNA Tools II

Zur Realisierung einer direkten Messunsicherheitsdarstellung bei Vektornetzwerkanalysatoren wurde die Einbindung der Programmbibliothek des METAS VNA Tools II [4] näher untersucht. Das METAS VNA Tools II kann Messunsicherheiten mithilfe der automatischen Differentiation berechnen und erfüllt alle Anforderungen der Richtlinie EURAMET cg-12 (Version 3.1). Es hat sich hierbei gezeigt, dass dieses Konzept eine Berechnung und Darstellung der

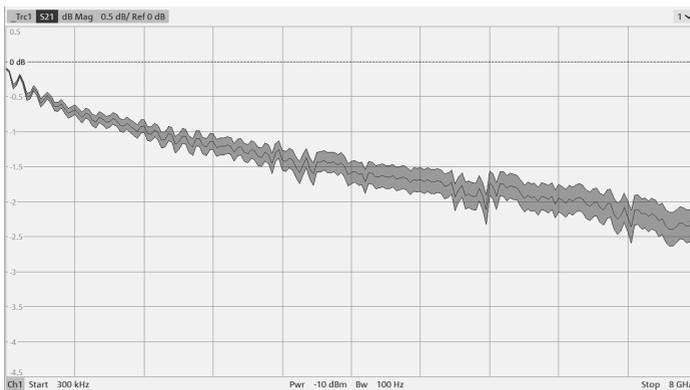


Bild 1: Benutzeroberfläche eines VNAs mit Messunsicherheitsdarstellung

Messunsicherheiten auch während der Messung ermöglicht (s. Bild 1). Durch die Einbindung der Programmbibliothek konnte des Weiteren die Benutzerfreundlichkeit erheblich verbessert werden, da für die Laborpraxis unnötige Arbeitsschritte entfallen bzw. automatisiert durchgeführt werden können. Durch eine erweiterte Benutzerführung können darüber hinaus Bedienfehler reduziert werden.

4. Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt die Einbindung des METAS VNA Tools II in die Firmware von einem Vektornetzwerkanalysator, um eine Berechnung und Darstellung von Messunsicherheiten im Zuge einer Messung zu ermöglichen. Diese Lösung ist konform zu den Anforderungen der Richtlinie EURAMET cg-12 (Version 3.1) und ermöglicht dem Anwender eine einfache und intuitive Bedienung.

- [1] ISO, "JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement," 2010.
- [2] D. Blackham, "Trends for computing VNA uncertainties," 2017 89th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), Honolulu, HI, 2017, pp. 1-4.
- [3] B. D. Hall, "Calculating measurement uncertainty using automatic differentiation," *Measurement Science and Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 421–427, 2002.
- [4] M. Wollensack, J. Hoffmann, J. Ruefenacht, and M. Zeier, "VNA Tools II: S-parameter uncertainty calculation," in 79th ARFTG Microwave Measurement Conference, 2012, pp. 1–5.
- [5] M. Zeier, J. Hoffmann, and M. Wollensack, "Metas.unclib a measurement uncertainty calculator for advanced problems," *Metrologia*, vol. 49, no. 6, pp. 809–815, 2012.
- [6] A. Lewandowski, D. F. Williams, P. D. Hale, J. C. M. Wang, and A. Dienstfrey, "Covariance-based vector-network-analyzer uncertainty analysis for time- and frequency-domain measurements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 7, pp. 1877–1886, 2010.
- [7] M. Garelli and A. Ferrero, "A unified theory for s-parameter uncertainty evaluation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 12, pp. 3844–3855, 2012.
- [8] G. Avolio *et al.*, "Software tools for uncertainty evaluation in VNA measurements: A comparative study," 2017 89th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), Honolulu, HI, 2017, pp. 1-7.
- [9] DE102006008063A1

Spurengasmessung für die Luftqualitätsmessung mit Halbleitersensoren

Prof. Dr. rer. nat. **A. Schütze**, **T. Baur**, Dr. rer. nat. **T. Sauerwald**,
Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Messtechnik, Saarbrücken

Kurzfassung

Die Luftqualität hat einen erheblichen Einfluss auf unsere Gesundheit und unser Wohlbefinden. Dennoch liegen nur in begrenztem Maße Messungen der wichtigsten Luftschadstoffe vor, weil heutige Messungen auf sehr teuren analytischen Systemen aufbauen, um eine ausreichende Datenqualität zu erzielen. Preiswerte Gassensoren stellen eine interessante Ergänzung dar, um flächendeckend mit hoher zeitlicher Auflösung Daten zu erheben, scheitern heute aber noch an der unzureichenden Sensitivität und Spezifität. Moderne Sensorsysteme mit dynamischen Betriebsmodi und intelligenter Signalauswertung können hier den Brückenschlag ermöglichen. Jüngste Untersuchungen belegen das Potential dieser Systeme zur Messung kleinster Benzolkonzentrationen. Die Konzentrationsmesswerte sind trotz des komplexen Signalverarbeitungsalgorithmus nahezu normalverteilt und homoskedastisch. Das belegt das Potential für die Luftqualitätsmessung, aber auch die Notwendigkeit einer verallgemeinerten Form der Messunsicherheitsbetrachtung für solche Systeme.

1. Einleitung

Die Luftqualität hat einen erheblichen Einfluss auf unsere Gesundheit und unser Wohlbefinden. Dennoch werden nur wenige Luftschadstoffe (CO, NO_x, SO₂, Ozon, Benzol) an wenigen Messstellen erfasst, da die heute üblichen analytischen Systeme zur Erzielung einer ausreichenden Datenqualität sehr teuer sind (typisch 20.000 €/Messgröße zzgl. laufender Kosten). Damit können heute keine flächendeckenden und zeitaufgelösten Informationen zur Luftqualität bereitgestellt werden, zudem fehlen Informationen zu weiteren Schadstoffen, speziell VOC (volatile organische Verbindungen), sowie auch zu Geruchsbelastungen. Damit sind darauf aufbauende Schritte (umfassende Information der Bevölkerung, Vorhersage von Schadstoffbelastungen, Identifizierung von Verschmutzungs- und Geruchsquellen, gezielte Maßnahmen zur Reduzierung der Schadstoffbelastung) bestenfalls eingeschränkt möglich. Man beachte, dass die fehlende Messtechnik auch die Bewertung der Auswirkungen von Schadstoffen auf Umwelt und Gesundheit stark einschränkt, weswegen diese Systeme auch von Medizinern als ein wichtiges Hilfsmittel gefordert werden. Preiswerte Gassensoren sind prinzipiell geeignet, um ubiquitär Umweltdaten mit hoher zeitlicher Auflösung zu erheben, scheitern heute aber zumeist noch an unzureichender Sensitivität und Spezifität [1].

2. Intelligente Sensorsysteme basierend auf Halbleitersensoren

Moderne Sensorsysteme mit dynamischen Betriebsmodi und intelligenter Signalauswertung können hier den Brückenschlag ermöglichen. Jüngste Untersuchungen belegen das Potential dieser Systeme, z.B. für die Überwachung von Benzol in kleinsten Konzentrationen für Anwendungen in der Außenluft und in Innenräumen [2]. Allerdings muss dabei die gesamte Messkette vom gassensitiven Material, über den Transducer, die Elektronik für dynamischen Betrieb und Datenerfassung, die Signalauswertung und Kalibrierung bis zum mechanischen Aufbau (Gaszufuhr, Gehäusematerial) systemisch betrachtet werden [2]. Eine weitere Hürde für die Akzeptanz stellt die Datenqualität dar: zwar werden experimentell sehr vielversprechende Ergebnisse erzielt, die Auswertung ist jedoch nicht mit den heutigen Methoden der Messunsicherheitsbewertung kompatibel. Dem optimierten Betrieb liegt ein physikalisches Modell des Sensors zugrunde [3], die Auswertung basiert jedoch auf statistischer Datenanalyse, d.h. auf Merkmalskombinationen, die mit Methoden des maschinellen Lernens identifiziert werden. Eine weit verbreitete Methode ist die PLSR (partial least squares regression), die eine Linearkombination von Merkmalen wie Steigungen und Mittelwerten des Sensorsignalmusters zur Vorhersage der Zielgröße Konzentration nutzt. Als Beispiel ist die Laborkalibrierung eines temperaturzyklisch betriebenen Gassensorsystems in Bild 1 gezeigt. Das Ergebnis ist eine lineare Kennlinie mit nahezu konstanten, normalverteilten Abweichungen. Mit zusätzlichen Störgrößen ergeben sich deutlich größere Abweichungen, Bild 2, das Modell ist aber auch für die Vorhersage unbekannter Daten (rote Punkte in Bild 2) gültig [4].

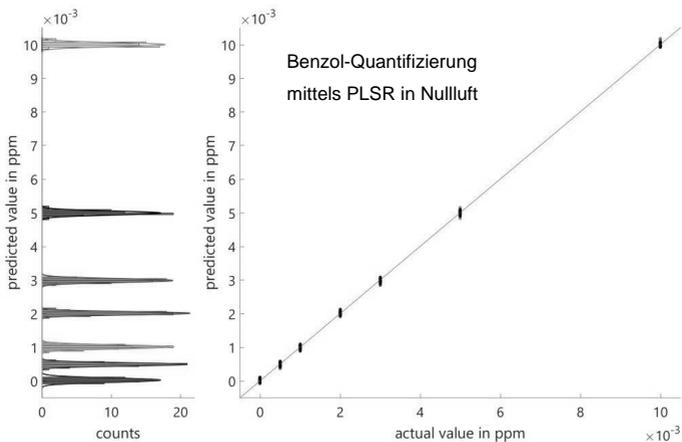


Bild 1: PLSR-Kalibrierkurve eines Sensorsystems zur Quantifizierung von Benzol für Nullluft bei 25% r.F. in Anwesenheit von 2 ppb Toluol; links sind die Histogramme der Daten gezeigt mit Standardabweichungen zwischen 0,11 und 0,15 ppb Benzol.

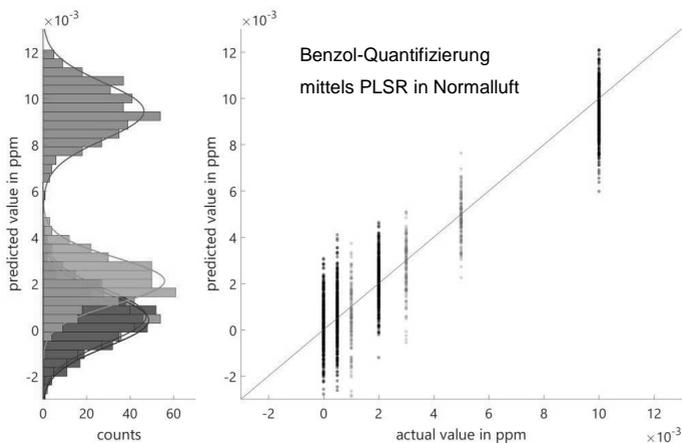


Bild 2: PLSR-Kalibrierkurve des Sensorsystems zur Quantifizierung von Benzol für Normalluft (ubiquitärer Gashintergrund: 1,8 ppm CH₄; 500 ppb H₂; 150 ppb CO) bei variabler Feuchte (10, 25, 40% r.F.) und Störgaskonzentrationen (Toluol: 0, 2, 20 ppb, CO: 0, 350 ppb); links die Histogramme der Kalibrierdaten (schwarz, Standardabweichung von 2,3 bis 2,9 ppb Benzol).

3. Ausblick

Um die Potentiale preiswerter Gassensorsysteme für die Umweltüberwachung ausnutzen zu können, müssen nicht nur die Systeme selbst mit allen ihren Komponenten konsequent entwickelt werden, auch das metrologische Umfeld muss sich den neuen Möglichkeiten öffnen. Dies umfasst neben einer erweiterten Betrachtung der Messunsicherheit (Berücksichtigung daten-basierter Modelle) auch eine konsequente Entwicklung von Kalibrierverfahren, die nicht nur analytische Systeme im Fokus haben, sondern auch die speziellen Randbedingungen sensor-basierter Systeme im Hinblick auf Störeinflüsse und deren Eliminierung.

- [1] Spinelle, L.; Gerboles, M.; Kok, G.; Persijn, S.; Sauerwald, T.: Review of Portable and Low-Cost Sensors for the Ambient Air Monitoring of Benzene and Other Volatile Organic Compounds. *Sensors* 2017, 17, 1520, doi:10.3390/s17071520.
- [2] Schütze, A.; Baur, T.; Leidinger, M.; Reimringer, W.; Jung, R.; Conrad, T.; Sauerwald, T.: Highly Sensitive and Selective VOC Sensor Systems Based on Semiconductor Gas Sensors: How to?. *Environments* 2017, 4, 20; doi: 10.3390/environments4010020
- [3] Baur, T.; Schütze, A.; Sauerwald, T.: Optimierung des temperaturzyklischen Betriebs von Halbleitersensoren. *tm - Technisches Messen*, 82 (4), 187–195 (2015).
- [4] Leidinger, M.; Baur, T.; Sauerwald, T.; Schütze, A.; Reimringer, W.; Spinelle, L.; Gerboles, M.: Highly sensitive benzene detection with MOS gas sensors. *Proc. SENSOR 2017*, Nuremberg, Germany, May 30 - June 01, 2017; doi: 10.5162/sensor2017/A4.3

Messunsicherheit coulometrischer Spurenfeuchtesensoren

Dr. Carlo Tiebe, M.Sc. Marc Detjens, Dr. Thomas Hübert,
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kurzfassung

Die Spurenfeuchte von technischen Gasen kann zuverlässig mit coulometrischen Feuchtesensoren bestimmt werden. Das Prinzip dieser Sensoren basiert auf der Absorption von Wasser in einer hygroskopischen Schicht und anschließender elektrolytischer Zersetzung. Die Kalibrierung der Sensoren erfolgte mit einem Spurenfeuchtegenerator bei Frostpunktemperaturen kleiner als -30 °C bzw. einem Volumenanteil kleiner als $376\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$. Die generierte Feuchte wurde zusätzlich zu den coulometrischen Sensoren mit einem Taupunktspiegelhygrometer, welches als Referenz diente, gemessen. Zwischen dem coulometrischen Sensorsignal und der gemessenen Referenzfeuchte wurde eine empirische nichtlineare Funktion gefunden. Die resultierende Kalibrierungsfunktion, die aus zwei Parametern besteht, wurde hinsichtlich ihrer Messunsicherheit bewertet. Zusätzlich erfolgt die Überprüfung der Kalibrierparameter mittels einfaktorieller Varianzanalyse (ANOVA). Die ANOVA zeigte, dass eine gemittelte Funktion für die Feuchtigkeitbestimmung in Stickstoff, Helium und synthetischer Luft für mehrere Sensoren angewendet werden kann.

Mit coulometrischen Sensoren ist es möglich, die Spurenfeuchte in technischen Gasen mit einer erweiterten Unsicherheit hinsichtlich der Frostpunktemperatur kleiner als $2,1\ \text{K}$ zu ermitteln.

1 Einleitung

Dieser Beitrag beschreibt die Bestimmung der Spurenfeuchte bei Volumenanteilen kleiner als $2000\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ bzw. bei Frostpunktemperaturen kleiner als -13 °C . Spurenfeuchte stellt ein relevantes Qualitätsmerkmal von technischen Gasen dar und sollte möglichst präzise und kontinuierlich bestimmt werden. Die Angabe von Kenngrößen und Formelzeichen erfolgt gemäß VDI/VDE 3514-1.^[1]

Der Wassergehalt gasförmiger Vor-, Zwischen- und Endprodukte sowie verwendeter Trägergase spielt in vielen Industrieprozessen eine entscheidende Rolle. Es besteht hierbei

die Notwendigkeit die Wasserdampfkonzentration während eines Prozesses kontinuierlich und präzise zu messen. Der Wassergehalt kann sowohl als Steuergröße dienen, zum Beispiel bei Trocknungsprozessen oder auch als Qualitätsmerkmal von Endprodukten. Zu den wichtigsten Methoden, um die Spurenfeuchte in Prozessgasen zu bestimmen, zählen Taupunktspiegelhygrometer, Polymer- und Metalloxidsensoren, spektroskopische und coulometrische Hygrometer.^[2]

Letzt genanntes Hygrometer bietet eine zuverlässige, präzise, kontinuierliche und kostengünstige Bestimmung der Spurenfeuchte, welche auf der Messung der elektrischen Stromstärke basiert und somit auf eine SI-Einheiten rückführbar ist.^[3]

Das Sensorprinzip, dargestellt in Abbildung 1, beruht auf der Absorption von Wasserdampf in einer hygroskopischen Phosphorpentoxid-Schicht (P_4O_{10}). Das P_4O_{10} reagiert mit dem absorbierten Wasser und es bilden sich unterschiedliche Phosphorsäuren. Das gebundene Wasser wird elektrolytisch zu Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt und der resultierende Elektrolysestrom korreliert zum Feuchtegehalt des Gases. Bei dieser Reaktion werden Elektronen als Ladungsträger freigesetzt, welche das primäre Messsignal - Stromstärke I - der coulometrischen Sensoren erzeugen. Der Reaktionsmechanismus ist in den folgenden Gleichungen vereinfacht dargestellt:

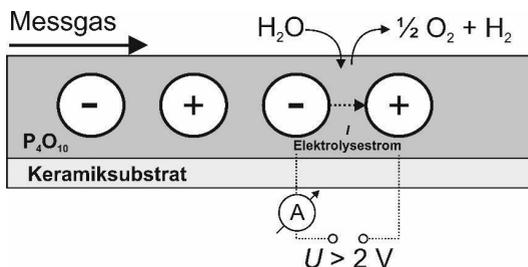
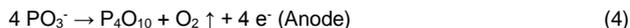
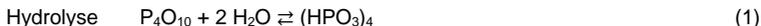


Abbildung 1: Sensorprinzip eines coulometrischen Sensors.

Die Berechnung der resultierenden Stromstärke für eine vollständige Umsetzung der absoluten Wassermenge in einem Gasvolumen wird durch das FARADAYSche Gesetz realisiert, es gilt:

$$Q = \int I \cdot dt = n_v \cdot F \cdot z = \frac{m_v}{M_v} \cdot F \cdot z$$

Jedoch besteht eine Notwendigkeit für die Kalibration von coulometrischen Sensoren, weil auf der einen Seite eine unvollständige Absorption des Wassers in der Schicht erzielt wird. Ebenso müssen auf der anderen Seite die angelegte Spannung, der Volumenstrom, der Gasdruck und die -temperatur berücksichtigt werden.^[3-5]

2 Prozessbeschreibung

Zum Test der Sensorelemente wurde eine Einrichtung für die Spurenfeuchtegenerierung (THG11), siehe Abbildung 2, im Frostpunktbereich von (-80 bis -30) °C konzipiert und aufgebaut. Die Herstellung des Prüfgases erfolgt dabei durch Mischen eines trockenen und eines wasserdampfgesättigten Druckluft-Gasstromes. Zunächst wird die Druckluft über Aktivkohle- und Molekularsiebfilter (DAC-8, Fa. Boge-Kompressoren und Big Moisture Trap, Fa. Sigma-Aldrich) gereinigt und getrocknet. Für die Befeuchtung wird ein Gasstrom durch eine mit reinem Wasser gefüllte Waschflasche geleitet. Die zwei Gasströme (trocken und feucht) werden dann mit Massenflussreglern eingestellt (EL-Flow®, Fa. Bronkhorst) und zum Prüfgas mit einem definierten Feuchtegehalt vermischt. Das generierte Prüfgas wird auf sieben Teilgasströme aufgeteilt und strömt über sechs parallel angeordnete coulometrische Spurenfeuchtesensoren sowie zu einem Präzisionstaupunktspiegel-Hygrometer (S4000 TRS, Fa. Michell Instruments). Die Messung des Umgebungsdrucks erfolgt im Referenzgasstrom mit einem Manometer (LEO2, Fa. Keller). Sämtliche Rohleitungen, Ventile und Verbindungen des Prüfgasgenerators bestehen aus titanlegiertem Edelstahl (Fa. Swagelok).^[6, 7]

Der Volumenanteil des generierten Prüfgases φ_v in $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ lässt sich mittels folgender Prozessgleichung berechnen:

$$\varphi_v = \varphi_{v,1} \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2} + \varphi_{v,0}$$

Hierbei ist $\varphi_{v,1}$ der Volumenanteil des feuchten Gasstromes, \dot{V}_1 der Volumenstrom des feuchten Gasstromes (Regelbereich $0 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ bis $9 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$), \dot{V}_2 der Volumenstrom des trockenen Gasstromes (Regelbereich $0 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ bis $450 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) und $\varphi_{v,0}$ der Volumenanteil des trockenen Gasstromes ($\varphi_{v,0} < 0,5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1} \triangleq t_{i,0} < -80 \text{ }^\circ\text{C}$). Dies ergibt einen Bereich generierbarer

Feuchtegehalte von kleiner als $0,5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ bis $650 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ bzw. kleiner als $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ Frostpunkttemperatur.

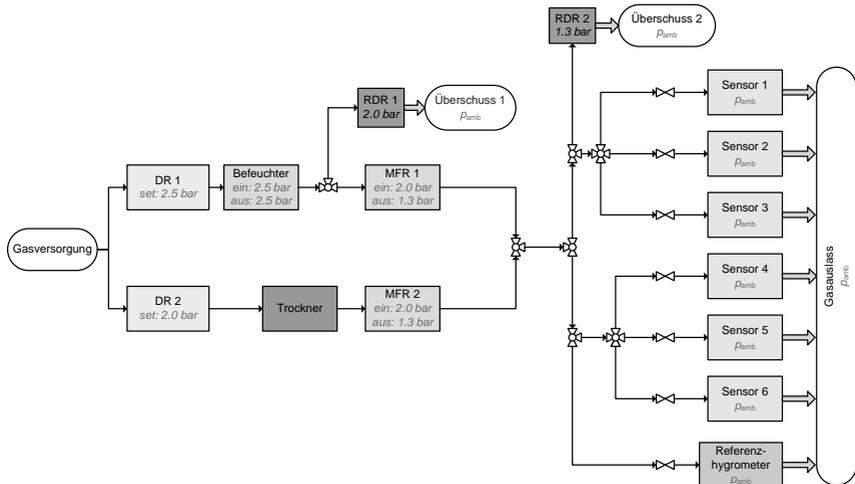


Abbildung 2: Flussdiagramm des Spurenteuchtegenerators, DR = Druckregler, RDR = Rückdruckregler, MFR = Massenflussregler, p_{amb} = Umgebungsdruck.

2.2 Einflussgrößen

Sechs Größen beeinflussen die Präzision des Messergebnisses und sind im Folgenden hinsichtlich ihres Unsicherheitsbeitrages beschrieben.

2.2.1 Referenzmessung | Taupunktspiegelhygrometer

Diese Art von Messverfahren ermöglicht eine direkte Bestimmung der Taupunkt- bzw. Frostpunkttemperatur des Gases. Das ist die Temperatur, bei welcher der aktuelle Wasserdampfpartialdruck gleich dem Sättigungsdampfdruck ist und bei der Kondensation bzw. Eisbildung einsetzt. Das Messprinzip beruht auf der Kondensation des im Gasfluss befindlichen Wassers auf einer glatten Spiegeloberfläche. Der Spiegel wird mit einem Peltier-Element auf eine definierte Temperatur bis zur Betauung bzw. Eisbildung gekühlt. Die Spiegeloberfläche wird mit einer Diode beleuchtet und das reflektierte Licht wird von einer Fotodiode aufgenommen. Dabei entsteht ein elektrischer Strom, der von der Reflektivität durch Kondensations- bzw. Reiferscheinungen des Spiegels abhängt. Ein zweiter und von Kondensationserscheinungen unabhängiger Lichtstrahl dient als Referenz. Die Intensität der

zwei Lichtstrahlen ist vor der Kondensation bzw. Reifbildung gleich. Bei eingetretener Kondensation unterscheiden sich die Intensität am Spiegel und die der Referenz und somit entsteht ein Differenzsignal. Dieses wird zur Temperaturregelung der Spiegeloberfläche genutzt, so dass bei vorhandenem thermodynamischen Gleichgewicht die Oberflächentemperatur des Spiegels gleich der Taupunkt- bzw. Frostpunktemperatur ist.^[2] Das Referenzhygrometer S4000 TRS ist auf den NPL-Standard kalibriert und wurde als Referenz verwendet. Die erweiterte Messunsicherheit des Hygrometers ist mit kleiner als 0,63 K anzusetzen, dies gilt für den Frostpunktemperaturbereich von -80 °C bis -30 °C.

2.2.2 Stromsignal der coulometrischen Feuchtesensoren

Das gemessene Sensorsignal (Stromstärke I) stellt eine mit Unsicherheiten behaftete Größe dar und wird durch die Unsicherheitsbeiträge des Digital-Multimeters, der generierten Prüfgasfeuchte, des Drucks, der Temperatur und des Volumenstroms beeinflusst. Die Strommessung erfolgt mit einem Digital-Multimeter HP 3458A^[8] der Fa. Agilent - Hewlett-Packard. Die gemessene Stromstärke ist der Gesamtelektrolysestrom, zusätzliche Einflüsse durch den Wasserstoffeffekt oder Reststrom bleiben unberücksichtigt. Die erweiterte Unsicherheit der Stromstärkemesswerte ist im relevanten Strommessbereich mit 30 ppm anzusetzen.

2.2.3 Volumenstrom

In der Gasmischanlage THG11 werden planare coulometrische Sensoren mit einem Volumenstrom von $(20 \pm 2) \text{ L h}^{-1}$ mit definierten Wassermengen umströmt. Die Sensoren sind mit einer gesinterten porösen PTFE-Membran vor Partikelablagerungen und Abrasion geschützt. Zusätzlich kompensiert die PTFE-Membran dabei den Einfluss eines schwankenden Volumenstroms am Sensorelement im Toleranzbereich von 2 L h^{-1} .^[9]

2.2.4 Spannungsversorgung

Die Zersetzungsspannung für die coulometrischen Sensoren beträgt $U = 25 \text{ V} \pm 0,03 \text{ V}$. Die Umpolungsfrequenz wurde mit 0,05 Hz festgelegt. Somit erfolgt alle 20 s ein Wechsel der Stromrichtung.^[10]

2.2.5 Druck

Die Systemdruck-Messung im Prüfgasstrom erfolgt vor den Messzellen mit einem digitalen Manometer LEO 2 (Keller Ges. für Druckmesstechnik mbH). Der Unsicherheitsbeitrag des Drucks beträgt maximal 0,1 % vom Messwert im Bereich von 0 bis 4 bar. Die Feuchtemessungen mit dem Referenzhygrometer als auch mit den coulometrischen Sensoren erfolgen bei Umgebungsdruck. Die Druckschwankungen des Umgebungsdrucks liegen hierbei im Bereich von 970 hPa bis 1040 hPa.

2.2.6 Temperatur

Die Prüfgasgenerator THG11 wird bei einer Raumtemperatur von $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ betrieben. Die Temperaturmessung erfolgt unmittelbar über dem Prüfgasgenerator THG11 mit einem Pt100-Widerstandsthermometer und wird an dem Präzisionstaupunktspiegelhygrometer S4000 TRS angezeigt.

3 Ergebnisse

3.1 Funktionaler Zusammenhang

Die coulometrischen Sensoren wurden fünfmal im Frostpunktbereich $-85\text{ °C} < t_f < -30\text{ °C}$ in der Prüfgaseinrichtung THG11 untersucht, (Abbildung 3, links). Gemäß dem FARADAYSchen Gesetz wird ein linearer Zusammenhang zwischen dem Wasserdampf-Volumenanteil (φ_v / $\mu\text{L L}^{-1}$) und der Stromstärke (I / A) erwartet. Viele Anwender von Feuchtesensoren in der Industrie verlangen zusätzlich die Angabe des Feuchtegehaltes als Frostpunktbereich. Die Frostpunktbereich stellt die primäre Messgröße des Referenzgeräts dar. Für die coulometrischen Sensoren lässt sich in guter Näherung eine nichtlineare Kalibrierfunktion abgeben, die den Zusammenhang zwischen der Frostpunktbereich und dem Sensorsignal beschreibt:

$$I = c \cdot e^{\frac{t_f - a}{b}}$$

mit Stromstärke I in μA , c als eine Konstante für die Gleichung mit dem Wert $1\text{ }\mu\text{A}$, a und b sind Parameter der Kalibrierfunktion in $^{\circ}\text{C}$ und t_f stellt die Frostpunktbereich in $^{\circ}\text{C}$ dar. Für praxisorientierte Anwendungen dient die Umkehrung der oben genannten Funktion, wobei dann die ermittelte Stromstärke direkt als Frostpunktbereich angezeigt wird (Abbildung 3, rechts):

$$t_f = b \cdot \ln\left(\frac{I}{c}\right) + a$$

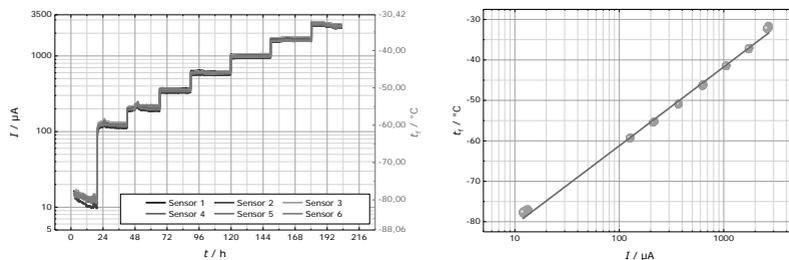


Abbildung 3: links) Signalverlauf von sechs HUMitrac-Sensoren (linke y-Achse) und der Referenzfeuchtemessung (rechte y-Achse) über die Zeit
rechts) Resultierende Kennlinie eines coulometrischen Spureneuchtesensors in Druckluft (Sensor 1) für einen Gasfluss von $(20 \pm 2) \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$.

3.2 Varianzanalyse

Die berechneten Parameter a und b der Kalibrierfunktion (Methode der kleinsten Quadrate) aller sechs Sensoren aus fünf Durchläufen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Ermittelte Parameter a und b aller durchgeführten Versuche

Parameter a						
Nr.	S1	S2	S3	S4*	S5	S6
1	-100,23	-98,79	-101,35	(-114,44)	-100,68	-101,31
2	-102,47	-101,05	-103,77	(-114,14)	-103,26	-104,35
3	-101,01	-100,37	-101,37	(-105,38)	-101,58	-100,76
4	-102,88	n. b.	-103,91	(-113,96)	-101,35	-103,71
5	-102,81	n. b.	-103,16	(-106,28)	-103,03	-105,23

Parameter b						
Nr.	S1	S2	S3	S4*	S5	S6
1	8,47	8,40	8,63	(-10,68)	8,63	8,69
2	8,84	8,76	8,90	(-9,78)	9,07	9,09
3	8,53	8,78	8,57	(-7,96)	8,70	8,33
4	8,89	n. b.	9,07	(-9,35)	8,70	9,01
5	8,81	n. b.	8,92	(-8,25)	8,90	9,18

S1...S6 - Sensor 1 bis 6

* - Sensor ohne Polymermembran. n. b. - nicht bestimmt

Hinsichtlich der ermittelten unterschiedlichen Parameterwertsätze, ist zu prüfen, inwieweit die coulometrischen Sensoren ein individuelles Verhalten besitzen.

Hierfür wurden die ermittelten Parameter a und b aus allen Messläufen mit Hilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) auf Ähnlichkeit überprüft. Durch dieses Verfahren,

dem der F -Test zugrunde liegt, ist es möglich zu bestimmen, ob statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen vorliegen oder nicht.^[11]

Sensor 4 wurde in den durchgeführten Versuchen ohne PTFE-Membran betrieben und wie erkennbar weichen die Parameter der Kennlinie von den ermittelten Werten mit PTFE-Membran ab. Aufgrund dessen wurden nur die Parameter der fünf Sensoren mit einer ANOVA geprüft bei denen eine Polymermembran zur Kompensation des Volumenstromeinflusses zum Einsatz kam. Die berechnete Prüfgröße (F -Wert) des Parameters a beträgt 1,179 und der von Parameter b beträgt 1,876. Für den kritischen F -Wert gilt 2,809 für ein 95 %-iges Signifikanzniveau bei einer Gesamtanzahl von 22 Freiheitsgraden ($df = 22$). Beide berechnete F -Werte der Parameter sind kleiner als der kritische F -Wert und somit ist die Nullhypothese bestätigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Kalibrierparameter a bzw. b der einzelnen Sensoren sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Anhand dieser statistischen Auswertung kann geschlussfolgert werden, dass die Sensoren kein individuelles Verhalten aufweisen und somit kann eine gemittelte Kalibrierfunktion für alle Sensoren angewandt werden. Die Kalibrierfunktion für den funktionalen Zusammenhang zwischen der Frostpunkttemperatur und der Stromstärke in Luft bei $(23 \pm 1) \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ lautet:

$$t_f = 8,79 \cdot \ln(I) - 102,22.$$

Die Reststandardabweichung, berechnet aus $n = 63538$ Daten aus fünf Durchläufen, der Kalibrierfunktion beträgt 0,53 K. Diese Kalibrierfunktion kann zur Berechnung der Gasfeuchte im Elektronikteil eines Spurenfuchtemessgerätes gespeichert und verwendet werden.

3.3 Gesamtmessunsicherheit

Die Berechnung der Gesamtmessunsicherheit für die Kalibrierfunktion von coulometrischen Sensoren erfolgt auf Grundlage des GUM.^[12, 13] Zur Berechnung wurde die Software GUM Workbench angewandt.^[14]

Die folgende Modelgleichung wurde für die Unsicherheitsbetrachtung der Kalibrierfunktion angenommen:

$$t_f = \left(b \cdot \ln\left(\frac{I}{c}\right) + a \right) + \delta t_{f,SD} + \delta t_{f,Res} + \delta t_{f,Cal}$$

Tabelle 2 zeigt die Auflistung des Messunsicherheitsbudgets.

Tabelle 2: Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Größen

Größe	Wert	Standardunsicherheit	Verteilung	Beitrag
b	8,783 °C	0,026 °C	N	0,21 °C
l	3500 μ A	0,61 μ A	R	0,0015 °C
a	-102,12 °C	0,156 °C	N	0,16 °C
c	1 μ A	---	---	---
$\bar{\delta}t_{,SD}$	0 °C	0,531 °C	N	0,53 °C
$\bar{\delta}t_{,Res}$	0 °C	$5,77 \cdot 10^{-3}$ °C	R	0,0058 °C
$\bar{\delta}t_{,Cal}$	0 °C	0,364 °C	R	0,36 °C
Ergebnis				
t_i	-30,44 °C \pm 1,4 °C (mit Erweiterungsfaktor $k = 2$)			

N: Normalverteilung; R: Rechteckverteilung

Die Standardunsicherheit $\bar{\delta}t_{,Cal}$ dieser Kalibrierung beträgt 0,364 °C, zusätzlich muss die Unsicherheit der Auflösung $\bar{\delta}t_{,Res}$ des Hygrometers berücksichtigt werden, sie beträgt $5,77 \cdot 10^{-3}$ °C. In die eigentliche Kalibrierfunktion fließt neben den Unsicherheiten der Parameter a und b noch die Reststandardabweichung des funktionalen Zusammenhangs $\bar{\delta}t_{,SD} = 0,53$ °C und die gemessene Stromstärke l mit ein. Die resultierende Gesamtunsicherheit der Funktion für Messungen in Luft beträgt maximal 1,4 K bezogen auf die Frostpunktemperatur.

Der gleiche Prozess zur Auswertung der Spurenfeuchtebestimmung mit coulometrischen Sensoren wurde in drei weiteren technischen Gasen wie Stickstoff, Wasserstoff und Distickstoffmonoxid angewandt. Die dabei ermittelten erweiterten Messunsicherheiten sind kleiner als 2,1 K.^[6]

4 Schlussfolgerung

Es konnte ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen generierter Feuchte und dem Sensorsignal ermittelt werden. Die Parameter der Kalibrierfunktion wurden mittels einer ANOVA überprüft. Die ANOVA hat gezeigt, dass sich alle ermittelten Parameter a statistisch nicht signifikant von einander unterscheiden. Selbiges konnte für den Parameter b ermittelt werden. Ausgehend von dieser Überprüfung konnte eine allgemeingültige Kalibrierfunktion erstellen werden, welche für alle Messungen in einem untersuchten Gas mit diesem verwendeten Sensortyp gilt. Ergänzend wurde die berechnete Kalibrierfunktion hinsichtlich ihrer Messunsicherheit bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, mit coulometrischen Spurenfeuchtesensoren im Frostpunktemperatur-Bereich von -85 °C bis -30 °C mit einer erweiterten Messunsicherheit von maximal 2,1 K zu messen.

Des Weiteren konnten die hier beschriebenen Resultate bis zu einer Gesamtladungsmenge von 3600 Coulomb bzw. $1 \cdot 10^6$ ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)-h vergleichbar reproduziert werden. Bei Überschreitung des Wertes ist eine Sensorregenerierung ratsam, weil es andernfalls zu einem Signaldrift kommen kann. Zur Regenerierung werden die Sensoren in Aceton gereinigt und die hygroskopische P_4O_{10} -Schicht neu aufgebracht.

Literatur

- [1] VDI/VDE 3514-1:2016-11, Gasfeuchtemessung - Kenngrößen und Formelzeichen.
- [2] VDI/VDE 3514-2:2013-03, Gasfeuchtemessung - Messverfahren.
- [3] R. Wernecke, J. Wernecke, *Industrial Moisture and Humidity Measurement: A Practical Guide, 1*, Wiley, **2014**.
- [4] J. Mitchell, D.M. Smith, *Aquametry: a treatise on methods for the determination of water*, 5, Wiley, **1984**.
- [5] F. A. Keidel, Determination of Water by Direct Amperometric Measurement *Analytical Chemistry* **1959**, 31, 12, 2043-2048.
- [6] M. Detjens, T. Hübert, U. Banach, Spurenfeuchtemessung in unterschiedlichen Gasen mit coulometrischen Sensoren *Tagungsband Temperatur 2017 - Verfahren und Geräte in der Temperatur- und Feuchtemesstechnik* **2017**, 247-252.
- [7] C. Tiebe, T. Hübert, A. Lorek, R. Wernecke, New planar trace humidity sensor *Proceedings – IMCS 2012 – The 14th International Meeting on Chemical Sensors* **2012**, 294-297.
- [8] Agilent, *Agilent 3458A Multimeter - Data sheet* **2011**.
- [9] A. Lorek, A. Koncz, R. Wernecke, Development of a gas flow independent coulometric trace humidity sensor for aerospace and industry *Proceedings "Aquametry 2010", Weimar* **2010**, 289-296.
- [10] A. Koncz, A. Lorek, R. Wernecke, V. Schwanke, Coulometrischer Feuchtesensor und entsprechendes Verfahren *Patent EP2264445 B1* **2017**.
- [11] NIST/SEMATECH, E-Handbook of Statistical Methods <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/> **2006-01-05**.
- [12] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*.
- [13] DIN V ENV 13305:1999-06, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*.
- [14] Metrodata GmbH, GUM Workbench Pro, Version 2.4.1.375 *Software* **2009**.

Messunsicherheiten bei Überwachung der Umweltradioaktivität

Dipl.-Phys. **B. Stegmaier**, Dipl.-Ing. (FH) **Chr. Wilhelm**,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Überwachung der Umweltradioaktivität kurz vorgestellt. Die einzelnen Beiträge zum Messunsicherheitsbudget bei der Überwachung werden dargelegt und deren Bestimmung erläutert und abschließend an zwei Beispielen mit Zahlenwerten dargestellt.

1 Überwachung der Umweltradioaktivität

1.1 Was ist Radioaktivität

Radioaktivität ist eine Eigenschaft eines Stoffes sich spontan unter Aussendung von Strahlung in einen anderen Stoff umzuwandeln. Die Messgröße für diese Stoffeigenschaft ist die Aktivität.

1.2 Überwachungsziele

Das Ziel der Überwachung der Umweltradioaktivität ist die Minimierung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch die Wirkung von ionisierender Strahlung auf den Menschen. Die hierfür maßgebende Messgröße ist die Dosis, also die bewertete Wirkung der Strahlung auf den menschlichen Körper. Die Dosis lässt sich wiederum zweiteilen:

- Direkte Exposition von Personen durch Aufenthalt auf Flächen auf denen sich Radionuklide befinden,
- Aufnahme von radioaktiven Stoffen in den Körper.

Die direkte Exposition erfolgt in erster Linie durch Photonenstrahlung und kann in der Regel direkt gemessen werden. Dieser Teil der Strahlenexposition kann schnell und wirksam reduziert werden, indem sich Personen z.B. von der entsprechenden Stelle entfernen. Anders verhält es sich mit der Aufnahme von Radionukliden in den Körper, z.B. durch Essen oder Trinken, in der Fachsprache Ingestion genannt. Diese aufgenommenen Radionuklide verbleiben je nach chemischem Verhalten eine kurze oder auch lange Zeit im Körper und führen durch den radioaktiven Zerfall im Körper zu einer Strahlenexposition. Diese Exposition lässt sich nicht direkt messen, sondern nur aus der Menge an aufgenommen

radioaktiven Stoffen rechnerisch ermitteln. Zu diesem Zweck wird die spezifische Aktivität, also die Aktivität pro Masse oder die Aktivitätskonzentration, also die Aktivität pro Volumen in Umweltmedien bestimmt.

1.2 Messgröße Aktivität

Für die Aktivität ist die Einheit das Becquerel, Bq. Das Becquerel ist die Anzahl an Atomkernen die sich in einer Sekunde durch radioaktiven Zerfall umwandeln oder kurz die Anzahl an Zerfällen pro Sekunde. Das Becquerel ist eine kohärente abgeleitete SI-Einheit mit besonderem Namen und besonderem Zeichen und trägt die SI-Einheit s^{-1} . Die genaue Definition für die Messgröße Aktivität ist in DIN 6814 Teil 4 „Begriffe in der radiologischen Technik; Radioaktivität“ [1] zu finden.

Wie aus der Definition der Aktivität hervorgeht, ist zu deren Bestimmung die Anzahl an Umwandlungen pro Zeiteinheit zu ermitteln. Dies geschieht in der Regel durch einfaches Zählen der Anzahl an Ereignissen innerhalb einer festgelegten Messdauer mit einem Messgerät.

Wird die Aktivität in eine Stoffmenge umgerechnet kommen dabei immer sehr kleine Stoffmengen heraus. So entspricht 1 Bq ^{137}Cs eine Menge von 0,3 pg oder $0,3 \cdot 10^{-12}$ g.

Die Natur der Aktivität ist, dass sich diese bei jedem Zerfall ändert, von daher muss zu einer Aktivitätsangabe auch immer der Zeitpunkt auf den sich diese bezieht angegeben werden.

1.3 Überwachungspflicht zur Umweltradioaktivität

Die Überwachung der Umwelt auf das Vorhandensein von radioaktiven Stoffen ist in Deutschland gemäß dem Strahlenschutzvorsorgegesetz [2], der Strahlenschutzverordnung [3] und dem untergesetzlichen Regelwerk, wie beispielsweise die Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung an kerntechnischen Anlagen [4], geregelt.

2 Messung der Aktivität von Radionukliden

2.1 Allgemeiner Ansatz zur Messung der Aktivität

Wie in Abschnitt 1.2 schon angesprochen basieren fast alle Messverfahren für die Bestimmung der Aktivität auf einem zählenden Verfahren. Die Berechnung der Aktivität beruht auf der Bestimmung der Nettozählrate r_n , also der Zählrate der Probe r_g abzüglich der Zählrate des Untergrundes r_0 (natürlicher Zerfall, Messgerät, etc.). Diese Nettozählrate wird dann mit einem erweiterten Kalibrierfaktor w multipliziert, wodurch sich die Aktivität oder die Aktivitätskonzentration ergibt. Dieser einfachste Fall findet sich fast 1:1 in der Methode Flüssigszintillationsspektrometrie wieder.

2.1.1 Berechnung der Aktivität

Die Aktivität errechnet sich dann wie folgt:

$$a = r_n \cdot w \quad \text{mit} \quad w = \frac{1}{\varepsilon \cdot p_E \cdot v \cdot K} \quad (1)$$

Typische Größen die in den erweiterten Kalibrierfaktor w eingehen, sind der Zählwirkungsgrad ε , der auch Nachweiswahrscheinlichkeit genannt wird, die Emissionswahrscheinlichkeit p_E , die Probengröße, entweder als Masse m oder Volumen v , und Korrekturfaktoren K . Letztere können erforderlich sein zur Korrektur des radioaktiven Zerfalls oder des Wirkungsgrads, wie beispielsweise Selbstabsorptionskorrektur oder Kaskadenkorrektur in der Gammaskopimetrie.

2.1.2 Messunsicherheiten der Aktivität

Aus den Unsicherheiten der Nettozählrate r_n und des erweiterten Kalibrierfaktors ergibt sich die Standardmessunsicherheit der Aktivität $u(a)$ zu:

$$u(a) = \sqrt{r_n^2 \cdot u^2(w) + w^2 \cdot u^2(r_n)} = \sqrt{A^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(w) + w^2 \cdot u^2(r_n)} \quad (2)$$

Da das Verfahren zur Berechnung der Unsicherheit der Nettozählrate vom Messverfahren abhängt, wird es in den Beispielen in Kapitel 3 jeweils individuell beschrieben.

Meist bleiben für die Unsicherheit der Aktivität nur multiplikative Unsicherheitsbeiträge zu $u(w)$ übrig. Dadurch lässt sich die relative Standardmessunsicherheit des erweiterten Kalibrierfaktors w , $u_{\text{rel}}(w)$, wie folgt berechnen:

$$u_{\text{rel}}(w) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{\text{rel}}^2(x_i)} \quad (3)$$

2.2 Flüssigszintillationsspektrometrie

2.2.1 Grundlagen der Methode

Bei der Flüssigszintillationsspektrometrie (LSC) wird die zu messende Probe mit der flüssigen Szintillator-Mischung (auch Cocktail genannt) in einem Messfläschchen gemischt. Die Strahlungsenergie der Betaeilchen wird auf die Szintillator-Mischung übertragen, was letztlich zu Lichtemissionen führt. Im Messgerät wird die Intensität der Lichtemissionen gemessen, und über eine Spektroskopieelektronik kann dann ein Energiespektrum der Betastrahlung aufgenommen werden. Die Bestimmung der Aktivität der Probe erfolgt über

die in einem eingestellten Energiebereich des Spektrums registrierte Impulsrate, welche unter Berücksichtigung des Nulleffekts zusammen mit dem Wirkungsgrad zur Aktivität verrechnet wird. Der Wirkungsgrad ist Abhängig vom Quenchgrad (Löschung von Licht durch Wechselwirkung zwischen Probe und Cocktail). Im Idealfall wird die Probe direkt mit einem flüssigen Szintillator-Cocktail vermischt und die Zählrate im eingestellten Energiebereich für das Nuklid mit einem LSC-Messgerät ermittelt.

2.2.2 Berechnung der Aktivitätskonzentration

Die Aktivitätskonzentration c_A ermittelt sich dann aus der im Energiebereich ermittelten Zählrate r_g und r_0 wie folgt:

$$c_A = w \cdot (r_g - r_0) \quad \text{mit} \quad w = \frac{1}{\mathcal{E}(q) \cdot v} \quad (4)$$

2.2.3 Berechnung der Unsicherheit der Aktivitätskonzentration

Die Unsicherheit bei der Aktivitätsbestimmung über die LSC-Methode setzt sich aus den zwei Teilen, der Zählstatistik bei der Messung der Probe und der Unsicherheit aus der Bestimmung des erweiterten Kalibrierfaktors zusammen.

2.2.3.1 Zählstatistik LSC

Die Zählstatistische Unsicherheit ergibt sich aus der Zählrate der Probe und der Zählrate des Nulleffekts wie folgt:

$$u_{\text{rel}}(r_n) = \frac{\sqrt{\frac{r_g}{t_m} + \frac{r_0}{t_0}}}{r_g - r_0} \quad (5)$$

2.2.3.2 Unsicherheit des erweiterten Kalibrierfaktor

Für die Unsicherheit des Kalibrierfaktors ergeben sich folgende Größen und Unsicherheitsanteile:

- Der Kalibrierstandard und die auf dem Kalibrierschein angegebene Unsicherheit $u(\text{präp})$
- Die Unsicherheiten der einzelnen Verdünnungsschritte des Kalibrierstandards zur Herstellung der Kalibrierlösung $u_i(\text{Lö})$
- Die Unsicherheit des Quenchfaktors $u(q)$
- Die Unsicherheit aus der ermittelten Funktion zwischen Ansprechvermögen und Quenchgrad aus der dann der quenchgradabhängige Wirkungsgrad ermittelt wird $u(\text{gr})$

$$u_{\text{rel}}(w) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\text{pr\"ap}) + u_{\text{rel}}^2(V) + \sum_{i=1}^n u_{\text{rel},i}^2(\text{L\"o}) + u_{\text{rel}}^2(\text{gr}) + u_{\text{rel}}^2(q)} \quad (6)$$

2.2.3.3 Unsicherheit des Gesamtunsicherheit

$$u_{\text{rel}}(c_a) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(r_n) + u_{\text{rel}}^2(w)} \quad (7)$$

2.3 Gammaskpektrometrie

2.3.1 Grundalge der Methode

Mit der Gammaskpektrometrie kann die Aktivität von einer Vielzahl von Radionukliden meist ohne weitere Probenvorbereitung bestimmt werden. Dabei wird die aus dem Material austretende Gammastrahlung in einem Halbleiter-Detektor registriert. Mit Hilfe einer Elektronik wird eine Häufigkeitsverteilung über die Energie der Gammastrahlung aufgezeichnet. Diese Häufigkeitsverteilung wird mittels einer Software analysiert und die Aktivität bestimmt. Weiterführende Informationen zu den Grundlagen der Gammaskpektrometrie finden sich in „*Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*“ [5].

2.3.2 Berechnung der spezifischen Aktivität

Bei der Gammaskpektrometrie wird die Aktivität aus der korrigierten Nettofläche des Peaks, der Messdauer, dem Wirkungsgrad bei dieser Energie und der Emissionswahrscheinlichkeit für Gammaquanten dieser Energie bei einem Zerfall des Radionuklids ermittelt. Bei der Berechnung der spezifischen Aktivität ist noch die Masse der Probe zu berücksichtigen. Die Emissionswahrscheinlichkeit entnimmt man am besten aus den Daten des Decay Data Evaluation Projects [6]. Der Zahlwirkungsgrad bei der Energie E wird mit einer Wirkungsgradkalibrierung ermittelt. Siehe dazu „*Kalibrieren eines Gammaskpektrometers*“ [7].

$$a = \frac{n_c}{t_m} \cdot w \quad \text{mit} \quad w = \frac{1}{\varepsilon(E) \cdot p_E \cdot m} \quad (8)$$

Um die Aktivität zu ermitteln, muss zuerst die Nettofläche des Peaks aus der Energieverteilung im Spektrum ermittelt werden.

2.3.2.1 Bestimmung der Netto-Peakfläche

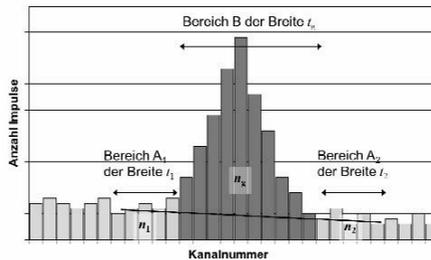


Abbildung 1: Darstellung des Peak-Bereichs zur Bestimmung der Nettofläche. Die Bereiche zur Untergrundbestimmung (A1, A) in Gelb, der Peak-Bereich (B) in Rot. Die hellblauen Kanalinhalte sind angrenzende Spektren-Bereiche.

Die Breite der Bereiche A₁ und A₂ sollte nach DIN ISO 11929 [8] bei linearem Untergrund gleich sein, so dass $t = t_1 = t_2$ gilt. Wenn nun die Breite t_g des Bereichs B so gewählt wird, dass $t_g = 2 t$ ist, vereinfacht sich die Berechnung der Nettofläche. Da später auch die Nachweis- und Erkennungsgrenzen sowie der Vertrauensbereich gemäß dieser Norm zu berechnen sind, sind zwingend diese Parameter bei der Bestimmung der Nettoflächen zu verwenden. Sollte dies nicht möglich sein, sind die Parameter so zu wählen, dass diese den Vorgaben der DIN ISO 11929 möglichst nahe kommen. Für die Bestimmung der Netto-Peakfläche n_{NP} wird zuerst der Untergrund unter dem Peak (Compton-Untergrund) berechnet. Dieser Untergrund wird aus den Inhalten der Bereiche A₁ und A₂ berechnet.

$$n_0 = n_1 + n_2 \quad (9)$$

Damit ergibt sich die Netto-Peakfläche n_{NP} zu:

$$n_{NP} = n_g - (n_1 + n_2) \quad (10)$$

2.3.2.2 Berücksichtigung eines Nulleffekt-Peaks

Auch bei einer Messung ohne Probe auf dem Detektor kann in einem Gammaspektrum ein Netto-Peak auftreten. Hierbei handelt es sich um einen sogenannten Nulleffekt. Dies tritt insbesondere bei den Energien der natürlichen Radionuklide, wie z. B. der 1460-keV-Linie aus dem Zerfall von ⁴⁰K auf, oder wenn Kontaminationen am Detektor vorliegen auf. Dieser Nulleffekt muss bei der Auswertung einer Probenmessung mit berücksichtigt werden. Da derselbe Nulleffekt meist zur Auswertung vieler Proben herangezogen wird, ist es nicht nur

zielführend, sondern es lohnt sich auch der Aufwand, ihn mit einer hohen Genauigkeit, sprich mit einer langen Messdauer, zu bestimmen. Der Unterschied zwischen der Messdauer der Probe t_m und der Messdauer des Nulleffekts t_0 muss dann bei der Korrektur der Peak-Netto-Fläche berücksichtigt werden.

$$n_c = n_{NP,S} - \left(n_{NP,0} \cdot \frac{t_m}{t_0} \right) \quad (11)$$

2.3.3 Berechnung der Unsicherheit der spezifischen Aktivität

Die Unsicherheit der Aktivität setzt sich aus der Unsicherheit der korrigierten Netto-Fläche und der Unsicherheit des erweiterten Kalibrierfaktors zusammen und wird als relative Unsicherheit wie folgt berechnet:

$$u_{rel}(a) = \sqrt{\left(\frac{u(n_c)}{n_c} \right)^2 + \left(\frac{u(w)}{w} \right)^2} \quad (12)$$

Setzt man für den erweiterten Kalibrierfaktor die Einzelterme ein, ergibt sich die relative Unsicherheit der Aktivität wie folgt:

$$u_{rel}(a) = \sqrt{\left(\frac{u(n_c)}{n_c} \right)^2 + \left(\frac{u(p_E)}{p_E} \right)^2 + \left(\frac{u(\varepsilon(E))}{\varepsilon(E)} \right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m} \right)^2} \quad (13)$$

Dabei ist die Unsicherheit der Messdauer nicht berücksichtigt, da diese in der Regel vernachlässigbar ist. Die Unsicherheit der korrigierten Peak-Netto-Fläche ergibt sich aus den Unsicherheiten der Peak-Netto-Fläche und des Nulleffekts:

$$u(n_c) = \sqrt{u(n_{NP,S})^2 + \left(\frac{t_m}{t_0} \cdot u(n_{NP,0}) \right)^2} \quad (14)$$

Die Unsicherheit des Nettopeaks wird aus den Impulsen der Bereiche A₁, A₂ und B wie folgt ermittelt:

$$u(n_{NP}) = \sqrt{n_g + (n_1 + n_2)} \quad (15)$$

3 Umweltüberwachung

Das Ziel der radiologischen Umweltüberwachung ist es, an Hand von genommenen Probe nachzuweisen, ob und wenn ja in welchem Maße eine Beeinflussung der Umgebung durch z.B. durch Ableitungen aus Anlagen stattfindet.

3.1 Probenentnahme in der Umweltüberwachung

Die Probenentnahme ist für die radiologische Umweltüberwachung eine spezielle Herausforderung, da im Zusammenhang mit einer Interpretation der Messwerte stets eine repräsentative Probe unterstellt wird. Repräsentativ heißt in diesem Zusammenhang, dass man davon ausgeht, eine Zweite Probe aus dem gleichen örtlichen Bereich würde zu, im Rahmen der Messunsicherheit, gleichen Messergebnissen führen. Da Umweltproben natürlicherweise inhomogen sind, ist eine punktuelle Beprobung z.B. einer Bodenprobe für die gesamte Wiese nicht notwendigerweise repräsentativ. Daher hat der Bund in der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung an kerntechnischen Anlagen [4] festgelegt, dass die sog. Messanleitungen des Bundes bei der Probenentnahme, der Probenvorbereitung sowie bei der Analyse selbst zu beachten sind. Hierdurch soll eine möglichst einheitliche und vergleichbare Probenentnahme erreicht werden. Bei der Probenentnahme in der radiologischen Umweltüberwachung können nur wenige Unsicherheiten so quantifiziert werden, dass sie berücksichtigt werden können. Hierzu gehören regelmäßig: Durchsätze (von Luft oder Wasser) sowie die Dichtheit von Probenentnahmeeinrichtungen, bei direkt messenden Systemen. In der Nachfolgenden Abbildung 2 sind die Anteile an der Gesamtunsicherheit schematisch dargestellt.

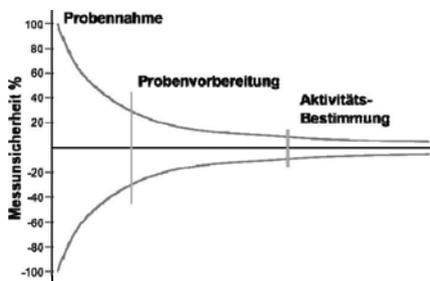


Abbildung 2: Schematische der Darstellung der einzelnen Anteile am Unsicherheitsbudget bei der Aktivitätsbestimmung in Umweltproben.

Wie aus der Abbildung 2 ersichtlich ist, kann die Probenentnahme Unsicherheiten auch von über 100 % beitragen. Daher werden diese im Unsicherheitsbudget nicht berücksichtigt und stattdessen wie eingangs beschrieben die Probenentnahme durch die Anwendung von Richtlinien vereinheitlicht. Nachfolgend nun zwei Beispiele aus der Umweltüberwachung,

eine ^3H -Bestimmung im Niederschlag und die Bestimmung von ^{137}Cs im Boden mit konkreten Zahlenwerten und deren Unsicherheitsberechnungen.

3.2 Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Niederschlag

Tritium, oder in Nuklid Schreibweise ^3H , kommt im Niederschlag grundsätzlich vor. Hierfür gibt es zwei Quellen: zum einen die Produktion von ^3H in der Stratosphäre durch kosmische Strahlung über Spallation von Stickstoff und zum anderen durch Freisetzung aus der Kerntechnik (Atombombentests und nukleare Anlagen). Die natürliche Aktivitätskonzentration für Regen liegt bei ca. 0,6 Bq/L [9].

3.2.1 Probenentnahme und Aufbereitung

Die Probenentnahme erfolgt mit sogenannten Niederschlagssammlern. Ein Teil des gesammelten Niederschlags wird anschließend im Labor destilliert. Unsicherheiten bei beiden Schritten werden in diesem Fall nicht berücksichtigt.

3.2.2 Bestimmung der Aktivitätskonzentration

Die Bestimmung der Aktivitätskonzentration von ^3H im Niederschlag erfolgt mit der Methode Flüssigszintillation die unter 2.2 beschrieben ist. Dabei kommen 10 ml Probe zur Messung. Eine ausgewählte Beispielprobe ergab bei der Messung die Ergebnisse die in Tabelle 1 wiedergegeben sind.

Tabelle 1: Ergebnisse der ^3H -Messung der Niederschlagsprobe am LSC

t_m	r_g	t_0	r_0	$\varepsilon(q)$
18.000 s	0,0705 s ⁻¹	60.000 s	0,0225	21,2 %

Die Aktivitätskonzentration c_A ergibt sich unter Anwendung der Gleichung (4) zu 22,6 Bq/L.

3.2.3 Bestimmung der Unsicherheit

3.2.3.1 Unsicherheit aus der Zählstatistik

Aus der Messdauer t_m für die Probe und der Messdauer für den Nulleffekt t_0 sowie deren Zählraten lässt sich die zählstatistische Unsicherheit $u_{rel}(r_n)$ mit Gleichung (9) mit den Werten aus Tabelle 1 zu 4,3 % berechnen.

3.2.3.2 Unsicherheit der Aktivitätsbestimmung

Neben der Zählstatistik sind in die Unsicherheit der Aktivitätsbestimmung noch die Anteile aus dem erweiterten Kalibrierfaktor mit einzurechnen die in Tabelle 2 angegebenen sind. Die Unsicherheit $u_{\text{rel}}(\text{präp})$ des Kalibrierpräparates ist bei einem ^3H -Standard im Verhältnis zu anderen Standards in der Aktivitätsbestimmung relativ klein. Die mit 1 % angegebene relative Unsicherheit $u_{\text{rel}}(\text{V})$ bei der Volumenbestimmung ist bedingt durch die Bestimmung des Volumens über das Gewicht.

Tabelle 2: Unsicherheitsbeiträge des erweiterten Kalibrierfaktors bei ^3H -Messung am LSC

$u_{\text{rel}}(\text{präp})$	$u_{\text{rel}}(\text{Lö})$	$u_{\text{rel}}(\text{q})$	$u_{\text{rel}}(\text{gr})$	$u_{\text{rel}}(\text{V})$
0,83 %	2,0 %	0,28 %	0,15 %	1 %

Mit diesen Werten aus der Tabelle 2 ergibt sich $u_{\text{rel}}(\text{w})$ nach Gleichung (6) zu 2,4 %.

3.2.3.3 Vollständiges Unsicherheitsbudget

Weitere Unsicherheiten, z.B. aus der Probennahme oder der Probenvorbereitung sind bei der ^3H -Bestimmung im Niederschlag nicht zu berücksichtigen, so dass sich mit Gleichung (7) $u_{\text{rel}}(c_A) = 4,9 \%$ ergibt.

3.3 Bestimmung der spezifischen Cs-137-Aktivität im Boden

3.3.1 Probenentnahme und Aufbereitung

Für eine Bestimmung von ^{137}Cs sind in diesem Beispiel mit einem Bodenstecher mehrere Einstiche \varnothing ca. 8 cm und Tiefe 5 cm entlang eine Linie von ca. 1 m entnommen worden, bis ca. 1,5 kg Bodenmaterial zusammen kommen. Grobe Steine wurden entfernt und das Bodenmaterial getrocknet und homogenisiert. Anschließend wurde der Boden in ein kalibriertes Messgefäß überführt und direkt auf den Detektor zur Messung gestellt. Bedingt durch die Füllung des Behälters ergeben sich Unsicherheiten in der Geometrie, z.B. durch die Füllhöhe. Näheres kann in „*Uncertainty of gamma-ray spectrometry measurement of environmental samples due to uncertainties in matrix composition, density and sample geometry*“ [10] nachgelesen werden.

3.3.2 Bestimmung der spezifischen Aktivität

Tabelle 3: Messdaten der ^{137}Cs -Bestimmung an der Bodenprobe mittels der Methode Gammaskpektrometrie

t_m	n_g	n_0	$P(E)$	$\varepsilon(E)$	m
60.000 s	6919	1806	85 %	0,93 %	1,382 kg

Die spezifische Aktivität a ergibt sich aus den Messdaten von Tabelle 3 nach der Gleichung (8) zu 7,8 Bq/kg.

3.3.3 Bestimmung der Unsicherheit

3.3.3.1 Unsicherheit aus der Zählstatistik

Die Unsicherheit aus der Zählstatistik ergibt sich nach Gleichung (15) zu $u_{\text{rel}}(\text{NP}) = 1,83 \%$. Eine Unsicherheit aus dem Nulleffekt ist nicht zu berücksichtigen, da keine Korrektur hierfür nötig war.

3.3.3.2 Unsicherheit der Aktivitätsbestimmung

Tabelle 4: Einzelne Unsicherheitsbeiträge bei der ^{137}Cs -Bestimmung an der Bodenprobe

$u_{\text{rel}}(\varepsilon)$	$u_{\text{rel}}(P)$	$u_{\text{rel}}(m)$	$u_{\text{rel}}(G)$
1,06 %	0,24 %	0,00 %	5 %

Die Unsicherheit des erweiterten Kalibrierfaktors ergibt sich mit den Werten aus Tabelle 4 zu 1,09 %.

3.3.3.3 Vollständiges Unsicherheitsbudget

Neben den Unsicherheiten aus der Messung, ist bei einer festen Proben, wie der Bodenprobe, auch eine Unsicherheit für die Geometrie $u_{\text{rel}}(G)$ (Füllstand, Dichte, ...) zu berücksichtigen. Diese Unsicherheit lässt sich nur durch eine Abschätzung ermitteln und wurde in diesem Fall nach [10] abgeschätzt und mit 5 % angenommen. Damit ergibt sich die Gesamtunsicherheit bei dieser ^{137}Cs -Bestimmung in der Bodenprobe zu $u_{\text{rel}}(a)$ zu 5,4 %.

4 Zusammenfassung

Die Unsicherheiten bei der Probenentnahme können bei der Umweltüberwachung in der Regel nicht berücksichtigt werden. Wohingegen die Unsicherheiten aus der Probenvorbereitung zur Messung grundsätzlich mit in das Unsicherheitsbudget einfließen. In der Umwelt sind die Aktivitäten der meisten Radionuklide glücklicherweise unter der

Nachweisgrenze und diejenigen oberhalb dieser, haben dann aus der Zählstatistik den größten Anteil an den berücksichtigten Unsicherheiten. Eine Zusammenfassung der zwei hier vorgestellten Beispiele ist in Tabelle 5 wiedergegeben.

Tabelle 5: Zusammenfassung der einzelnen Unsicherheitsbeiträge

Verfahren	Unsicherheit aus Zählstatistik $u_{\text{rel}}(r_n)$	Unsicherheit erweiterter Kalibrierfaktor $u_{\text{rel}}(W)$	Unsicherheit Probenentnahme, -Vorbereitung $u_{\text{rel}}(G)$	Vollständige Unsicherheit Messung $u_{\text{rel}}(a)$
^3H -Bestimmung	4,3 %	2,4 %	-	4,9 %
^{137}Cs -Bestimmung	1,83 %	1,09%	5 %	5,4 %

5 Literatur

- [1] DIN 6814 Teil 4: Begriffe in der radiologischen Technik; Radioaktivität. 2006-10
- [2] Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung (Strahlenschutzvorsorgegesetz - StrVG). StrVG vom 19.12.1986. Zuletzt geändert am 31.08.2015
- [3] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV). StrlSchV, vom 20.07.2001
- [4] Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI), REI vom 7.12.2005
- [5] Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors
- [6] Decay Data Evaluation Project, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm, zuletzt geprüft 14.9.2017
- [7] Chr. Wilhelm: Kalibrieren eines Gammaskpektrometers. Strahlenschutzpraxis 2/2012
- [8] DIN ISO 11929: Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung Grundlagen und Anwendungen (ISO 11929:2010). 2011-01
- [9] IAEA: Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications (Vol. 2). 2001
- [10] Kaminski, S.; Jakobi, A.; Wilhelm, Chr.: Uncertainty of gamma-ray spectrometry measurement of environmental samples due to uncertainties in matrix composition, density and sample geometry. 2014; In: Applied Radiation and Isotopes 94, S. 306–313. DOI: 10.1016/j.apradiso.2014.08.008.

Festlegung der Kalibrier- oder Nutzungsintervalle von Messmitteln

Bernd Pesch, Pesch Consult, Zülpich

Kurzfassung

Zunächst wird dargestellt, warum ein Programm für die Festlegung und Überwachung von Kalibrierintervallen notwendig ist. Dann wird eine Methode zur Festlegung und kontinuierliche Anpassung der Intervalle auf der Basis gesicherter statistischer Informationen beschrieben. Diese Festlegung ist unabdingbar, um bei der Bestimmung der Messunsicherheit belastbare Aussagen zu den eingesetzten Messmitteln in die Messunsicherheitsbilanzen einbringen zu können.

Abstract

First of all, it is shown, why a program for the definition and monitoring of calibration intervals is necessary. Then a method for the definition and continuous adjustment of these intervals on the basis of well-defined statistical information is described. This determination is indispensable to be able to make reliable statements on the instruments used in the measurement uncertainty calculations.

1 Forderungen

Spätestens seit der Novellierung der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001 [1] ist der risikobasierte Denkansatz im Qualitätsmanagement angekommen. Bei Dienstleistungen ist demnach nun gefordert, Chancen und Risiken zu bewerten und berücksichtigen. Über die DIN EN ISO/IEC 17025 [2] wird dieser Ansatz auch für das metrologische Arbeiten relevant. Die kontinuierliche Bewertung der Verlässlichkeit der Normale und der Risiken des Betriebs – beispielsweise bei möglichen Überschreitungen der festgelegten Spezifikationen – ist nun notwendig. Sie ergibt sich neben der normativen Forderung auch aus der Notwendigkeit, die Rückführung der Messgrößen sicherzustellen. Die Verlässlichkeit der Normale wird wiederum durch die Festlegung angemessener Kalibrierintervalle maßgeblich beeinflusst.

Normativ lassen sich die Forderungen nach einem Programm zur Festlegung von Kalibrierintervallen indirekt aus DIN EN ISO/IEC 17025 [2] Pkt. 5.5.2 oder Pkt. 5.6.1 ableiten. Eine direkte Forderung ist in der DIN EN ISO 10012:2012 [3] zu finden:

Intervalle der metrologischen Bestätigung

Die für die Festlegung oder Änderung der Intervalle zwischen den metrologischen Bestätigungen verwendeten Methoden müssen in dokumentierten Verfahren beschrieben werden. Diese Intervalle müssen überprüft und gegebenenfalls angepasst werden, um die fortgesetzte Übereinstimmung mit den festgelegten metrologischen Anforderungen sicherzustellen.

Zitat aus DIN EN ISO 10012:2012 [3], Pkt. 7.1.2

2 Bezüge, Quellen und Vorschläge für die Festlegungen

Den Forderungen stehen im europäischen Raum aber kaum belastbare Grundlagen gegenüber:

- ILAC-G5 [4] (zurückgezogen) und ILAC-G24/OIML D-10 [5]

Die zwei Dokumente ILAC-G5 (zurückgezogen!) und ILAC-G24/OIML D-10 bleiben vage und geben lediglich organisatorische Hilfen. ILAC-G24/OIML D-10 schlägt folgende Verfahren vor:

- Methode 1 - Treppenstufen („Staircase method“): Für die Spezifikationen werden zunächst engere Prüfgrenzen als die anzuwendenden Spezifikationsgrenzen festgelegt. Mit jeder Kalibrierung bei der die Prüfgrenzen eingehalten werden, wird das Kalibrierintervall automatisch verlängert. Ansonsten ist es zu verkürzen¹.
- Methode 2 – Kalibrierkontrollkarten: Diese waren (und sind) die wichtigsten Werkzeuge der statistischen Qualitätskontrolle. Ergebnisse der Kalibrierungen werden auf den Karten aufgezeichnet. Abhängig von den Aufzeichnungen erfolgt die Anpassung der Kalibrierintervalle. Es wird darauf hingewiesen, dass dieses Verfahren bei komplexen Messmitteln sehr aufwendig ist. Wie die Aufzeichnungen auszuwerten sind, bleibt offen.
- Methode 3 – Betriebszeiten („In use time“): An Stelle der verstrichenen Zeit seit der letzten Kalibrierung wird die tatsächliche Nutzungszeit erfasst. Hierzu sollten die Messmittel mit entsprechenden Aufzeichnungsgeräten versehen werden.
- Methode 4 – Black Box Testing: Hier werden neben den üblichen Kalibrierintervallen in kurzen Intervallen Stabilitätsmessungen ausgewählter Größen (beispielsweise gegen eine Black Box, die lediglich stabile Messeigenschaften haben muss) durchgeführt. Wenn die Abweichungen gegenüber den letzten Stabilitätsmessungen zu groß werden

¹ Sinnvoller wäre ein dreistufiges Modell (Beispiel: Prüfgrenze 75 %. Bei Erfüllung der Prüfgrenze gibt es eine Verlängerung; im Bereich 75 % bis 100 % der Spezifikation bleibt das Intervall und bei einer Überschreitung der Spezifikation erfolgt eine Verkürzung). ILAC geht in diesem Zusammenhang bei den notwendigen Konformitätsaussagen nicht auf die Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit ein.

und somit auf eine Drift hindeuten, wird das Messmittel automatisch aus dem Einsatz genommen und eine „vollständige“ Kalibrierung durchgeführt².

- DIN ISO 10012, Teil 1 – Messmanagementsysteme [6]

Diese Norm nennt Vorgaben, wie ein System zur Festlegung von Kalibrierintervallen vom Labor betrieben werden muss.

- DIN EN ISO/IEC 17025 [2]

Die „Basisnorm zum Betrieb von Prüf- und Kalibrierlaboren“ spricht die Festlegung von Intervallen nicht explizit an.

Hingegen wird dieser Thematik in den USA wesentlich mehr Aufmerksamkeit gewidmet:

- Wyatt, Castrup: Managing Calibration Intervals [7]

Die Ansätze der amerikanischen Autoren Donald W. Wyatt³ und Howard T. Castrup⁴ in [7] sind wesentlich konkreter. Aber auch in amerikanischen Gremienarbeiten, wie im Rahmen der NCSL-I⁵, bei der NASA⁶ und der USAF⁷ ([8], [9] und [10]) wurden numerisch belastbare Lösungen erarbeitet. Diese Programme werden in der Praxis mindestens seit 2008 umgesetzt und können als stabil und validiert angesehen werden.

Wyatt/Castrup stellen zunächst dar, dass Systeme zur Ermittlung und Anpassung von Kalibrierintervallen verschiedene Zielsetzungen haben sollten. Sinngemäß aus obigen Quellen zusammengefasst:

- Ziele für die Zuverlässigkeit von Messergebnissen korrespondieren mit der Messunsicherheit und Forderungen an die Entscheidungskriterien in Sinne des Risikomanagements möglicher falscher Entscheidungen. Je größer die Messunsicherheit ist, desto größer ist das Risiko für falsche Entscheidungen.

Anmerkung: Dieses Ziel nimmt die Forderungen des Risikomanagements aus den novellierten Normen DIN EN ISO 9001 und DIN EN ISO/IEC 17025 vorweg.

² Diese Methode kann nur Stabilitätsindizes liefern, denn es könnte ja auch die Black Box driften. Zudem bleiben Messabweichungen abseits der geprüften Messgrößen eventuell unerkannt. Driften die Black Box und das eingesetzte Messmittel in die gleiche Richtung, liefern die Stabilitätsmessungen sogar eine trügerische Sicherheit.

³ Diversified Data Systems Inc., Tucson, Arizona, USA

⁴ Integrated Sciences Group, San Dimas, California, USA

⁵ NCSL-I: National Conference of Standard Laboratories – International Section

⁶ NASA: National Air & Space Administration

⁷ United States Air Force

- Kalibrierintervalle sind mit dem Risikomanagement verknüpft. Je länger Kalibrierintervalle gewählt werden, desto größer ist das in Kauf zu nehmende Risiko für Fehlentscheidungen. Eine Risikoanalyse ist in diesem Falle sinnvoll (Anmerkung: nach ISO 9001 sogar notwendig).
- Kalibrierintervalle müssen im Hinblick auf die Kosten (der Kalibrierung) gewählt werden.
- Korrekte Kalibrierintervalle sollten schnellstmöglich etabliert werden. Dies bedeutet, dass gerade bei neu in Gebrauch kommende Messmittel eine schnelle Anpassung angestrebt werden sollte.
- Analytische Ergebnisse sollten schnell und transparent zu erzielen sein. Methoden zur Anpassung der Kalibrierintervalle sollten in automatisierte Entscheidungsprozesse eingebunden werden können.

Diese Ziele können nicht alle parallel verfolgt werden.

3 Das reale zeitliche Messmittelverhalten

Die Kenntnis über die Messabweichung von Messmitteln wird als Funktion der verstrichenen Zeit seit der letzten Kalibrierung immer unsicherer. Verschiedene Effekte überlagern sich und sind nicht eindeutig zu trennen. Der Erwartungswert einer Messung verschiebt sich in Abhängigkeit von Benutzungshäufigkeit, Belastung des Messmittels, Pflege, Sauberkeit, thermische Wechsel und vielen anderen Gründen. Er driftet. Zudem wird die Kenntnis um diese Lage kontinuierlich unsicherer. Auch bei einem bestmöglichen Messmittel würden obige Effekte irgendwann zu einer Überschreitung festgelegter Spezifikationsgrenzen führen.

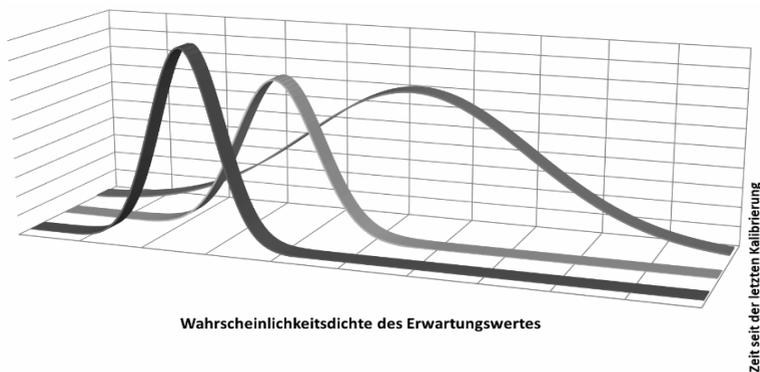


Abbildung 1: Drift von Messmitteleigenschaften

4 Vorgehensweise

Die Erkenntnissicherheit kann nur durch erneute Kalibrierungen wiederhergestellt werden. Angemessene Intervalle können nach folgendem Vorgehen definiert werden.

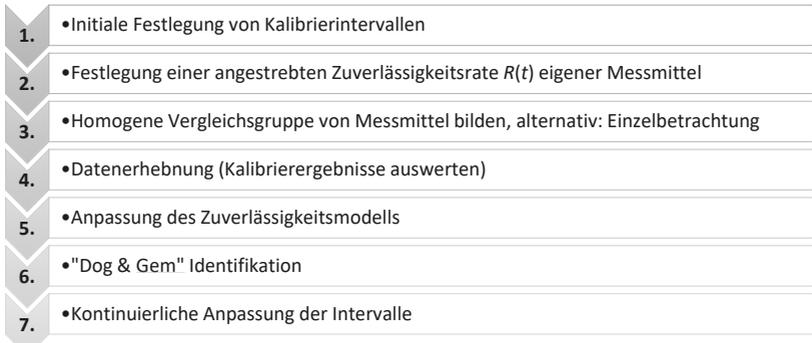


Abbildung 2: Prozess zur kontinuierlichen Anpassung von Kalibrierintervallen

4.1 Initiale Festlegung von Intervallen

So lange keine eigenen gesicherten Informationen und Historien vorliegen, helfen nur Vergleiche mit anderen Messmittel. Bereits jetzt können aber schon viele relevante Einflüsse berücksichtigt werden. ILAC-G24 [5] nennt hierzu unter anderem:

- Benötigte Messunsicherheit im Labor oder externe metrologische Forderungen
- Risiko, dass ein Messmittel die maximal zulässige Abweichung im Betrieb überschreitet.
- Verursachte Kosten, wenn (nachträglich) festgestellt wird, dass ein Messmittel länger Zeit außerhalb der Spezifikationen betrieben wurde
- Art des Messmittels
- Tendenz zur Drift
- Herstellerempfehlung
- Nutzungshäufigkeit und Intensität
- Umgebungsbedingungen
- Historie und (Reparatur-)Lebenslauf
- Häufigkeit und Qualität von sonstigen Vergleichsmessungen
- Transport und hiermit verbundene Risiken
- Qualifikation des Nutzers

Anpassungen von Kalibrierintervallen sind Reaktionen auf die fortgeschriebene Informationslage. In der Praxis revidieren nur wenige Labore die Anfangsfestlegungen. Dabei gibt es viele Gründe, warum kontinuierliche Anpassungen notwendig sein können:

- Auf der Basis von Herstellerempfehlungen übernommene Intervalle berücksichtigen oft wirtschaftliche Interessen der Hersteller (Serviceverträge und der Verkauf der Dienstleistung „Kalibrierung“ einerseits oder die Präsentation eines Messmittels als besonders servicefreundlich andererseits).
- Messmittel altern mit der Zeit und ändern ihre Eigenschaften dann möglicherweise mit anderem Tempo. So gibt es Messmittel, die sich erst nach Jahren des Gebrauchs stabilisieren (typische Beispiele sind „elektrische Maßverkörperungen“, wie Widerstände, Induktivitäten und Kondensatoren, Widerstandsthermometer, oder auch Quarzoszillatoren). Man nennt diese Stabilisierungsphase auch „Einbrennen“. Andere Messmittel beginnen mit der Zeit stärker zu driften und verlieren an Präzision.
- Die Nutzung eines Messmittels ist deutlich geringer oder stärker als erwartet.
- Die Qualitätspolitik und die Qualitätsziele einer Firma ändert sich.

4.2 Wahl der Zuverlässigkeitsrate

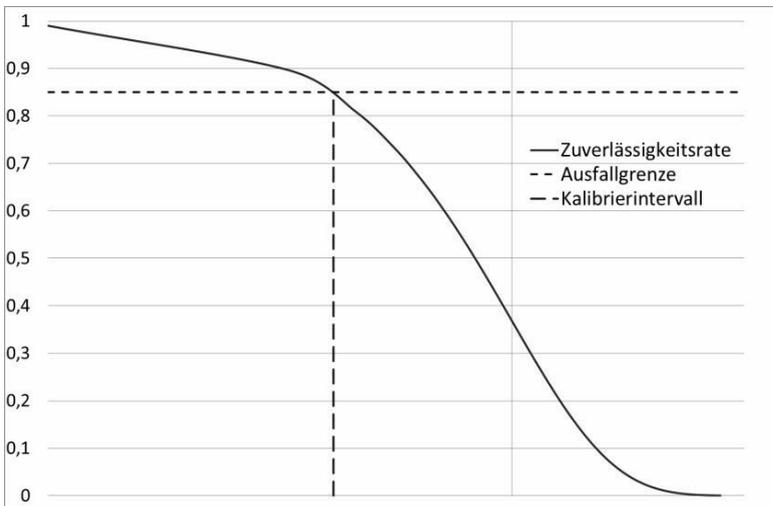


Abbildung 3: Zuverlässigkeit eines Messmittels im Gebrauch

Obige Grafik zeigt die seit dem Zeitpunkt der letzten Kalibrierung kontinuierlich abfallende Zuverlässig (die Zeitachse x ist logarithmisch dargestellt). Entsprechend der eigenen Firmenphilosophie wird ein „End-of-term“ Zuverlässigkeitsniveau $R(t)^8$ definiert. Im obigen Falle beträgt dieses Niveau 0,85. Dies bedeutet, dass zum Ablauf des Kalibrierintervalls maximal 15 % der Messmittel ihre Spezifikationsgrenzen überschritten haben dürfen. Dieses Niveau wird beispielsweise von der US Air Force [10] genutzt. In manchen Firmen geht man sogar von Niveaus von 0,95 oder noch höher aus. Derart hohe Anforderungen sind in aller Regel unrealistisch und wirtschaftlich kaum erfüllbar. Immerhin ist hier zu beachten, dass lediglich der Messmittelzustand zum Intervallende beschrieben wird und die Zuverlässigkeit im Nutzungszeitraum wesentlich höher ist.

4.3 Bildung von Vergleichsgruppen

Die Messmittel werden nach gleichartigen Merkmalen klassiert:

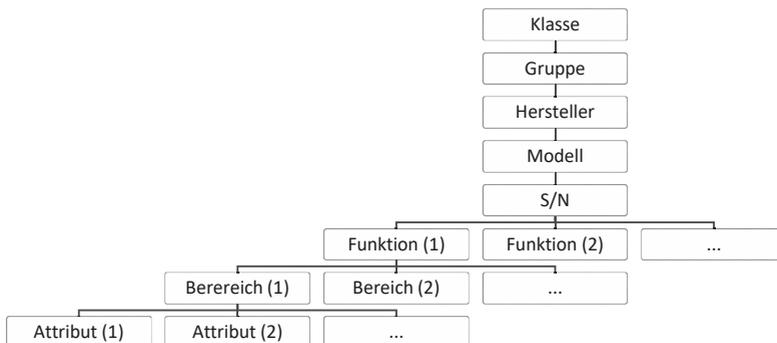


Abbildung 4: Beispiel der Klassierungsebenen der Messmittel

Beispiel:

Klasse und Gruppe	Labornormale, Digitalmultimeter
Hersteller, Modell, S/N	Fluke 8508A, ###
Funktion, Bereich, Attribut	Widerstandsmessung, 2 kΩ, Low Current

Prinzipiell können auf alle Ebenen Spezifikationen und Kalibrierintervalle festgelegt werden, die von einer Ebene zu unteren Ebenen vererbt werden können. Kalibrierintervalle werden üblicherweise auf der Modellebene festgelegt. Ausnahmen sind möglich.

⁸ $R(t)$: Reliability

4.4 Datenerhebung – Auswertung der Kalibrierergebnisse

Die bei Kalibrierungen festgestellten Ergebnisse werden hinsichtlich der Spezifikationsüberschreitungen ausgewertet. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze, um statistisches Material zu erhalten.

Horizontale Datenerhebung: Die Messmittel werden individuell über die Zeitschiene bewertet. Dieses Verfahren bietet sich für kleine Vergleichsgruppen oder einzelne Geräte an.

Vertikale Datenerhebung: Vertikale Datenerhebungen gehen nicht auf individuelle Gerätebewertungen ein, sondern betrachten eine größere Gesamtheit auf der Klassierungsebene nach Abbildung 4 in einem festgelegten Vergleichszeitraum, beispielsweise eines Jahres.

Zweidimensionale Datenerhebung: Ein kombiniertes zweidimensionales Vorgehen berücksichtigt einerseits individuelle Eigenschaften und andererseits die breitere Erfahrung mit allen gleichartigen Messmitteln. Eine Gewichtung der individuellen Merkmale gegenüber den Gruppenmerkmalen ist in diesem Falle notwendig.



Abbildung 5: Kombiniertes Verfahren zur Datenerhebung

4.5 Anpassung des Zuverlässigkeitsmodells

Zur Ermittlung eines angepassten Intervalls (engl. „revised interval“) wird zunächst folgende Definition benötigt: *„Die bei einer Kalibrierung festgestellte Spezifikationsüberschreitung ist als „Failure“, als Ausfall, zu betrachten, da das Messmittel in dem festgestellten Zustand nicht mehr einsatzklar ist.“*

Weiterhin werden folgende Axiome angewendet:

- Axiom 1: Als Entscheidungskriterium wird ausschließlich das Überschreiten mindestens einer Spezifikationsgrenze gesehen. Es ist für die Bewertung irrelevant, ob einzelne oder mehrere Parameter eines Messmittels Spezifikationen überschreiten.

- Axiom 2: Die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Messmittels während der Kalibrierung wird analog zu [8] durch folgende Funktion entsprechend der in der Elektrotechnik (vgl. DIN EN IEC 61709, [11]) gebräuchlichen Bestimmung der sogenannten „Mean Time Between Failure“ (MTBF) ausreichend gut beschrieben:

$$F(\Delta t) = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{MTBOOT}} \quad (1)$$

Δt Aktuelles Kalibrierintervall

$F(\Delta t)$ Ausfallrate, abhängig vom Zeitintervall Δt mit: $0 < F(\Delta t) < 1$. Die Grenzwerte 0 und 1 werden nur in der Theorie erreicht.

$MTBOOT$ „Mean time between out of tolerance“ (Mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen)

An Stelle $F(\Delta t)$ wird zur späteren Vereinfachung die Zuverlässigkeitsrate $R(\Delta t)$ – betrachtet⁹:

$$R(\Delta t) = 1 - F(\Delta t) = e^{-\frac{\Delta t}{MTBOOT}} \quad (2)$$

Zielsetzung: Gesucht wird das zu einer (zukünftig) geltenden Zuverlässigkeitsrate gehörende Intervall Δt_{n+1} . Zu diesem Zeitpunkt wird ein vorgegebener Anteil an Messmitteln R_{n+1} die Spezifikationen mit hinreichender Sicherheit noch erfüllen. Für diesen Fall wäre zu lösen:

$$R(\Delta t_{n+1}) = e^{-\frac{\Delta t_{n+1}}{MTBOOT}} \quad (3)$$

Die Parameter Δt_{n+1} und $MTBOOT$ sind noch unbekannt. Allerdings kann $MTBOOT$ aus den aktuellen Verhältnissen mit bekanntem R_n und Δt_n ermittelt werden und gilt auch für R_{n+1} und Δt_{n+1} :

$$MTBOOT = -\frac{\Delta t_n}{\ln(R_n)}, \quad MTBOOT = -\frac{\Delta t_{n+1}}{\ln(R_{n+1})} \quad (4)$$

Weitere Notation:

R_n Zuverlässigkeitsrate zum aktuellen Intervalls Δt_n

R_{n+1} Angestrebte Zuverlässigkeitsrate für das kommende, novellierte Intervall Δt_{n+1}

Es gilt bei Gleichsetzung über $MTBOOT$:

$$-\frac{\Delta t_n}{\ln(R_n)} = -\frac{\Delta t_{n+1}}{\ln(R_{n+1})}, \quad \Delta t_{n+1} = \Delta t_n \cdot \frac{\ln(R_{n+1})}{\ln(R_n)} \quad (5), (6)$$

Diese Gleichung für ein „Revised Interval“ entspricht etwa dem Ansatz A3 aus [8].

4.6 Dog & Gem Management

Um einen homogenen Messmittelbestand zu erhalten, sind Ausreißertests sinnvoll. Nach amerikanischer Lesart wird die Ursprungsdatenmenge um „Dogs and Gems“ bereinigt. Als Dogs (Hunde) bezeichnet man Messmittel, die sich als deutlich weniger zuverlässig erwiesen haben als das Gros der Vergleichsdatenmenge. Gems (Edelsteine) sind Messmittel, die wesentlich zuverlässiger als die Allgemeinheit sind.

Für Dogs ist zu überlegen, inwiefern zusätzliche Wartungsmaßnahmen zu ergreifen sind oder ob eine individuelle, messmittelbezogene Verkürzung eines Kalibrierintervalls ausreichend ist. Bei Gems kommt hingegen die Intervallverlängerung in Frage; wie auch die Option, das betreffende Messmittel in Bereichen mit besonderen Anforderungen einzusetzen. Sollte sich das Dog- oder Gem-Intervall wieder dem der Gesamtheit nähern, kann dieses Messmittel wieder in die Gruppe integriert werden.

4.7 Modifikation oder Bestätigung der Kalibrierintervalle

Größere Intervalländerungen können eine solide Planung der Messmittelausnutzung und der Finanzen ad absurdum führen. Auch aus diesem Grunde ist es sinnvoll, die Bandbreite der Änderung von Kalibrierintervallen zu begrenzen und Schrittweiten sukzessive anzupassen, anstatt ständig hin und her zu springen.

Statische Anpassung mit festen Korrekturfaktoren

Ein Ansatz zur Begrenzung der Änderungen ist eine Festlegung auf maximal eine Halbierung ($a = 0,5$) oder Verdopplung ($b = 2$) der Intervalle. Dann könnte die Festlegung neuer Intervalle nach folgendem Bildungsgesetz durchgeführt werden:

$$\Delta T_{n+1} = \begin{cases} \Delta T_n \cdot b & \text{wenn } R_n > R_{n+1}^{\frac{1}{b}} \\ \Delta T_n \cdot a & \text{wenn } R_n < R_{n+1}^{\frac{1}{a}} \\ \Delta T_n \cdot \frac{\ln(R_{n+1})}{\ln(R_n)} & \text{in anderen Fällen} \end{cases} \quad (7)$$

Wyatt/Castrup weisen auch in [8] auf die Möglichkeit einer alternativem flexiblen Anpassung hin, die aber nach unserer Meinung keine wesentlichen Vorteile birgt.

5 Beispiele zur Anwendung der Intervallanpassung

Bewertung einer Gruppe gleicher Messmittel (vertikale Datenermittlung)

Eine Anzahl Messschieber aus einem Prüffeld, die als Gruppe betrachtet werden, werden augenblicklich alle 24 Monaten kalibriert. Hierbei wurden bei 140 durchgeführten Kalibrierung 19 Überschreitungen der Spezifikationen festgestellt.

$$R_n = 1 - F_n = 1 - \frac{19}{140} = 0,86 \quad (8)$$

Die eigenen Qualitätsrichtlinien legen fest, dass eine Ausfallrate von maximal 10 % akzeptiert wird:

$$R_{n+1} = 0,90 \quad (9)$$

Das Zielintervall wäre wie folgt zu wählen:

$$\Delta t_{n+1} = \Delta t_n \cdot \frac{\ln(R_{n+1})}{\ln(R_n)} = 24 \text{ Monate} \cdot \frac{\ln(1-0,1)}{\ln\left(1-\frac{19}{140}\right)} = 17,3 \text{ Monate} \quad (10)$$

Aus Gründen der Praktikabilität würde man entweder ein 15 Monate- oder ein 18 Monate-Intervall¹⁰ wählen.

Prüfung des Intervalls eines Labornormals mit Historie (horizontale Datenermittlung)

Für ein Digitalmultimeter als Labornormal (Einzelgerät) wird eine hohe Verlässlichkeit gefordert. Angestrebt wird eine maximale Ausfallrate von 5 %. Das Messmittel wird mit einem initial gewählten Kalibrierintervall gemäß Herstellerempfehlung von 12 Monaten übernommen. Im Rahmen der Kalibrierungen wurde bei einer von vier Kalibrierungen eine Spezifikationsüberschreitung festgestellt. Obwohl die Datenbasis noch sehr dünn ist, soll eine erste Anpassung des Kalibrierintervalls routinemäßig geprüft werden. In diesem Falle gilt:

$$\Delta t_n = 12 \text{ Monate} \quad (11)$$

Festgestellte Ausfallrate und hieraus ermittelte aktuelle Zuverlässigkeitsrate R_n .

$$R_n = 1 - \frac{1}{4} = 0,75 \quad (12)$$

Angestrebte Zuverlässigkeitsrate 95 %:

$$R_{n+1} = 0,95 \quad (13)$$

$$\Delta t_{n+1} = \Delta t_n \cdot \frac{\ln(R_{n+1})}{\ln(R_n)} = 12 \text{ Monate} \cdot \frac{\ln(0,95)}{\ln\left(1-\frac{1}{4}\right)} = 2,1 \text{ Monate} \quad (14)$$

¹⁰ Für Kalibrierintervalle ist es empfehlenswert, feste Intervalllängen vorzugeben. Beispielsweise wäre ein Raster („Cal Before Use“ (CBU), 14 Tage, 30 Tage, und dann in Monaten: 2, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 60, sinnvoll. Längere Intervalle sollten nicht zur Anwendung kommen.

Eine deutliche Verkürzung des Kalibrierintervalls wäre angeraten. Jedoch ist für viele Messmittel ein Kalibrierintervall kleiner 90 Tage nicht praktikabel oder schlichtweg zu teuer¹¹. Weiterhin sollte man Intervalländerungen sukzessive und in nicht zu großen Sprüngen durchführen, um das Arbeitsaufkommen stabil planen zu können.

Empfehlung: Die Zuverlässigkeitsrate sollte für „normale“ Laboranwendungen auf 80 % bis 85 % festgelegt werden.

Statt einer Verkürzung des Intervalls auf zwei Monate zu wählen, wird nun geprüft, inwieweit sich die Zuverlässigkeitsrate R_{n+1} ändern würde, falls das Kalibrierintervall auf sechs Monate festgelegt würde:

$$R_{n+1} = \left(e^{\frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n}} \right)^{\ln(R_n)} = \left(e^{\frac{6 \text{ Mo}}{12 \text{ Mo}}} \right)^{\ln(0,75)} = 0,87 \quad (15)$$

Bei Festlegung des neuen Kalibrierintervalls auf sechs Monate würde die Ausfallwahrscheinlichkeit des Normals bei etwa 13 % liegen. Dies wiederum würde einem gängigen Zuverlässigkeitsniveau von 85 % (vgl. [10]) nahekommen¹².

11 Das Beispiel zeigt, dass in der Praxis eine Zuverlässigkeitsrate von 95 % auf Messmittelebene kaum wirtschaftlich zu erreichen ist. Zudem wird die Spezifikationsüberschreitung erst am Ende eines Kalibrierintervalls festgestellt. Bis dato ist das Messmittel aber über das Intervall hinweg gedriftet. So kann davon ausgegangen werden, dass dieser *Fail*-Zustand erst spät im Intervall eingetreten sein könnte.

¹² Dieses Beispiel ist realistisch. Es zeigt, dass die Kombination aus langen Kalibrierintervallen und hoher angenommener Zuverlässigkeitsrate oft unrealistisch ist.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), „DIN EN ISO 9001:2015: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen,“ Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), „DIN EN ISO/IEC 17025 - Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien [...],“ Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), DIN EN ISO 10012:2004 - Messmanagementsysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel (ISO 10012:2003), Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [4] International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), „ILAC-G5:1994 - Guidelines for Calibration and Maintenance of Test and Measuring Equipment,“ Silverwater (Australien), 1996.
- [5] International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), „ILAC-G24:2007 / OIML D 10 - Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments,“ Silverwater (Australien), 2007.
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 10012:2004 - Messmanagementsysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- [7] D. W. Wyatt und H. T. Castrup, „Managing calibration intervals,“ Albuquerque, NM (USA), 1991.
- [8] National Conference Standard Laboratories - International, Recommended Practice 1 (RP-1) - Establishment and Adjustment of Calibration Intervals, Boulder, CO (USA): NCSL International, 2010.
- [9] National Air & Space Administration (NASA), „NASA Reference Publication 1342: Metrology - Calibration and Measurement Guidelines,“ Pasadena, USA, 1994.
- [10] S. u. G. T. (. S. A. F. A. Brockman, „Air Force Calibration Interval Analysis of Test, Measurement und Diagnostic Equipment (TMDE) based on Maintenance Data Collection (MDC),“ in *NCSL International Workshop and Symposium*, Heath, Ohio, 2008.
- [11] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), DIN EN ISO 61709 - Elektrische Bauelemente - Zuverlässigkeit - Referenzbedingungen und Beanspruchungsmodelle zur Umrechnung, Berlin: Beuth, 2015.

Die neue ISO/IEC 17025

Was ändert sich für Prüf- und Kalibrierlaboratorien?

Dr. rer.nat. **Gabriele Dudek**,
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kurzfassung

Die revidierte ISO/IEC 17025 wird zumindest für die ca. 52000 weltweit akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien einige Änderungen im Laboralltag mit sich bringen, denn nicht nur der strukturelle Aufbau der Norm hat sich grundlegend verändert. Die Unparteilichkeit des Handelns ist stärker in den Vordergrund gerückt und muss nunmehr fortdauernd betrachtet werden. Die Probenahme, sofern sie in Verbindung mit der nachfolgenden Prüfung oder Kalibrierung steht, wird nun zu den Labortätigkeiten gezählt und damit stärker einbezogen. In Anlehnung an die aktuelle ISO 9001:2015 wurden Prozessorientierung und risikobasierte Ansätze verstärkt. Die Wortwahl ist weitaus generischer und gibt so mehr Raum und Flexibilität in der Umsetzung. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die wichtigsten Neuerungen, die mit der Revision einhergehen.

Abstract (optional)

The revised ISO/IEC 17025 will entail several changes in the everyday life of laboratories at least for the approx. 52,000 accredited testing and calibration laboratories worldwide as not only the structure of the standard has changed fundamentally. The impartiality has been emphasized and must now be considered on an on-going basis. Sampling, when it is associated with subsequent testing or calibration, is now included as part of laboratory activities and is therefore more closely handled. In accordance with the current ISO 9001:2015, process-oriented and risk-based approaches have been strengthened. The wording is more general and allows for room and flexibility in the implementation. The present paper gives an overview of the most important developments accompanying the revision.

1. Einleitung

Die ISO/IEC 17025 „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“ bildet weltweit die normative Grundlage für Anforderungen an kompetentes Arbeiten im Labor, unabhängig davon, ob es sich um ein akkreditiertes oder nicht-akkreditiertes

Labor handelt. Über 300 weitere ISO-Normen haben Bezüge zu dieser Norm und verweisen auf ihre Anforderungen [1]. Weltweit gibt es derzeit ca. 52000 Laboratorien, die auf Basis dieser Norm international anerkannte Akkreditierungen aufrechterhalten und so ihre Kompetenz nach außen demonstrieren [2]. In Folge der aktuellen Revision ist die 3. Ausgabe nun fertiggestellt. Die erste Ausgabe wurde 1999 veröffentlicht. Die letzte Revision im Jahr 2005 brachte kleinere Änderungen und erfolgte in erster Linie, um die Anforderungen der Norm in Übereinstimmung mit den Grundprinzipien der ISO 9001 zu bringen. Große Teile der technischen Anforderungen gehen somit noch auf die Zeit vor der Jahrtausendwende zurück. Zwischenzeitlich haben sich nicht nur der Stand der Technik in den Laboratorien und die Anforderungen der Akkreditierungsstellen weiterentwickelt, sondern auch die generellen Anforderungen an Konformitätsbewertungsstellen insgesamt, die in den ISO/IEC-Normen der sogenannten ISO CASCO¹ Toolbox verankert sind [Bild 1].



Bild 1: ISO CASCO Toolbox, 2017

Im Zuge der jüngsten Anpassungen sollten nicht nur veraltete technische Abschnitte neugefasst werden, auch die Anpassung an neue Strukturvorgaben von ISO CASCO und die für

¹ CASCO (Committee on Conformity Assessment) ist der ISO-Ausschuss, der sich mit Fragen der Konformitätsbewertung beschäftigt.

alle Laboratorien wichtige Anpassung an die aktuelle ISO 9001:2015 waren Beweggründe für die in 2014 gestartete Revision der ISO/IEC 17025.

2. Zeitplan

Die neue Norm ist das Ergebnis eines dreijährigen internationalen Normungsprojekts von ISO CASCO. Die Arbeitsgruppe besteht aus über 100 Experten und spiegelt die starke weltweite Verbreitung des Standards wieder. Bild 2 gibt einen zeitlichen Überblick über die Revision.

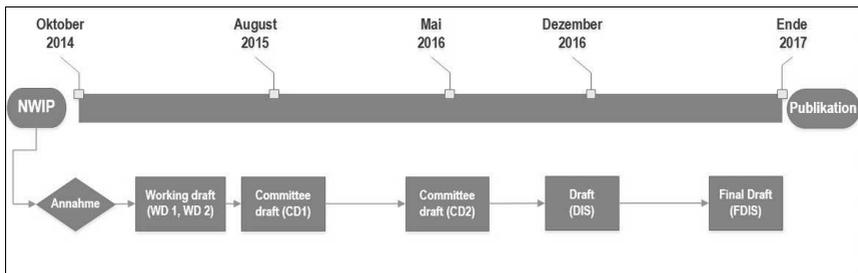


Bild 2: Zeitstrahl der Revision der ISO/IEC 17025, 2014-2017

3. Einflussfaktor ISO 9001:2015

Es ist ein erklärtes Anliegen von ISO CASCO, dass Laboratorien bei der Anwendung der ISO/IEC 17025 davon profitieren können, wenn in ihren Organisationen ein Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9001 etabliert ist und aufrechterhalten wird. Insofern wurde bei der Überarbeitung der ISO/IEC 17025 darauf geachtet, dass die Kompatibilität mit ISO 9001 erhalten bleibt und einige grundlegende Aspekte der aktuellen ISO 9001:2015 einfließen, wie z. B.:

- die Betonung der Verantwortung der Leitung
- die Förderung risikobezogener Ansätze
- die Prozessorientierung
- die Anpassung an geänderte Begriffe (z. B. Differenzierung zwischen Produkten und Dienstleistungen) sowie
- verschiedene Optionen zur Gestaltung des Managementsystems.

Die stärkere Prozessorientierung findet sich neben einer strukturellen Umgestaltung auch in einer geänderten Art der Formulierung der Anforderungen wieder. Wurden bislang konkrete

Anforderungen an die Umsetzung im Labor in der Norm ausgeführt, so bleibt die neue Wortwahl vielfach abstrakter. Es wird zwar Ergebnis bzw. Zweck bestimmter Prozesse in den Formulierungen (leistungsbasierte Anforderungen) verankert, die Ausgestaltung der Verfahren (das „Wie“) bleibt hingegen den Anwendern überlassen und es wird folglich auf die Beschreibung einzelner Prozessschritte verzichtet (siehe Beispiel 1).

Beispiel 1:

Die Version aus dem Jahr 2005 fordert in Unterabschnitt 4.13.2.3, dass jeder Fehler in Aufzeichnungen ausgestrichen werden muss, jedoch nicht ausgeradiert, unleserlich gemacht oder gelöscht werden darf. Änderungen müssen unterschrieben oder abgezeichnet werden von dem Mitarbeiter, der die Änderung vorgenommen hat.

Die geänderte neue Formulierung fordert in Abschnitt 7.5.2 nun, dass das Laboratorium sicherzustellen hat, dass die Änderungen an den technischen Aufzeichnungen zurückverfolgt werden können zu ursprünglichen Beobachtungen. Hinweise auf die geänderten Aspekte und das Personal, das für die Änderungen verantwortlich ist, müssen aufbewahrt werden.

Es entstehen auf diese Weise Gestaltungsspielräume, die u. a. eine unterschiedliche IT-Basierung in den Laboratorien berücksichtigen. Zusätzlich wird auch Raum geschaffen für risikobasierte Ansätze in der Ausgestaltung der Labortätigkeiten.

Dazu passt auch, dass die explizite Verpflichtung zur Benennung eines Qualitätsmanagementbeauftragten sowie von Stellvertretern für Schlüsselpositionen, wie auch in der ISO 9001:2015, entfallen sind. Die Verpflichtung zur Festlegung von Verantwortlichkeiten und Befugnissen sowie die Autorisierung entsprechenden Personals ist dennoch nach wie vor gefordert. Die Ausgestaltung der Dokumentation ist weniger präskriptiv. Es wird zwar nicht mehr explizit ein Qualitätsmanagementhandbuch gefordert, jedoch wird festgelegt, dass alle Dokumentationen, in das Managementsystem eingebunden sein müssen und in ihm zitiert oder damit verknüpft werden müssen. Das bietet mehr Flexibilität bei der Ausgestaltung der Dokumentation und berücksichtigt auch die zunehmende Nutzung elektronischer Systeme.

4. Einflussfaktor „Common Elements“

Die sogenannten „Common Elements“ sind Textbausteine, die innerhalb der Normen von ISO CASCO gleichartig Verwendung finden sollen und für die folgenden gemeinsamen Elemente entwickelt wurden:

- Unparteilichkeit,
- Vertraulichkeit,
- Beschwerden und Einsprüche sowie
- Einsatz von Managementsystemen.

Sie sind zur Verwendung bei der Entwicklung bzw. Revision von Normen gedacht und enthalten zwei Kategorien von Anforderungen:

- a) Obligatorischer Text: Das Element ist ohne Änderung anzupassen, ausgenommen bei Ersetzung durch speziellere Begriffe
- b) Empfohlener Text: kann durch Arbeitsgruppen verwendet werden, wenn diese ein höheres Maß an Spezifikation für das jeweilige Thema wünschen.

So ist beispielsweise zu erklären, dass das Thema Unparteilichkeit in der neuen ISO/IEC 17025 einen sehr viel größeren Raum einnimmt als in der Vorgängerausgabe aus 2005, in der der Begriff „unparteilich“ nur einmal als grundlegende Anforderung an das Handeln im Labor angesprochen wurde. Auf internationaler Ebene wurde im Rahmen der Normenrevision festgelegt, die Unparteilichkeit als übergeordnetes Konzept stärker zu verankern, jedoch keine Unabhängigkeitstypen (A, B, C) vorzusehen, wie sie für Inspektionsstellen gelten. Ziel ist es, Interessenkonflikte zu vermeiden und keinen kommerziellen, finanziellen oder sonstigen Druck zuzulassen, der das unparteiliche Handeln des Laboratoriums gefährden könnte. In diesem Zusammenhang sind nicht nur die Beziehungen der jeweiligen Organisation zu betrachten, sondern auch die Beziehungen des Personals. Ein Blick auf die Veränderungen, denen Laboratorien heutzutage ausgesetzt sind (z. B. Wechsel der Eigentümerschaft, Personalfluktuationen u. ä.), verdeutlicht, dass es sich bei der Analyse resultierender Risiken für die Unparteilichkeit um eine fortdauernde Aufgabe handelt.

In Bezug auf die Managementsystemanforderungen ist es vorrangiges Anliegen gewesen, keine Konflikte zu anderen Managementsystemnormen hervorzurufen und keine Anforderungen festzulegen, die zu mehreren Managementsystemen oder mehrfachen Bewertungen von Managementsystemen bei den Anwendern führen. Weiterhin musste darauf geachtet werden, dass nicht der Anschein erweckt wird, die Erfüllung der Anforderungen der

ISO/IEC 17025 impliziert, dass die Anforderungen eines anderen Managementsystem-Standards, wie der ISO 9001, erfüllt sind. So wurde festgelegt, in allen ISO CASCO Normen vorzusehen, dass es immer zwei Optionen (A und B) zur Erfüllung der Managementsystemanforderungen gibt. In der neuen ISO/IEC 17025 beschreibt Option A die Mindestanforderungen an das Managementsystem des Laboratoriums. Dazu zählen:

- Managementsystem-Dokumentation
- Lenkung der Managementsystem-Dokumente
- Lenkung der Aufzeichnungen
- Maßnahmen zum Umgang mit Risiken und Chancen (neu aufgenommen, entfallen sind dafür die vorbeugenden Maßnahmen)
- Verbesserung
- Korrekturmaßnahmen
- Interne Audits
- Managementbewertung.

Option B hingegen sieht vor, dass es für Laboratorien auch möglich ist, ein Managementsystem nach ISO 9001 zu betreiben, welches jedoch in der Lage sein muss, die konsequente Erfüllung der Anforderungen der Abschnitte 4 bis 7 der ISO/IEC 17025 zu unterstützen. Diese Option ist für Laboratorien interessant, die Teil einer größeren Organisation sind, die ihrerseits ein Managementsystem nach ISO 9001 betreiben.

Weiterhin konnte davon ausgegangen werden, dass Einsprüche, die definitionsgemäß immer an bestimmte Entscheidungen bzgl. eines Gegenstandes der Konformitätsbewertung gekoppelt sind (wie z. B. bei der Zertifizierung), im Laboralltag keine wesentliche Bedeutung haben und deshalb entsprechende Anforderungen zum Umgang mit Einsprüchen entfallen können.

5. Struktur, Anwendungsbereich und neue Begriffe

5.1 Neue Struktur

Die Norm unterscheidet allgemeine und strukturelle Anforderungen, Anforderungen an die Ressourcen und an die Prozesse sowie Anforderungen an das Managementsystem. Die strukturellen Anforderungen beinhalten alle Anforderungen an die Organisation, die Rechtsform sowie Festlegungen zu den Verantwortlichkeiten. Im Abschnitt „Anforderungen an Ressourcen“ werden alle Anforderungen an das Personal, die Räumlichkeiten und Einrichtungen, die metrologische Rückführbarkeit sowie die Einbeziehung externer Dienstleistungen und Prozesse vereint. Das Herzstück der Norm enthält alle Anforderungen an die Prozesse,

wie die Durchführung der Labortätigkeiten und das Berichten der Ergebnisse. Im Abschnitt 8 werden neben Angaben zu den beiden o. g. Optionen A und B auch Ausführungen zu den Mindestanforderungen an das Managementsystem des Laboratoriums (Option A) gemacht. Die Norm enthält zu dieser Thematik auch einen informativen Anhang B mit Erläuterungen. Im Anhang A (ebenfalls informativ) werden Erläuterungen zum Thema „Metrologische Rückführbarkeit“ gegeben.

5.2 Anwendungsbereich

Im Anwendungsbereich wurde auf eine explizite Unterscheidung von Anbietern (first party), von Anwendern (second party) und unabhängigen Dritten (third party) verzichtet. Der Text wurde gestrafft, weist aber immer noch darauf hin, dass die Anforderungen für alle Laboratorien anwendbar sind, unabhängig von der Mitarbeiterzahl. Alle Organisationen, die sogenannte „Labortätigkeiten“ durchführen, können diese Norm anwenden.

5.3 Neu eingeführte Begriffe

Der Terminus „Labortätigkeiten“ (laboratory activities) wurde neu eingeführt. Durch die damit verbundene neue Definition des Begriffs „Labor“ wird deutlich, dass Labortätigkeiten nicht nur Prüfung und Kalibrierung, sondern auch die Probenahme umfassen, sofern diese in Verbindung mit einer darauffolgenden Prüfung oder Kalibrierung steht. Die stärkere Einbeziehung der Probenahme war eine der Intensionen, die den Anlass zur Revision gab. Einig sind sich die Experten, dass die Probenahme teilweise erheblichen Einfluss auf die Prüfergebnisse hat. Ob diese Tätigkeiten als eigenständige Tätigkeiten der Kompetenzfeststellung durch eine Akkreditierung unterliegen sollen, wird jedoch international unterschiedlich gesehen. Die Betonung der Verbindung der Probenahme zu den Prüf- und Kalibriertätigkeiten stellt somit eine Kompromisslinie dar, um international Konsens herbeiführen. Wichtig für den Anwender ist nunmehr, dass immer dann, wenn die Norm von Labortätigkeiten spricht, die entsprechenden Anforderungen für alle drei Tätigkeiten gelten.

Der Begriff der Entscheidungsregel wurde definiert, da dieser Begriff im Zusammenhang mit Aussagen zur Konformität benutzt wird und sichergestellt werden sollte, dass die Messunsicherheit dabei berücksichtigt wird.

6. Umfang der Labortätigkeiten

Das Dienstleistungsspektrum eines Laboratoriums kann sowohl aus eigenen Labortätigkeiten als auch aus Labortätigkeiten Externer bestehen. Die ISO/IEC 17025 fordert nunmehr,

dass Laboratorien den Umfang ihrer Tätigkeiten genau darlegen müssen, für die sie die Konformität mit der Norm in Anspruch nehmen. Die Übereinstimmung mit der Norm darf zukünftig nur für die eigenen Tätigkeiten beansprucht werden, nicht jedoch für die Labortätigkeiten, die dauerhaft von Externen erbracht werden. Damit ist sichergestellt, dass nach außen erkennbar ist, für welche Leistungen das Laboratorium eigene Kompetenz besitzt.

7. Produkte und Dienstleistungen von Externen

In Ergänzung zu den eigenen Labortätigkeiten können Laboratorien, wie bisher auch, geeignete Produkte und Dienstleistungen von externen Anbietern nutzen. Damit sind nicht nur diejenigen Prüf-, Kalibrier-, bzw. Probenahmetätigkeiten zur Ergänzung des eigenen Leistungsspektrums gemeint, die bislang als Unterauftragsvergabe bezeichnet wurden. Die neue ISO/IEC 17025 lehnt sich an den ganzheitlichen Ansatz der ISO 9001:2015 an und integriert alle Produkte und Dienstleistungen von Externen in einem Abschnitt. Eingeschlossen sind auch Produkte und Dienstleistungen, die direkt an den Kunden gehen oder zur Unterstützung der eigenen Arbeit eingesetzt werden, wie z. B. Beschaffungen.

Im Umgang mit externen Anbietern fordert die Norm eine klare Verständigung. So müssen den externen Anbietern Kriterien, die Voraussetzung für die Annahme der Dienstleistung sind, und die Anforderungen an die Kompetenz bzw. die erforderliche Qualifikation mitgeteilt werden.

8. Metrologische Rückführbarkeit

Der Unterabschnitt beinhaltet im Grundsatz alle Anforderungen, die bislang im Unterabschnitt „Messtechnische Rückführung“ enthalten waren. Im Vergleich dazu ist der Text jedoch deutlich generischer formuliert und gestrafft worden. Die Unterscheidungen von besonderen Anforderungen an Prüfung und Kalibrierung wurden aufgegeben und Erläuterungen, die in etlichen Anmerkungen enthalten waren, aus dem Text entfernt. Stattdessen wird auf den informativen Anhang A verwiesen. An der grundsätzlichen Anforderung, die metrologische Rückführbarkeit der Messergebnisse mittels einer ununterbrochenen Kette von Kalibrierungen einzuführen und aufrechtzuerhalten, hat sich nichts verändert. Die Rückführung auf das SI-System kann, wie bisher, durch verschiedene Wege realisiert werden (Kalibrierungen, zertifizierte Werte von zertifizierten Referenzmaterialien (RM), oder durch direkten oder indirekten Vergleich mit nationalen oder internationalen Normalen). Dabei zielt die Norm darauf ab, dass die Rückführung durch kompetente Laboratorien (im Sinne der ISO/IEC 17025) oder kompetente RM-Hersteller (im Sinne der ISO 17034) zu erbringen ist. Anerkannt wird

ebenfalls, dass es nicht immer technisch möglich ist, die Ergebnisse auf das SI-System zurückzuführen. In diesen Fällen ist eine geeignete Referenz zu beschreiben und die metrologische Rückführbarkeit mit Hilfe von zertifizierten RM, Referenzmessverfahren oder durch Bezug auf Normale, die auf gegenseitigem Konsens beruhen, nachzuweisen.

Der Anhang A liefert zusätzliche Informationen, wie die metrologische Rückführbarkeit realisiert werden kann, welche Wege es für den Nachweis der metrologischen Rückführbarkeit gibt und welche Formen der Anerkennung möglich sind. Zu Letzterem wird neben der Akkreditierung als Mittel zur Kompetenzbestätigung auch auf die Begutachtungsverfahren unter Gleichrangigen der nationalen Metrologieinstitute hingewiesen. Letztendlich bleibt das Laboratorium dafür verantwortlich, die metrologische Rückführbarkeit in Übereinstimmung mit der Norm zu realisieren.

Der Anhang enthält auch Ausführungen zu Normalen, deren Ergebnisberichte lediglich eine Aussage zur Konformität mit einer Spezifikation enthalten ohne die Angabe einer Messunsicherheit, wie es zuweilen bei den in Deutschland gängigen Eichscheinen der Fall ist. Es wird dargelegt, dass auch solche Normale verwendet werden, um die metrologische Rückführbarkeit weiterzugeben. In diesem Fall können die vorgegebenen Fehlergrenzen als Ursprung für die Messunsicherheit herangezogen werden unter Anwendung einer geeigneten Entscheidungsregel zur Bestätigung der Konformität und unter der Voraussetzung, dass die vorgegebenen Fehlergrenzen technisch angemessen in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

9. Neue Prozessanforderungen

Der Abschnitt 7 der neuen ISO/IEC 17025 beschreibt die Anforderungen an den eigentlichen Prüf-, Kalibrier- bzw. Probenahmeprozess von der Anfrage bis hin zur Berichterstattung. Die im Folgenden genannten Aspekte beschränken sich auf einige wichtige Neuerungen.

Bei Veränderungen während des Prozesses und bei der Einbeziehung externer Stellen wird eine stärkere Beteiligung des Kunden gefordert. Bevor das Laboratorium seine Tätigkeiten aufnimmt, müssen alle Änderungen mit dem Kunden geklärt und für beide Seiten zufriedenstellend gelöst sein. Neu hinzugekommen ist eine Anforderung, dass vom Kunden verlangte Abweichungen nicht die Integrität des Laboratoriums gefährden oder Auswirkungen auf die Validität der Ergebnisse haben dürfen.

Die Anforderungen an die Sicherung der Qualität von Prüf- und Kalibrierergebnissen sind nunmehr in einem Unterabschnitt „Sicherung der Validität von Ergebnissen“ enthalten. Die neue Norm enthält an dieser Stelle einen Katalog von internen und unter externer Beteiligung durchgeführter Maßnahmen, denen sich das Labor bedienen muss, sofern dies zweckmäßig ist. Dazu zählen neben der bewährten Verwendung von Referenzmaterialien beispielsweise auch Vergleiche innerhalb des Laboratoriums und Blindversuche. Dem Vergleich mit den Ergebnissen anderer Laboratorien wird in einem eigenen Abschnitt Rechnung getragen. An dieser Stelle schränkt die Norm die Verpflichtung zur Teilnahme mit dem Worten „sofern verfügbar und zweckmäßig“ ein und berücksichtigt, dass es in vielen Bereichen keine entsprechenden Vergleiche oder Eignungsprüfungen gibt.

Stärker als bisher wird bei den Anforderungen an die Berichterstattung von Ergebnissen auf besondere Anforderungen zu Konformitätsaussagen (z. B. Test bestanden/nicht bestanden oder Grenzwert eingehalten/nicht eingehalten) eingegangen. So müssen solche Aussagen auf Entscheidungsregeln beruhen, die das Risiko einer falschen Aussage berücksichtigen, es sei denn der Kunde gibt diese Entscheidungsregel selbst vor. Schon bei einer Angebots- bzw. Vertragsprüfung ist darauf zu achten, dass die gewählte Entscheidungsregel dem Kunden mitgeteilt und mit diesem abgestimmt wird.

In den Ergebnisberichten ist eindeutig zu kennzeichnen, wenn Daten vom Kunden stammen. Sofern dies Auswirkungen auf die Validität der Prüf- oder Kalibrierergebnisse hat, muss der Bericht dazu eine Aussage enthalten. Ferner muss auf einem Ergebnisbericht erkenntlich sein, wenn das Laboratorium nicht für die Probenahme verantwortlich war (analysiert, wie erhalten). Die Verwendung eines entsprechenden Haftungsausschusses ist bereits heute für akkreditierte Laboratorien vorgeschrieben.

Die neue ISO/IEC 17025 enthält einige neue Anforderungen an Informationsmanagementsysteme, wie sie vielerorts in Laboratorien für die Datenerfassung und -verarbeitung sowie die Erstellung von Ergebnisberichten eingesetzt werden. Informationsmanagementsysteme umfassen computergestützte und nicht computergestützte Systeme. Bei der Prüfung auf Funktionsfähigkeit ist besonderes Augenmerk auf die Schnittstellen zwischen den Systemen und auf die Validierung von Software, insbesondere nach Updates zu achten, einschließlich der Dokumentation und Freigabe. Kommerzielle Standardsoftware kann man, wie bisher, als ausreichend validiert ansehen, aber auch hier ist bei Updates auf eine Überprüfung der Funktionsfähigkeit zu achten.

10. Umgang mit Risiken und Chancen

Der Umgang mit Risiken und Chancen ist grundsätzlich nichts Neues für die Laboratorien [3, 4]. Die bisherige Normversion ist ebenfalls auf den Umgang mit Risiken an verschiedenen Stellen eingegangen, insbesondere im Zusammenhang mit Korrektur- und Präventivmaßnahmen oder bei der Validierung von Methoden bzw. der Angabe der Messunsicherheit. Risiken, die in diesem Zusammenhang zu betrachten sind, fokussieren auf die Validität der Ergebnisse oder auf die Einhaltung der eigenen grundsätzlichen Regelungen und Verfahren sowie auf die Verbesserung der Effektivität des Managementsystems. Neu hinzugekommen sind Risiken, die die Unparteilichkeit des Handelns beeinträchtigen können. Wichtig ist eine entsprechende Planung, dass entsprechende Maßnahmen in das Managementsystem integriert werden und die Wirksamkeit dieser Maßnahmen bewertet wird. Der Grundgedanke der Vorbeugung geht in diesem Konzept auf, was dazu führt, dass Vorbeugemaßnahmen nicht mehr separat in der neuen Norm angesprochen werden. Betont werden soll an dieser Stelle, dass weder die ISO 9001:2015 noch die neue ISO/IEC 17025 die Einführung eines formalen Risikomanagementsystems, wie es etwa in der ISO 31000 beschrieben ist, fordern.

11. Ausblick

Die Publikation der neuen ISO/IEC 17025 wird Ende 2017 erwartet. Bis die deutsch/englische Ausgabe verfügbar sein wird, werden ggf. noch ein paar weitere Monate vergehen. Die Akkreditierungsstellen haben sich auf internationaler Ebene bereits im November 2016 auf eine dreijährige Übergangsfrist verständigt (ILAC Resolution GA 20.15) [5].

12. Literaturangaben

- [1] ISO Online Browsing Platform, 2017, <https://www.iso.org/obp/ui/#home>
- [2] International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), 2017, <http://ilac.org>
- [3] Wong, S: Risk-based thinking for chemical testing. Accreditation and Quality Assurance, 22, 2017, 103-108
- [4] Rozet, E. et al.: Advances in validation, risk and uncertainty assessment of bioanalytical methods. J Pharm Biomed Anal, 55, 2011, 848-858
- [5] International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), 2016, <http://ilac.org/publications-and-resources/ga-resolutions/>

Measurement Uncertainty and its Influence on Dynamic Object Tracking in Autonomous Driving

Benjamin Naujoks M.Sc., **Torsten Engler** B.Eng. M.Sc.,
Dipl. Math. **Martin Michaelis**, Prof. Dr.-Ing. **Hans-Joachim Wuensche**,
University of the Bundeswehr Munich

1 Abstract

Measurement Uncertainty plays an important role in every real-world perception task. This paper describes the influence of measurement uncertainty to all steps in Dynamic Object Tracking. Its base is the probabilistic Bayesian Filtering approach. Throughout this paper, practical examples and tools for choosing the correct filter implementation including measurement models for different kinds of sensors are presented.

2 Introduction

In the autonomous driving context, the perception and tracking of dynamic objects is a crucial task. Hence, there exists a vast amount of research for tracking algorithms since decades [1, 2]. Dynamic object tracking can be seen as an estimation problem, which determines the value of an unknown quantity, the state of the dynamic object, from several observations. The state may be the velocities or the position, whereas the observations are potentially different quantities depending on the sensor measurements. This could be the position based on LiDAR measurements. Since sensor measurements are error-prone, it is important to include the measurement uncertainty in the tracking algorithms. Section 3 describes commonly used distributions, whereas [3] operates on fuzzy approximations of the measurement uncertainty.

The standard is the Bayesian Filtering approach, as it accounts for the probabilistic nature of dynamic object tracking [4]. Therefore, we introduce the fundamentals of Bayesian filtering theory as well as the well-known Kalman filter [5]. Clearly, if we assume perfect measurements, then we could use deterministic optimization approaches, but this is never the case in a real-world scenario. Moreover, [6] reveals how to deal with different kinds of measurement uncertainty simultaneously. However, we show in Section 5 important aspects of several sensor models. In contrast to other publications, this paper describes the influence of the measurement uncertainty to all steps in dynamic object tracking with practical examples. Therefore, we present in Section 6 a real-world experiment and discuss the further handling of the tracked objects, especially their covariances. Throughout this paper, vectors and matrices are denoted with bold symbols.

¹All authors are with the Institute for Autonomous Systems Technology (IAS), University of the Bundeswehr Munich, Germany. Contact author email: benjamin.naujoks@unibw.de

3 Noise Types

In this section, we illustrate two of the most important noise types. The choice of the measurement noise type highly affects the range of possible filters and the handling of the measurements.

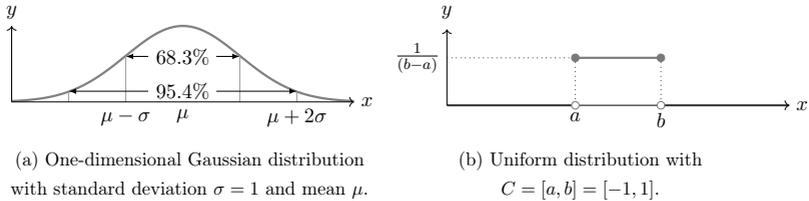


Figure 1: The PDFs corresponding to the Gaussian (left) and the Uniform (right) distribution.

3.1 Gaussian Noise

The most widely used distribution is the Gaussian distribution or Normal distribution. It is the main necessity for the optimality of the majority of filters, as for example the Kalman filter. Nevertheless, more realistic would be to assume a β distribution [7], as no sensor has the measurement interval of $(-\infty, \infty)$.

Definition 1 (Multivariate Gaussian Distribution [7]). *Let $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^n$ with $n \in \mathbb{N}$ be vectors and $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ the covariance matrix. Then, $\mathcal{N}(\mathbf{x} \mid \boldsymbol{\mu}, \mathbf{P})$ denotes the normal distribution and the corresponding distribution function is defined as:*

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \det(\mathbf{P})}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{P}^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right). \quad (1)$$

Figure 1a shows an example of the Gaussian Distribution in the special case of $n = 1$ and $\mathbf{P} = \sigma = 1$. Moreover, it is illustrated that in the intervals $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ and $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ lie 68.3%, resp. 95.4% of all measurements. Additionally, it holds that 99.7% of all measurements exists in the interval $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$.

3.2 Uniformly Distributed Noise

The Uniform distribution states that every event has the same probability to occur. Thus, it is a good choice if we do not have information about the nature of noise. In practice, the Uniform distribution is defined with an interval $[a, b]$ with $a, b \in \mathbb{R}$ and $b > a$, which is illustrated in Figure 1b.

Definition 2 (Uniform Distribution [7]). *The corresponding distribution function of the Uniform distribution is defined as:*

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{if } \mathbf{x} \in [a, b], \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

4 Bayesian Filtering

Bayesian filtering can be seen as a statistical inversion problem, with one major difference. Contrary to statistical problems, where a probability of an event means the occurrence in an infinite number of trials, the Bayesian approach is to consider the uncertainty of one event in a single trial [4]. Typically, these inversion problems are defined as a Hidden-Markov-Model (HMM), with a vector valued time series as unknown variable \mathbf{x}_k , $k = 0, 1, \dots$, which are observed through a set of noise-corrupted measurements $\{\mathbf{y}_k\}_{k=0,1,\dots}$.

4.1 Probabilistic State Space Model and the Bayesian Filtering Equations

Definition 3 (Probabilistic state space model [4]). *The probabilistic state space model is defined as:*

$$\mathbf{x}_k \sim p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_k \sim p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k), \quad (4)$$

for $k = 1, 2, \dots$, where $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^n$, $n \in \mathbb{N}$ is the system state and $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^m$, $m \in \mathbb{N}$ is the measurement at time step k , $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1})$ represents the stochastic dynamic model and $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k)$ describes the stochastic measurement model. Depending on the structure of the dynamic model (continuous or discrete), it can be described through a probability density or counting measures.

Definition 3 is supposed to be Markovian, which is defined as:

Definition 4 (Markovian [4]). *A state space model is Markovian if it fulfills the following properties:*

1. *The sequence of states $\{\mathbf{x}_l\}_{l=0,1,\dots}$ is Markovian, which means that every future state \mathbf{x}_{k+i} , $i = 0, 1, \dots$ and $k = 1, 2, \dots$, given \mathbf{x}_{k-1} is independent of every state before time step $k - 1$:*

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{1:k-1}) = p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}). \quad (5)$$

2. *Given the current state \mathbf{x}_k , the current measurement \mathbf{y}_k is conditionally independent of the measurement and state histories:*

$$p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_{1:k}, \mathbf{y}_{1:k-1}) = p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k). \quad (6)$$

Furthermore, for Definition 3 holds:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{y}_{1:k-1}) = p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}), \quad (7)$$

which shows that every future state is independent of every measurement before time step $k - 1$. The purpose of the previously mentioned inversion is to estimate hidden states from observed

measurements. Therefore, we want to compute the joint posterior distribution. For a given time step $T \in \mathbb{N}$, the posterior distribution can be computed through the Bayes' Rule [4]:

$$p(\mathbf{x}_{0:T} \mid \mathbf{y}_{1:T}) = \frac{p(\mathbf{y}_{1:T} \mid \mathbf{x}_{0:T})p(\mathbf{x}_{0:T})}{p(\mathbf{y}_{1:T})} \quad (8)$$

$$\propto p(\mathbf{y}_{1:T} \mid \mathbf{x}_{0:T})p(\mathbf{x}_{0:T}), \quad (9)$$

where the joint prior distribution:

$$p(\mathbf{x}_{0:T}) = p(\mathbf{x}_0) \prod_{k=1}^T p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{x}_{k-1}) \quad (10)$$

as well as the joint likelihood of measurements:

$$p(\mathbf{y}_{1:T} \mid \mathbf{x}_{0:T}) = \prod_{k=1}^T p(\mathbf{y}_k \mid \mathbf{x}_k), \quad (11)$$

follows from Definition 3 and 4. Unfortunately, this direct computation is not feasible, particularly for real-time applications, as the computational load increases with every time step. Hence, we compute the marginal posterior distributions $p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{y}_{1:k})$ recursively with a constant computational load for every time step $k \in \mathbb{N}$. Note that this is only possible with the Markovian assumption in Definition 4. The fundamental Bayesian filtering equations are given by the following theorem.

Theorem 1 (Bayesian filtering equations [4]). *Let the probabilistic state space model be defined as in Def. 3 with the Markovian assumption 4. Then, it holds that:*

1. **Initialization:** *The prior distribution $p(\mathbf{x}_0)$ is the starting point of the recursion.*
2. **Prediction:** *Given the dynamic model $p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{x}_{k-1})$, the predictive distribution at the time step $k \in \mathbb{N}$ can be computed through the Chapman-Kolmogorov equation:*

$$p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{y}_{1:k-1}) = \int p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{x}_{k-1})p(\mathbf{x}_{k-1} \mid \mathbf{y}_{1:k-1}) d\mathbf{x}_{k-1}. \quad (12)$$

3. **Update:** *For a measurement \mathbf{y}_k at time step $k \in \mathbb{N}$, the posterior distribution of \mathbf{x}_k is:*

$$p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{y}_{1:k}) = \frac{1}{Z_k} p(\mathbf{y}_k \mid \mathbf{x}_k)p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{y}_{1:k-1}), \quad (13)$$

where Z_k is the normalization constant defined as:

$$Z_k = \int p(\mathbf{y}_k \mid \mathbf{x}_k)p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{y}_{1:k-1}) d\mathbf{x}_k. \quad (14)$$

Proof. To prove the prediction step, we start from the joint distribution of \mathbf{x}_k and \mathbf{x}_{k-1} given $\mathbf{y}_{1:k-1}$, we have:

$$p(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k-1} \mid \mathbf{y}_{1:k-1}) \stackrel{\text{Chain rule}}{=} p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{y}_{1:k-1})p(\mathbf{x}_{k-1} \mid \mathbf{y}_{1:k-1}) \quad (15)$$

$$\stackrel{(5),(7)}{=} p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{x}_{k-1})p(\mathbf{x}_{k-1} \mid \mathbf{y}_{1:k-1}). \quad (16)$$

By integrating (16) over \mathbf{x}_{k-1} , we get (12). It follows the proof for the update step:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_{1:k}) \stackrel{\text{Bayes' rule}}{=} \frac{1}{Z_k} p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k, \mathbf{y}_{1:k-1}) p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_{1:k-1}) \quad (17)$$

$$\stackrel{(6)}{=} \frac{1}{Z_k} p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k) p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_{1:k-1}), \quad (18)$$

where Z_k is defined by (14). \square

4.2 The Kalman Filter

The Kalman Filter [5, 8, 9, 10] was originally derived from a least-squares approach. Nevertheless, Ho and Lee soon discovered that it belongs to the Bayesian filter family [4, 11]. Let the dynamic as well as the measurement model be linear with additive Gaussian noise:

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v}_{k-1} \quad (19)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad (20)$$

where $\mathbf{v}_{k-1} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_{k-1})$, $\mathbf{Q}_{k-1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ is the process noise, $\mathbf{w}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$, $\mathbf{R}_k \in \mathbb{R}^{m \times m}$ is the measurement noise and the prior distribution is Gaussian as well, with $\mathbf{x}_0 \sim \mathcal{N}(\mathbf{x}_0^*, \mathbf{P}_0)$, $\mathbf{x}_0^* \in \mathbb{R}^n$ is the prior mean and $\mathbf{P}_0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ the initial covariance. The matrix Φ_{k-1} is the transition matrix of the dynamic model and \mathbf{C}_k defines the measurement model matrix. Then, the Kalman Filter is the closed form solution of the linear Bayesian filtering problem [4]. Consequently, the probabilistic state space model 3 transforms to [4]:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) = \mathcal{N}(\mathbf{x}_k | \Phi_{k-1} \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{Q}_{k-1}) \quad (21)$$

$$p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k) = \mathcal{N}(\mathbf{y}_k | \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k, \mathbf{R}_k). \quad (22)$$

For the whole equations see [4]. The well-known Kalman Gain, for a time step k , $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^* \mathbf{C}_k^T \mathbf{S}_k^{-1}$, with the predicted covariance \mathbf{P}_k^* and the innovation covariance $\mathbf{S}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{P}_k^* \mathbf{C}_k^T + \mathbf{R}_k$ [4], can be interpreted as the importance of the innovation $\Delta \mathbf{y} = \mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k^*$ [4], where \mathbf{x}_k^* is the predicted mean, relative to the predicted estimate. Furthermore, the Kalman Gain heavily depends on the measurement noise \mathbf{R} , through the innovation covariance \mathbf{S} . Therefore, the importance of the error, which defines the correction of the predicted estimate, is proportional to the measurement noise.

4.3 Non-linear Extensions to the Kalman Filter

The Kalman Filter is an optimal estimator for linear state estimation problems. Unfortunately, only few applications satisfy the linearity condition. For a time step $k \in \mathbb{N}$ the non-linear extension to Equation 19 is defined as [4]:

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_{k-1}) \quad (23)$$

$$\mathbf{y}_k = g(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k), \quad (24)$$

where $f(\cdot)$ is the non-linear dynamic model function and $g(\cdot)$ the non-linear measurement model function. Several non-linear extensions were developed in the past decades [8, 9, 10]. Examples are the Unscented Kalman filter [1, 4, 12, 13, 14] and general Gaussian filters like the Gauss-Hermite Kalman Filter [15], the Cubature Kalman filter [16] or Gaussian-Sum filters [17]. The next part describes the Extended Kalman filter, which can be seen as approximation of the general Gaussian filters.

Extended Kalman Filter The Extended Kalman Filter (EKF) [1, 4, 9, 18] uses Gaussian approximations like

$$p(\mathbf{x} \mid \mathbf{y}_{1:k}) \simeq \mathcal{N}(\mathbf{x}_k \mid \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{P}_k) \quad (25)$$

to the filtering densities. These approximations are realized as Taylor series of the non-linear functions. Hence, the transition matrix and the measurement model matrix are approximated through calculating the corresponding Jacobians:

$$\Phi_{k-1} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mu_{k-1}} \quad (26)$$

$$\mathbf{C}_k = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mu_k} . \quad (27)$$

There exist the first order and the second order EKF, depending on the terms of the Taylor series [1]. For the complete EKF equations see, e.g. [4] or [9]. One advantage of the EKF is its simplicity, as linearization is a common tool for non-linear systems. Disadvantages are the relatively poor performance for highly non-linear models and the need of Jacobians [4]. Moreover, the EKF tends to underestimate the true covariance matrix as it only propagates the first moment through the non-linearity. This can lead to filter inconsistency, which is explained in the following part.

4.4 Filter Consistency

The filter consistency plays an important part in understanding the performance of a filter implementation. It is a reflection of how good the true state was estimated and can be checked with the Normalized Innovation Squared (NIS).

Definition 5 (Normalized Innovation Squared [1, 19, 20]). *With model definition 23 and potentially non-linear Kalman Filter equations (e.g. EKF or UKF), the NIS is defined for a time step $k \in \mathbb{N}$ as:*

$$NIS = [\mathbf{y}_k - g(\mathbf{x}_k)]^T \mathbf{S}^{-1} [\mathbf{y}_k - g(\mathbf{x}_k)] . \quad (28)$$

If the filter converges the NIS follows a Chi-Squared distribution [7] with $\dim(\mathbf{y})$ degrees of freedom [19]. This means that the filter is unbiased and therefore, the innovation is white-noise with zero-mean and covariance \mathbf{S} . As measurements of one time step may not be reliable it is recommended in [8] to test with the average of NIS values from several consecutive time steps

[19]. Another possible test would be to simulate the noise with Monte Carlo runs of the same time step [8].

5 Measurement Models

5.1 Models in Sensor Coordinates

Sensors provide their measurements in the corresponding natural sensor coordinate system. For example, these coordinate systems could be spherical. It is only natural to consider the measurement model to lie in the sensor coordinate system. The major advantage is that in the most cases the measurement errors can be assumed to be uncorrelated and Gaussian with zero-mean in this coordinate system [21].

5.2 LiDAR

The sensor coordinate system of a typical 2D LiDAR sensor is polar with the range $r \in \mathbb{R}$, yaw $\psi \in [0, 2\pi)$. The measurement function depends on the coordinate system of the state vector. For example, it is linear if \mathbf{x} lies in the sensor coordinate system. Otherwise if \mathbf{x} is Cartesian then the measurement model is defined through the following measurement equation system:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} + e_r \quad (29)$$

$$\psi = \arctan \frac{y}{x} + e_\psi, \quad (30)$$

where $[e_r, e_\psi] \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R})$ is the measurement error with $\mathbf{R} = \text{cov}(\mathbf{w}) = \text{diag}(\sigma_r^2, \sigma_\psi^2)$.

5.3 Camera

Cameras have a high spatial resolution, are passive and comparably cheap. To obtain reliable 3D information from cameras either model based temporal filtering of monocular image sequences may be used as has been done using the 4D-approach since more than three decades [22], or several popular stereo algorithms can be used, e.g. Semi-Global-Matching, Graph-Cut. The result is a disparity measurement and given by

$$d = u_l - u_r = \frac{b \cdot f_u}{x} \quad (31)$$

where $u_{l/r}$ are image coordinates, b is the baseline, f_u is the focal length and x is the depth. The measurement noise can be modeled as additive in the measurement space, therefore it holds $\hat{d} = d + \omega$ with normally distributed measurement noise ω . From (31) follows for the reconstruction

$$x(d) = \frac{b \cdot f_u}{d + \omega}. \quad (32)$$

This leads to the probability density function for x

$$f_x = \frac{b \cdot f_u}{\sqrt{2\pi}\sigma_d x^2} \exp \frac{-(b \cdot f_u/x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}. \quad (33)$$

The integration of this PDF leads to a mean slightly higher than the real expected value and hence the stereo measurement is biased towards bigger distances as shown in Fig. 2. Different approaches to handle the bias are shown in [23].

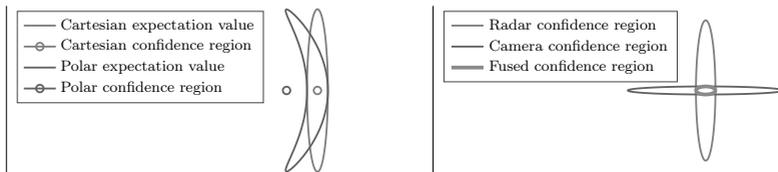
If the measurement equation is non-linear the assumption of Gaussian distributed noise is usually violated. This has to be compensated, otherwise the estimated state is biased as well.



Figure 2: PDF for the range x . The dotted line is the real value of the mean, and the straight line is the mean of the distribution.

5.4 Radar

Similar to the case of LiDAR measurements, the sensor coordinate system is in polar coordinates. However, typical radar sensors offer a significantly worse performance in cross-range direction compared to the range direction. As a result, the use of the measurements in their native coordinate system is very advisable. This is illustrated in Figure 3a, where it can be seen that the linearized conversion of the measurements from the polar sensor coordinate system to the cartesian tracking coordinate system results in biased measurements. It is important to note that radar measurements suffer not only from the measurement noise that is caused by physical phenomena in the measurement processing chain, but also from measurement origin uncertainty that is caused by fluctuating reflection characteristics of the observed objects [24].



(a) Non-linearly converted measurements

(b) Geometrical gain obtainable in the multi-sensor fusion

Figure 3: Comparison of modeling in the Cartesian coordinate system and the sensor coordinate system (left) as well as the different confidence regions of multiple sensors (right).

5.5 Sensor Fusion

A complementary use of different sensor principles offers major advantages. Individual sensors may provide useful additional attributes such as color information (camera) or radial velocities (radar). Radar sensors are less prone to occlusions than LiDAR sensors, which in turn offer more

detailed measurements. The most significant advantage obtainable in suitable sensor configurations by a sensor fusion is termed “geometrical gain”. For example, the combination of a radar sensor and a stereo camera system combines the good range resolution of the radar sensor with the favorable angular resolution of the camera system, as displayed schematically in Figure 3b.

5.6 Models in Cartesian Coordinates

For this method, the sensor measurements have to be converted into Cartesian coordinates. This can lead to linear measurement equations if the state vector lies in the Cartesian coordinate system. Thus, a linear Kalman filter is applicable if the dynamic model is linear as well [21]. As it is stated in [25], the major flaw of the conversion is the non-zero mean and non-Gaussian property of the measurement noise. There are several techniques to overcome these flaws. For further readings see [21, 25]. Nevertheless, we recommend to use the sensor coordinate system for the measurements, because of the previously mentioned properties of the measurement noise.

6 Dynamic Object Tracking

In this section we illustrate the influence of the measurement noise on the tracking of a dynamic object in a real-world scenario. The software and hardware architecture is essentially as described in [26]. As process model we use the Augmented Coordinated Turn model (ACT) with input noise and the measurement model is the LiDAR sensor measurement model 29. ACT is a non-linear process model. Hence, the Unscented Kalman Filter [27] is chosen to handle the non-linearities. Figure 4 shows the comparison of the estimated velocities. The estimate of the velocity has a lot of jumps and is very rough, if the measurement noise is assumed to be about 2 cm, which is the official measurement uncertainty of the Velodyne sensor. This is illustrated as the blue graph. To be fair, one has to note that the point cloud segmentation step adds errors to the measurements. Nevertheless, we chose to illustrate the corresponding results to point out that one has to account for every error made in the processing pipeline. On the contrary, if we set the measurement noise one magnitude higher, we get the smooth and practically usable estimate shown by the red graph. It is important to note that a too large measurement noise assumption can lead to undesired tracking behavior, because this would lead to an almost uncorrected estimate, which relies on the prediction only. The appropriate measurement noise was set according to the filter consistency check of Subsection 4.4 and our measured errors of the calibrated sensor. We chose a 95% confidence bound as it is a common choice in the research community. Therefore, the chi-squared confidence bounds $[b_1, b_2]$ with $b_1, b_2 \in \mathbb{R}$ for 400 samples are:

$$[b_1, b_2] = \left[\frac{\chi_{400}^2(0.05)}{400}, \frac{\chi_{400}^2(0.95)}{400} \right] = [0.886, 1.119]. \quad (34)$$

The mean *NIS* for the appropriate noise model is 0.9355, which lies in $[0.886, 1.119]$. In contrary, for the mean *NIS* of the underestimated noise model holds $295.919 \notin [0.886, 1.119]$.

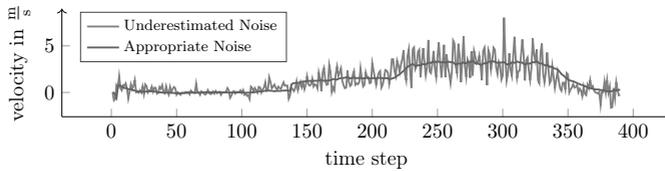


Figure 4: Comparison of velocity estimates under different measurement noise assumptions.

7 Further Handling of Tracked Object Noise

The measurement uncertainty influences the covariance of the tracked object through the Kalman Gain, which was described in section 4. The covariance of an object is an important albeit often underestimated feature of the Kalman Filter. Through the covariance, one has the knowledge about the certainty of the current estimate. Therefore, it is desirable to integrate the covariance in the further handling of the estimate. Unfortunately, some filters like the EKF tend to underestimate the true covariance. Hence, it is advisable to do a consistency check as described in Subsection 4.4. Figure 5 shows an example in the context of autonomous driving. Here, the autonomous black car tries to overtake the red car, whose position and dimension are estimated through a tracking algorithm. Thus, the estimate might be different from the true state. Nevertheless, we can safely plan a collision-free trajectory if we include the covariance (dotted ellipse) of the estimate.

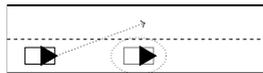


Figure 5: Considering the object's covariance (dotted ellipse) in the trajectory generation.

8 Summary

This paper described the importance of the measurement uncertainty in dynamic object tracking. Standard methods for linear and non-linear filtering have been shown. Furthermore, implementation issues for different sensor models were presented. Moreover, a method for setting the correct uncertainty assumptions, the filter consistency, was explained. Additionally, it has been illustrated that false uncertainty assumptions can lead to drastically worse tracking results. At last, practical issues like the handling of the covariance of the tracked object were explained for the different parts of the tracking pipeline.

References

- [1] Y. Bar-Shalom, *Tracking and Data Association*. San Diego, CA, USA: Academic Press Professional, Inc., 1987.
- [2] B. Ristic, S. Arulampalam, and N. Gordon, *Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications*. Artech House, 2004.
- [3] G. Mauris, V. Lasserre, and L. Foulloy, "A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement," *Measurement*, vol. 29, no. 3, pp. 165 – 177, 2001.
- [4] S. Särkkä, *Bayesian Filtering and Smoothing*. Cambridge University Press, 2013, vol. 3.
- [5] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering And Prediction Problems," *ASME Journal of Basic Engineering*, 1960.
- [6] A. Gning, B. Ristic, and L. Mihaylova, "Bernoulli Particle/Box-Particle Filters for Detection and Tracking in the Presence of Triple Measurement Uncertainty." *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 60, no. 5, pp. 2138–2151, 2012.
- [7] K. D. Schmidt, *Maß und Wahrscheinlichkeit*. Springer, 2011.
- [8] Y. Bar-Shalom, T. Kirubarajan, and X.-R. Li, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [9] A. Jazwinski, *Stochastic processes and filtering theory*, ser. Mathematics in science and engineering. Acad. Press, 1970, no. 64.
- [10] B. Anderson and J. Moore, *Optimal Filtering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.
- [11] Y. Ho and R. Lee, "A bayesian approach to problems in stochastic estimation and control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 9, no. 4, pp. 333–339, 1964.
- [12] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "Unscented Filtering and Nonlinear Estimation," in *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 2004, pp. 401–422.
- [13] S. J. Julier, "The Scaled Unscented Transformation," in *Proceedings of the IEEE American Control Conference*. Anchorage AK, USA: IEEE, 2002, pp. 4555–4559.
- [14] E. A. Wan and R. V. D. Merwe, "The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation," 2000, pp. 153–158.
- [15] K. Ito and K. Xiong, "Gaussian filters for nonlinear filtering problems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 5, pp. 910–927, 2000.

- [16] I. Arasaratnam and S. Haykin, "Cubature Kalman Filters," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 6, pp. 1254–1269, 2009.
- [17] D. L. Alspach and H. W. Sorenson, "Nonlinear Bayesian estimation using Gaussian sum approximations," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 17, no. 4, pp. 439–448, 1972.
- [18] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB*, 4th ed. Wiley-IEEE Press, 2014.
- [19] R. Niu, P. K. Varshney, M. G. Alford, A. Bubalo, E. K. Jones, and M. Scalzo, "Curvature nonlinearity measure and filter divergence detector for nonlinear tracking problems," in *11th International Conference on Information Fusion, FUSION 2008, Cologne, Germany, June 30 - July 3, 2008*, 2008, pp. 1–8.
- [20] R. Piché, "Online tests of kalman filter consistency," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 30, no. 1, pp. 115–124, 2016.
- [21] X. R. Li and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking: III. Measurement models," vol. 4473, 2001, pp. 423–446. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.492752>
- [22] E. D. Dickmanns and V. Graefe, "Dynamic monocular machine vision," *Machine vision and applications*, vol. 1, no. 4, pp. 223–240, 1988.
- [23] L. M. Gabe Sibley and G. Sukhatme, "Bias reduction and filter convergence for long range stereo," 2007.
- [24] P. Berthold and M. Michaelis, "Radar reflection characteristics of vehicles," in *Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications*, 2017, under review.
- [25] D. Lerro and Y. Bar-Shalom, "Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF," *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, vol. 29, pp. 1015–1022, Jul. 1993.
- [26] F. Ebert, D. Fassbender, B. Naujoks, and H. Wünsche, "Robust Long-Range Teach-and-Repeat in Non-Urban Environments," in *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Yokohama, Japan, 2017.
- [27] E. Wan and R. Van Der Merwe, "The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation," 2000, pp. 153–158.

Vergleich von FEM-Simulations- und Messergebnissen unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten

Am praktischen Beispiel des Modells einer Fixpunktzelle zur Kalibrierung von Berührungsthermometern

Ing. **Sebastian Marin**, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. **Thomas Fröhlich**, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, TU Ilmenau, Ilmenau

Kurzfassung

Eine praktische Durchführung, realisiert mit kommerzieller Software, zur Ermittlung der Unsicherheit einer numerischen thermischen Simulation mit FEM wird in diesem Beitrag vorgestellt. Hintergrund davon ist die Prognosefähigkeit dieses FEM-Modells anhand seiner Validierung mit Messungen unter Berücksichtigung ihrer Reproduzierbarkeiten zu Berechnen und daraus die Güte oder Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung von Mess- und Simulationsergebnissen unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten in drei unterschiedlichen Szenarien zu finden, mit unbekanntem Messergebnissen, mit bekannten Messergebnissen und nicht vollständig bekannten Randbedingungen und mit bekannten sowohl Messergebnissen als auch Randbedingungen. Der Vergleich der Ergebnisse wird mit einer Erweiterung der Area-Metrik Methode gemacht.

Abstract

This contribution deals with a practical approach to determine the uncertainty of a FEM-Modell of a thermal application with commercial Software. The background of this is to calculate the predictive capability of the Modell on the basis of its validation with measurements, taking into account their reproducibility and to determine the quality of the agreement between measurement results and simulation results, considering their both uncertainties. This was made for three different scenarios, the first with unknown measurement results, the second with known measurement results but not completely known boundary conditions and the third scenario with known measurement results as well as boundary conditions. The comparison of the results was made with an extension of the area metric method.

1. Einführung

Mess- und Simulations- oder Berechnungsergebnisse können im Allgemeinen auf vier unterschiedlichen Arten oder Methoden verglichen werden. Die erste ist eine qualitative Methode, wobei nur eine graphische Darstellung der Ergebnisse im Betracht gezogen wird. Ein Bei-

spiel dafür in der thermischen Ebene wäre der Vergleich der Temperaturverteilungen einer thermographischen Abbildung mit Ergebnissen einer FEM-Simulation. Die zweite und am weiteste verbreitete Methode ist ein diskreter Vergleich der Ergebnisse. Hierfür werden die Resultate an einem gemessenen Punkt oder einer gemessenen Kurve mit einem simulierten Punkt bzw. einer simulierten Kurve verglichen. In der dritten Methode werden die Simulationsergebnisse in einem Bereich der Messergebnisse verglichen, wobei dieser mit der Messunsicherheit abgegrenzt wird. Abschließend, findet in der vierten Methode ein probabilistischer Vergleich der Ergebnisse statt, wobei sowohl Mess- als auch Simulationsergebnisse mit Unsicherheiten definiert werden müssen [1]. In diesem Fall werden zwei Wahrscheinlichkeitsverteilungen miteinander verglichen. Dies erfolgt in der Regel nach drei Lösungsweisen [2]:

- Statistische Tests (Hypothesentest), wie der Kolmogorow-Smirnow-Test [3] oder die Kulback-Leibler-Divergenz [1].
- Bayes'scher Wahrscheinlichkeitsbegriff.
- Gewichtete Durchschnitts, wo nur die zentralen Tendenzen (Mittelwerte und Standardabweichungen) der Wahrscheinlichkeitsverteilungen verglichen werden.

Person schlug als Maß der Übereinstimmung von Mess- und Simulationsergebnisse eine auf dem Minkowsky-Abstand erster Ordnung basierte Metrik vor [1, 2], die sogenannte Area-Metrik. Hierfür wird die Differenzfläche zwischen den kumulierten Verteilungsfunktionen als Maß angegeben (A_d in Bild 1). Da diese für den Vergleich normiert werden, bleibt die Einheit bei der Area-Metrik oder Validierungsmetrik enthalten. Ein Wert von 0 Einheiten entspricht einer vollen Übereinstimmung der Ergebnisse. Problem dieser Metrik ist die Interpretation, da sie auch skalenabhängig ist, also auch große Werte können trotzdem einer guten Übereinstimmung der Ergebnisse entsprechen. Ein sehr großer Vorteil dieser Methode ist, dass systematische Fehler des Simulationsmodells sich sehr einfach erkennen lassen (Bild 1 rechts. Die rot markierte kurve, Simulation, wurde um den systematischen Fehler zur Messung geschoben). Eine Erweiterung dieser Methode wird in diesem Beitrag vorgestellt, wobei das prozentuale Verhältnis der Differenzfläche im Kontaktbereich der Verteilungsfunktionen (A_d) definiert als ein Vertrauensintervall von 95 % auf ihre gesamte Differenzfläche (A_t) als Maß für die Prognose- oder Vorhersagefähigkeit (P_{Fx}) eines Simulationsmodells für ein Szenario x gegeben wird (Gleichung 1). Wenn $A_d = A_t = 0$, wird $P_{Fx} = 100\%$ definiert, ansonsten wird es nach der Gleichung (1) berechnet.

$$P_{\text{Fx}} = \frac{A_{\text{H}}}{A_{\text{I}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Der Vorteil der vorgestellten Methode besteht darin, die Richtigkeit der simulierte Ergebnisse auch an den Stellen zu zeigen, an denen nicht gemessen wird. Dies wird anhand des Modells einer kleinen-Mehrfachfixpunktzelle für die Kalibrierung von Berührungsthermometern realisiert. Ziel ist es, die Aussage zu treffen, wie wahrscheinlich ist, dass das Modell der Realität unter drei unterschiedlichen Szenarien entspricht:

- Im Fall, dass keine Messergebnisse vor den Simulationen vorliegen (F1).
- Im Fall, dass Messergebnisse vorliegen aber die Temperaturverteilung der Randbedingungen noch unbekannt ist (F2).
- Im Fall, dass Messergebnisse vorliegen und den Messaufbau bestmöglich bekannt ist (F3).

Die Schwierigkeit dieses Vorgehen wird durch die Ermittlung der Unsicherheit der Simulationsergebnisse dargestellt.

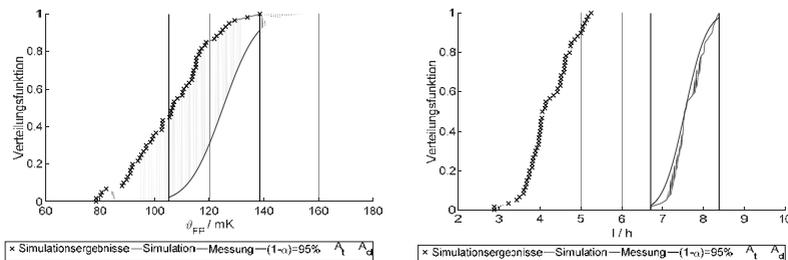


Bild 1: Verteilungsfunktionen der Simulationen und der Messungen. Links am Beispiel von Fixpunkttemperatur (θ_{FP}) für Zn, und rechts Plateaulänge (l_{FP}) für Zn.

2. Kleine-Mehrfachfixpunktzelle zur Kalibrierung von Berührungsthermometern

Die in der ITS-90 [4] definierten Fixpunkttemperaturen (θ_{90}), sind hoch reproduzierbare Temperaturen, die während der Phasenumwandlung (Schmelz- in Bild 2, und/oder Erstarrungsplateau) von hochreinen Materialien (Fixpunktmaterialien) ermittelt und als Referenz für die Kalibrierung von Temperaturfühlern eingesetzt werden. Diese Fixpunkte werden in speziellen Tiegel (Fixpunktzelle) Öfen induziert, was dies in der Praxis erschwert und es für bestimmte Anwendungen unzugänglich machen kann. Mit dem Ziel den Kalibrieraufwand, unter Beibehaltung einer hohen Reproduzierbarkeit der Fixpunkttemperatur, zu reduzieren, wurde

eine kleine-Mehrfachfixpunktzelle (k-MFFPZ) entwickelt. Sie wurde als Kalibrierreferenz für den Referenzfühler eines Temperatur-Blockkalibrators (T-Bk) für den Bereich von 80 °C bis 430 °C konzipiert [5, 6]. Die k-MFFPZ wurde modular konstruiert und besteht aus 4 Tiegeln, die ineinander gesteckt werden können und drei Fixpunktmaterialien mit ϑ_{90} im Arbeitstemperaturbereich des T-Bks. Im innersten Tiegel befindet sich Indium ($\vartheta_{90} = 156,5985$ °C), im mittleren Zinn ($\vartheta_{90} = 231,928$ °C), und im äußeren Zink ($\vartheta_{90} = 419,527$ °C). Der vierte Tiegel enthält die anderen drei (k-MFFPZ in Bild 3 links).

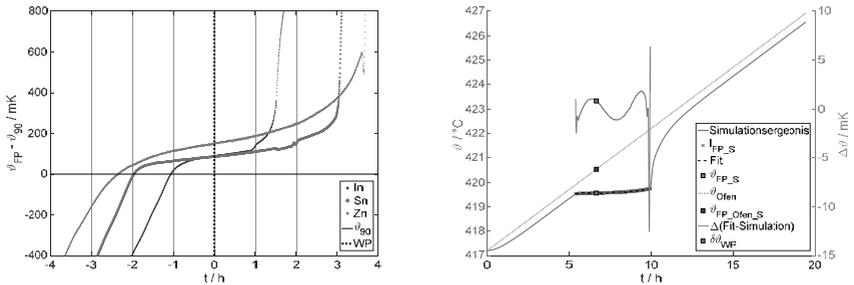


Bild 2: Schmelzplateaus. Links gemessen für In, Sn und Zn und rechts simuliert für Zn.

Die Ermittlung der Fixpunkttemperatur (Auswahl eines Temperaturwerts auf dem Plateau $\vartheta_{FP,S}$ in Bild 2 rechts) erfolgt nach unterschiedlichen praktischen Verfahren [7]. Im hier beschriebenen Fall wurde die Auswertung nach der Wendepunktmethode (WP) ausgewählt. Hierfür wird auf das Schmelzplateau eine Kurve dritter Ordnung gelegt und ihr Wendepunkt, wird als ϑ_{FP} ausgewertet. Erstarrungsplateaus wurden nicht weiterverfolgt, weil sich ihre Anwendung im T-BK als nicht praktikabel erwiesen hat. Wegen der gleichzeitigen Entwicklung des T-BKs und der k-MFFPZ wurde die Langzeituntersuchung der Zelle in einem separaten Aufbau in einem senkrecht positionierten Rohrofen durchgeführt (Bild 3 links), womit angestrebt wurde, dass die thermischen Eigenschaften der k-MFFPZ im T-BK erhalten bleiben. Nach der Auswertung der Messergebnisse liegen Werte für die Reproduzierbarkeiten der Fixpunkttemperatur ($\vartheta_{FP,M}$), der Plateaulänge ($l_{FP,M}$) und der Plateausteigung ($m_{FP,M}$) aller 3 Fixpunktmaterialien vor. Diese sind von der Differenz der eingestellten Ofentemperatur zu ϑ_{90} bei der jeweiligen ausgewertete ϑ_{FP} abhängig ($\Delta \vartheta_{WP_Ofen,S}$ in Bild 2 rechts). Darüber hinaus liegen die auf adiabatische Bedingungen ($\Delta \vartheta_{WP_Ofen,M} = 0$) extrapolierten Fixpunkt-

temperaturen ($\vartheta_{FP,MO}$) der drei Fixpunktmaterialien mit ihren entsprechenden Messunsicherheiten vor [8]. Diese Werte werden in der Tabelle 1 gezeigt.

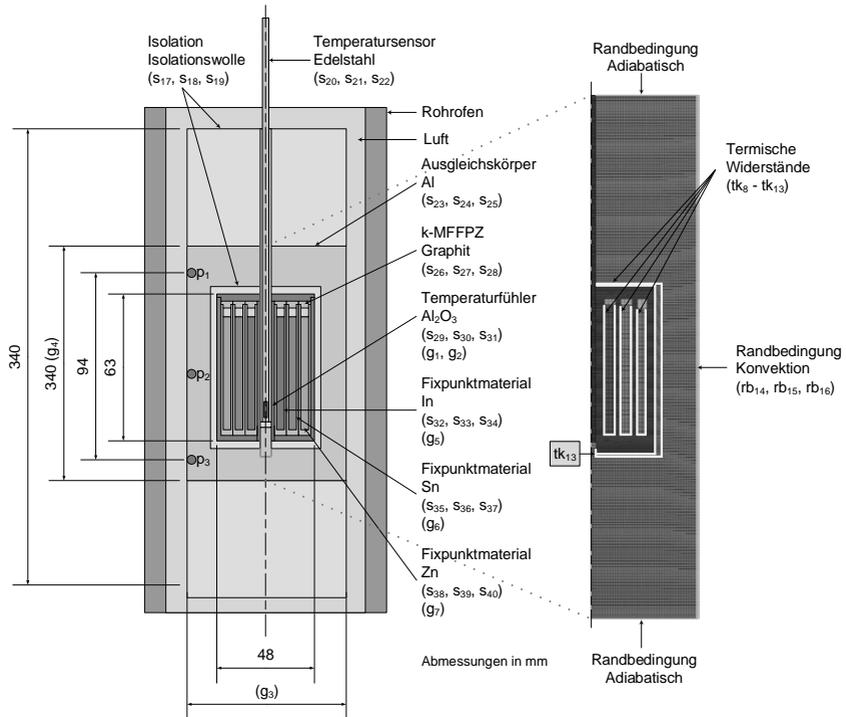


Bild 3: Links: Schematische Darstellung des Messaufbaus. Rechts: FEM-Modell.

Tabelle 1: Gemessene Fixpunkttemperatur $\vartheta_{FP,MO}$ unter adiabatischen Bedingungen und ihre erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$)

Fixpunktmaterial	$\vartheta_{FP} \pm u_{\vartheta_{FP}}, (k = 2)$	$(\vartheta_{FP} - \vartheta_{90}) \pm u_{\vartheta_{FP}}, (k = 2)$
In	156,6305 °C ± 66 mK	32 mK ± 66 mK
Sn	231,9020 °C ± 94 mK	-26 mK ± 94 mK
Zn	419,5120 °C ± 160 mK	-15 mK ± 160 mK

3. Simulationsmodell der kleinen-Mehrfachfixpunktzelle

Das Simulationsmodell der k-MFFPZ wurde als ein vereinfachtes zwei-dimensionales axial-symmetrisches Modell (Bild 3 rechts) des inneren Messaufbaus (Bild 3 links) in ANSYS konstruiert und simuliert. Schrauben, Gewinde, Phasen, große Isolationskörper, dünne Drähte und der Rohrofen wurden nicht simuliert. Die Heizung im Rohrofen (ϑ_{Ofen} in Bild 2 rechts) wurde durch freie Konvektion als Randbedingung definiert. Dies erfolgte mit einer Heizrampe von 0,5 K/h. Die Netzunabhängigkeit der Ergebnisse wurde vor den Simulationen ausgeschlossen. Luftspalte bis zu einer Dicke von 0,25 mm zwischen den Bauteilen wurden nicht als Körper sondern als temperaturabhängige thermische Widerstände definiert. Diese werden als das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit der Luft zu der Dicke der Luftspalte eingetragen. Für die simulierten Luftkörper zwischen der Fixpunktzelle und dem Temperaturfühler und zwischen den Fixpunktmaterialien und der Fixpunktzelle (Bild 3) wurden temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten der Luft unter Berücksichtigung der Wärmestrahlung eingesetzt [5].

4. Ansatz zur Bestimmung der Unsicherheit des Simulationsmodells der kleinen-Mehrfachfixpunktzelle

Für die Ermittlung der Unsicherheit des Simulationsmodells wurde von probabilistischen Untersuchungen des deterministischen FEM-Modells der k-MFFPZ Gebrauch gemacht [3]. In einer thermischen Simulation wird die Wärmeleitungsdifferenzgleichung (Gleichung 2) gelöst [9]. In ihr werden geometrischen Größen (x, y, z), Randbedingungen (q), und Stoffeigenschaften (λ Wärmeleitfähigkeit, ρ Dichte, c spezifische Wärmekapazität), sogenannte Eingangparameter für die Berechnung der Temperatur (ϑ), Ausgangsparameter, benutzt.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (2)$$

Den Eingangsparametern des FEM-Simulationsmodells wurden Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugewiesen. Eine einzelne Simulation einer definierten Konstellation von Eingangsparametern entspricht einer deterministischen Berechnung des FEM-Modells. Nach mehreren deterministischen Berechnungen können die Ergebnisse (Ausgangsparameter) mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen ausgewertet werden. Das versteht man unter eine probabilistische Berechnung. Als Ein- oder Ausgangsparameter können auch Vor- oder Nachrech-

nungen der anderen Parameter eingefügt werden. Die simulierte Fixpunkttemperatur (ϑ_{FP_S}) und Plateaulänge (l_{FP_S}) wurden wie im Bild 2 rechts gezeigt, ausgewertet. Die Plateaustei-
gung (m_{FP_S}) wurde als der Mittelwert der ersten Ableitung der auf das Plateau gelegten
Kurve dritter Ordnung ermittelt. Diese drei Ergebnisse wurden als Ausgangsparameter der
Simulationen definiert und ihre Reproduzierbarkeiten (nach probabilistische Berechnungen)
benutzt um die P_{Fx} ermitteln zu können (Gleichung 1). Die auf adiabatische Bedingungen
($\Delta\vartheta_{Ofen_M} = 0$) extrapolierte simulierte Fixpunkttemperatur (ϑ_{FP_S0}) für den Vergleich mit den
aus Messungen ermittelten Fixpunktwerte (ϑ_{FP_M0} in Tabelle 1) wurde nach dem folgenden
Unsicherheitsmodell berechnet (Gleichung 3). Dies gilt für alle drei Fixpunktmaterialien.

$$\vartheta_{FP_S0} = \vartheta_{WP_S_fit} + \delta\vartheta_{WP} + \delta\vartheta_{adiabatisch} + \delta\vartheta_{Modell} \quad (3)$$

$$\delta\vartheta_{adiabatisch} = k_{P_{Fx}} (\delta\vartheta_{Geometrie} + \delta\vartheta_{therm.Kontakte} + \delta\vartheta_{RB} + \delta\vartheta_{Stoff} + \delta\vartheta_{numerisch}) \quad (4)$$

Wobei:

- $\vartheta_{WP_S_fit}$ Durch eine Ausgleichsrechnung auf adiabatische Bedingungen extrapolierte Fixpunkttemperatur.
- $\delta\vartheta_{WP}$ Abweichung des Wendepunktes von der Kurve dritten Ordnung zu der simulierten Kurve (Bild 2 rechts).
- $\delta\vartheta_{adiabatisch}$ Abweichung der Ausgleichsrechnung für $\vartheta_{WP_S_fit}$.
- $\delta\vartheta_{Modell}$ Modellvereinfachungsfehler: Eine Phasenumwandlung jedes Fixpunktmaterials aus einem detaillierten dreidimensionalen Modell wurde mit dem zweidimensionalen axialsymmetrischen Modell (Bild 3 rechts) verglichen, um diesen Beitrag zu ermitteln. Es ist zu erwarten, dass es sich um einen systematischen Fehler handelt. Dies dient zusätzlich als Verifikation des Modells (überprüft, dass es nur erlaubte Annahmen getroffen wurden).
- $k_{P_{Fx}}$ Konfidenzintervall ermittelt als der Mittelwert der neuen berechneten P_{Fx} für das Modell (3 ϑ_{FP_S} , 3 l_{FP_S} , und 3 m_{FP_S}). Dies ist abhängig von geometrische- und Stoffeigenschaften sowie Randbedingungen und numerischen Unsicherheiten.

Der gesamte Term ($\delta g_{\text{Geometrie}} + \delta g_{\text{therm.Kontakte}} + \delta g_{\text{RB}} + \delta g_{\text{Stoff}} + \delta g_{\text{numerisch}}$) entspricht der Reproduzierbarkeit von g_{FP_S} . Die einzelnen Beiträge werden nicht getrennt ermittelt, sondern, man erhält den gesamten Term automatisch aus den probabilistischen Berechnungen. Im Folgenden wird gezeigt, welche Eingangsparameter die einzelnen Beiträge enthalten.

$\delta g_{\text{Geometrie}}$ Es werden die Position des Temperaturfühlers im Inneren des Temperatursensors (g_1 in Bild 3 links), seine Länge (g_2), den Radius (g_3) und die Länge (g_4) des Ausgleichsblockes sowie die Höhe der einzelnen Fixpunktmaterialien (g_5), (g_6) und (g_7) in Abhängigkeit der Dichteänderung mit der Temperatur variiert.

$\delta g_{\text{therm.Kontakte}}$ Die thermische Widerstände wurden einzeln untersucht indem der Einfluss bei einem Temperatursprung auf die vom Temperatursensor gemessene Temperatur mit einer maximalen definierten Luftspaltdicke von 0,25 mm und ohne thermischen Widerstand verglichen wurde. Sie wurden auf insgesamt 6 reduziert ($tk_8, tk_9, tk_{10}, tk_{11}, tk_{12}, tk_{13}$ in Bild 3 rechts) und im Bereich von 0 mm bis 0,25 mm variiert.

δg_{RB} Es ist zu erwarten, dass der für die Messungen benutzten Rohrofen ein axiales Temperaturprofil aufweist. Für die Fälle F1 und F2 wurde es temperaturabhängig in Form einer Parabel mit Scheitel auf der Höhe der Mitte der k-MFFPZ und auf der Oberfläche des Ausgleichsblockes angenommen (Bild 4 links). Die Skala (rb_{14}) der einzelnen Parabeln wurde als Eingangsparameter angenommen, ebenso die Anfangstemperatur der Simulation (rb_{15}) und der Wärmeübergangskoeffizient (rb_{16}). Für den dritten Fall F3 wurde das Profil entlang des Ausgleichsblocks aus Messungen an drei Punkten ermittelt (p_1, p_2 in der Mitte der k-MFFPZ und p_3 in Bild 3, 4 links).

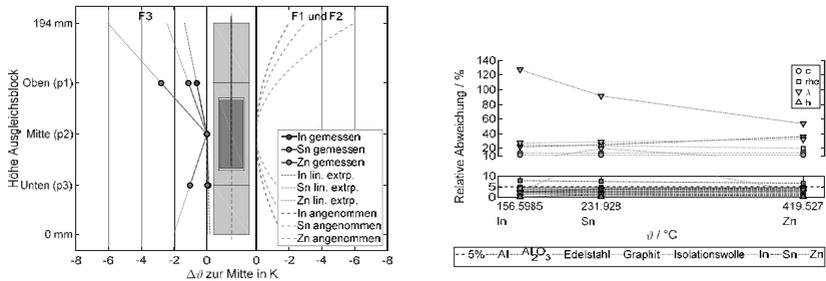


Bild 4: Links: Temperaturprofil bezüglich der Mitte der k-MFPZ für die drei untersuchte Szenarien. Rechts: relative Abweichung der Stoffeigenschaften.

Stoffeigenschaften

Die thermische Stoffeigenschaften (λ , ρ , c oder h) von acht im Systemaufbau präsenten Materialien wurden für ϑ_{90} jedes Fixpunktmaterials aus Literaturdaten interpoliert [10 bis 24]. Allen gefundenen Eigenschaften jeder Literaturquelle wurde die gleiche Wahrscheinlichkeit zugewiesen. Luft wurde nicht berücksichtigt, weil im Temperaturbereich keine Unterschiede ihrer thermischen Eigenschaften gefunden wurden. Bei der Phasenumwandlung findet eine sprunghafte Änderung der Enthalpie (H) des Stoffes statt. Diese Nichtlinearität der spezifischen Enthalpie der Fixpunktmaterialien (h) wird in ANSYS für den Phasenübergang verwendet [25]. Die Fixpunkttemperatur weist eine Unsicherheit bezüglich der Konzentration von Verunreinigung in den Fixpunktmaterialien auf [26, 27], dies wird zusätzlich als Eingangsparameter behandelt. Insgesamt wurden hiermit 24 Eingangsparameter berücksichtigt (s_{17} bis s_{40}).

Für das Isolationsmaterial ist die relative Abweichung von λ auffällig groß, vor allem bei niedrigen Temperaturen, da Literaturwerte in der Regel bei höheren Temperaturen (600 °C bis 1000 °C) angegeben werden. Für Indium ist die relative Abweichung von λ nach seiner Phasenumwandlung deutlich größer als bei den anderen zwei Temperaturen, weil die gefundene Daten entweder vor der Fixpunkttemperatur aufhören oder nach ihr anfangen. Die relative Abweichung aller thermischen Eigenschaften von Graphit und Aluminiumoxid ist relativ groß wegen der nicht genau bekannten Porosität der Materialien. Die Abweichung der spezifischen Enthalpie h für die Fixpunktmaterialien wurde mit der Dichte ρ berücksichtigt,

weil nur eine Literaturquelle für diese Daten gefunden wurde. In der Regel könnte man sagen, dass gut bekannte Materialeigenschaften eine relative Abweichung von maximal 5 % zeigen.

$\delta g_{\text{numerisch}}$

ANSYS erlaubt während der transienten Berechnung eine automatische Zeitschrittsteuerung, diese enthält die zufällige Auswahl einer Zeitschrittweite für die nächste Berechnung und deswegen gibt es eine zufällige Änderung der Plateaulänge und dementsprechend der Plateausteigung und der Fixpunkttemperatur. Dies wird durch die maximal erlaubte Toleranz der Konvergenzkriterien für die Wärme und die Temperatur beeinflusst. Die Auswahl von geringen festen Zeitschritten ist wegen der Wiederholung der Simulation für die probabilistische Berechnung nicht möglich.

4. Simulationsvorgehen

Die Berechnungen für die einzelnen Fixpunktmaterialien wurden getrennt durchgeführt. Ein Simulationsschritt (Bild 5) bestand aus einer statisch-thermischen Simulation, deren Ergebnis als Ausgangstemperaturverteilung für eine transiente-thermische Simulation benutzt wurde. Die auf dem Temperaturfühler über die Zeit integrierte Temperatur wurde in einer .txt-Datei geschrieben und in Matlab ausgewertet (Bild 2 rechts). Die Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Programmen sowie die probabilistische Berechnung erfolgte in optiSlang [28]. Die probabilistische Berechnungen wurden in vier Schritten für den Fall F1 und in drei Schritten für die Fälle F2 und F3 durchgeführt. Für den Fall F1 wurde im ersten Schritt eine sogenannte Sensitivitätsanalyse mit einer Stichprobe von 250 Simulationen angesetzt. Der Eingangsparameterraum der Stichprobe wurde systematisch mit der Advanced-Latin-Hypercube-Sampling Methode AHLS generiert [3]. Den Eingangsparametern wurden Rechteckverteilungen für die Sensitivitätsanalyse zugewiesen. Korrelation zwischen den Ein- und Ausgangsparametern werden danach ermittelt und daraus sogenannte Antwortflächen berechnet, was als ein neues mathematisches Modell des FEM-Modells mit den sensitivsten, korrelierten Ein- und Ausgangsparametern beschrieben wird. Die Eingangsparameter wurden nach der Sensitivitätsanalyse von 40 zu 3 reduziert (Tabelle 2).

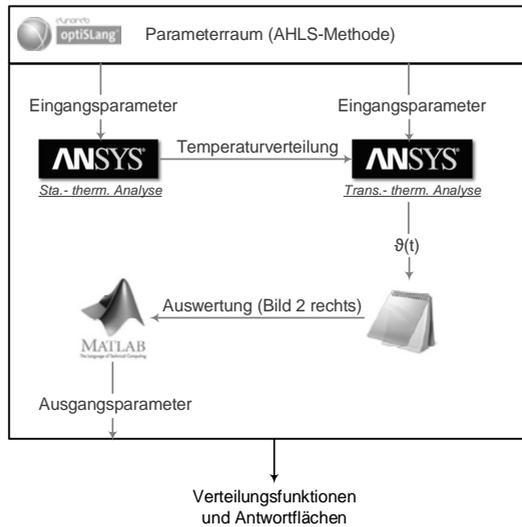


Bild 5: Simulationschritt der probabilistischen Berechnungen

Tabelle 2: Sensitivste Eingangsparemeter auf die Ausgangsparemeter des Modells für jedes Fixpunktmaterial

Fixpunktmaterial	Sensitivste Eingangsparemeter		
In	tk_{13} Bild 3 rechts	Wärmeübergangskoeffizient rb_{16}	λ Isolationswolle
Sn	tk_{13}	rb_{16}	λ Isolationswolle
Zn	tk_{13}	g_{FP} wegen Verunreinigungen	λ Isolationswolle

Nur diese Eingangsparemeter wurden für die nächsten drei Schritte weiterverwendet. Im zweiten Schritt wurde mit einer Stichprobe von 130 Simulationen und derselben Sampling-Methode festgestellt, dass es sich tatsächlich um die sensitivsten Eingangsparemeter handelt, indem die ausgewertete Ausgangsparemeter ($g_{FP,S}$, $I_{FP,S}$ und $m_{FP,S}$) verglichen wurden. Dadurch, dass diese von der eingestellten Ofentemperatur ($\Delta g_{WP,Ofen,S}$) abhängig sind, musste ein Temperaturbereich ausgewählt werden in dem $g_{WP,Ofen,S}$ als konstant berücksichtigt wird. Dies wurde bei $g_{WP,Ofen,S} = \pm 250$ mK definiert. Diese Schwankung wurde mit den Messungen bestätigt und es ist plausibel für die Laborbedingungen während der über mehrere Stunden dauernden Messung der Phasenumwandlungen (Bild 2 links). Im dritten

Schritt wurden die sensitivsten Eingangsparameter zu den Mittelwerten der Ausgangsparameter im zweiten Schritt optimiert. Dies bedeutet, dass die Konstellation der Eingangsparameter gefunden wurde, die als Ergebnis die Mittelwerte der Ausgangsparameter ausgibt. Dies erfolgte innerhalb wenigen Sekunden auf den Antwortflächen und nicht mit mehreren Simulationsschritten. Damit wurden Mittelwerte für die Eingangsparameter gefunden. Im vierten Schritt wurde eine sogenannte Robustheitsbewertung mit einer Stichprobe von 130 Simulationen durchgeführt. Hier wurden zu den im vorigen Schritt gefundene Mittelwerte Standardabweichungen von 5 % hinzugefügt und sie wurden als Normalverteilt für die probabilistische Berechnung definiert. Diesen Wert von 5 % wurde wegen der am häufigsten relative Abweichung der bekannten Stoffeigenschaften ausgewählt. Nach diesem Schritt wurde P_{F_x} (Bild 1 links und Tabelle 3) für die drei Ausgangsparameter jedes Fixpunktmaterials berechnet. Für die Fälle F2 und F3 wurde der erste Schritt nicht durchgeführt. Es wurden die gleichen sensitivsten Parameter von F1 ausgewählt. Der Unterschied bei der Berechnung dieser zwei Fälle lag darin, dass bei der Optimierung der Mittelwerte der Eingangsparameter zu den Mittelwerten der Ausgangsparameter vom zweiten Schritt, diese zusätzlich zu den Messergebnissen gezwungen wurden, d. h. die Mittelwerte der Ausgangsparameter sollten im Bereich der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse liegen.

Tabelle 3: Prognosefähigkeit der einzelnen berechneten Fälle und ihre erweiterte Standardabweichung des Mittelwertes ($k = 2$)

Fall	F1	F2	F3
$P_{F_x,0}, (k = 2)$	50 % ± 24 %	63 % ± 18 %	66 % ± 10 %

6. Ergebnisse

Fünf zusätzliche Simulationen jedes Fixpunktmaterials mit unterschiedlich eingestellter Ofentemperatur für jeden optimierten Fall (insgesamt 45 Simulationen) wurden manuell durchgeführt. Diesmal wurden Stufen und nicht eine Heizrampe für die Heizung definiert. Mit einer Ausgleichsrechnung wurden $\mathcal{G}_{WP_S_fit}$ und $\delta \mathcal{G}_{adiabatisch}$ im durch k_{F_x} definierten Vertrauensintervall, wobei das Ergebnis bekannt ist, ermittelt und daraus wurde die Güte der Simulation unter adiabatischen Bedingungen mit Verwendung der Gleichung 1 berechnet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übereinstimmung der Mess- und Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung ihrer erweiterten Unsicherheiten ($k = 2$)

Fall	F1	F2	F3
$P_{F_{X,0}} (k = 2)$	18 % ± 2 %	19 % ± 4 %	28 % ± 8 %
Verhältnis zu F1	0	1,06 ± 0,35	1,56 ± 0,48

Diese Werte sind relativ klein, aber hier muss betrachtet werden, dass die Messunsicherheiten relativ groß sind (Tabelle 1). Dadurch, dass die Mittelwerte der simulierten Fixpunkttemperaturen des Fall F3 näher an den Mittelwerte der Messung liegen (Bild 6), würde eine Reduzierung der Messunsicherheiten $P_{F_{X,0}}$ erheblich als bei den anderen Fällen erhöhen.

Ferner ist aus der Tabelle 4 zu entnehmen, dass die Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung von Mess- und Simulationsergebnissen bis zu zweimal größer sein kann, wenn das Messsystem bekannt ist.

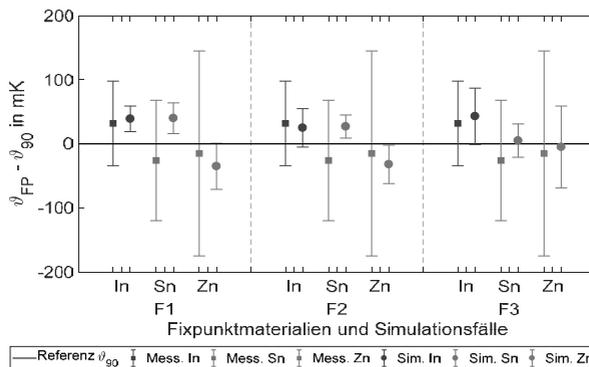


Bild 6: Mess- und Simulationsergebnisse der drei simulierten Fälle. Erweiterungsfaktoren auf der Graphik für die Unsicherheiten der Mess- ($k = 1$) und der Simulationsergebnisse ($k = 2$)

7. Fazit

Das Vorgehen für die Ermittlung der Unsicherheit einer FEM-Simulation, wie in Fall einer Messung gemacht wird: Wiederholen, Reproduzierbarkeit ermitteln und hinterher alle Einflussfaktoren addieren, wurde im diesen Beitrag anhand des Modell einer kleinen-Mehrfachfixpunktzelle vorgestellt. Die Übereinstimmung von Mess- und Simulationsergeb-

nisse mit Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten für drei unterschiedliche Szenarien des FEM-Modell wurde mit einer Validierungsmetrik ermittelt. Daraus ergab sich, dass das Kenntnis des Messsystems, es erlaubt, eine Übereinstimmung der Ergebnisse bis über das 2-Fache mehr zu finden als wenn es unbekannt ist. Darüber hinaus wurde bei der Berechnung der Prognosefähigkeit mit dem hier durchgearbeiteten Beispiel gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Modells der Realität zu entsprechen ohne validiert zu werden, durchaus beschränkt sein kann (Mittelwert P_{Fx} 50 %). Diese Situation bringt die Konsequenz mit sich, dass mit dem Modell durchgeführte Optimierungen nicht unbedingt die Beste Konstellation der optimierten Eingangsparameter und dementsprechend nicht die optimierten Ergebnisse geliefert werden können.

- [1] Oberkampf, W. L. u. Roy, C. J.: Verification and validation in scientific computing. Cambridge: Cambridge University Press 2010
- [2] Ferson, S., Oberkampf, W. L. u. Ginzburg, L.: Model validation and predictive capability for the thermal challenge problem. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 197 (2008) 29-32, S. 2408–2430
- [3] Voigt, M.: Probabilistische Simulation des strukturmechanischen Verhaltens von Turbinenschaufeln. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2009. Dresden: TUDpress Verl. der Wiss 2010
- [4] Preston-Thomas, H.: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Metrologia 27 (1990) 1, S. 3–10
- [5] Marin, S., Hohmann, M., Schalles, M., Krapf, G. u. Fröhlich, T.: Einsatzblock mit einer Mehrfachfixpunktzelle für einen Temperatur-Blockkalibrator. tm - Technisches Messen 82 (2015) 7-8
- [6] Hohmann, M., Marin, S., Schalles, M. u. Fröhlich, T.: Dry Block Calibrator with Improved Temperature Field and Integrated Fixed-Point Cells. International Journal of Thermophysics 38 (2017) 2, S. 2360
- [7] Krapf, G., Schalles, M. u. Fröhlich, T.: Estimation of fixed-point temperatures – A practical approach. Measurement 44 (2011) 2, S. 385–390
- [8] Marin, S., Hohmann, M. u. Fröhlich, T.: Small Multiple Fixed-Point Cell as Calibration Reference for a Dry Block Calibrator. International Journal of Thermophysics 38 (2017) 2, S. 2085
- [9] Incropera, F. P. u. DeWitt, D. P.: Fundamentals of heat and mass transfer. New York, Chichester: Wiley 2002

- [10] Martienssen, W. u. Warlimont, H. (Hrsg.): Metal Forming Data of Ferrous Alloys - deformation behaviour. Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009
- [11] Gancarz, T., Gaşior, W. u. Henein, H.: Physicochemical Properties of Sb, Sn, Zn, and Sb–Sn System. International Journal of Thermophysics 34 (2013) 2, S. 250–266
- [12] Assael, M. J., Armyra, I. J., Brillo, J., Stankus, S. V., Wu, J. u. Wakeham, W. A.: Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Cadmium, Cobalt, Gallium, Indium, Mercury, Silicon, Thallium, and Zinc. Journal of Physical and Chemical Reference Data 41 (2012) 3, S. 33101
- [13] Assael, M. J., Kalyva, A. E., Antoniadis, K. D., Michael Banish, R., Egly, I., Wu, J., Kaschnitz, E. u. Wakeham, W. A.: Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Copper and Liquid Tin. Journal of Physical and Chemical Reference Data 39 (2010) 3, S. 33105
- [14] Friedrich, H. E. u. Mordike, B. L.: Magnesium Technology. [New York]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [15] Shackelford, J. F. u. Doremus, R. H.: Ceramic and glass materials. Structure, properties and processing. New York: Springer 2008
- [16] Binnewies, M. u. Milke, E.: Thermochemical data of elements and compounds. Weinheim [etc.]: Wiley-VCH 1999
- [17] Steinberg, D. J.: A simple relationship between the temperature dependence of the density of liquid metals and their boiling temperatures. Metallurgical Transactions 5 (1974) 6, S. 1341–1343
- [18] Weissbach, W.: Werkstoffkunde. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Viewegs Fachbücher der Technik. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag 2007
- [19] Powell, R. W., Ho, C. Y. u. Liley, P. E.: Thermal conductivity of selected materials. NSRDS-NBS, Bd. 8. Washington: U.S. Gov. Print. Off 1966
- [20] Martienssen, W. u. Warlimont, H.: Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data. [New York]: Springer-Verlag 2005
- [21] VDI e.V.: VDI-Wärmeatlas. 11., bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- [22] Lide, D. R.: CRC handbook of chemistry and physics. A ready-reference book of chemical and physical data. Boca Raton: CRC 2002
- [23] Cardarelli, F.: Materials Handbook. A Concise Desktop Reference. London: Springer-Verlag 2008
- [24] Barin, I.: Thermochemical data of pure substances. New York: VCH 1989

- [25] Schätzing, W., Müller, G., Groth, C. u. Stelzmann, U.: FEM für Praktiker. Basiswissen und Arbeitsbeispiele zur Finite-Element-Methode mit dem FE-Programm ANSYS Rev. 5.5. Edition Expertsoft, 23 ; 44 ; 45 ; 60. Renningen-Malmsheim: Expert-verlag 2000-
- [26] Pearce, J. V., Gisby, J. A. u. Steur, P. P. M.: Liquidus slopes of impurities in ITS-90 fixed points from the mercury point to the copper point in the low concentration limit. Metrologia 53 (2016) 4, S. 1101–1114
- [27] Krapf, G., Mammen, H., Blumröder, G. u. Fröhlich, T.: Influence of impurities on the fixed-point temperature of zinc. Estimations by the SIE method and practical limitations. Measurement Science and Technology 23 (2012) 7, S. 74022
- [28] Methods for multidisciplinary optimization and robustness analysis, Dynardo GmbH, Weimar 2012

Messunsicherheitsbestimmung für Farbkoordinaten und andere integrale Größen aus spektralen Messungen

Franko Schmähling, Gerd Wübbeler, Clemens Elster,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Berlin
Benjamin Ruggaber, Udo Krüger,
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau

Kurzfassung

Die Bestimmung von Farbkoordinaten und anderen integralen Größen, wie z.B. die zentrale Wellenlänge oder eine orts aufgelöste Temperatur, mittels spektraler Messtechnik ist Stand der Technik. Um die Messunsicherheit der integralen Größen zu berechnen, muss nach den entsprechenden metrologischen Richtlinien (GUM) die Messunsicherheit des gemessenen Spektrums bekannt sein. Das gemessene Spektrum stellt eine multivariate Messgröße dar, deren Messunsicherheit durch eine Kovarianzmatrix charakterisiert werden kann. In diesem Beitrag soll vorgestellt werden, wie diese Kovarianzmatrix auf Basis der Messdaten und weiteren Informationen bestimmt wird. Weiterhin soll gezeigt werden, welchen Einfluss Korrelationsstrukturen in der Kovarianzmatrix des Spektrums auf die resultierende Messunsicherheit von integralen Größen haben können.

1. Einführung

Um das emittierte Spektrum, z.B. das Spektrum einer farbigen LED oder das Spektrum eines stark erhitzten Bauteils beim Schweißen zu messen, werden üblicherweise Array-Spektroradiometer bzw. orts aufgelöste Strahldichte/Leuchtdichte-Kameramesssysteme eingesetzt. Darüber hinaus werden diese Messsysteme nicht nur in der Radiometrie und Photometrie [1,2,3] eingesetzt, sondern auch in der Geophysik, Meteorologie [4] bis hin zur Chemie, Biologie und Medizin [5]. Alle Einsatzbereiche haben dabei eine Gemeinsamkeit: im Mittelpunkt steht meist nicht das gemessene Spektrum sondern eine daraus, oft aus einfachen physikalischen Zusammenhängen resultierende, integrale Größe. Die Bestimmung von Messunsicherheiten für die integralen Größen ist in vielen Anwendungen von großer Bedeutung, etwa bei der Beurteilung der Konformität oder beim Nachweis der Konsistenz von Messungen unterschiedlicher Laboratorien.

Das Grundgerüst für die Bestimmung der Messunsicherheit bildet der GUM („Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“) [6], mit seinen Zusatzmaterialien.

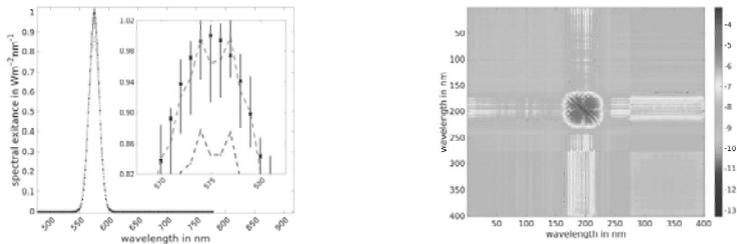


Bild 1 Links: Simulation eines gemessenen Spektrums (gestr. rot) und das Ergebnis der Auswertung (gestr. grün) zusammen mit den erweiterten Unsicherheiten an jeder Wellenlänge (blaue Balken), zusammen dargestellt mit dem synthetischen Spektrum. Rechts: Logarithmischer Plot des Betrages der Kovarianzmatrix des ausgewerteten Spektrums.

Das Konzept basiert auf einer Abbildung, die den Zusammenhang zwischen allen Einflussgrößen und der Messgröße modelliert. Ist diese Abbildung gefunden, kann die Messgröße und die dazugehörige Messunsicherheit anhand der Information über alle Einflussgrößen bestimmt werden. Unglücklicherweise, ist für spektrale Messungen eine explizite Angabe dieser Abbildung auf Grund der Komplexität des Messprozesses (z.B. der Berücksichtigung der Entfaltung des gemessenen Spektrums) nicht in einfacher Weise möglich.

Das Ziel des Artikels ist es, eine allgemein anwendbare Methodik vorzustellen, um die Messunsicherheit eines gemessenen Spektrums angeben zu können. Die Bestimmung der Messunsicherheit der integralen Größen ist anschließend nach den Regeln des GUMs zu bestimmen. Aufgrund der multivariaten Charakteristik der Messgröße Spektrum wird die resultierende Messunsicherheit als Kovarianzmatrix dargestellt. Der Einfluss der Kovarianzen auf die Messunsicherheiten der integralen Größen, am Beispiel der Farbkoordinate, wird im zweiten Teil des Artikels im Fokus stehen.

2. Auswertung spektraler Messungen

Die Auswertung spektraler Messungen soll auf folgenden Modell basieren

$$\mathbf{S} = \text{Deconv}(\tilde{\mathbf{S}}, H) - \mathbf{\Delta}, \quad (1)$$

mit

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{c} \otimes \tilde{\mathbf{S}}_{ind} \otimes \mathbf{v}_{nonlinSAT} \otimes \mathbf{v}_{nonlinIT} + \mathbf{v}_{DSNU} + \mathbf{v}_{DS},$$

und

$$\tilde{\mathbf{S}}_{ind}(\lambda_k) = \mathbf{S}_{ind}(\lambda_k - \Delta_{\lambda,k}),$$

wobei $\text{Deconv}(f, H)$ die Entfaltung der Funktion f mit dem Faltungskern H darstellt und $\mathbf{\Delta}$ steht für den Vektor aller systematischen Korrekturen infolge Entfaltung. Der Operator \otimes steht für die komponentenweise multiplikative Verknüpfung von zwei Vektoren gleicher Dimension und \mathbf{S}_{ind} repräsentiert die Daten des gemessenen Spektrums als Vektor.

Das Modell (1) besitzt einen stark nichtlinearen Zusammenhang bzgl. einiger Eingabegrößen, weshalb eine Propagation über eine Linearisierung nicht ratsam ist. Die Verwendung der Monte-Carlo-Technik ist als Mittel der Propagation zu empfehlen, welche eine Wahrscheinlichkeitsdichte als komplette Beschreibung der Messunsicherheit erzeugt. Dieses Vorgehen ist im Detail im Algorithmus 1 (Abbildung 1) beschrieben.

Algorithm 1 Evaluating a spectral measurement

```

1: Input:  $M$ , kernel function  $H$ , all parameters of the distributions used below
2: Output:  $\hat{\mathbf{S}}, \mathbf{U}_{\mathbf{S}}$ 
3: for  $k = 1$  until  $M$  do
4:    $\mathbf{v}_{DS} \sim N(\widehat{v}_{DS}, u^2(v_{DS}))(1, \dots, 1)^T$ 
5:    $\mathbf{v}_{DSNU} \sim N(\widehat{v}_{DSNU}, \mathbf{U}_{v_{DSNU}})$ 
6:    $\mathbf{v}_{nonlinIT} \sim N(\widehat{v}_{nonlinIT}, \mathbf{U}_{v_{nonlinIT}})$ 
7:    $\mathbf{v}_{nonlinSAT} \sim N(\widehat{v}_{nonlinSAT}, \mathbf{U}_{v_{nonlinSAT}})$ 
8:    $\mathbf{c} \sim N(\widehat{c}, \mathbf{U}_{\mathbf{c}})$ 
9:    $\mathbf{\Delta} \sim N(\widehat{\mathbf{\Delta}}, \mathbf{U}_{\mathbf{\Delta}})$ 
10:   $\mathbf{\Delta}_{\lambda} \sim N(\widehat{\mathbf{\Delta}}_{\lambda}, \mathbf{U}_{\mathbf{\Delta}_{\lambda}})$ 
11:   $\mathbf{S}_{ind} \sim N(\widehat{\mathbf{S}}_{ind}, \mathbf{U}_{\widehat{\mathbf{S}}_{ind}})$ 
12:   $\tilde{\mathbf{S}}_{ind}(\lambda_k) = \mathbf{S}_{ind}(\lambda_k - \mathbf{\Delta}_{\lambda,k})$ 
13:   $\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{c} \cdot * \tilde{\mathbf{S}}_{ind} \cdot * \mathbf{v}_{nonlinSAT} \cdot * \mathbf{v}_{nonlinIT} + \mathbf{v}_{DSNU} + \mathbf{v}_{DS}$ 
14:   $\mathbf{S}_k = \text{Deconv}(\tilde{\mathbf{S}}, H) - \mathbf{\Delta}$ 
15: end for
16: return calculate  $\hat{\mathbf{S}}$  and  $\mathbf{U}_{\mathbf{S}}$ 

```

Bild 2: „Pseudocode“ für die Auswertung von spektralen Messungen, mit dem Ziel der Schätzung eines Spektrums und der dazugehörigen Messunsicherheit (hier Kovarianzmatrix, da das Spektrum eine multivariate Messgröße darstellt)

Die Wahrscheinlichkeitsdichten der Eingangsgrößen sind in Tabelle 1 dargestellt. Für eine detaillierte Darstellung des Verfahrens, sowie eine Beschreibung der Eingangsgrößen und die Ermittlung deren Wahrscheinlichkeitsdichten siehe [7].

Input quantity	Symbol	Probability distribution	Parameters
Dark signal	v_{DS}	$N(\bar{v}_{DS}, \sigma^2(v_{DS}))(1, \dots, 1)^T$	$\bar{v}_{DS} = 0, \sigma(v_{DS}) = 0.005\%$
Dark signal non-unif.	v_{DSNU}	$N(\bar{v}_{DSNU}, \mathbf{U}_{v_{DSNU}})$	$\bar{v}_{DSNU} = \mathbf{0}, \mathbf{U}_{v_{DSNU}} = 0.001\% \cdot \mathbf{I}$
Non-linearity integr. time	v_{nlIntT}	$N(\bar{v}_{nlIntT}, \mathbf{U}_{v_{nlIntT}})$	$\bar{v}_{nlIntT} = \mathbf{0}, \mathbf{U}_{v_{nlIntT}} = 0.06\% \cdot \mathbf{I}$
Non-linearity sat.	$v_{nlInSAT}$	$N(\bar{v}_{nlInSAT}, \mathbf{U}_{v_{nlInSAT}})$	$\bar{v}_{nlInSAT} = \mathbf{0}, \mathbf{U}_{v_{nlInSAT}} = 0.005\% \cdot \mathbf{I}$
Indicated spectral power distribution	\mathbf{S}_{ind}	$N(\bar{\mathbf{S}}_{ind}, \mathbf{U}_{\mathbf{S}_{ind}})$	$\bar{\mathbf{S}}_{ind}, \mathbf{U}_{\mathbf{S}_{ind}} = 2\% \cdot \mathbf{I}$
Calibration responsivity scale	\mathbf{c}	$N(\bar{\mathbf{c}}, \mathbf{U}_{\mathbf{c}})$	cf. publication in Color, Research and Application (in press)
Calibration wavelength scale	Δ_λ	$N(\bar{\Delta}_\lambda, \mathbf{U}_{\Delta_\lambda})$	cf. publication in Color, Research and Application (in press)
Stray light and band pass corr.	Δ	$N(\bar{\Delta}, \mathbf{U}_\Delta)$	$\bar{\Delta} = \mathbf{0}, \mathbf{U}_\Delta = 1\% \cdot \mathbf{I}$

Bild 3: Wahrscheinlichkeitsdichten der Eingangsgrößen

3. Korrelationen und Ihre Auswirkungen

In Abhängigkeit der Ausprägung des gemessenen Spektrums und der Wahrscheinlichkeitsdichten der Eingangsgrößen kann die Kovarianzmatrix starke nicht-diagonale Einträge besitzen. Das Ziel dieses Abschnittes ist es, den Einfluss der nicht-diagonalen Elemente bei der Bestimmung der Messunsicherheit von integralen Größen aufzuzeigen. Weiterhin ist die Größe der Kovarianzmatrix für das gemessene Spektrum abhängig von der Auflösung des Messinstrumentes und kann Größen von 1024x1024 und größer annehmen. Um den Nutzer die Weitergabe sowie die mathematische Handhabbarkeit zu erleichtern, soll gezeigt werden, welche Möglichkeiten es gibt, die Größe der Matrix zu reduzieren, ohne Verluste bei der Propagation der Messunsicherheit zu erhalten.

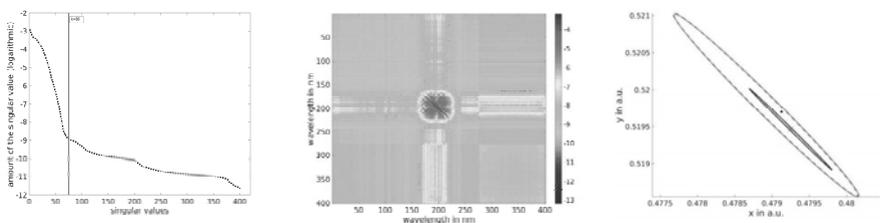


Bild 4 Links: Logarithm. Plot der Beträge der Singulärwerte. Ab dem k=80-ten Singulärwert (k=80) werden keine signifikanten Beiträge mehr bzgl. der Approximation der Kovarianzmatrix beobachtet. Mitte Logarithm. Plot des Betrages der approximierten Kovarianzmatrix (Vergleich hierzu mit Bild 1). Rechts: Farbkoordinate mit 95% Überdeckungsbereich (grün), bei Vernachlässigung der Korrelation (blau), Verwendung Singulärwertzerlegung (rot gestrichelt).

Die einfachste Art der Reduktion der Größe der Kovarianzmatrix besteht darin, alle nicht-diagonalen Elemente auf Null zu reduzieren, d.h. nur die Varianzen zu propagieren. Allerdings kann dies zu einer unzureichenden Abschätzung der Messunsicherheiten bei integralen Größen führen. Im ungünstigsten Fall kann dabei die Messunsicherheit sogar grob unterschätzt werden (s. Bild 4). Einen Ausweg bietet die Zerlegung der Kovarianzmatrix in signifikante Bestandteile via der Singulärwertzerlegung (SVD) (Details s. [7]). Typischerweise fallen die Beträge der Singulärwerte sehr schnell ab, so dass um eine gute Approximation der ursprünglichen Kovarianzmatrix zu erreichen, meist nur wenige Singulärwerte benutzt werden, siehe dazu Bild 4. Auf diese Art und Weise ist es möglich, die Größe der Kovarianzmatrix erheblich zu reduzieren. Konkret hängt dies jedoch von der Struktur der Kovarianzmatrix ab und damit wiederum vom gemessenen Spektrum und den Wahrscheinlichkeitsdichten der Eingangsgrößen. Zur Illustration ist in Bild 4 die Farbkoordinate und deren Messunsicherheit als 95% Überdeckungsbereich dargestellt, berechnet jeweils mit der original Kovarianzmatrix und der komprimierten (Reduzierung um 80%) Kovarianzmatrix der SVD-Zerlegung (rot gestrichelt) und unter Nichtbeachtung aller Kovarianzen (blau).

4. Zusammenfassung

Ein Spektrum stellt eine multivariate Messgröße dar. Aufgrund der Komplexität des Messprozesses kann die Modellgleichung für die Auswertung nicht in expliziter Art dargestellt werden, jedoch als Algorithmus, d.h. das Modell der Auswertung ist der Algorithmus. Bei gegebenen Wahrscheinlichkeitsdichten für die einzelnen Eingangsgrößen des Auswertalgorithmus kann das Spektrum als auch die dazugehörige Messunsicherheit, die aufgrund der multivariaten Charakteristik eine Kovarianzmatrix ist, geschätzt werden. Je nach gemessenem Spektrum und gegebenen Wahrscheinlichkeitsdichten der Eingangsgrößen sind die nicht-diagonalen Elemente ungleich Null und damit wichtig bei der Propagation der Messunsicherheit für integrale Größen. Eine praktikable Lösung, auch ohne die Weitergabe der vollständigen Matrix die korrekte Messunsicherheit für integrale Größen bestimmen zu können, bietet die Singulärwertzerlegung der Kovarianzmatrix. Dabei wird nur ein Bruchteil aller möglichen Singulärwerte und dazugehörigen (Singulär)vektoren verwendet um die Kovarianzmatrix ausreichend zu approximieren.

- [1] T. A. Germer, J.C. Zwinkels and B. K. Tsai, *Spectrophotometry: accurate measurement of optical properties of materials*. Academic Press, 2014
- [2] N. Pousset, B. Rougi and A. Razet, *Uncertainty evaluation for measurement of LED colour by Monte Carlo simulations*, *Metrologia*, vol. 46, no. 6, pp. 704-718, 2009
- [3] E. Woolliams, *Determining the uncertainty associated with integrals fo spectral quantities* (final report of the EMRP eng05), techn report, NPL, GB, April 2013.
- [4] R.R. Cordero, G. Seckmeyer, S. Riechelmann, A. Damiani and F. Labbe, *Monte-Carlo based uncertainty analysis of UV array spectroradiometers*, *Metrologia*, vol. 49, no. 6, pp. 745-755, 2012
- [5] J.C. Zwinkels, *Errors in colorimetry caused by the measuring instrument*, *Textile Chemist and Colorist*, vol. 21, no. 21, no. 2, pp. 23-29, 1989
- [6] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML and IUPAP, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM, 2016
- [7] F. Schmähling, G. Wübbeler, U. Krüger, B. Ruggaber, F. Schmidt, R.D. Taubert, A. Sperling and C. Elster, *Uncertainty evaluation and propagation for spectral measurements*, *Color, Research and Applications*, accepted (Juli 2017) (in press)

Die Revision der ISO/IEC 17025 und ihre Auswirkung auf die metrologische Rückführbarkeit und die Ermittlung der Messunsicherheit

Dr. rer. nat. **Martin Czaske**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig;
Magda Kemper,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin

Kurzfassung

Die ISO/IEC 17025 [1] befindet sich in Überarbeitung und wird voraussichtlich noch vor Ende 2017 in der Neufassung erscheinen. Ihre Struktur unterscheidet sich grundlegend von der derzeit gültigen Fassung ISO/IEC 17025:2005 [2] und folgt dem neuen Konzept, das ISO CASCO für alle Normen der Serie ISO/IEC 17000 eingeführt hat. Die Anforderungen an die metrologische Rückführbarkeit sind in der neuen Fassung verdichtet worden. Der Bezug auf das Internationale Wörterbuch der Metrologie (VIM) [3] ist gegeben. Meistens wird nicht mehr zwischen Kalibrier- und Prüflaboratorien unterschieden. Zur Ermittlung der Messunsicherheit wird vorrangig auf den Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) [4] und seine Ergänzungen Bezug genommen. Entscheidungsregeln, die angeben, wie die Messunsicherheit bei Konformitätsaussagen berücksichtigt wird, sind nun explizit in der Norm angesprochen. Bei der Anwendung einer Entscheidungsregel muss das damit verbundene Risiko berücksichtigt werden.

Im Vortrag werden diese Aspekte der neuen ISO/IEC 17025 dargestellt und näher erläutert.

1. Wesentliche Änderungen

Die überarbeitete ISO/IEC 17025 liegt inzwischen im Endentwurf vor (Final Draft International Standard, FDIS) [1] (im Folgenden als „Norm“ bezeichnet). Die Norm wird voraussichtlich noch vor Ende 2017 erscheinen. Sie hat eine völlig andere Struktur als die derzeit gültige Fassung ISO/IEC 17025:2005 [2] und folgt dem neuen Konzept, das ISO CASCO für alle Normen der Serie ISO/IEC 17000 eingeführt hat. Die bisher üblichen Anforderungen an das Management (Kapitel 4 in ISO/IEC 17025:2005) und Technischen Anforderungen (Kapitel 5 in ISO/IEC 17025:2005) wurden in eine neue Struktur umgesetzt. Die Anforderungen sind nun in den folgenden Kapiteln dargestellt:

- 4 Allgemeine Anforderungen,
- 5 Strukturelle Anforderungen,
- 6 Anforderungen an Ressourcen,
- 7 Anforderungen an Prozesse, 8 Anforderungen an das Managementsystem.

Alternativ darf an Stelle des Kapitels 8 auch die aktuelle ISO 9001 umgesetzt werden (8.1.3 Option B). Dabei muss das Managementsystem auf das Laboratorium bezogen sein. In beiden Fällen müssen die Anforderungen der Kapitel 4 bis 7 erfüllt werden.

Die metrologische Rückführbarkeit (bisher messtechnische Rückführung, Abschnitt 5.6 in ISO/IEC 17025:2005) ist Teil des Kapitels 6 (Abschnitt 6.5). Ergänzend kommt der informative Anhang A hinzu. Die Ermittlung der Messunsicherheit (Abschnitt 5.4.6 in ISO/IEC 17025:2005) befindet sich im Abschnitt 7.6 im Kapitel 7.

Die Norm bezieht sich auf Laboratorien. Diese sind erstmals in der Norm definiert als Stellen, die Prüfungen, Kalibrierungen oder Probenahmen durchführen verbunden mit anschließender Prüfung oder Kalibrierung (Abschnitt 3.6).

Die Anforderungen sind knapper formuliert als in der ISO/IEC 17025:2005. Die metrologische Rückführbarkeit bezieht sich weiterhin auf das „Internationale Einheitensystem“ und die Grundlage für die Ermittlung der Messunsicherheit bilden der „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ [4] und seine Supplements.

Erstmals werden Risiken und Chancen genannt. Das zeigt sich u.a. darin, dass einige vorschreibende Anforderungen durch leistungsorientierte Anforderungen ersetzt wurden. Die Anforderungen für Prozesse, Verfahren, dokumentierte Informationen und organisatorische Verantwortlichkeiten sind flexibler als bisher. Neu hinzugekommen sind Entscheidungsregeln (decision rules).

2. Metrologische Rückführbarkeit

Basis für die metrologische Rückführbarkeit ist die Definition aus dem Internationalen Wörterbuch der Metrologie (VIM) [3] (s. dort 2.41 bis 2.43). Das Laboratorium muss sicherstellen,

dass seine Messergebnisse auf das Internationale Einheitensystem (Système international d'unités; SI) rückführbar sind auf einem der folgenden drei Wege:

- durch Kalibrierung durch ein kompetentes Laboratorium,
- durch zertifizierte Merkmalswerte von zertifizierten Referenzmaterialien mit deklarerter metrologischer Rückführbarkeit zum SI,
- oder durch direkte Realisierung der SI-Einheiten, die durch direkten oder indirekten Vergleich mit nationalen oder internationalen Normalen sichergestellt wird. Hierzu wird auf die SI-Broschüre des BIPM [12] hingewiesen.

Nationale Metrologieinstitute werden hierbei nicht mehr explizit genannt, nur noch im informativen Anhang A „Metrologische Rückführbarkeit“. In diesen sind unterschwellig auch Anforderungen aus ILAC-P10 [6] eingeflossen.

Zwischenprüfungen sind jetzt nicht mehr unter der metrologischen Rückführbarkeit aufgeführt, sondern im Abschnitt 6.4 über Einrichtungen.

Auch die meisten anderen Inhalte des Abschnitts 5.6.3.1 „Bezugsnormale und Referenzmaterialien“ der ISO/IEC 17025:2005 stehen jetzt im Abschnitt über Einrichtungen. Dies schließt die Handhabung der Normale ein. Abschnitt 6.4 enthält außerdem Anforderungen an die Kalibrierung von Messeinrichtungen.

Die o.g. zertifizierten Referenzmaterialien werden als Normale angesehen. Der entsprechende Referenzmaterialhersteller gilt als kompetent, wenn er die ISO 17034 [8] erfüllt.

Damit wird deutlich, dass die Anforderung an die metrologische Rückführbarkeit in ihrer Gesamtheit erhalten bleibt.

3. Messunsicherheit

Die Anforderungen an die Ermittlung der Messunsicherheit (measurement uncertainty) wurden neu formuliert. Statt „Schätzung der Messunsicherheit“ heißt es jetzt wie im GUM [4] „Ermittlung der Messunsicherheit“. Die Anforderungen an Kalibrierlaboratorien haben sich nicht geändert. Für Prüflaboratorien sind die Anforderungen prinzipiell die gleichen; allerdings sind Ausnahmen in Anmerkungen beschrieben. Anmerkungen sind informativ und stellen keine Anforderungen dar. Die Norm verweist vorrangig auf den GUM [4], der als Grundlage zur Ermittlung der Messunsicherheit dient. Die Literaturhinweise der Norm enthalten auch die GUM-Supplements.

An einigen Stellen in der Norm wird immer noch der qualitative Begriff „Messgenauigkeit“ (zum Begriff s. z.B. [5]) neben der Messunsicherheit verwendet. Dieser wird in der ISO 5725

[10] benutzt, die weiterhin in der Norm zitiert wird, mit statistischen Methoden arbeitet und nicht mit VIM [5] und GUM konsistent ist. Die ebenfalls zitierte ISO 21748 nimmt Bezug auf den GUM und ISO 5725. In der aktuellen Fassung (April 2017) [7] heißt es dazu in der Einleitung „ISO/IEC Guide 98-3 is a widely adopted standard approach. However, it applies to situations where a model of the measurement process is available. A very wide range of standard test methods is, however, subjected to collaborative study in accordance with ISO 5725-2 [11]. This document provides an appropriate and economic methodology for estimating uncertainty associated with the results of these methods, which complies fully with the relevant principles of the GUM, while taking account of method performance data obtained by collaborative study.“

In Kalibrierscheinen (Abschnitt 7.8.4.1 der Norm [1]) ist die Anforderung über die Angabe der Messunsicherheit nun detaillierter: „a) die Messunsicherheit des Messergebnisses, angegeben in der gleichen Einheit wie die der Messgröße oder als relative Messunsicherheit (z. B. in Prozent)“. Auch in Prüfberichten muss, wenn anwendbar, die Messunsicherheit angegeben werden (Abschnitt 7.8.3.1 c) der Norm).

Wie bisher sind Konformitätsaussagen zulässig (Abschnitt 7.8.6.1 der Norm). Diese müssen nun an Hand von Entscheidungsregeln (Abschnitt 3.7 der Norm) getroffen werden (Abschnitt 7.1.3 der Norm). Die Regeln dazu vereinbart das Laboratorium mit dem Kunden. Das Risiko der Entscheidung (z. B. die Wahrscheinlichkeit einer falsch positiven oder falsch negativen Konformitätsaussage) muss im Kalibrierschein bzw. Prüfbericht genannt werden. Zur Auswahl von Entscheidungsregeln wird in der Norm der ISO/IEC Guide 98-4 (JCGM 106:2012) [9] genannt, in dem unterschiedliche Entscheidungsregeln, bei denen die Messunsicherheit berücksichtigt ist, beschrieben sind.

Nach Anhang A (informativ, keine Anforderung) Abschnitt A.2.3 ist es zulässig, unter bestimmten dort beschriebenen Bedingungen, Ergebnisberichte, die eine Konformitätsaussage bzgl. einer Spezifikation, aber keine Messwerte enthalten, als Nachweis der metrologischen Rückführbarkeit zu verwenden.

4. Zusammenfassung

In der neu revidierten ISO/IEC 17025, die voraussichtlich Ende 2017 veröffentlicht wird, sind die grundlegenden Anforderungen zur metrologischen Rückführbarkeit und Ermittlung der Messunsicherheit erhalten geblieben. Dies wird dadurch deutlich, dass die Bezüge zu den

internationalen Regelwerken gegeben sind: Zur metrologischen Rückführbarkeit wird auf die SI-Broschüre „International System of Units“ [12] Bezug genommen, und das internationale Regelwerk “Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)” [4] bildet weiterhin die Basis für die Ermittlung der Messunsicherheit.

Literatur

- [1] ISO/IEC FDIS 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, deutsche Fassung: FprEN ISO/IEC 17025:2017 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien
- [2] DIN EN ISO/IEC 17025:2005 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005)
- [3] Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM), DIN, 4. Auflage 2012 (ISO/IEC-Leitfaden 99:2007, auch JCGM 200:2008)
- [4] Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (ISO/IEC Guide 98-3:2008, JCGM 100:2008)
- [5] Prenesti, E.; Gosmaro, F.: Trueness, precision and accuracy: a critical overview of the concepts as well as proposals for revision; *Accred Qual Assur* (2015) 20:33–40, DOI 10.1007/s00769-014-1093-0
- [6] ILAC-P10:01/2013 ILAC Policy on the Traceability of Measurement Results (<http://ilac.org/publications-and-resources/ilac-policy-series/>)
- [7] ISO 21748:2017 Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation
- [8] DIN EN ISO 17034 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Referenzmaterialherstellern (ISO 17034:2016); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 17034:2016
- [9] ISO/IEC Guide 98-4:2012 Uncertainty of measurement – Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment (JCGM 106:2012)
- [10] DIN ISO 5725-1 Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe (ISO 5725-1:1994). ISO 5725 hat insgesamt 6 Teile.
- [11] DIN ISO 5725-2 Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 2: Grundlegende Methode für Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens (ISO 5725-2:1994 einschließlich Technisches Korrigendum 1:2002) Ausgabe 2002-12
- [12] International System of Units (SI), BIPM, 8th edition, 2006, updated in 2014

Einsatz von Monte-Carlo-Methoden zur Bestimmung der Kennlinienunsicherheit

Anwendung auf die Berechnung der Unsicherheit von Thermometerkennlinien

Dr.-Ing. **Marc Schalles**, Dr.-Ing. **Michael Hohmann**,
Institut für Prozessmess- und Sensortechnik Technische Universität
Ilmenau, Ilmenau

Kurzfassung

Kennlinien von Thermometern werden mit Hilfe von Regressionsverfahren aus Kalibrierwerten bestimmt. Die Unsicherheit dieser neuen Kennlinie hängt von der Unsicherheit der Kalibrierwerte, der Anzahl der Kalibrierwerte, der Regressionsmethode und dem Kennlinienansatz ab. Die Ermittlung der Unsicherheit gestaltet sich in der Praxis oft schwierig, da die Berechnung aufwendig ist und kein genereller Ansatz zur Unsicherheitsermittlung existiert. Eine transparente, modellbasierte Möglichkeit der Unsicherheitsermittlung bietet die Monte-Carlo-Methode, bei der mittels stochastischer Methoden unter Vorgabe des Kennlinientyps, der Kalibrierwerte und deren Unsicherheiten eine Berechnung der Kennlinienunsicherheit möglich ist. Am Beispiel der Standardkennlinie von Widerstandsthermometern wird diese Methode vorgestellt und die Berechnung erläutert.

1. Einleitung

Thermometer werden innerhalb eines interessierenden Temperaturintervalls in der Regel an n Kalibrierpunkten kalibriert. Bei diesen Kalibrierungen werden die n Wertepaare (T_n, Y_n) , bestehend aus Referenztemperatur T_n und Ausgangsgröße Y_n des Thermometers bestimmt und in einem Kalibrierschein bereitgestellt. Aus diesen kann dann mittels geeigneter Interpolations- oder Approximationsverfahren eine neue Thermometerkennlinie $Y = f(T)$ ermittelt werden. Für häufig verwendete Temperaturmessprinzipien sind die Kennlinienansätze der Thermometer genormt [1-3] beziehungsweise Stand der Technik. Die geeignete Wahl eines Kennlinienansatzes und einer Methode zur Kennlinienschatzung werden vorausgesetzt und sind nicht Gegenstand dieses Beitrages. Es sei hierzu auf [4] verwiesen, die Hinweise dazu und auch Informationen zu geeigneter Wahl der Anzahl und Verteilung von Kalibrierpunkten enthält.

Die Kennlinien von PTC-Widerstandsthermometern sind in der Regel Polynome der Ordnung $m \leq 3$. Ihre Koeffizienten werden in der industriellen Praxis aus den Wertepaaren der Kalibrierung direkt ermittelt. Obwohl in [4] zur sicheren Kennlinienschätzung bei bekannten Sensortypen ein Freiheitsgrad $n - m \geq 2$ und bei unbekanntem Sensortypen $n - m \geq 10$ empfohlen ist, beträgt die Anzahl der Kalibrierpunkte in der industriellen Praxis aufgrund der zusätzlichen Kalibrierkosten je Kalibrierpunkt meist $n = m$ oder $n = m + 1$. Die Kennlinien werden zumeist mit vorhandener Standardsoftware interpoliert oder nach dem unter Minimierung der Restquadratsumme zwischen den Funktionswerten der an den Kalibrierpunkten ausgewerteten geschätzten Kennlinie und den gemessenen Kalibrierpunkten approximiert.

Standardkennlinien von Thermoelementen sind Polynome höherer Ordnung, weshalb bei Kalibrierungen mit geringer Anzahl an Kalibrierpunkten meist Abweichungspolynome von den Standardkennlinien der Ordnung $m \leq 3$ bestimmt werden. In eingeschränkten Temperaturintervallen können je nach Thermoelementtyp auch direkt Kennlinien niedriger Ordnung geschätzt werden.

Unabhängig davon, ob Abweichungspolynome oder Kennlinien direkt bestimmt werden, ergibt sich die Unsicherheit der ermittelten Kennlinie aus der Unsicherheit der mathematischen Kennlinienbestimmung u_{kenn} und der Unsicherheit der Kalibrierung u_{kal} , bestimmt durch die individuelle Unsicherheit $u(T_n)$ und $u(Y_n)$ der Wertepaare an den Kalibrierpunkten. Methoden zur Abschätzung von u_{kenn} werden in [4-6] für Interpolations- und Approximationsverfahren vorgegeben. Auch werden Möglichkeiten zur Berücksichtigung von u_{kal} bei der Kennlinienermittlung gegeben. Diese werden in der Praxis jedoch nicht einheitlich angewandt oder können in praktischen Fällen zu wenig plausiblen Unsicherheitskennlinien $u(T)$ führen.

Deshalb wird in diesem Beitrag ein alternatives Verfahren präsentiert, das mittels Monte-Carlo-Methoden eine Abschätzung der Kennlinienunsicherheit als Funktion der Temperatur ermöglicht. Die Vorteile des gezeigten Verfahrens liegen in der guten Nachvollziehbarkeit und der Anwendbarkeit auf unterschiedlichste Kennlinienansätze sowie der, im Vergleich zu analytischen Verfahren bspw. aus [6], einfachen Implementierung in geeignete Softwarelösungen. Sie wird am Beispiel von Kennlinien von Platinwiderstandsthermometern diskutiert.

2. Ermittlung der Kennlinienunsicherheit nach DAkS-DKD-R 5-6

In der Richtlinie DAkS-DKD-R 5-6 [4] ist ein Beispieldatensatz zum Test der Kennlinienermittlung von Pt100-Kennlinien gegeben. Auf diesen Datensatz (Tabelle 1) sind

Tabelle 1: Testdatensatz nach [4]

Temperatur in °C	Widerstand in Ω	Messunsicherheit ($k = 1$)		Wichtungsfaktor	
		$u(R_i)$ in m Ω	$u(T_i)$ in mK	in m Ω ²	normiert
0,010	100,0054	2	5	0,0625	1,591981
417,765	253,3138	5	12,5	0,01	0,254717
303,988	213,5463	5	12,5	0,01	0,254717
200,000	175,9075	3	7,5	0,0277778	0,707547

hier verschiedene Methoden der Unsicherheitsermittlung angewendet worden, deren Ergebnisse im Folgenden erläutert werden. Es wird in allen Fällen eine Callendar-van-Dusen-Kennlinie für den Temperaturbereich $T \geq 0$ °C mit den drei freien Parametern a_i bestimmt:

$$Y(T) = R(T) = a_0(1 + a_1T + a_2T^2). \quad (1)$$

Die folgenden Abschnitte erläutern die Einzelbeiträge der im angewandten Verfahren ermittelten Kennlinienunsicherheit.

2.1. Unsicherheit der Kennlinienschätzung

Für die ermittelte Kennlinie kann nach [4] die Unsicherheitsberechnung der Kennlinienbestimmung für Kennlinieninterpolation und Kennlinienapproximation nach folgenden Gleichungen erfolgen:

Interpolation

Zwischen den Kalibrierpunkten kann die Unsicherheit wie folgt berechnet werden:

$$u_{\text{kenn}}^2(Y(T)) = \sum_{i=0}^n \left[\left(\frac{\delta Y}{\delta T_i} \right)^2 \cdot u^2(T_i) \right]. \quad (2)$$

An den Kalibrierpunkten gilt $u_{\text{kenn}}(Y(T_i)) = u(R_i)$.

Approximation

Bei Approximation einer Kennlinie wird die Unsicherheit zwischen den Kalibrierpunkten wie folgt ermittelt:

$$u_{\text{kenn}}^2(Y(T)) = \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\delta Y}{\delta a_i} \right) \cdot u^2(a_i) \right] + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{l=i+1}^m \left[\left(\frac{\delta Y}{\delta a_i} \right) \cdot \left(\frac{\delta Y}{\delta a_l} \right) \cdot u(a_i, a_l) \right]. \quad (3)$$

An den Kalibrierpunkten gilt

$$u_{\text{kenn}}^2(Y(T)) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n [Y_i(T_i) - f(T_i, a_1, a_2 \dots a_m)]^2. \quad (4)$$

Obwohl ein Freiheitsgrad $d = m - n > 2$ für Kennlinienermittlungen gefordert ist, werden in der Praxis häufig Kennlinienbestimmungen mit $d = 1$ oder $d = 0$ vorgenommen. Diese Freiheitsgrade liegen vor, wenn man sich aus dem DKD-Testdatensatz drei bzw. vier Kalibrierpunkte auswählt und mit diesen die Kennlinie (1) und deren Standardunsicherheit ermittelt.

Es ergeben sich die im folgenden Diagramm dargestellten Unsicherheiten u_{kenn} gemäß [4]. Dargestellt sind zusätzlich die Unsicherheiten der zur Ermittlung verwendeten Kalibrierpunkte $u(R_i)$. Bei Approximation der Kennlinie, $d = 1$, wurde zusätzlich der vierte Kalibrierpunkt bei 303,988 °C verwendet.

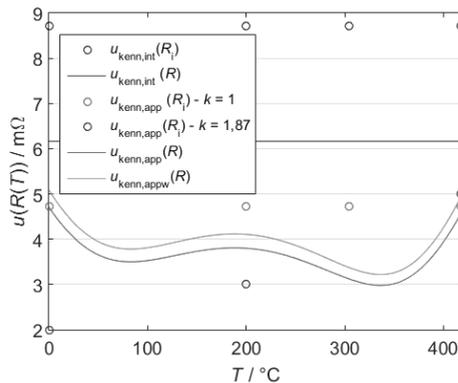


Bild 1: Unsicherheit der Kennlinienschätzung u_{kenn} bei Interpolation oder Approximation einer CvD-Kennlinie unter Berücksichtigung von $u(R_i)$. Das Vertrauensniveau ist $p = 68,27 \%$.

Bei Interpolation, $d = 0$, ergibt sich die Unsicherheit $u_{\text{kenn,int}}$ der Kennlinie aus (2). Sie ist im ganzen betrachteten Intervall zwischen den Kalibrierpunkten konstant. An den Stützstellen ist die Unsicherheit $u_{\text{kenn,int}}(R(T_i))$ gleich der Unsicherheit der Kalibrierpunkte. Bei der Approximation ergibt sich nach (3) ein für quadratische Funktionen typischer, zu den Messbereichsenden hin ansteigender Unsicherheitsverlauf $u_{\text{kenn,app}}$. Die Unsicherheit an den Kalibrierpunkten $u_{\text{kenn,app}}(R(T_i))$ ergibt sich aus der Summe der Abweichungsquadrate der Kennlinie zu den Stützstellen, die jeweils einen Schätzwert der Standardabweichung der Kennlinienabweichung darstellen. Um dem Einfluss der Unsicherheit einzelner Stützstellen auf die Gesamtunsicherheit Rechnung zu tragen, sind in [7] für niedrige Freiheitsgrade höhere Erweiterungsfaktoren k der Unsicherheit vorgesehen. Für die hier dargestellte Approximation mit $d = 1$ und Vertrauensniveau 68,27 %, müsste anstelle des Erweiterungsfaktors $k = 1$, der Erweiterungsfaktor $k = 1,87$

verwendet werden. Beide Fälle sind im Diagramm dargestellt. In der Praxis wird dies häufig nicht berücksichtigt.

Eine andere in der Richtlinie vorgeschlagene Methode der Kennlinienapproximation nutzt die Wichtung der Kalibrierpunkte bei Kennlinienermittlung. Hierbei werden Kalibrierpunkte mit höherer Unsicherheit mit einem geringeren Wichtungsfaktor beaufschlagt (Tab.1, rechte Spalte). Sie beeinflussen somit die Kennlinienschätzung weniger stark. Die Unsicherheit dieser Methode ist $u_{\text{kenn,appw}}$.

Gut zu erkennen sind in allen Fällen die Unterschiede bei Betrachtung der Unsicherheit an den Kalibrierpunkten zur Unsicherheit des vollständigen Kennlinienverlaufs, die rein mathematisch begründet sind.

2.2. Berücksichtigung der Unsicherheit der Kalibriermethode

Die zuvor dargestellten Beiträge u_{kenn} beschreiben allein die Unsicherheit der Kennlinienermittlung. Die Unsicherheit der Kalibrierpunkte und damit des Kalibrierverfahrens selbst ist insbesondere im Beitrag $u_{\text{kenn,app}}$ noch nicht berücksichtigt. Sie muss lt. [4] zusätzlich berücksichtigt werden (Bild 2). Eine Angabe wie dies zu erfolgen hat, wird nicht gegeben. Denkbar ist, die Gesamtunsicherheit mittels quadratischer Addition von u_{kenn} und den Unsicherheiten der Kalibrierpunkte zu ermitteln:

$$u_{\text{ges,app}}(Y(T)) = \sqrt{u_{\text{kenn,app}}^2(Y(T)) + u_{\text{kal,app}}^2(Y(T))} = \sqrt{u_{\text{kenn,app}}^2(Y(T)) + \sum_{i=1}^n u^2(Y_i)} \quad (5)$$

Dies würde jedoch bei steigender Anzahl von Kalibrierpunkten zu einer ebenfalls steigenden Unsicherheit $u_{\text{ges,app}}$ führen, obwohl die Kennlinienschätzung bei steigender Stützstellenzahl eigentlich sicherer werden sollte. Auch die quadratische Addition der Unsicherheit nur einzelner Kalibrierpunkte, mit beispielsweise der größten Unsicherheit, ist nicht zielführend.

Der für $u_{\text{kenn,appw}}$ ermittelte Unsicherheitsverlauf unterscheidet sich nur gering von $u_{\text{kenn,app}}$, die Diskrepanz zu $u_{\text{ges,app}}$ ist jedoch sehr stark (Bild 2). Die analog dazu bestimmte Unsicherheit $u_{\text{ges,appw}}$ führt zu einer Überschätzung der Kennlinienunsicherheit, da die Unsicherheit der Kalibrierpunkte bereits bei der Kennlinienschätzung mittels Wichtung eingeflossen ist.

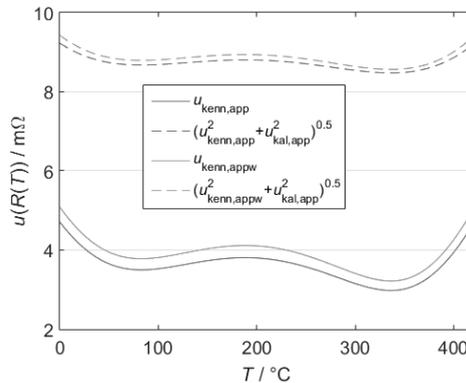


Bild 2: Unsicherheit der Kennlinien bei unterschiedlicher Berücksichtigung der Unsicherheit der Kalibrierpunkte

Bei der Angabe einer oder mehrerer der gezeigten Unsicherheiten steht der Anwender des kalibrierten Thermometers vor Schwierigkeiten. Insbesondere für Anwender aus dem industriellen Umfeld, die ggf. wenig Erfahrung mit dem GUM oder der Messunsicherheit im Allgemeinen haben, ergeben sich möglicherweise Fragen. So ist nicht unmittelbar ersichtlich, warum bspw. die Unsicherheit an den Kalibrierpunkten von der Unsicherheit der Kennlinie abweicht oder welche Unsicherheit in unmittelbarer Nähe der Kalibrierpunkte angenommen werden muss. Das im Folgende gezeigte Verfahren auf Basis von Monte-Carlo-Methoden stellt eine leistungsfähige Möglichkeit dar, welche die gezeigten bekannten Verfahren zur Unsicherheitsermittlung erweitert und eine für den Anwender transparent ermittelte Kennlinienunsicherheit über den gesamten Kalibrierbereich bereitstellt. Diese kann auch auf einem Kalibrierschein angegeben werden.

3. Ermittlung der Kennlinienunsicherheit mittels Monte-Carlo-Methode

Eine alternative Methode der Ermittlung der Kennlinienunsicherheit bietet der Einsatz von Monte-Carlo-Methoden. Sie können vorteilhaft eingesetzt werden, wenn beispielsweise das Modell des Zusammenhangs zwischen Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße der Unsicherheitsbetrachtung für einen analytischen Ansatz zu komplex ist [8]. Rechnerunterstützt werden hierbei für die Eingangsgrößen Erwartungswerte (Mittelwerte) und Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorgegeben, auf deren Basis eine vorgegebene Anzahl von N Berechnungen mit

dem Modell durchgeführt und die Ausgangsgröße N -fach berechnet wird. Im vorliegenden Anwendungsfall sind die Erwartungswerte die Kalibrierwerte der Wertepaare (T_n, R_n) und deren erweiterte Unsicherheit wird als zweifache Standardabweichung einer angenommenen zugehörigen Normal-Verteilung interpretiert. Das Modell ist der Algorithmus zur Bestimmung der Kennlinienkoeffizienten. Aus diesem Modell kann die Unsicherheit der Kennlinie wie folgt bestimmt werden:

- I. Die Eingangsgrößen werden um ihre Erwartungswerte in den Grenzen der angenommenen Verteilung variiert, wobei die einzelne Variation mittels eines Zufallsgenerators berechnet wird. Als Ergebnis der N Berechnungs-Durchläufe erhält man N Kennlinien $R_M(T)$, die um eine mittlere Kennlinie, welche aus den Ausgangswertepaaren (T_n, R_n) bestimmt wurde, normalverteilt sind.
- II. Für jeden Temperaturwert (Abszissenwert) werden die N Widerstandswerte (Ordinatenwerte) der N Kennlinien zu einer Stichprobe zusammengefasst. Von jeder dieser Stichproben können der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt werden, so dass sich eine mittlere Kennlinie mit einem $\pm s$ -Band entsprechend der Kennlinienunsicherheit $u_{\text{kal}}(R)$ aufgrund der Kalibrierung ergibt.
- III. Von jeder der N Kennlinien wird die Güte der Kurvenanpassung an die Kalibrierwerte nach [4] und damit die Unsicherheit der Kennlinienermittlung u_{kenn} bestimmt. Dies erlaubt für jede Einzelkennlinie eine Aussage über die Eignung des Kennlinienansatzes für die vorgegebenen Kalibrierwerte.
- IV. Die 68%-Grenze der Güte der Kurvenanpassung aus III. sowie die Standardabweichung der Kennlinien aus II. werden für jeden Punkt geometrisch summiert. Damit ergibt sich die Gesamtunsicherheit $u(R(T))$ der Kennlinie.

3.1. Bestimmung von $u_{\text{kal}}(R)$

Die Vorgehensweise kann am Beispiel der approximierten Kennlinie mit 4 Stützstellen gut nachvollzogen werden (Bild 3 und 4). Aus den N Variationen der Eingangsgrößen erhält man N Kennlinien, deren Verteilung der Ordinatenwerte ein Maß der Unsicherheit der Eingangswerte ist. Im dargestellten Beispiel ist die Kennlinienstreuung bei höheren Temperaturen größer, da auch die Eingangsunsicherheit der Kalibrierwerte hier größer ist. Aus diesen Kennlinienscharen wird zu jedem Abszissenwert die Verteilung der Ordinatenwerte ermittelt und aus diesem die Standardabweichung der Normalverteilung ermittelt (Bild 4). Dieser bestimmte Verlauf der Standardabweichung $s(T)$ (schwarze Strichlinie in Bild 3) ist ein Schätzwert der Unsicherheit der bei der Kalibrierung bestimmten Kennlinie aufgrund der gegebenen Unsicherheit

der Kalibrierwerte. Seine Ermittlung ist gut nachvollziehbar, da sie nur auf dem gegebenen Kennlinienmodell und den bekannten Eingangswerten beruht. Hier liegt ein direkter funktionaler Zusammenhang zwischen Referenztemperaturen und Widerstandswerten vor.

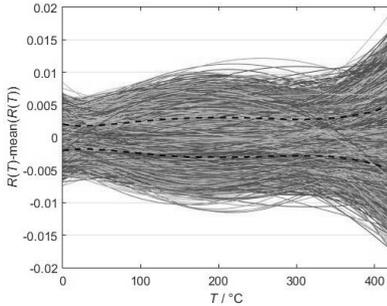


Bild 3: Abweichungen der Kennlinienschar für $N = 10000$ Simulationen zum Mittelwert (Schritt I.) bei Approximation einer Kennlinie (Stützstellen $0,010\text{ }^\circ\text{C}$; $200,000\text{ }^\circ\text{C}$; $303,988\text{ }^\circ\text{C}$; $417,765\text{ }^\circ\text{C}$). Schwarz markiert ist die Kennlinienabweichung bei $p = 68,27\%$, entsprechend $u_{\text{kal}}(R(T))$.

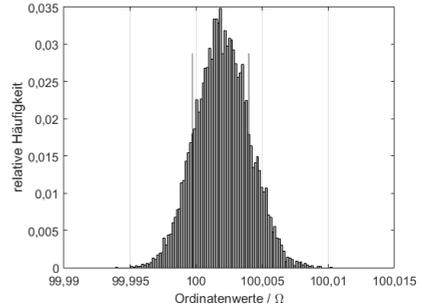


Bild 4: Histogramm der Widerstandswerte der N Kennlinien für $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ (Schritt II.). Rot markiert sind die Ordinatenwerte der in Bild 3 dargestellten Kennlinienverteilung bei $p = 68,27\%$ (Schätzwert der Standardabweichung der Verteilung bei $N \rightarrow \infty$).

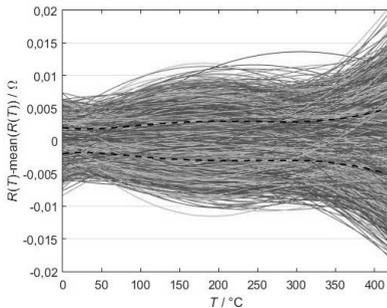


Bild 5: Abweichungen der Kennlinienschar für $N = 10000$ Simulationen zum Mittelwert bei Interpolation einer Kennlinie (Stützstellen $0,010\text{ }^\circ\text{C}$; $200,000\text{ }^\circ\text{C}$; $417,765\text{ }^\circ\text{C}$)

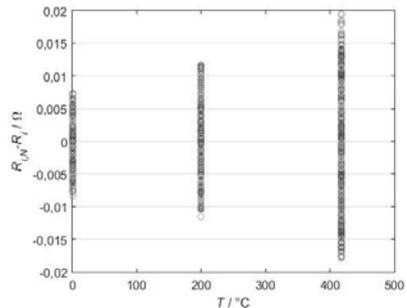


Bild 6: Variation der Eingangswerte zum Kalibrierwert R_k bei Interpolation

Die Ermittlung der Unsicherheit u_{kal} mittels Monte-Carlo-Methode kann auch auf komplizierte Funktionen wie Thermoelementkennlinien oder auch Abweichungsfunktionen angewendet werden, da im Gegensatz zu analytischen Verfahren wie in [7] keine inversen Probleme berechnet werden müssen. Auch bei Interpolationen liefert sie einen plausiblen Unsicherheitsverlauf (Bild 5).

3.2. Bestimmung von $u_{\text{kenn}}(R)$

Für jede der N zuvor bestimmten Kennlinien kann nach (3) die Unsicherheit $u_{\text{kenn}}(R)$ bestimmt werden. Man erhält für das obige Beispiel der Approximation die in Bild 7 dargestellte Schar von Unsicherheitsverläufen. Die Verteilung ist unsymmetrisch und erreicht nicht den Wert $u_{\text{kenn,app}}(R(T)) = 0$, da der Freiheitsgrad größer 0 ist, die Eingangsdaten nicht einem polynomialen Verlauf folgen und somit das Residuum der Kennlinienschätzung und damit die Unsicherheit nach (3) bzw. (4) sehr wahrscheinlich nie zu null wird.

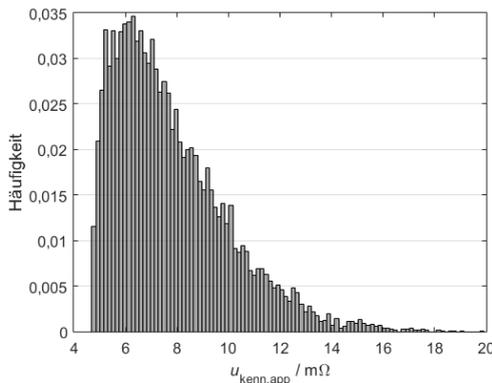


Bild 7: Histogramm der Unsicherheit $u_{\text{kenn,app}}$ der N Kennlinien für $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Schritt III.).

3.3. Bestimmung von $u_{\text{ges}}(R)$

Mit Hilfe der zuvor bestimmten N Beiträge $u_{\text{kenn}}(R)$ und $u_{\text{kal}}(R)$ kann mittels geometrischer Addition für jede Temperatur die Gesamtunsicherheit der Kennlinienschätzung u_{ges} ermittelt werden.

$$u_{\text{ges}}(R) = \sqrt{u_{\text{kenn}}^2(R) + u_{\text{kal}}^2(R)}. \quad (6)$$

Somit ergeben sich bei jedem Temperaturwert N Unsicherheitswerte u_{ges} , aus deren Verteilung der Schätzwert der Unsicherheit durch Integration der Histogrammflächen beginnend bei Abszissenwert 0 ermittelt werden kann. Daraus können leicht die Abszissenwerte für beispielsweise $p = 68,27\%$ ($k = 1$) oder $95,45\%$ ($k = 2$) für jeden Temperaturwert abgelesen werden. Die Monte-Carlo-Analyse liefert damit sowohl Informationen zur Verteilung (Bild 8), als auch der Temperaturabhängigkeit der Unsicherheit u_{ges} (Bild 9).

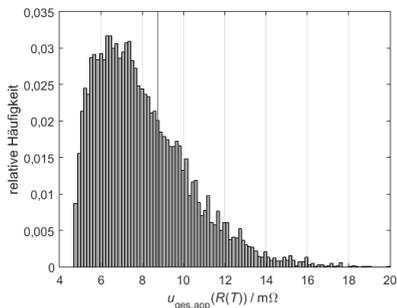


Bild 8: Verteilung der Unsicherheit $u_{\text{ges,app}}$ der Kennlinienschar für $N = 10000$ Simulationen bei $T = 0^\circ\text{C}$. Rot markiert ist der Ordinatenswert bei $p = 68,27\%$.

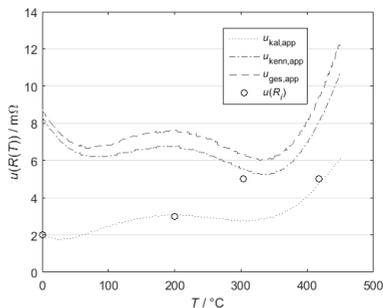


Bild 9: Verteilungen der Unsicherheiten bei Kennlinienapproximation ohne Wichtung der Kalibrierwerte.

Bei Interpolation von Kennlinien, müsste der Beitrag u_{kenn} entsprechend (2) berechnet werden. Hierbei ergibt sich u_{kenn} aus der Unsicherheit der Stützstellen. Da die Kennlinie aber immer durch die Kalibrierwerte verläuft und tatsächlich keine Kennlinienabweichung der geschätzten Kennlinie zu den Kalibrierpunkten vorliegt, ist es naheliegender die Variation der Kennlinie aufgrund der Unsicherheit der Stützstellen in der Monte-Carlo-Methode im Beitrag u_{kal} zu erfassen. Für Interpolationen ergibt sich somit $u_{\text{ges}} = u_{\text{kal}}$, wodurch sich ebenfalls eine temperaturabhängige Unsicherheit der Kennlinie ergibt.

In Bild 10 sind die Gesamtunsicherheiten $u_{\text{ges,app}}$, $u_{\text{ges,appw}}$ und $u_{\text{ges,int}}$ zusammengestellt. Bei allen dargestellten Unsicherheitsverläufen steigt die Unsicherheit zu hohen Temperaturen hin an, da hier auch die Unsicherheit der Kalibrierpunkte höher ist. Die Form der Unsicherheitskurven resultiert aus dem quadratischen Kennlinienansatz und ist für diesen typisch. Auch steigt die Unsicherheit zu den Enden des Betrachtungsbereichs bei $T < 50^\circ\text{C}$ und $T > 400^\circ\text{C}$ an. Dies ist plausibel, da auch bei Extrapolation über den Bereich der Kalibrierpunkte hinaus die Unsicherheit zunimmt.

Obwohl die hier dargestellte Unsicherheit bei Kennlinieninterpolation am geringsten ist, sollten die Empfehlungen aus [4] zur Anzahl der Stützstellen berücksichtigt werden. Damit kann vermieden werden, dass beispielsweise Ausreißer unter den Kalibrierwerten die Kennlinienschätzung zu stark verfälschen.

Die berechneten Unsicherheitsverläufe sind im Gegensatz zu den in Bild 1 dargestellten plausibel und kontinuierlich. Sie können selbst sehr gut, beispielsweise mittels eines Polynoms 6. Ordnung, interpoliert und somit auch als Ergebnis einer Unsicherheitsberechnung der in einer Kalibrierung bestimmten Kennlinie in einem Kalibrierschein angegeben werden. Auch ist eine tabellarische Angabe in geeigneter Temperaturschrittweite möglich.

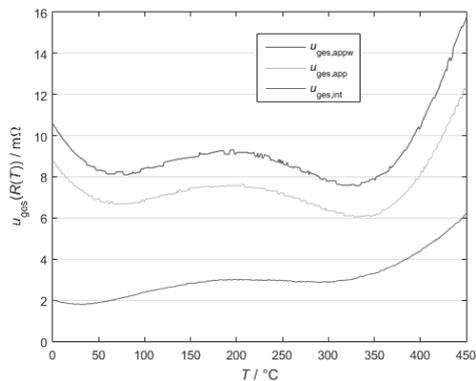


Bild 10: Mittels Monte-Carlo-Methode errechnete Gesamtunsicherheiten u_{ges} für verschiedene Varianten der Kennlinienbestimmung

Die Qualität der Monte-Carlo-Methode wird unter anderem durch die numerische Auflösung der Berechnung, die Anzahl N der Variationen und die Auflösung der Histogramme beeinflusst. Für die dargestellten Berechnungen wurde $N = 10000$ gewählt, da sich hier ein guter Kompromiss zwischen Berechnungszeit und Unsicherheit der Simulation ergab. Die zu wählenden Parameter jeder Simulation sind jedoch für jede Berechnung zu hinterfragen und individuell festzulegen.

4. Zusammenfassung

Es wurde eine alternative Methode der Ermittlung der Kennlinienunsicherheit mittels Monte-Carlo-Methode vorgestellt. Als Ergebnis der Berechnung steht eine Kennlinienunsicherheitsfunktion $u(T)$ zur Verfügung, die aus dem gewählten Kennlinienansatz, den Kalibrierwerten

und deren Unsicherheit resultiert. Die Berechnungsmethode ist an die DKD-Richtlinie zur Bestimmung von Thermometerkennlinien angelehnt. Sie bietet darüber hinaus aber auch die Möglichkeit die individuelle Unsicherheit der Kalibrierpunkte in die Schätzung der Kennlinienunsicherheit zu integrieren. Die so bestimmte Kennlinienunsicherheit berücksichtigt somit nicht nur die Unsicherheit der mathematischen Schätzung, sondern auch die Kalibriermethode und die Anzahl und die Verteilung der Kalibrierpunkte.

- [1] Deutsches Institut für Normung, DIN, *DIN EN 60584-1 - Thermoelemente Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen*, 2013.
- [2] Deutsches Institut für Normung, DIN, *DIN EN 60751 - Industrielle Platinwiderstandsthermometer und Platinmesswiderstände*, 2009.
- [3] Preston-Thomas, H., *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*. Metrologia, 1990. **27**: p. 3-10.
- [4] Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS, *DAkkS-DKD-R 5-6 : Bestimmung von Thermometerkennlinien*, 2010.
- [5] Matus, M., *Koeffizienten und Ausgleichsrechnung: Die Messunsicherheit nach GUM. Teil 1: Ausgleichsgeraden*. Technisches Messen, 2005. **72**(10)
- [6] Matus, M. and W. Kolaczka, *Koeffizienten und Ausgleichsrechnung: Die Messunsicherheit nach GUM - Teil 2: Der quadratische Fall*. Technisches Messen, 2006. **73**(7-8)
- [7] Joint Committee for Guides in Metrology *JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 2008.
- [8] Joint Committee for Guides in Metrology, *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*, 2008.

Fortpflanzung der Messunsicherheit in der Virtuellen Messdatenanalyse (VMDA) im Automobilbau

Dr.-Ing. **Maryna Galovska**, Dr.-Ing. **Christoph Germer**, **Mike Nagat**,
Volkswagen AG, Wolfsburg;
Prof. Dr.-Ing. **Rainer Tutsch**, TU Braunschweig, Braunschweig

Kurzfassung

Die Virtuelle Messdatenanalyse (VMDA) ist ein bei der Volkswagen AG entwickeltes System, das der Analyse der geometrischen Fahrzeugqualitätsmerkmale dient. Die Qualität der Analyse hängt u.a. von der Unsicherheit der einzelnen virtuellen Messungen ab. Die einzelnen Unsicherheitskomponenten und deren Unsicherheitsfortpflanzung werden analysiert.

1. Einführung

Die Virtuelle Messdatenanalyse (VMDA) ist ein bei der Volkswagen AG entwickeltes System, das der Visualisierung, Vorhersage und Analyse der geometrischen Fahrzeugqualitätsmerkmale dient [1]. Die Basis der VMDA ist die Kopplung eines virtuellen Fahrzeugmodells und der realen Messwerte (Bild 1). Die virtuellen Messungen der Merkmale sind mittels der statistischen Monte-Carlo-Methode kombiniert, um eine Vorhersage bezüglich der geometrischen Merkmale zu liefern. Die Qualität der Vorhersage hängt u.a. von der Unsicherheit der einzelnen virtuellen Messungen ab. In diesem Beitrag werden die einzelnen Unsicherheitskomponenten und deren Unsicherheitsfortpflanzung analysiert. Der Einsatz der Software 3DCS für die Toleranzanalyse [2] wird demonstriert.



Bild 1: Virtuelle Messdatenanalyse: Kopplung eines virtuellen Fahrzeugmodells und der realen Messwerte

Der Kern des VMDA-Systems und der Messunsicherheitsfortpflanzung ist das Modell des virtuellen Fahrzeuges, dessen Komplexität eine analytische Modellbildung für die Messunsicherheitsanalyse verhindert. Das Modell eines virtuellen Fahrzeuges wurde mithilfe des System 3DCS entwickelt, das als eine Plattform für die Messunsicherheitsanalyse eingesetzt wird. Die realen Messungen der Baugruppen (taktil oder optisch, offline oder inline) erzeugen die Basis für die Simulation unter Berücksichtigung des tatsächlichen Produktionszustandes (Eingangsdaten für die Berechnung der virtuellen Messungen). Die virtuellen Messungen der Spaltmaße zwischen den Baugruppen erzeugen die Basis für die Analyse der Einflussfaktoren bzw. Entscheidungen über Korrekturmaßnahmen in dem Produktionsprozess. Das ist eine Art der indirekten Messung, deren Modelle analytisch sehr komplex sind und nur als Algorithmen dargestellt werden.

Die zwei „Parallelwelten“ (virtuelle und reale Welt) sind bei der Qualitätssicherung fest verdrahtet (Bild 2): Die realen Messungen der Baugruppen sind die Eingangsgrößen für die virtuellen Messungen der Spalte zwischen den Baugruppen und umgekehrt: die virtuellen Stellmaßnahmen (Korrekturmaßnahmen) sind die Basis für die realen Stellmaßnahmen. Dabei werden die verfügbaren realen Messungen der Spaltmaße als Validierungsdaten für die virtuellen Messungen verwendet.

Das Ziel des VMDA-Einsatzes ist: (1) Schätzung der Abweichungen der Fahrzeugqualitätsmerkmale; (2) Erkennung derjenigen Fahrzeugqualitätsmerkmale, die nicht in Ordnung (außerhalb der Toleranzgrenzen) sind, mithilfe der Monte-Carlo-Simulation; (3) Fehler-Ursache-Analyse anhand der virtuellen Messungen und der Geofaktoranalyse für die Bewertung der Stellmaßnahmen; (4) entsprechende Kostenreduzierung. Dabei zeigen die Empfindlichkeitskoeffizienten oder die sogenannten geometrischen Faktoren (Geofaktoren oder GF) die Einflüsse der einzelnen Messunsicherheitskomponenten auf das Ergebnis einer virtuellen Messung. Die Studie liefert die Kriterien der Zuverlässigkeit der Messdaten für die Vorhersage der Fahrzeugqualitätsmerkmale und grenzt die Herausforderungen der Messunsicherheitsanalyse für komplexe Modelle ein.

2. Virtuelle Messungen der geometrischen Merkmale: Anwendung und Modellierung

Optische und technische Funktionen, wie z. B. Fugenverlauf und Fugendichtung der Türen, beeinflussen nicht nur das Erscheinungsbild eines Fahrzeuges, sondern auch weitere abgeleitete Funktionen, wie z.B. die Türschließ- und Öffnungskraft [3]. Für die Funktionsmaße werden die Nominalwerte und entsprechende Toleranzgrenzen festgelegt.

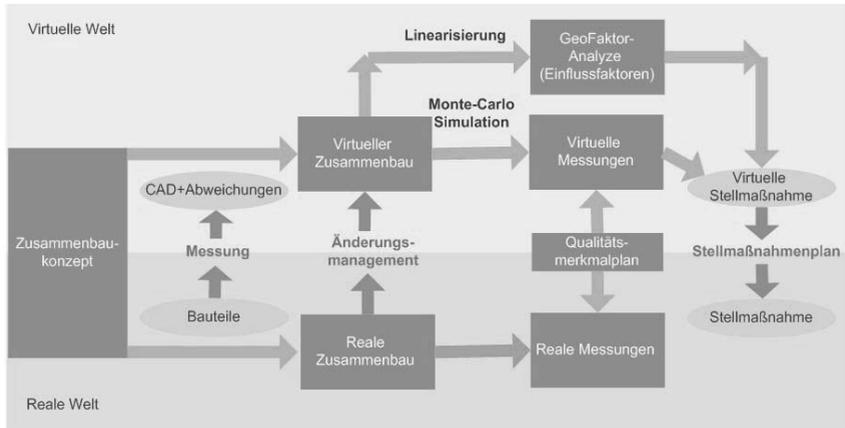


Bild 2: Virtuelle Messdatenanalyse als ein Baustein der Industrie 4.0: Zusammenführen der virtuellen und realen Welt in der Qualitätssicherung

Unter den virtuellen Messungen verstehen wir die „Messungen“, die auf Basis des virtuellen Zusammenbaus modelliert werden, und die reale Messungen mittels Messuhr oder Messschieber etc. ersetzen. Dazu zählen z. B. virtuelle Messungen der Fugen und Bündigkeiten zwischen den Baugruppen. Die Basis für die Modellierung ist ein Zusammenbaukonzept (ZBK), das bereits in der Fahrzeugentwicklungsphase erstellt wird und in der früheren Phase der Produktion leichte Korrekturen erhalten kann. Im Gegensatz zu den standardisierten Algorithmen für die Funktionsmaßberechnung [4] sind die Fugen und Bündigkeiten nicht eindeutig definiert, was die Eigenunsicherheit verursacht (siehe Abschnitt 3). Die Nominalwerte und Toleranzen für die Prüfmerkmale (Eingangsgößen der VMDA) werden im sogenannten Prüfmerkmalplan (PMP) festgelegt. Die Nominalwerte und Toleranzen der Fugen und Bündigkeiten sind im Fugenplan (FUP) angegeben.

3. Unsicherheitskomponenten der virtuellen Messungen

Die Eingangsgößen des Modells für die Messunsicherheitsanalyse der virtuellen Messungen in der VMDA sind die in dem kartesischen Koordinatensystem gemessenen Koordinaten. Die Fortpflanzung der Messunsicherheiten soll unter Berücksichtigung der Modellunsicherheit analysiert werden. Bild 3 zeigt die Gruppen der Messunsicherheitskomponenten, die die Messunsicherheit der virtuellen Messungen beeinflussen.

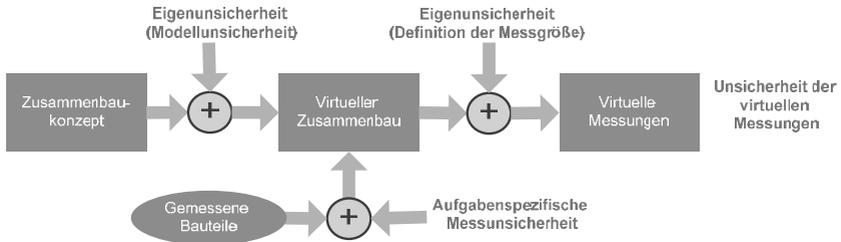


Bild 3: Gruppen der Komponenten der Messunsicherheit der virtuellen Messungen

3.1 Definition der Messgrößen und Eigenunsicherheiten

Bei der Fortpflanzung der Messunsicherheiten soll an dieser Stelle die Modellunsicherheit erwähnt werden. Es ist die sogenannte Eigenunsicherheit (definitional uncertainty), die aus der endlichen Detaillierung der Definition einer Messgröße resultiert [5]. In [6] gilt die Eigenunsicherheit gegenüber den anderen Beiträgen zur Messunsicherheit als vernachlässigbar, obwohl diese Vernachlässigung nicht immer zulässig ist [7].

Die Unsicherheit bei der Spaltmaßdefinition soll auch berücksichtigt werden. z. B. hängt das Nennmaß einer Fuge von der Messrichtung ab (Bild 4) [3]. Es könnte z. B. als Abstand zwischen den Linien oder zwei Ebenen definiert werden. Für die VMDA sowie in der Entwicklungsphase eines Fahrzeugprojektes wird die Berechnung von Spaltmaßen als Abstand zwischen zwei Punkten, projiziert auf den Normalenvektor eines Punkts, verwendet. Mathematisch gesehen ist es ein Skalarprodukt des Vektors, der aus zwei entsprechenden Punkten $P_1(x_1, y_1, z_1)$ und $P_2(x_2, y_2, z_2)$ und dem Normalenvektor (n_x, n_y, n_z) an einem der Punkte erzeugt wird:

$$F = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = (x_2 - x_1) \cdot n_x + (y_2 - y_1) \cdot n_y + (z_2 - z_1) \cdot n_z, \quad (1)$$

Für die Berechnung werden die entsprechend dem Zusammenbaukonzept transformierten Punktkoordinaten eingesetzt (siehe 3.4).

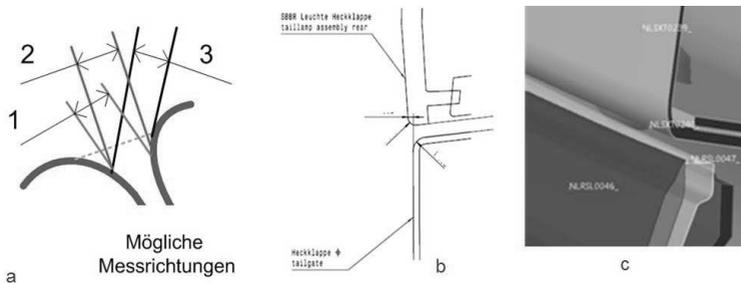


Bild 4: Spaltmaßdefinition: (a) Einfluss der Messrichtung; (b) Darstellung in Fugenplan; (c) Position der PMP-Punkte für eindeutige Definition.

Ein weiterer Effekt entsteht, da die im PMP festgelegten Messpunkte nicht mit den Schnittstellen im Fugenplan übereinstimmen. Die virtuellen Messungen (Messpunkt zu Messpunkt) ergeben einen vom FUP abweichenden Nominalwert, ein systematischer Effekt, den es zu korrigieren gilt:

$$F_{korr} = F + \Delta_{korr} = F + (F_{FUP} - F_{PMP}), \quad (2)$$

wobei F : unkorrigierter Schätzwert der virtuellen Messgröße;

F_{FUP} : Nominalwert des berechneten in der Entwicklungsphase und im FUP angegebenen Spaltmaßes;

F_{PMP} : Nominalwert des Spaltmaßes in dem auf Basis des PMP entwickeltem VMDA-Modell;

Δ_{korr} : Korrekturwert (relativ kleiner Wert vergleichbar mit der erweiterten Messunsicherheit).

Noch mehr Variationen im Detaillierungsgrad bzw. Eigenunsicherheit bringt die Modellierung des Zusammenbaus, u. a. die Anwendung des Modells der starren Bewegung oder zusätzlichen Verformung. Im Fall der Verformungsmodellierung könnten unterschiedliche Faktoren die Umsetzung der Simulationen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) signifikant beeinflussen, u. a. Randbedingungen und Materialmodelle, die Diskretisierung (Meshing) usw. Die Faktoren werden als unkorrigierter systematischer Effekt in den virtuellen Messungen auftauchen. Solange die Schätzung der Eigenunsicherheit nicht realisierbar ist, wird über modellspezifische Messunsicherheit gesprochen (in der Koordinatenmesstechnik ist der Begriff aufgabenspezifische Messunsicherheit verbreitet [8, 9]).

3.2 Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen

In der VMDA werden hauptsächlich Serienmessungen verwendet: (1) Interne Serienmessungen der Karosseriebaugruppen: Karosserie und Anbauteile, wie Heckklappe, Frontklappe, Türen und Kotflügel. Messungen der Kaufteile (u. a. Leuchte, Stoßfänger), die von den Lieferanten zur Verfügung gestellt werden; (2) Die Ergebnisse der Punktmessungen (entsprechend dem Prüfmerkmalplan) werden in eine Datenbank exportiert und über eine speziell entwickelte Schnittstelle in die VMDA-Projekte eingebunden. Das stellt die Rückführbarkeit der Messdaten sicher.

Messtechnische Einrichtungen bei der Volkswagen AG verfügen über die modernste Messtechnik, die in den verschiedenen Phasen des Produktentstehungsprozesses eingesetzt wird: taktile Messgeräte sowie optische Messsysteme. Optische Messtechnik wird nicht nur in den Messräumen eingesetzt, sondern auch für die Inline-Messungen. Die Auswahl der Prüfmerkmale und der Messprinzipien beeinflusst die Qualität der Messergebnisse und die weiteren Analysen. Inline- sowie Offline-Messungen werden automatisiert, weshalb die Programmierung der Messungen eine große Rolle im Gesamtprozess spielt. Viele andere Faktoren des Messprozesses beeinflussen die Ergebnisse der Merkmalsmessungen, deren Gruppierung in Bild 5 dargestellt ist.

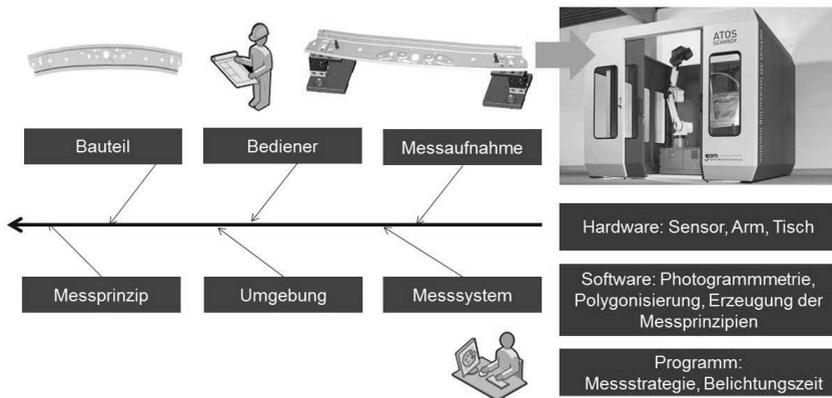


Bild 5: Messunsicherheit der Koordinatenmessungen: GOM ATOS Scanbox [13] mit dem systemspezifischen Einflussfaktoren (rechts) und klassisches Ishikawa-Diagramm mit den Gruppen der Messunsicherheitsbeiträgen (links)

Die Messunsicherheit der Messergebnisse wird im Rahmen der Untersuchung der Prüfprozesseignung nach VDA5 [10] bzw. Konzernnorm VW10119 [11] geschätzt. Aus dem Verhältnis zwischen der ermittelten Messunsicherheit und der Toleranz des Merkmals werden sogenannte Eignungskennwerte QMS und QMP berechnet. Dabei werden folgende Anteile der Messunsicherheit bestimmt:

- Messsystemunsicherheit: u. a. im Rahmen der Annahmenprüfung (z. B. nach VDI/VDE 2634 für optische Messtechnik) und mithilfe der Wiederholmessungen an einem Referenzteil;
- Messprozessunsicherheit: wird an den Serienbauteilen durchgeführt und mittels einer Software von Firma Q-DAS Solara.MP ausgewertet.

Wenn die Prüfprozesseignung nicht erfolgreich ist, wird die Prozedur für das Unsicherheitsmanagement (PUMA: Procedure for Uncertainty Management) nach DIN EN ISO 14253-2 [12] angewendet.

3.3 Modellierung des Zusammenbaus und Transformation der Messunsicherheit

Zur Analyse der Messdaten und deren Anwendung für die VMDA werden alle Punktwolken in einem Koordinatensystem (Fahrzeugkoordinatensystem) benötigt. Über das sogenannte Referenzpunktsystem (RPS) werden alle Bauteile und Baugruppen eindeutig und reproduzierbar im Koordinatensystem fixiert [14]. Von der Position der RPS-Punkte hängen die Messunsicherheitsfortpflanzung und die Messunsicherheitsstruktur ab.

Für den virtuellen Zusammenbau ist es notwendig, die Starrkörperbewegung zu modellieren z. B. für die Abbildung des Verbaus der Heckklappe oder der Montage der Leuchte in die Heckklappe. Die Bewegung des Objekts zum Target wird mithilfe der entsprechenden Objekt-Punkte X_i^O und Target-Punkte X_i^T mit Richtungsvektoren n_i beschrieben (Bild 6). Das Modell enthält die Minimierung der Abstände zwischen den Objekt-Punkten und Target-Ebenen:

$$\min \sum_{i=1}^k [(R \cdot X_i^O - X_i^T) \cdot n_i] \rightarrow R, \quad (3)$$

wobei R die Transformationsmatrix ist, die die Bewegung beschreibt; k ist die Anzahl der Ausrichtpunkte (meistens $k=6$).

Die Gleichung (3) kann mittels nichtlinearer oder linearer Algorithmen gelöst werden. Die lineare Lösung [15] wurde als ICP-Routine (Iterative Closest Point) implementiert (Octave/

Matlab) und mit der 3DCS-Simulation verglichen (siehe 4.1). In 3DCS wird die Bewegung durch den sogenannten „Six-Plane-Move“ realisiert. Aufgrund der immer steigenden Designkomplexität, ist es nicht immer möglich, die orthogonale primäre, sekundäre und tertiäre Ebene über sechs Punkte zu definieren. Dadurch wird das Modell der Starrkörperbewegung erweitert.

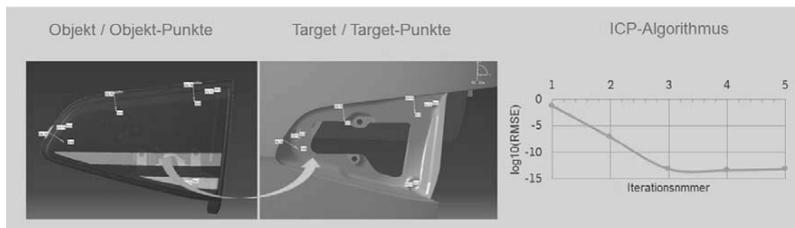


Bild 6: Objekt-Target-Bewegung am Beispiel der Montage der Leuchte in die Heckklappe. Rechts: Visualisierung in 3DCS, die Bewegung ist über die Transformationsmatrix beschrieben, die aus Objekt- und Target-Punkten berechnet wird. Links: mittlerer quadratischer Gesamtfehler (mm) nach jeder Iteration des Algorithmus.

Die Messunsicherheitstransformation fängt mit der Transformation der gemessenen Punktwolken im RPS-Koordinatensystem an. Im weiteren Schritt wird der Zusammenbau simuliert (Bild 7): die Punktwolke des Objekt-Bauteils wird zum Target-Bauteil über Ausrichtungspunkte transformiert. Die Transformationsunsicherheit, die dabei entsteht, hängt stark von der Auswahl der Referenzpunkte (RPS- oder Ausrichtepunkte) und deren Unsicherheit ab [16]: (1) Messunsicherheit der Referenzpunkt-Messungen beeinflusst die ganze Punktwolke; (2) Struktur der Messunsicherheit wird dabei geändert: die RPS-Punkte sind ein gemeinsamer Effekt für die Punktwolke, deshalb die Quelle der Korrelation. Die Korrelation soll bei der Analyse der virtuellen Messungen berücksichtigt werden.

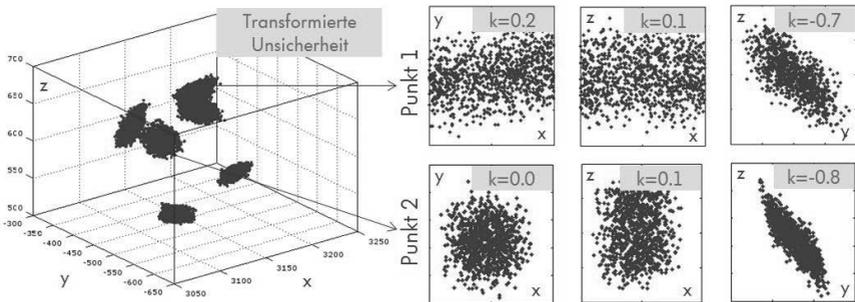


Bild 7: Unsicherheit bei Koordinatentransformation: Unsicherheit der transformierten gemessenen Koordinaten hängt von der Unsicherheit vor der Transformation und Unsicherheit der Transformationsparameter ab. Links: Unsicherheitstransformation bei „Six-Plane-Move“ nach der Gleichung (3). Rechts: Änderung der Struktur der Messunsicherheit in kartesischem Koordinatensystem, wobei k der jeweilige Korrelationskoeffizient ist.

4. Fortpflanzung der Unsicherheit im virtuellen Fahrzeug

Wie im Abschnitt 3 gezeigt wurde, ist die Modellierung der virtuellen Messungen komplex und analytisch kaum beschreibbar. Die allgemeine vektorielle Form des multivariaten Messmodells [17] $\mathbf{h} = (h_1 \dots h_m)^T$ kann wie folgt geschrieben werden:

$$\mathbf{h}(\mathbf{Y}, \mathbf{X}) = 0 \quad (4)$$

wobei $\mathbf{X} = (X_1 \dots X_n)^T$ den Eingangsvektor und $\mathbf{Y} = (Y_1 \dots Y_m)^T$ den Ausgangsvektor darstellt. In der Regel sind die Eingangsgrößen Punktwolken im 3D-Raum mit Messunsicherheiten, die als Ellipsoide darstellbar und über Kovarianzmatrizen beschreibbar sind. Der einfachste Fall des Modells eines virtuellen Fahrzeugs wäre eine Kombination aus den Gleichungen (1)-(4). Die aktuellen Modelle haben über 12000 Eingangsgrößen und über 1000 Ausgangsgrößen. Solche Modelle sind „in Form einer Berechnungsvorschrift (Algorithmus)“ verwendbar [6]. Für die Schätzung der Messunsicherheit sind die folgenden Varianten einsetzbar (Bild 8):

- Monte-Carlo-Methode: die Eingangsgrößen werden zufällig variiert und die Variation der Ausgangsgröße (virtuelle Messung) wird analysiert.

- Linearisierungsmethode mit der Berechnung der Empfindlichkeitsfaktoren, die in 3DCS als geometrische Faktoren bezeichnet bzw. numerisch über den sogenannten Gradientenschritt (gradient step) d berechnet werden:

$$GF(Y_i) = \frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} = \frac{\Delta Y_i}{d} \rightarrow \frac{\partial Y_i}{\partial X_i}, i = 1..m. \quad (5)$$

Die Vorteile der Monte-Carlo-Methode für die Messunsicherheitsabschätzung sind in [18] erklärt. Alle im Dokument erwähnten Verteilungen sind im 3DCS-System für die Monte-Carlo-Simulation verfügbar. Trotzdem wird die Linearisierungsmethode in der VMDA angewendet: Die erhaltenen Empfindlichkeitsfaktoren werden für die Analyse der Beanstandungen in der Produktion sowie für die Simulation der Stellmaßnahmen benötigt. Sogenannte Geofaktoren (Empfindlichkeitsfaktoren) werden bei der Linearisierungsmethode numerisch für jede Eingangsgröße berechnet. In Bild 9 ist ein Beispiel der Messunsicherheit bzw. Verteilungsfortpflanzung für eine virtuelle Messung der Fuge zwischen Leuchte und Heckklappe gezeigt.

Im Beispiel wurde eine "ideale" Leuchte in eine "gemessene" Heckklappe verbaut. Mit der Annahme, dass die Verformung vernachlässigbar ist, wird der Zusammenbau mithilfe der Starrkörpertransformation (3) modelliert. Die Fuge zwischen der Leuchte und der Heckklappe wurde gemäß Gleichung (2) berechnet. Im ersten Versuch wurden alle Messpunkte der Heckklappe mit unabhängigen Zufallswerten (Unsicherheit) unter der Annahme einer Rechteckverteilung simuliert. Die Grenzwerte der Verteilung entsprechen den Grenzwerten der Prüfprozesseignungskennwerte (worst case). Die kombinierte Standardunsicherheit, die mit der 3DCS-Software, sowie mit dem Referenzalgorithmus berechnet wurde, beträgt 0.072 mm. Den größten Einfluss haben zwei Faktoren: Die Z-Koordinate des Ausrichtpunktes (Punkt 1) und die Z-Koordinate des Punktes 2, der unmittelbar für die Fugenberechnung verwendet wurde. Die absoluten Werte der Empfindlichkeitsfaktoren sind fast gleich:

$$|GF(P_1)| \approx |GF(P_2)| = 1.$$

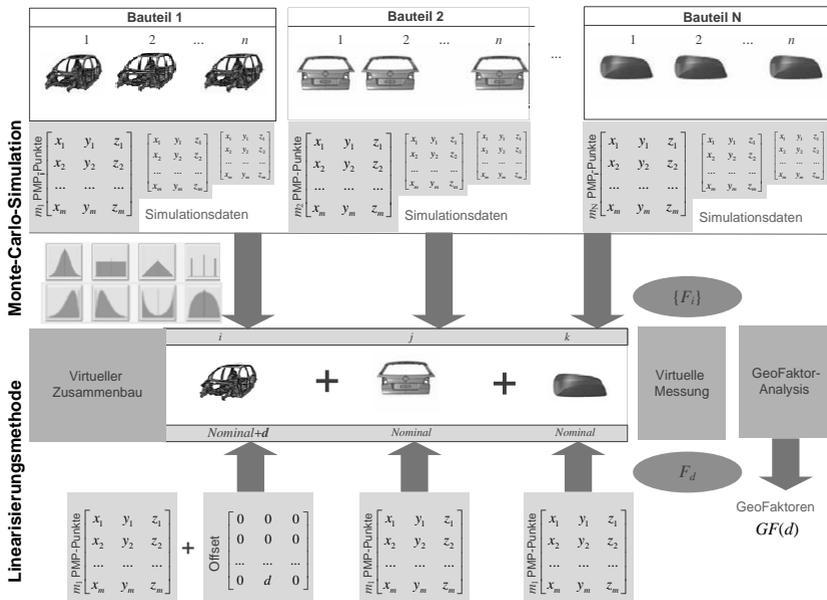


Bild 8: Methoden der VMDA und deren Anwendung für die Analyse der Fortpflanzung der Messunsicherheit: (1) Monte-Carlo-Simulation liefert n Werte der Ausgangsgröße (virtuelle Messung) F_i ; (2) Linearisierungsmethode mit numerischer Berechnung der GeoFaktoren und Ausgangsgrößen F_d .

Im zweiten Schritt wurde starke Korrelation (Korrelationskoeffizient $k=1$) zwischen den Z-Koordinaten der Punkte 1 und 2 simuliert. Die Kausalität besteht darin, dass eine gemeinsame Quelle der Messunsicherheit für die beiden Punkte (Z-RPS-Punkt der Heckklappe) eine signifikante Streuung zeigt. Die Monte-Carlo-Methode ergab für die kombinierte Messunsicherheit einen Wert von 0.035 mm durch das Reduzieren des Einflusses der beiden Punkte. Der Empfindlichkeitsfaktor der Punkte beträgt nur 0.1, was nach dem Paretoprinzip weit unter den Hauptfaktoren liegt. Das 3DCS-System ermöglicht die Simulation der korrelierten Größen mit unterschiedlichen marginalen Verteilungen.

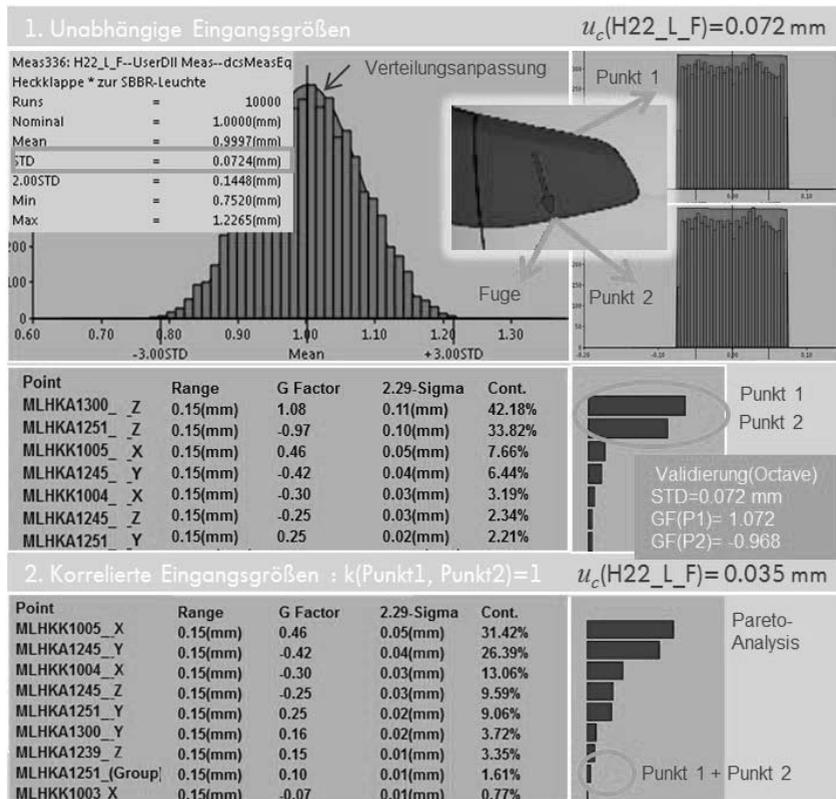


Bild 9: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation (n=10000) und Geofaktor-Analyse (Berechnung der Empfindlichkeitsfaktoren) für die Messgröße „Untere Fuge zwischen Leuchte und Heckklappe H22_L_F“. Fortpflanzung der Verteilungen bei den unabhängigen Eingangsgrößen (1) und korrelierten Eingangsgrößen (Z-Koordinate) Punkt 1 und Punkt 2 (2). Die Eingangunsicherheit entspricht den Grenzwerten bei der erfolgreichen Prüfprozesseignung. Vergleich mit einem Referenzalgorithmus ist erfolgreich.

5. Zusammenfassung

Die Virtuelle Messdatenanalyse (VMDA) ist ein System, das Ergebnisse der virtuellen Messungen enthält. In diesem Beitrag wurde das Prinzip der virtuellen Messungen der geometrischen Fahrzeugqualitätsmerkmale vorgestellt und hinsichtlich der

Messunsicherheitsfortpflanzung analysiert. Virtuelle Messungen der Spaltmaße zwischen den Baugruppen sind indirekte Messungen, deren Modelle als Algorithmen dargestellt werden. Die Komplexität der Modelle bzw. die Anzahl der Eingangs- und Ausgangsgrößen erlauben ausschließlich eine numerische Berechnung der Messunsicherheit.

Die Analyse der Einflussfaktoren der Messunsicherheitsfortpflanzung (von der Messunsicherheit der einzelnen Koordinaten der Punkte bis zur Unsicherheit der virtuellen Messungen der Spaltmaße) wurde durchgeführt. Die Anwendbarkeit der Umgebung der Toleranzanalyse-Software (3DCS) wurde für die Messunsicherheitsfortpflanzung demonstriert.

Die Kombination der realen Messungen mit dem Modell eines virtuellen Fahrzeugs verursacht einen signifikanten Beitrag der Eigenunsicherheit der benutzerdefinierten Messgrößen (Spaltmaße) und des Zusammenbaumodells. Der Begriff der modellspezifischen Messunsicherheit der virtuellen Messungen wurde eingeführt.

Die Transformation der Messunsicherheit und deren Struktur bei der Starrkörperkoordinatentransformation wurden analysiert. Die Korrelation und deren Auswirkung auf die kombinierte Unsicherheit der virtuellen Fuge zwischen Leuchten und Heckklappe (mithilfe Monte-Carlo- und Linearisierungsmethode) wurden gezeigt.

6. Ausblick und Herausforderungen

Die Messunsicherheit beeinflusst die Wahrnehmung der Prozessfähigkeit. Die Messunsicherheit geht in die beobachtete Streuung der Merkmalswerte und damit in den beobachteten Fähigkeitsindex ein und verringert diesen im Vergleich zum tatsächlichen Fähigkeitsindex des Prozesses [19]. In die VMDA laufen die Serienmessungen ein, infolgedessen wird die Verteilung der Werte der virtuellen Messungen über die transformierte Faltung der Prozessstreuung und der Messunsicherheit beeinflusst.

Eine der größten Herausforderung der Modellierung ist die FEM-Simulation, insbesondere die Abschätzung der unkorrigierten systematischen Fehler, die bei der FEM entstehen. Obwohl die Monte-Carlo-Simulation dabei deutlich mehr Zeit braucht, ermöglicht sie eine Betrachtung der Fortpflanzung der Unsicherheit in einem virtuellen Fahrzeugbau mit Berücksichtigung der Bauteilverformung.

[1] Germer C., Nagat M., Klenk T.: Die virtuelle Messdatenanalyse bei Volkswagen. VDI Fachbericht Konstruktion; 10-2014.

- [2] <http://www.3dcs.com>
- [3] Bohn M., Hetsch K.: Toleranzmanagement im Automobilbau, Carl Hanser Verlag, 2013.
- [4] Konzern Standard Katalog Gesamtgeometrie, Volkswagen AG.
- [5] ISO/IEC-Leitfaden 99:2007 Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM).
- [6] ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement—Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
- [7] Krystek M.: Berechnung der Messunsicherheit: Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung, DIN e.V., 2015.
- [8] Hernla M., Wendt K., Franke M.: Aufgabenspezifische Messunsicherheit von Koordinatenmessungen, Technisches Messen 77, 11-2010.
- [9] ISO/TS 15530-4:2008 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement -- Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation.
- [10] VDA Band 5. Prüfprozesseignung - Eignung von Messsystemen, Mess- und Prüfprozessen, Erweiterte Messunsicherheit, Konformitätsbewertung, 2011.
- [11] VW10119 Prüfprozesseignung. Berücksichtigung der Messunsicherheit in Prüfprozessen, Konzernnorm, Volkswagen AG, 2012.
- [12] DIN EN ISO 14253-2 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.
- [13] <http://www.gom.com>
- [14] Germer C.: Interdisziplinäres Toleranzmanagement, Logos, 2005.
- [15] Kok-Lim Low: Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration, Technical Report TR04-004, Department of computer science, University of North Carolina, 2004.
- [16] Galovska M.: Data fusion in the measurement of the geometry of rotationally symmetric workpieces, Shaker, 2013.
- [17] JCGM 102:2011 Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities.
- [18] JCGM 101:2011 Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – propagation of distributions using a Monte Carlo method, Joint Committee for Guides in Metrology
- [19] Weckenmann A. (Hrsg.): Koordinatenmesstechnik, Carl Hanser Verlag, 2012.

Ermittlung von Messunsicherheitsbudgets für Prozessanalysensensoren unter Einsatzbedingungen

Eine Frage des Vertrauens

Dr.rer.nat. **Thomas Wilhelm**, Dr.-Ing. **Ronny Große-Uhlmann**,
Endress+Hauser Conducta, Waldheim

Extended Abstract

Ein aus metrologischer Sicht vollständiges Messergebnis sollte in der Regel [1, 2] die dazu gehörige Messunsicherheit beinhalten. Die Messunsicherheit ist ein Maß für die Qualität des Messwertes. Sie bildet somit die Grundlage für das Vertrauen des Kunden in die Messung und wird von ihm in zunehmendem Maße eingefordert.

Gerade bei Prozessanalysensensoren werden Messunsicherheiten durch eine Vielzahl von Faktoren wie Umwelt- und Prozesszustandsgrößen mitbestimmt. Zum Aufstellen eines möglichst genau quantifizierten, umfassenden Unsicherheitsbudgets sind daher entsprechend viele Informationen notwendig. Dabei ist zu beachten, dass sich die Messproblematik selten auf den Sensor bzw. das Sensorelement beschränkt sondern alle Elemente der Messstelle zu berücksichtigen sind. Eine Messstelle umfasst den Sensor, eine Armatur sowie eine Vorrichtung zur Signalwandlung und ist an einem Prozess angeschlossen. Neben den Prozessbedingungen können auch die Einbauverhältnisse und die Umweltbedingungen der Messstelle relevant sein [3]. Außerdem spielen vielfach Wartung/ Rekalibrierung und das Alter einzelner Komponenten eine Rolle.

Das Problem ist nun: Es ist kaum möglich, dass einem einzelnen alle notwendigen Informationen vorliegen, um ein Modell für eine vollständige, qualitative und quantitative Messunsicherheitsbetrachtung aufzustellen. Diese Informationen verteilen sich auf unterschiedliche Sachgebiete und somit normalerweise auf unterschiedliche Personenkreise.

Hier wird ein Ansatz präsentiert, ein solches Modell zu erzeugen. Durch seine umfassende, streng hierarchische Herangehensweise besitzt er das Potential einer genauen, realistischen Messunsicherheitsbeschreibung.

Den Ausgangspunkt bildet ein qualitatives Modell der Messung, welches sämtliche Aspekte, die Einflüsse auf die Messunsicherheit haben, berücksichtigt.

Dieses Modell umfasst

- Unsicherheiten, die sich aus den Grundlagen des Messprinzips und des Sensoraufbaus ergeben,

- Produktionsbedingte Unsicherheiten, die aus statistischen Daten des Qualitätsmanagements und der Warenendkontrolle abgeleitet werden können,
- Unsicherheiten durch applikationstypische und prozessspezifische Umwelt-, Einbau- und Prozessbedingungen,
- Unsicherheiten durch applikationstypische und prozessspezifische Wartungs- und Rekalibrierungsprozeduren,
- aus Sensordatenbanken mit statistischen Daten über Alterung und Einsatzdauer der Sensoren abgeleitete Unsicherheitsbeiträge.

Erstellt wird dieses Modell z.B. von der Entwicklungsabteilung unter Einbeziehung von Wissen bzw. Daten aus der Produktion und aus dem Qualitätsmanagement. Für alle nicht vorhandenen Informationen enthält das Modell Platzhalter: Entweder grobe Schätzwerte (Standardbedingungen, Standardkalibrierprotokolle etc.) oder aber - für seltener relevante Parameter - neutrale Größen, die zunächst keine eigenen Beiträge zur Messunsicherheit liefern.

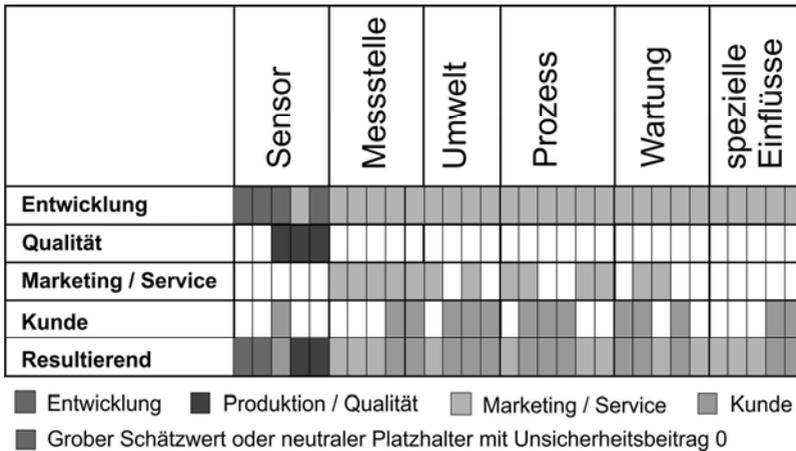


Bild 1: Hierarchische Erzeugung eines resultierenden Parametersatzes / Szenarios für die Angabe der Messunsicherheit aus verschiedenen Quellen.

Ausgehend von diesem Modell lassen sich durch kundennahe Organisationsbereiche (Marketing / Service) Szenarien für Standardapplikationen entwerfen, d.h. Teilparametersätze, die in das Rechenmodell passen und einzelne Aspekte verfeinern.

Dieser Grad der Verfeinerung erlaubt das Konzipieren von Messstellen und das Planen von Anlagen.

Doch erst in Zusammenarbeit mit dem Kunden und unter Verwendung der konkreten Daten aus / zu seinen Prozessen entfaltet das Modell seine wahre Stärke, da nun qualitativ hochwertige Aussagen zur den Messergebnissen in seinen Anlagen möglich werden. Auch wird es nun möglich, falls die entsprechende Messtechnik vorhanden ist, die Messergebnisse auf höherwertige oder rückführbare Normale zurückzuführen oder wenigstens abzuschätzen, inwieweit diese metrologische Rückführbarkeit überhaupt sinnvoll ist.

Eine große Chance diesbezüglich bietet das Konzept der „Industrie 4.0“, bei dem Kunden und Geschäftspartner direkt in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse eingebunden sind [4]. Durch die Vernetzung wird ein Zusammenfließen von Hersteller- und Kundendaten und damit die Parametrierung eines solchen Modells zur Messunsicherheit in Echtzeit möglich.

Und hier schließt sich der Kreis zu den „weichen“ psychologischen Einflussfaktoren, denn eine solche Vorgehensweise erfordert Mut und Vertrauen. Mut des Herstellers, der mit realistischen Messunsicherheiten wirbt, die viel schlechter sein werden als man durch Zählen der Stellen auf den omnipräsenten Digitalanzeigen vermuten könnte, und Vertrauen des Kunden in den Hersteller: In die Fähigkeit des Herstellers, seine wertvollen Daten zu schützen und vor allem seine Integrität im Umgang mit diesen Daten.

- [1] VIM3, JCGM 200:2012 - International vocabulary of metrology -- Basic and general concepts and associated terms. 2012: BIPM
- [2] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections). 2008, Paris: BIPM Joint Committee for Guides in Metrology
- [3] Wilhelm, T. & Pechstein, T. (2010). Einflüsse realer Einsatzbedingungen auf die pH-Messung mit Glaselektroden Effects of Real World Application Conditions on pH Measurements with Glass Electrodes. tm - Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik, 77(3), pp. 140-149. Retrieved 15 Sep. 2017, from doi:10.1524/teme.2010.0046
- [4] BMBF: Digitale Wirtschaft und Gesellschaft. Industrie 4.0. <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html> (11.9.2017)

Unsicherheitsbeiträge zur Signalerfassung der Prozess-Verschleissbestimmung beim Tiefbohren

Ein Beispiel aus der praktischen Anwendung

Dipl.-Ing. **Christoph Einspieler**,
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Friedrich Bleicher**,
TU-Wien, Österreich

Kurzfassung

Aufgrund der fortschreitenden Automatisierung in der Fertigungstechnik erhält die automatische Verschleiß- und Prozessparameterkontrolle einen immer höheren Stellenwert. In der Serienfertigung werden heute der allgemeine Maschinenzustand sowie der Prozess selbst überwacht und gegebenenfalls korrigierende Maßnahmen ergriffen. Der Bearbeitungsprozess wird in der Einlaufphase von erfahrenen Maschinenbedienern empirisch optimiert. In der Produktion erfolgt in den meisten Fällen nur eine Postprozess-Überwachung. Dies bedeutet, dass an einem Fertigungsteil Abweichungen detektiert werden, jedoch erst beim folgenden Fertigungsteil korrigierend eingegriffen wird. Ein solches Vorgehen ist in der Einzelfertigung nicht möglich. Man verlässt sich hier hauptsächlich auf die Kompetenz des Maschinenbedieners, der mit Erfahrung und seiner menschlichen Sensorik durch aktiven Eingriff in die Prozessparameter einen stabilen Bearbeitungsprozess gewährleistet. Aufgrund von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen wird die Mehrmaschinenbedienung und die Maschinenverfügbarkeit ein immer größeres Thema. Daher ist der Wunsch begründet, auch in der Einzelfertigung entsprechende Prozessüberwachungs- und Korrektursysteme einzusetzen.

Es wird hierzu versucht, ein generelles Verständnis über die Verhältnisse am Schneidkeil zu erlangen, um die Grundlagen für ein den Bearbeitungsprozess abbildendes Modell zu entwickeln. Da die Qualität jedes Modells direkt von der Aussagekraft seiner Eingangsvariablen abhängt, werden die verschiedenen Messsysteme diskutiert und auf deren Tauglichkeit hin überprüft. Das gewählte Modell, kontinuierlich durch prozessrelevante Messdaten erweitert, soll eine sehr kurzfristige Vorhersage zur Stabilität des Bohrprozesses ermöglichen und gegebenenfalls Daten für ein korrigierendes Eingreifen liefern. Zu diesem Zweck müssen die Unsicherheiten der gemessenen Signale möglichst genau bekannt sein.

Im Zuge der Analyse werden vor allem die physikalischen Verhältnisse am Schneidkeil und im Besonderen deren schallemittierende Effekte untersucht. Es wird nicht nur die Entstehung

betrachtet, sondern das Forschungsziel ist daraufhin ausgerichtet, mittels Messungen, Filterung der Rohdaten und deren Bewertung mit anschließender Auswertung der gewonnenen Daten auf die Verhältnisse direkt am Schneidkeil zu schließen. Aufgrund der Ergebnisse wird in Echtzeit automatisch in den Arbeitsprozess regulierend eingegriffen.

Gerade beim Bearbeitungsprozess des Tiefbohrens besteht für solche Prozessüberwachungssysteme eine besondere Nachfrage. Dieser Prozess ist sehr kostenintensiv und wird häufig bei sehr teuren Werkstücken am Ende der Bearbeitungskette eingesetzt.

Es wird anhand des Einlippen-Tiefbohrprozesses gezeigt, dass eine automatische In-Prozessüberwachung basierend auf der Beobachtung von Körperschallemissionen möglich ist. Voraussetzung dafür ist die möglichst gute Fehlerkorrektur der Messwerte und die richtige Abschätzung der Messunsicherheiten.

1. Einleitung

Der Prozess des Bohrens gehört zu den ältesten formgebenden Bearbeitungsverfahren für das Erreichen reproduzierbarer geometrischer Formen, da Bohrungen z.B. für die Realisierung einer leistungsfähigen Verbindungstechnik unerlässlich sind.

Die Einteilung der Bearbeitungsverfahren erfolgt nach DIN 8580, unter Punkt 3.2.2.2 werden die verschiedenen Rundbohrprozesse mit geometrisch bestimmten Schneiden unterteilt. Grundsätzlich wird dabei zwischen zweischneidigen symmetrischen und einschneidigen asymmetrischen Bohrer unterschieden. Die zweischneidig-symmetrischen Bohrer werden für eher kurze Bohrungen eingesetzt. Ein typischer Vertreter ist der Spiralbohrer. Vom Tiefbohren spricht man wenn das Verhältnis der Bohrtiefe zum Bohrdurchmesser größer als 10 ($l/d_n > 10$) ist. In der Tiefbohrtechnik unterscheidet man drei grundlegende Verfahren: das Einlippenbohren (ELB), das BTA-Tiefbohren und das Ejektor-Tiefbohren[1].

Bei Tiefbohrprozessen entscheidet herkömmlich der Maschinenbediener aus Erfahrung und subjektiver Einschätzung, ob ein Werkzeug verschlissen ist oder nicht. Um den Mehraufwand bei einem Werkzeugversagen möglichst zu vermeiden, wird oftmals das Tiefbohrwerkzeug unnötigerweise zu früh gewechselt. Menschliches Versagen bzw. Fehleinschätzungen oder organisatorische Defizite bei der Mehrmaschinenbedienung sind grundlegend in einer pragmatischen Darstellung der Verfahrensschwierigkeiten.

Der zunehmende Verschleiß hat im Prozess sowohl einen steigenden Mittenverlauf als auch sinkende Bohrungsflächenqualität zur Folge. Da Tiefbohren vor allem mit Bohrtiefen von $l/d_n > 500$ einen relativ aufwendigen Produktionsprozess darstellt, gilt das Senken der Ausschussrate und der Korrekturbearbeitung infolge großer Toleranzabweichungen der erste Schritt zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Prozesses.

Die Prozessüberwachung kann letztlich in zwei, grundlegend verschiedene Bereiche unterteilt werden:

- die prozessbegleitende Überwachung, welche auch In-Prozess-Überwachung genannt wird, und
- die Post-Prozess-Überwachung.

Beide Überwachungsarten sind als selbständig zu bezeichnen und überschneiden sich nur sehr selten.

Die Unterschiede liegen vor allem im Überwachungszeitpunkt. Bei der Post-Prozess-Überwachung erfolgt die Kontrolle nach der Bearbeitung. Jedoch bei der In-Prozess-Überwachung erfolgt sie während der Bearbeitung.

Die ausschlaggebenden Messgrößen der beiden Überwachungsarten sind in Bild 1.1 gezeigt.

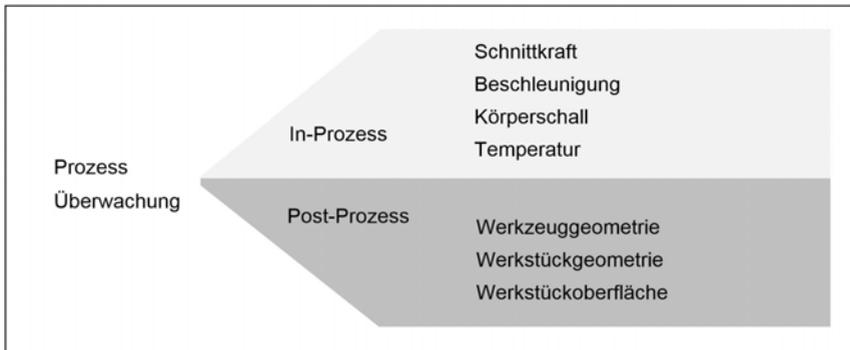


Bild 1.1: Messgrößen in der Prozessüberwachung

Werkstücke in der Massenfertigung werden meist nach dem Prozess überwacht. Werkstücke mit tiefen Bohrungen werden meist nur in Einzel- oder Kleinserien hergestellt. Zu beachten ist auch, dass bei einem Bearbeitungsschritt das Werkzeug mehrmals gewechselt werden muss. Eine Kontrolle im Nachhinein ist somit nicht sinnvoll, da nur das Ergebnis der gesamten Bearbeitung aufgezzeigt werden würde und keine Informationen über die Teilschritte vorliegen.

2. Kräfte- und Schallentstehung am Bohrer

Beim Spanen werden durch eine oder mehrere Schneiden eines Werkzeuges Stoffteile in Form von Spänen vom Werkstück mechanisch getrennt. Wird mit geometrisch bestimmten Schneiden gearbeitet, ist die Form des Schneidkeiles und dessen Lage zum Werkstück bekannt.

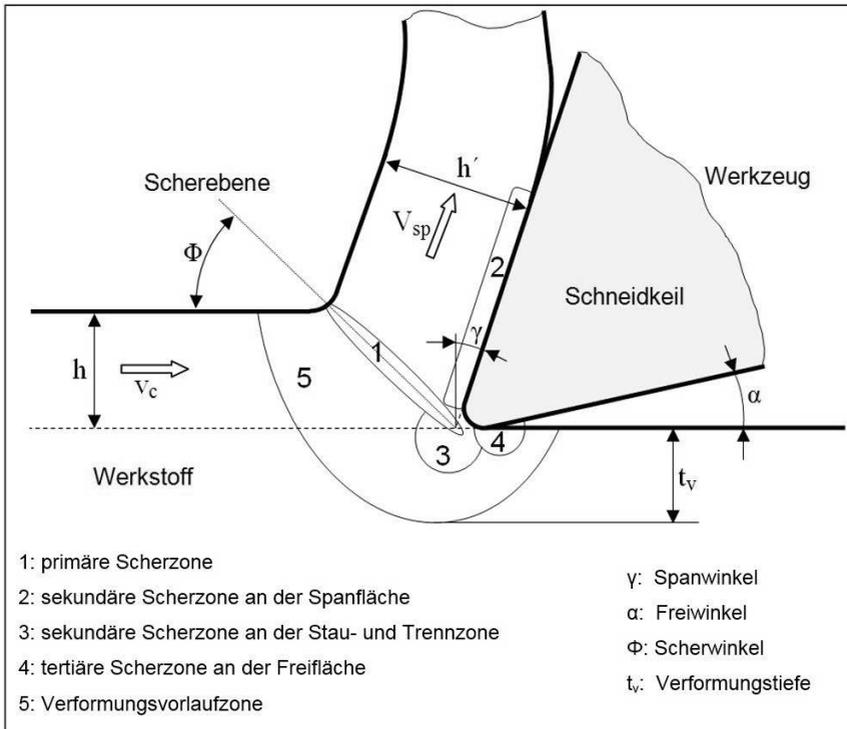


Bild 2.1: Scher- und Reibzonen bei der Spanbildung

Die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück induziert Kräfte, die Schubspannungen im Werkstückmaterial verursachen. Bei Überschreiten der Fließgrenze des Werkstoffs findet in der primären Scherzone eine plastische Deformation statt. Die kontinuierliche Verformung des Werkstoffs resultiert in der Bildung eines Spans, der sich entlang der Spanfläche des Werkzeugs bewegt. Die Relativbewegung zwischen Span und Spanfläche bewirkt Reibkräfte zwischen Spanunterseite und Spanfläche des Werkzeugs. Diese können so groß werden, dass die Scherfließspannung des Werkstoffs überschritten, und eine sekundäre Scherzone im Bereich der Spanunterseite ausgebildet wird. An der Schneidkante kommt es zur Reibung mit der Werkstückoberfläche. Diese Reibzone vergrößert sich mit zunehmendem Verschleiß des Werkzeugs. Ähnlich wie bei der Reibzone an der Spanfläche kann es auch hier zur Ausbildung einer Scherzone kommen, der tertiären Scherzone. Obwohl die verschiedenen Scherzonen unterschiedliche Ursachen haben, ist eine klare lokale Trennung in der Realität

nur schwer möglich. Insbesondere an der Schneidkante gehen die Zonen ineinander über (siehe dazu Bild 2.1 nach [2], [3]).

Ein Schluss von den Zerspankräften auf den Verschleißzustand des Werkzeuges bei einem relativ einfachen Prozess wie beim Drehen ist möglich, da die Zerspankräfte direkt gemessen werden können. Die Prozessbeobachtung gestaltet sich hingegen beim Tiefbohren relativ komplex, da der Schnitt in einer schwer zugänglichen Stelle stattfindet. Auch ist insbesondere durch Reibungseffekte zwischen dem Werkzeugschaft, den Spänen und der Bohrungswand eine Zuordnung der Messwerte des Drehmoments und des Vorschubs auf die Schnittkräfte wie Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft sehr aufwändig und fehlerbehaftet.

Ein weiterer Zugang zur Erfassung und Beurteilung der Verhältnisse am Schneidkeil ist die Messung Körperschall-emittierender Effekte an der Schneidkante. Der Schervorgang und insbesondere die Ausprägung der Scherzone hängt neben den geometrischen Eingriffbedingungen, vor allem der Schnitttiefe, insbesondere von der Mikrogeometrie der Schneidkante (Schneidkantenverrundung) und vom Verschleißzustand ab.

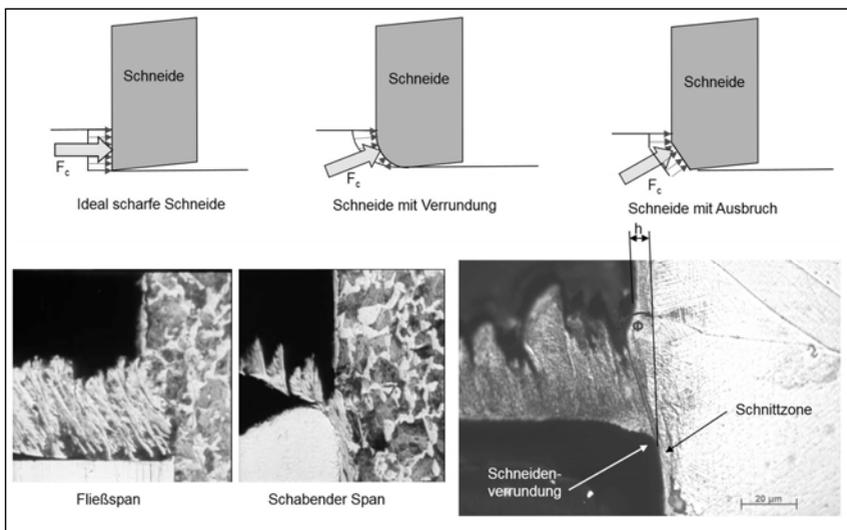


Bild 2.2: Spanbildung in Abhängigkeit zum Verschleißzustand

In Bild 2.2 ist die Spanbildung in Abhängigkeit vom Verschleißzustand des Werkzeuges dargestellt. Beim Einlippenbohren bilden sich in erster Linie zwei Verschleißmerkmale aus – eine fortschreitende Verrundung der Schneidkante und ggf. ein Schneidkantenausbruch.

Beides führt zu einem partiell negativen Spanwinkel. Daraus resultieren einerseits eine Verschiebung zwischen Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft und andererseits ein höherer Verformungsgrad des Werkstückmaterials an der Schneide. Die dabei auftretenden schallemittierenden Effekte können in zwei Gruppen unterteilt werden. Dies sind zunächst jene Effekte, welche direkt in der Schnittzone auftreten und prioritär vom Verschleißzustand abhängig sind. Weiters treten schallemittierenden Effekte außerhalb der Scherzone auf, welche in erster Linie als Störsignale zu betrachten sind. In Bild 2.3 sind die schallemittierenden Effekte bezogen auf deren Entstehung dargestellt.

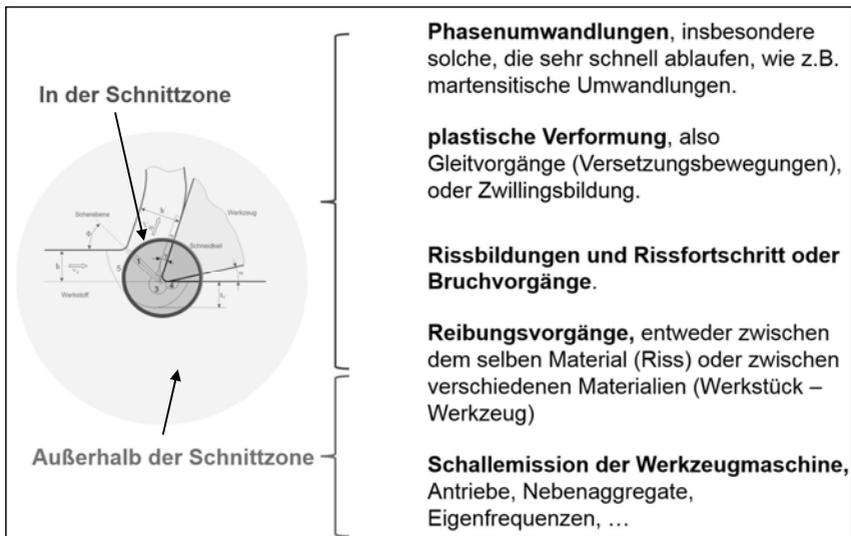


Bild 2.3: Schallentstehung am Werkzeug

Im Folgenden sind die verschiedenen schallemittierenden Effekte kurz beschrieben.

Bei Temperaturerhöhungen zeigen viele Stähle eine Ferrit-Austenit-Umwandlung (Austenitisierung). Bei beschleunigter Abkühlung aus dem austenitisierten Zustand kommt es zur Bildung von Nichtgleichgewichtsgefügen. Dies führt grundsätzlich zu einer Schallemission. Da jedoch die Phasenumwandlung bei den beim Bohren auftretenden Temperaturen zu langsam verläuft, ist die Schallemission viel zu gering.

Der Vorgang der plastischen Verformung von metallischen Werkstoffen beruht primär auf der Bewegung und Neubildung von Versetzungen und deren Wechselwirkung mit Hindernissen

im Kristallgitter sowie der mechanischen Zwillingbildung. Die Zwillingbildung und das Veretzungsgleiten laufen meist gleichzeitig als parallele Prozesse ab (siehe [4], [5]).

Die klassische Theorie der Rissausbreitung beschreibt eine Spannungsspitze an der Rissfront, welche die Zugfestigkeit des Werkstoffes überschreitet. Infolgedessen wandert die Rissfront kontinuierlich, um einen Spannungsausgleich herbeizuführen. Neuere Arbeiten wie z.B. am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart zeigen, dass diese Theorien insbesondere für härtere Werkstoffe zu bezweifeln sind, da die Elastizität von Festkörpern von der Intensität ihrer Verformung abhängt. So verlieren Metalle ihre Festigkeit, wenn sie sich durch zunehmende Dehnung dem Zustand des Materialversagens nähern. Während sich Risse ausbreiten, absorbieren und vernichten sie Energie vom umgebenden Material. Ist die Region um den Riss durch Hyperelastizität verhärtet, kann in kürzerer Zeit sehr viel mehr Energie zum Riss transportiert werden. Umgekehrt wird der Energietransport langsamer, wenn der Bereich um die Risspitze weicher wird. Daher schlussfolgert man, dass die Hyperelastizität entscheidend ist, um die Dynamik von Rissen korrekt verstehen und vorhersagen zu können.

Reibungsvorgänge, welche an den Scherzonen auftreten, sind akustisch nur schwer von allen anderen Reibvorgängen beim Bearbeitungsprozess zu unterscheiden. Eine Ausfilterung dieser Schallemissionen erscheint nach dem heutigen Stand der Technik nicht möglich. Dennoch erwähnen einige Arbeiten wie [6], [7], dass sich bei zunehmendem Verschleiß die Verhältnisse an den verschiedenen Scherzonen ändern.

3. Unsicherheitsbeiträge der gemessenen Größen bei der Prozess-Verschleißbestimmung

Die Einflussgrößen, die bei der Ermittlung der gemessenen Kräfte, Momente und Schall relevant sind, also die auf die Messwerte der Sensoren wirkenden Messunsicherheitsanteile, lassen sich weiter in zwei Bereiche teilen. Ein Bereich sind die Komponenten, die ihren Ursprung in der Entstehung der Kräfte, Momente und des Schalls haben. Sie sind somit anlagenspezifisch und liegen in einem Bereich bestehend aus jenen Komponenten, die dem Messgerät zugeordnet werden können. Diese sind somit messgerätespezifisch, wie es Bild 3.1 darstellt.

Die Zuordnung der Messwerte, wie Vorschub und Drehmoment auf die klassischen Prozesskräfte wie Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft, ist beim Bohren sehr aufwendig, da durch dominierende Einflüsse, welche infolge diverser Interaktionen zwischen Bohrer, Bohrschaft,

Werkstück, Kühlschmiermittel und Maschine auftreten, ein hohes Maß an Unsicherheit besteht. In Bild 3.2 sind die verschiedenen Entstehungsursachen von Drehmoment und Vorschub dargestellt.

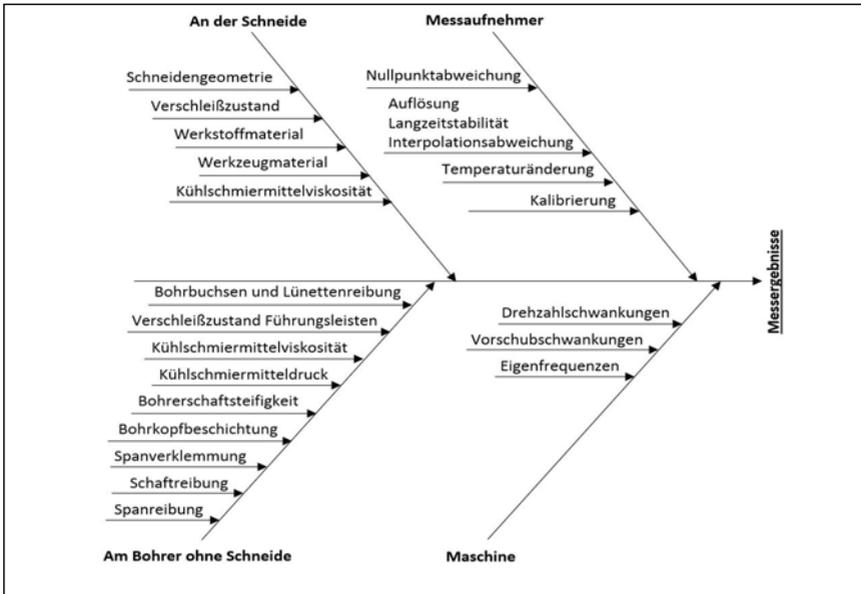


Bild 3.1: Messunsicherheitsrelevante Einflussgrößen bei der Kraft-, Momenten- und Schallmessung

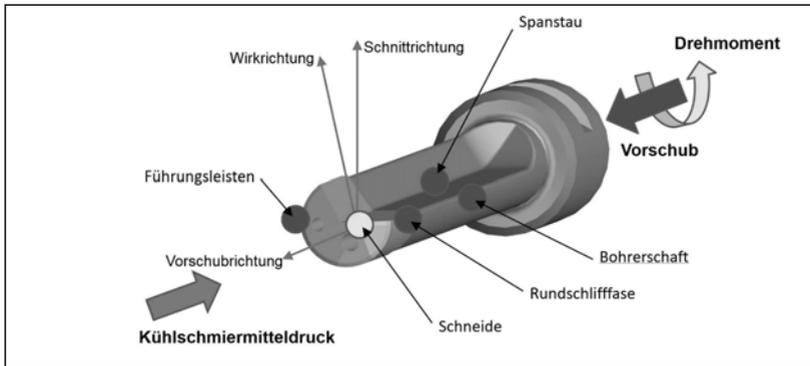


Bild 3.2: Entstehung der Kräfte und Momente am Bohrer

Bohrlochwand empirisch ermittelt dargestellt. Man kann erkennen, dass diese Einflüsse in der Größenordnung der Zerspankräfte an der Schneide liegen. Die gemessene Vorschubkraft hängt also stark vom Kühlschmiermitteldruck und der Kühlschmiermittelviskosität ab. Das gemessene Bohrerndrehmoment hängt ebenfalls von den Kühlschmiermittel-Parametern und der Vorschubkraft, von den Materialpaarungen Bohrkopf und Bohrerschaft zu Werkstoff sowie von der Bohrerschaftgeometrie und -steifigkeit ab.

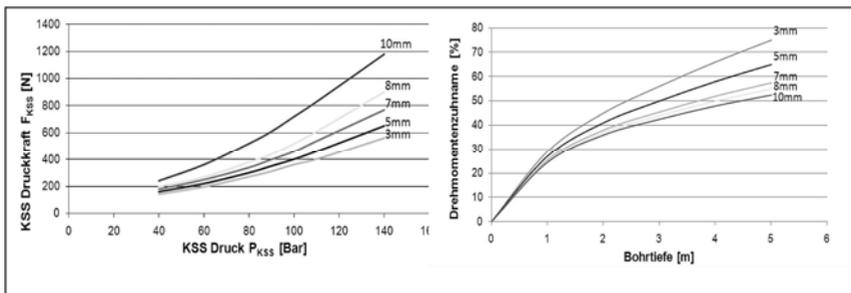


Bild 3.3: Kühlschmiermitteldruckkraft und Drehmomentzunahme durch Schafreibung beim Bohrer

Die zur Vorschub- und Drehmomentabschätzung benötigte Kühlschmiermitteldruckmessung hängt wiederum stark von der KSS-Viskosität, der Bohrergeometrie sowie dem Verhalten der abgeführten Späne in der Spansicke ab. Ein Schluss von der KSS-Druckmessung an der Bohrer-versorgung zum tatsächlichen Druck an der Bohrkopfspitze ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass durch die hohe Messunsicherheit in der ganzen Kette von Vorschubkraft- und Drehmomentmessung nur sehr eingeschränkt auf die wahren Verhältnisse am Schneidkeil beim Tiefbohren geschlossen werden kann. Die bewährten Methoden zur Verschleißerkennung, wie sie zum Beispiel beim Drehen eingesetzt werden, versagen also beim Tiefbohren. Um aussagekräftigere Daten zu bekommen, wird eine weitere Messgröße, die Schallemission, herangezogen. Zwei Effekte sind für die Schallemission verantwortlich; es sind dies die Verformung durch Versetzungsbewegung bzw. Zwillingsbildung und die Rissausbreitung.

Aufgrund der beim Tiefbohren systembedingt relativ kleinen Schnittgeschwindigkeit fällt der Temperaturanstieg in der Scherebene gering aus. Um einen Scherfortschritt initiieren zu können, muss erst eine entsprechende Spannung aufgebaut werden. Dies dauert angesichts der Steifigkeit des Systems eine gewisse Dauer bis zu dem Zeitpunkt, wo die erforderliche Spannung erreicht wird oder aber auch jene Zeit erreicht ist, wo Versetzungshindernisse mit Hilfe von thermischen Bewegungen zu überwinden sind. Es tritt kontinuierlich Verformung in den Scherbändern auf, solange bis die Spannung zu gering geworden ist und der Vorgang wieder zum Stillstand kommt. Diesem Effekt ist die Ursache der Schallemission zuzuschreiben. Bei steigender Schnittgeschwindigkeit hingegen kommt es zu dem Effekt, dass die Fließspannung σ_f immer über der zum Auslösen einer Verformung notwendigen Spannung liegt. Es stellt sich also ein kontinuierlicher Ablauf ein. Dadurch verringert sich die Erregung zur Schallemission stark oder kommt völlig zum Erliegen.

Die Zuordnung des gemessenen Schallsignals auf die verschiedenen verschleißabhängigen Effekte am Schneidkeil kann durch zwei, sich unterscheidende Versuchsreihen durchgeführt werden, die immer nur einen der beiden Effekte versuchstechnisch zugänglich machen. Daher wurde auf das Prinzip des Biege- und des Zugversuchs zurückgegriffen, um die spezifischen Frequenzen, die eine Rissausbreitung bzw. ein Umformvorgang hervorrufen, zu extrahieren und deren jeweilige Schallemission zu charakterisieren. Anhand dieser Messungen unter Laborbedingungen konnte gezeigt werden, dass jeder Werkstoff bei der Bearbeitung, neben diversen Störgeräuschen, einen eindeutigen akustischen Fingerabdruck abgibt. Die abgegebenen detektierten Körperschallfrequenzen hängen zwar in erster Linie vom Werkstückwerkstoff ab, repräsentieren aber auch die Zustände am Schneidkeil. Es handelt sich also bei den beschriebenen Effekten um sehr kurze, rasch aufeinander folgende Stöße. Anhand des Dirac'schen Stoßes lassen sich die bei den Messungen auftretenden breiten Frequenzbänder erklären.

Außerdem erreicht, wenn überhaupt, nur ein Impuls auf direktem Weg den Sensor (Bild 3.4, Strahl 1). Alle anderen Impulse erreichen den Sensor nur nach einer oder mehreren Reflexionen und mit erheblicher Verzögerung (Bild 3.4: Schallausbreitung im Festkörper, Strahl 2). Der Sensor registriert somit eine große Anzahl an Signalen, welche sich von der Phase, der Amplitude und infolge von Interferenzen auch in der Frequenz unterscheiden. Ein am Entstehungsort scharfes Signal wird vom Sensor als mehr oder weniger breitbandiges Rauschen registriert. Dieser Effekt tritt umso stärker auf, je größer der Abstand zwischen Schallmitter und Sensor wird - und je geringer die Materialdämpfung ist.

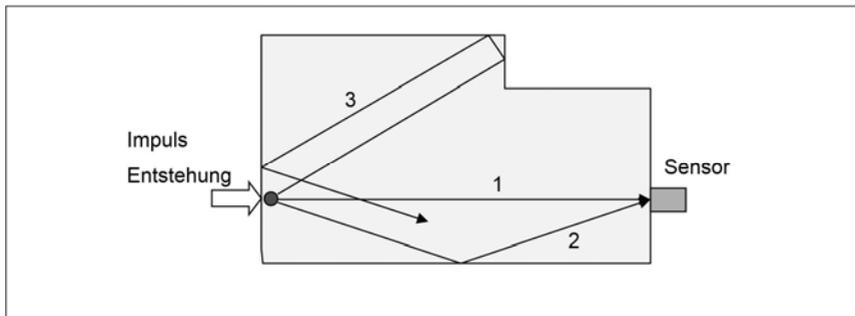


Bild 3.4: Schallausbreitung im Festkörper

Trifft eine Longitudinal-Welle nun auf eine Grenzfläche (der Werkstückoberfläche), wird ein Teil reflektiert und der Rest in verschiedenartige Oberflächenwellen umgewandelt. Dieser Effekt erleichtert die Sensoranbindung erheblich, da nur solche Longitudinal-Wellen detektiert werden, die nahezu direkt oder mit nur geringer Reflexion auf den Sensor treffen. Bei wiederholten Reflexionen und langen Wegen verschwindet die Wellenenergie durch Dämpfung fast vollständig. In der Praxis trifft generell, wenn überhaupt, nur wenig Wellenenergie direkt auf den Sensor. Messen wir jedoch direkt die Oberflächenwellen, welche sich in alle Richtungen an der Oberfläche ausbreiten, ist es viel einfacher, energiestarke Signale zu detektieren. Dennoch ist die Reichweite der Oberflächenwellen gering genug, um ein übermäßiges Verschleifen der Signale zu verhindern. Wegen der einfacheren Messbarkeit und dem Fehlen der Dispersion, hat es sich bewährt, die Rayleigh-Welle zu detektieren. Da aus oben angeführten Gründen immer auf einen möglichst kurzen Übertragungsweg geachtet werden muss, wird der Körperschallsensor dem schallmittlernden Bohrkopf nachgeführt. Die zur Körperschallmessung eingesetzten Sensoren haben meist einen Bereich von 20 kHz bis 500 kHz. Bei diesen

hohen Frequenzen liegt das primäre Problem der Schallübertragung zum Sensor, der sogenannten Ankopplung. In Bild 3.5 sind die Frequenzgänge verschiedener Ankopplungsarten an den Körperschallsensoren dargestellt. Bei Körperschallsensoren mit einem extrem hohen Frequenzbereich und einer Resonanzfrequenz von über 1 MHz muss sichergestellt werden, dass die Resonanzfrequenz des Systems Sensor – Werkstück nicht unter die maximal zu messende Frequenz sinkt.

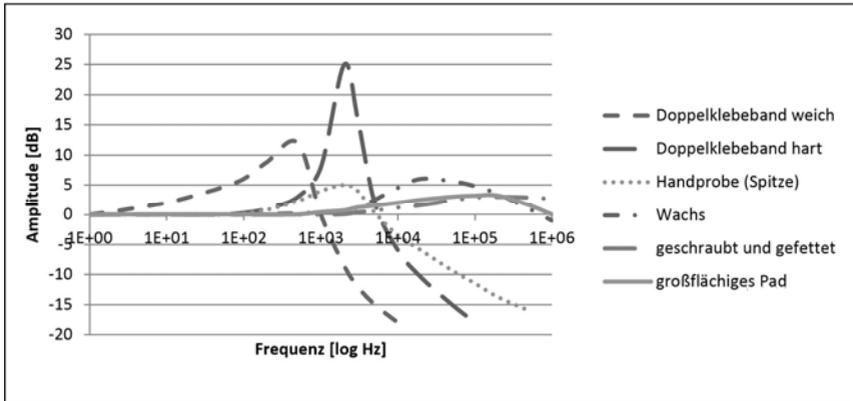


Bild 3.5: Übertragungsverhalten bei verschiedenen Ankopplungen

Die bewegte Ankopplung gestattet es nicht, auf die beste Lösung „geschraubt und gefettet“ zurückzugreifen. Es wurde daher ein großflächiges Pad (siehe Bild 3.5) ähnlich der Ankopplung bei Ultraschallsensoren entwickelt.

Körperschallsignale werden wie alle Schwingungen durch zwei Faktoren quantifiziert; erstens der Frequenz und zweitens der Schwingleistung. Die bei der Körperschallmessung aufgezeigten Probleme zeigen, dass zwar die Frequenzen mit sehr geringen Messunsicherheiten angegeben werden können, jedoch nicht die Amplituden. Diese sind von vielerlei Effekten abhängig.

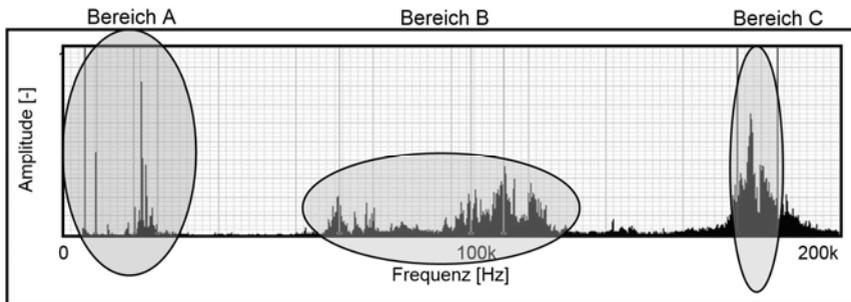


Bild 3.6: Exemplarisches Schallspektrum beim realen Einlippenbohrprozess

In Bild 3.6 ist exemplarisch ein Schallspektrum beim Tiefbohrprozess von austenitischen Cr-Mn-Stahl dargestellt. Es lässt sich eine Vielzahl von zum Teil breiten Spektren erkennen, wobei Nutz- (Bereich A) und Störsignale (Bereich B) getrennt oder aber, wie in Bereich C dargestellt, zusammenfallen können. Durch eine Bestimmung des akustischen Material-Fingerabdrucks können die Nutzsignale entsprechend zugeordnet werden. Bei den Störsignalen sind in erster Linie Reibungseffekte und Kavitation des Kühlschmierstoffes am Bohrkopf dominierend. Die Störsignale sind meist deutlich leistungsstärker als die Nutzsignale.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, sind die dominierenden schallemittierenden Effekte am Schneidkeil die plastische Verformung und die Rissbildung. Der Verschleiß am Einlippenbohrer führt vor allem zu einem negativ werdenden Spanwinkel (siehe Bild 2.2). Dabei steigt die durch die plastische Verformung emittierte Schallemission durch den steigenden Umformgrad des abgetrennten Materials, hingegen sinkt die durch die Rissbildung emittierte Schallemission durch die geringere Neigung. Bei zunehmendem Verschleiß verschiebt sich also das Verhältnis zwischen den Spektrumsleistungen, welche beim Riss bzw. bei plastischer Verformung auftreten. Dadurch umgeht man die Notwendigkeit einer absoluten Messung.

Die gemessenen Werte, wie Vorschubkraft, Drehmoment, Körperschallamplitude und Körperschallfrequenz mit ihren Messunsicherheiten, sind Eingangsgrößen eines sehr fehlertoleranten Modells, um einen Schluss auf die momentanen Verhältnisse am Schneidkeil zu ermöglichen. In Bild 4.1 sind die Abhängigkeiten und gegenseitigen Beeinflussungen dargestellt.

4. Zusammenfassung

Die heute im Allgemeinen üblichen Eingangsgrößen für die In-Prozess-Überwachung eines Zerspanungsvorgangs sind in erster Linie Kräfte und Momente. Wie sich jedoch zeigt, sind diese bei einem komplexeren Bearbeitungsprozess - wie dem Bohren - nur bedingt einsetzbar, um auf den Verschleißzustand zu schließen. Dies liegt in erster Linie an den hohen, kaum bestimmbaren Messunsicherheiten der Größen. Als eine mögliche Abhilfemaßnahme konnte gezeigt werden, dass man die Modelle durch eine weitere Eingangsgröße, dem Körperschallspektrum, erweitern kann. Es ist jedoch eine genaue Bestimmung des akustischen Fingerabdrucks des Materials nötig, um die Nutzsignale eindeutig zuordnen zu können. Dabei ist festzuhalten, dass vor allem die höher-frequente Rissbildung oft mehrere Frequenz-Spektren emittiert. Dadurch können jene Frequenzen zur Beobachtung ausgesucht werden, welche nicht durch Störsignale überlagert werden. Da gleichzeitig immer der emittierte Körperschall für die plastische Verformung und die Rissbildung beobachtet und relativ zu einander verglichen werden, sind amplitudenverändernde Beeinflussungen nicht problematisch. Probleme in der Ankopplung oder veränderte Ausbreitungsbedingungen haben unbedeutend geringe, frequenzabhängige Abschwächungen zur Folge. Das Verhältnis zwischen den Spektrumsleistungen, welche beim Riss bzw. bei plastischer Verformung auftreten, ist für die Verschleißbestimmung sehr aussagekräftig.

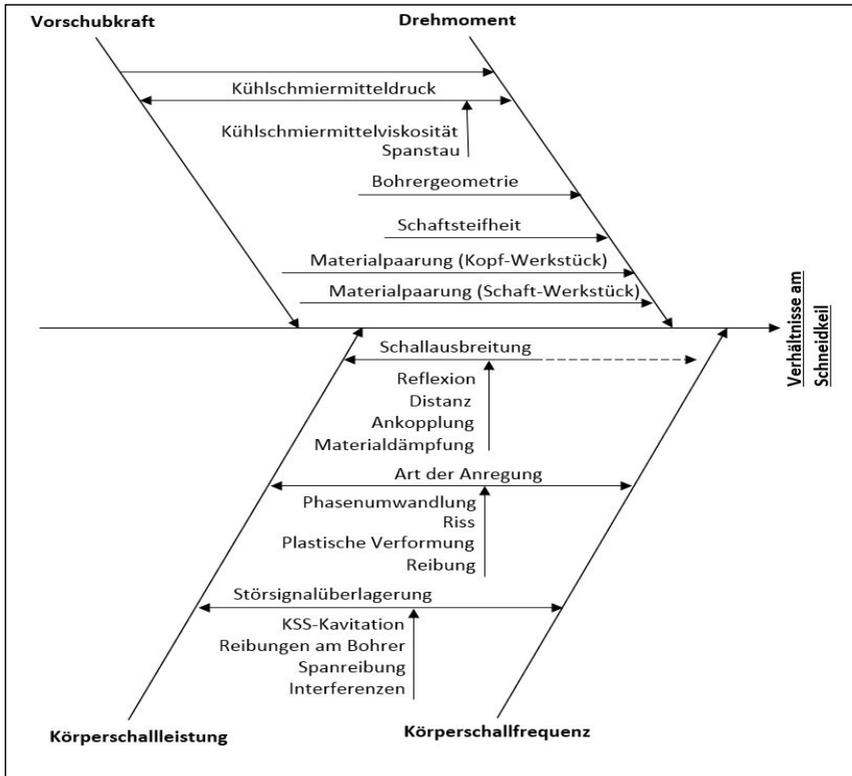


Bild 4.1: Messunsicherheitsbeiträge bei der Ermittlung der Verhältnisse am Schneidkeil

5. Literaturverzeichnis

- [1] Beratende Gesellschaft für Tiefbohr- und Zerspanungstechnik GmbH: 25.07.2005, Tiefbohrlexikon, <http://www.tiefbohr-lexikon.de>, <http://www.tiefbohren.info>,
- [2] Warnecke, G.: Spanbildung bei metallischen Werkstoffen, Technischer Verlag Resch, München 1974
- [3] Vieregge, G.: Zerspanung der Eisenwerkstoffe, Verlag Stahleisen M.B.H./Düsseldorf, 1970
- [4] Yoo, M.H.: Slip, Twinning and Fracture in Hexagonal Close-Packed Metals. In: Mat. Trans. (1981), S. 409–418
- [5] Seeger, A.: The Temperature and Strain-Rate Dependence of the Flow Stress of Body-Centred Cubic Metals: A Theory Based on Kink-Kink Interactions, In: Z. Metallkunde 72 (1981), S. 369–381
- [6] Rogers, H.C.: Adiabatic Plastic Deformation, Ann. Rev. Mater. Sci., 1979
- [7] Rogers, H.C.; Mescall, J.; Weiss, V: Adiabatic Shearing-General Nature and Material Aspects, in Material Behavior under High Stress and Ultrahigh Loading Rates, Plenum Press, New York, 1983

In situ Einpunktkalibrierung von Thermometern mittels Fixpunkten

In situ single point calibration of thermometers by means of fix point cells

Dr. rer. nat. **Pavo Vrdoljak**,
Endress+Hauser Wetzler GmbH + Co. KG, Nesselwang;
Dr.-Ing. **Marc Schalles**, Institut Prozess- und Sensortechnik,
Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Kurzfassung

In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Ilmenau hat Endress+Hauser Wetzler die Messunsicherheiten und deren Beiträge einer Einpunktrekalibrierung zu einem vereinfachten Messunsicherheitsbudget betrachtet. Als Kalibriermethode werden sogenannte Fixpunktzellen vorgestellt, welche Referenztemperaturen im Prozess bzw. in der Anwendung in situ ermöglichen. Die Auswirkung einer Kennlinienkorrektur auf die Messunsicherheit einer festgestellten Messabweichung eines Thermometers im Vergleich zur Messung ohne Korrektur wird dabei eingehend beleuchtet. Es kann gezeigt werden, dass mit Hilfe einer Einpunktrekalibrierung eines Thermometers mit nachfolgender Korrektur des Messgeräts (Transmitter-Matching) die Messunsicherheit deutlich verkleinert werden kann.

Abstract

In cooperation with Technische Universität Ilmenau, Endress+Hauser Wetzler has evaluated and compared the measurement uncertainties and their contributions of a single point recalibration by means of a simplified measurement uncertainty budget. Fix-point-cells providing calibration points were introduced which enable in situ reference temperatures. Both the detected deviations of the thermometer values and the option of an adjustment of the characteristic curve by means of the transmitter (transmitter-matching) were taken into account. It can be shown that a single point recalibration of a thermometer in combination with a subsequent transmitter-matching reduces the measurement uncertainty significantly.

1. Einleitung

In Produktionsanlagen, in welchen beispielsweise pharmazeutische- oder chemische Produkte hergestellt werden, kommen Industriethermometer zum Einsatz, die von den Anlagenbetreibern in regelmäßigen Zeitabständen kalibriert werden müssen. Der Grund hierfür ist die Sicherstellung der Einhaltung vorgegebener Grenzen von zeitlich auftretenden Messabweichungen von Thermometern, um spezifizierten Sicherheitsgrenzen und Effizienzzielen zu entsprechen. Wird an den Anlagen eine Vor-Ort-Kalibrierung durchgeführt, geschieht dies in der industriellen Praxis erfahrungsgemäß an zwei Temperaturen. Eine Kalibriertemperatur ist typischerweise die Eispunkt-Temperatur, die zweite wird typischerweise mit tragbaren Blockkalibratoren (inkl. Referenzmessung) eingestellt. Beide Kalibriertemperaturen liegen dabei in einem Bereich, in welchem die relevanten Prozesstemperaturen genau gemessen werden müssen. Wird im Anschluss an die Kalibrierung die festgestellte Messabweichung bewertet, wird in der Regel nur darauf geachtet, ob sich diese innerhalb vorgegebener Grenzen bewegt. Tritt der Fall auf, dass die Abweichung außerhalb der Grenzen liegt, wird das Thermometer normalerweise ausgemustert. Liegt die Abweichung jedoch innerhalb der erlaubten Grenzen, wird es meist wieder eingebaut, ohne dabei eine Korrektur der festgestellten Messabweichung (Kennlinien-Justierung oder Transmitter-Matching), die eine Messunsicherheitsminimierung zur Folge hätte, durchzuführen. Die ohne Anwendung des Transmitter-Matchings bestehende geringere Messgenauigkeit, scheint bei den Nutzern und Verantwortlichen nicht von Belang zu sein. Vielmehr scheint die Vermeidung eines vermeintlich schlechten Kosten-Nutzen-Verhältnisses im Vordergrund zu stehen, weil die Kosten für eine Mehrpunktkalibrierung mit anschließendem Matching relativ hoch im Vergleich zum Nutzen sind, wenn das Thermometer mit Korrektur in der Anlage wieder in Betrieb genommen wird.

Endress+Hauser Wetzlar hat in Zusammenarbeit mit dem Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau die Messunsicherheiten und deren Beiträge zu einem vereinfachten Messunsicherheitsbudget einer Einpunktkalibrierung betrachtet. Es wurde verglichen, welche Messunsicherheit sich nach einer festgestellten Messabweichung des Thermometers ergeben, wenn das Thermometer ohne Korrektur bzw. mit Korrektur weiter betrieben wird. Dabei sind Thermometertechnologien betrachtet worden, die einen Ausbau des Thermometers aus der Anlage nicht erfordern und somit eine in situ Kalibrierung ermöglichen.

2. Möglichkeiten der In-situ-Kalibrierung

Der Vorteil einer in-situ-Kalibrierung liegt darin, dass eine Kalibrierung ohne einen Ausbau des Thermometers stattfinden kann. Die finanziellen Vorteile liegen dabei auf der Hand, weil weder ein Techniker das Thermometer manuell ausbauen und kalibrieren muss noch eventuelle Anlagenstillstände notwendig sind.

Die technischen Möglichkeiten, eine Kalibrierung in situ durchzuführen sind durchwegs untersucht und gegeben [1-3]. Die Firma *electrotherm GmbH Geraberg* hat bereits Thermometermodelle entwickelt und auf den Markt gebracht, die es Anlagenbetreibern ermöglichen, Thermoelemente mittels integrierter Miniaturfixpunktzellen in situ zu kalibrieren (siehe Abbildung1).

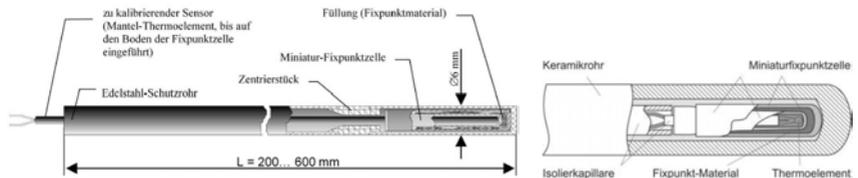


Bild 1: Modellausführungen von Miniaturfixpunktzellen der Firma *electrotherm GmbH Geraberg* ([4] links, [5] rechts).

Diese speziellen Thermometer enthalten in abgeschlossenen, zylinderförmigen Keramikzellen Reinstmetall oder -legierungen und nutzen die temporär konstante Schmelztemperatur des Fixpunktmaterials bei der Phasenumwandlung aus.

Ebenfalls gibt es eine Entwicklung einer solchen Miniaturfixpunktzelle an der *Technischen Universität Ilmenau*, die in Abbildung 2 dargestellt ist. Sie beruht auf demselben physikalischen Prinzip und besteht neben dem primären Thermoelement und der Miniaturfixpunktzelle zudem noch aus einem sekundären Thermoelement und einem Heizelement. Letzteres ermöglicht dem Anwender bei konstanten Prozesstemperaturen einen prozessunabhängigen, externen Start des Kalibriervorgangs [6].

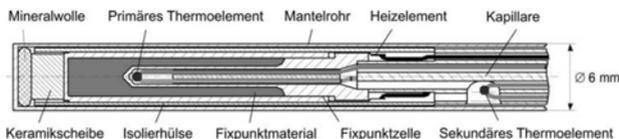


Bild 2: Aufbau des an der TU Ilmenau entwickelten Messeinsatzes mit integrierter Miniaturfixpunktzelle für den Einsatz in Kraftwerken [6].

Neben Phasenübergängen zwischen festem- und flüssigem Aggregatzustand gibt es auch Übergänge im festen Zustand. Diese treten beispielsweise in ferroelektrischen Materialien, wie Blei-Zirkonat-Titanaten $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT) oder Bariumtitanat BaTiO_3 , zwischen ferroelektrischer und paraelektrischer Phase auf. Dabei wird die sprunghafte Änderung der Dielektrizitätskonstante ϵ_r an der Curie-Temperatur des Materials zur Detektion und Ermittlung einer Referenztemperatur ausgewertet [7].

In diesem Bereich hat *Endress+Hauser* im April 2017 auf der Hannover Messe einen Messeinsatz mit Miniaturfixpunktzelle vorgestellt, dessen Aufbau in Abbildung 3 dargestellt ist. Dieser besteht aus einer keramischen Fixpunktzelle, welche mit dem Temperatursensor eine thermische Einheit bildet. Die Einsetzbarkeit liegt im Temperaturbereich bis $160\text{ }^\circ\text{C}$.

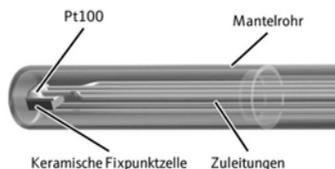


Bild 3: Aufbau des von *Endress+Hauser* entwickelten Messeinsatzes mit integrierter Fixpunktzelle für den Einsatz in Prozessen mit Bedingungen bis $160\text{ }^\circ\text{C}$.

3. Beurteilung der Messunsicherheit

In der folgenden Beurteilung der Messunsicherheit, wird für den Vergleich von einem handelsüblichen Widerstandsthermometer (Dünnschicht-Pt100, Klasse A) mit einem typischen Messumformer mit digitalem Ausgang ausgegangen. Weiter soll angenommen werden, dass das Thermometer zwischen $0\text{ }^\circ\text{C}$ und $150\text{ }^\circ\text{C}$ betrieben wird und der Messumformer einer Temperatur von $60\text{ }^\circ\text{C}$ ausgesetzt ist.

Werden nun als Eingabeparameter Herstellerangaben zu Langzeitstabilität der Sensor- und Messumformerkennlinie sowie Einflüsse von Versorgungsspannungsschwankungen und Temperatureinflüsse auf die Messung mit dem Messumformer für eine fünf- und eine achtzehnmonatige Betriebszeit herangezogen, erhält man nach Berechnung der Messunsicherheit der Messstelle in Abhängigkeit der Temperatur die in Abbildung 4 gezeigten Unsicherheitsverläufe ($k = 2$) – ohne vor dem Einsatz des Thermometers im Prozess am

Messumformer ein Matching angewendet zu haben (Regelfall). Zusätzlich wurde die typische Messunsicherheit im Auslieferungszustand des Thermometers (0 Monate) mit abgebildet.

Es zeigt sich in Abbildung 4, dass sich neben den physikalischen Randbedingungen die Einsatzzeit des Thermometers deutlich auf die Messunsicherheit auswirkt. Die berechnete erweiterte Messunsicherheit U nach einer Einsatzzeit von bis zu fünf Monaten liegt im gesamten Temperaturbereich unterhalb 0,6 K (grau). Dabei ist die Kurve des Auslieferungszustandes nahezu identisch zu der nach fünf Monaten Einsatzzeit. Mit fortschreitender Betriebszeit nimmt die Messunsicherheit stetig zu. So liegt, zum Beispiel nach 18 Monaten, die errechnete Messunsicherheit bezogen auf den gesamten Temperaturbereich knapp oberhalb 0,6 K.

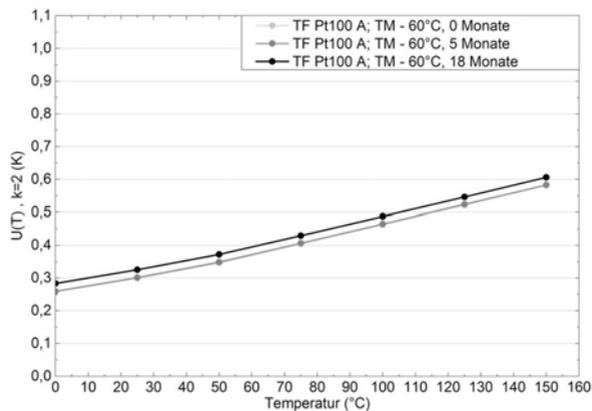


Bild 4: Erweiterte Messunsicherheit U in Abhängigkeit der Temperatur für Thermometer mit Messumformer im Auslieferungszustand (0 Monate) sowie nach fünf- und achtzehnmonatiger Betriebszeit im Prozess.

Wäre ein Messgerät für fünf Monate bei den oben genannten Bedingungen betrieben worden, würde ein Betreiber die in Abbildung 1 grau gezeichnete Messunsicherheit vorfinden. Würde nach der Betriebszeit (5 Monate) eine Rekalibrierung durchgeführt und auf die darauf folgende Kennlinienkorrektur verzichtet werden, müsste aufgrund der steigenden Unsicherheit der Langzeitstabilität mit einer zunehmenden Messunsicherheit der Temperaturmessung gerechnet werden.

Es steht außer Frage, dass eine Mehrpunkt-Kalibrierung mit Matching hohe Kosten bedeutet. Für ein Thermometer, das an der Anlage von einem Techniker kalibriert und anschließend im Messumformer korrigiert wird, belaufen sich die Kosten für einen Anlagenbetreiber bei interner Durchführung durch den eigenen Mitarbeiter auf etwa 50 EUR pro Kalibrierpunkt (inkl. Dokumentation). Bereits 80 EUR pro Kalibrierpunkt und Thermometer sind es bei einer extern beauftragten Durchführung. Pro Jahr können die Gesamtkosten bei Anlagen mit bis zu 1000 Messstellen sehr schnell in den mittleren sechsstelligen Bereich gehen.

Im Folgenden wird beschrieben, welchen Vorteil es bietet, das eingesetzte Thermometer zumindest an einem Punkt zu rekalisieren und die Kennlinienabweichung zu korrigieren. Die Herangehensweise an die Ermittlung der Korrekturen und Unsicherheiten orientiert sich dabei an [6] und werden der Übersichtlichkeit wegen für Temperaturen $T > 0$ betrachtet.

Wird bei einer Einpunktrekalibrierung an einer Temperatur T_{Kal} eine Kennlinienabweichung $\Delta R(T_{\text{Kal}})$ festgestellt, kann eine korrigierte Kennlinie durch Schätzung eines Kennlinienparameters bestimmt werden.

Die korrigierte, neue Kennlinie $R_2^{R0}(T) = R_{0,2} \cdot (1 + A \cdot T_{\text{Kal}} + B \cdot T_{\text{Kal}}^2)$ wird, wenn man den *Kennlinienparameter* R_0 schätzt zu

$$R_2^{R0}(T) = R_1(T) + \Delta R^{R0}(T) = R_1(T) + \frac{P(T)}{P(T_{\text{Kal}})} \cdot \Delta R(T_{\text{Kal}}) \quad (1)$$

$$\text{mit} \quad \Delta R(T_{\text{Kal}}) = R_2(T_{\text{Kal}}) - R_1(T_{\text{Kal}}) \quad (1)$$

Dabei ist:

- $P(T), P(T_{\text{Kal}})$ das Substitut des Ausdrucks $1 + A \cdot T + B \cdot T^2$
bzw. $1 + A \cdot T_{\text{Kal}} + B \cdot T_{\text{Kal}}^2$,
- $R_1(T)$ die Ausgangskennlinie $R_1 = R_{0,1} \cdot (1 + A \cdot T_{\text{Kal}} + B \cdot T_{\text{Kal}}^2)$,
- $R_2^{R0}(T)$ die korrigierte Kennlinie durch eine R_0 -Korrektur,
- $R_1(T_{\text{Kal}}), R_2(T_{\text{Kal}})$ der bekannte Widerstandswert der Erst- bzw. der Rekalisierung

Ebenso kann der *Kennlinienparameter* A neu bestimmt werden, wobei diese eine geschätzte *lineare Abweichungsfunktion* $\Delta R^A(T)$ ergibt, die Gegenstand dieses Beitrags ist.

Der Abschätzung der linearen Abweichungsfunktion $\Delta R^A(T)$ liegt die Annahme zugrunde, dass der Widerstandswert R_0 am Eispunkt keine Änderung aufweist. Nach [6] ergibt sich die linear korrigierte Kennlinie $R_2^A(T)$ zu:

$$R_2^A(T) = R_1(T) + \frac{T}{T_{\text{Kal}}} \cdot \Delta R(T_{\text{Kal}}) \quad (2)$$

Die Unsicherheit der linear korrigierten Kennlinie kann mit Hilfe von

$$U(R_2^A(T)) = \sqrt{U(R_1)^2 + \left(\frac{T}{T_{\text{Kal}}}\right)^2 \cdot U(\Delta R_{\text{Kal}})^2 + \left[\Delta R(T_{\text{Kal}}) \cdot \left(\frac{P}{P_{\text{Kal}}} - \frac{T}{T_{\text{Kal}}}\right)\right]^2} \quad (3)$$

abgeschätzt werden. Dabei ist:

$U(R_1)$	die Unsicherheit der individuellen Kennlinie beim Transmitter-Matching nach der Erstkalibrierung,
$U(\Delta R_{\text{Kal}})$	die Unsicherheit der bei der Einpunktrekalibrierung gemessenen Kennlinienabweichung,
$\Delta R(T_{\text{Kal}})$	die ermittelte Kennliniendifferenz bei der Einpunktrekalibrierung, sowie
$\Delta R(T_{\text{Kal}}) \left(\frac{P}{P_{\text{Kal}}} - \frac{T}{T_{\text{Kal}}}\right)$	die Differenz zwischen den Korrekturmethode, d.h. $R_2^{R0}(T) - R_2^A(T)$.

Gleichung (4) genauer betrachtet ergibt die Erkenntnis, dass die Unsicherheit dieser Einpunktrekalibrierung abhängig von der, gegenüber der Erstkalibrierung, ermittelten Kennliniendifferenz $\Delta R(T_{\text{Kal}})$ an der Kalibriertemperatur T_{Kal} ist.

Der Verlauf der erweiterten Messunsicherheit nach Gleichung (4) ist in Abbildung 5 für verschiedene, bei der Rekalibrierung festgestellte Kennlinienabweichungen $\Delta R(T_{\text{Kal}})$ gezeigt – im Folgenden in Temperaturwerten $\Delta T(T_{\text{Kal}})$ ausgedrückt. Für die Berechnung wurde eine Kalibriertemperatur $T_{\text{Kal}} = 115 \text{ °C}$ mit einer *beigeordneten* Unsicherheit von $U(T_{\text{Kal}}) = 0,2 \text{ K}$ ($k = 2$) angenommen, was beispielsweise mit einer in-situ-Kalibration oder einer Einpunktkalibrierung mittels Blockkalibrator erreicht werden kann. Die daraus resultierende Unsicherheit $U(\Delta R_{\text{Kal}})$ errechnet sich dabei aus:

$$U(\Delta R_{\text{Kal}}) = U(T_{\text{Kal}}) \cdot (R_0(A + 2B \cdot T_{\text{Kal}})) \quad (4)$$

Bei der Berechnung wird ebenfalls angenommen, dass ein Thermometer eine Erstkalibrierung erfahren hat und die Messunsicherheit dieser Kalibrierung bei $U(R_1) = 0,05 \Omega$ lag und über den gesamten Temperaturbereich konstant war.

In Abbildung 5 zeigt sich, dass die Unsicherheit der Einpunktkalibrierung (purpur) rechts vom Kalibrierpunkt generell höher ist. Dies ist aufgrund des quadratischen Temperaturverhältnisses im zweiten Summanden in Gleichung (4) zu erwarten. Links der Kalibriertemperatur liegt die Messunsicherheit unterhalb des Wertes des Kalibrierpunktes und wird mit zunehmender Abweichung $\Delta T(T_{\text{Kal}})$ größer. Allerdings wird auch sehr deutlich, dass bei einer nicht vorhandenen Abweichung $\Delta T(T_{\text{Kal}}) = 0 \text{ K}$ die Unsicherheit bei durchgeführtem Matching über den ganzen Temperaturbereich unterhalb der Unsicherheit ohne Kennlinienkorrektur (grau) liegt. Deutlich schlechter wird die Unsicherheit im unteren Temperaturskalenbereich mit zunehmender Abweichung $\Delta T(T_{\text{Kal}}) > 0 \text{ K}$, jedoch im Bereich um den Kalibrierpunkt bleibt sie dafür deutlich unterhalb der grauen Linie.

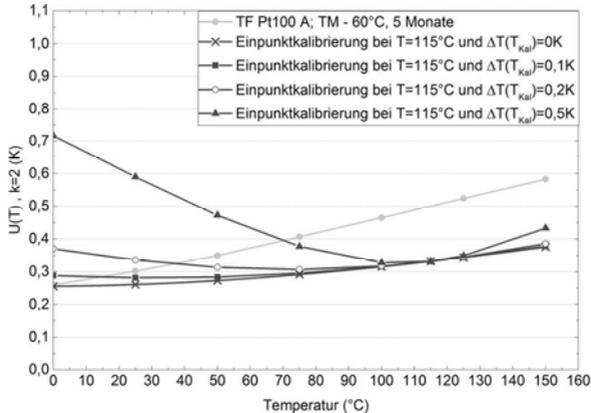


Bild 5: Erweiterter Messunsicherheitsverlauf U in Abhängigkeit der Temperatur für verschieden festgestellte Kennlinienabweichungen $\Delta T(T_{\text{Kal}})$ (entspricht $\Delta R(T_{\text{Kal}})$) bei einer Einpunktkalibrierung bei $T_{\text{Kal}} = 115 \text{ °C}$.

Werden unter den gleichen Randbedingungen dieselbe Betrachtungen der Unsicherheit angestellt, jedoch für eine bei einer niedrigeren, in der Mitte des Messbereichs liegenden Kalibriertemperatur $T_{\text{Kal}} = 70\text{ °C}$, erhält man den in Abbildung 6 gezeigten Verlauf.

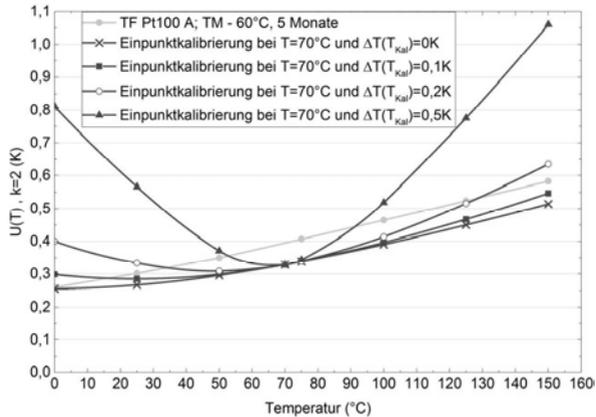


Bild 6: Erweiterter Messunsicherheitsverlauf U in Abhängigkeit der Temperatur für verschieden festgestellte Kennlinienabweichungen $\Delta T(T_{\text{Kal}})$ (entspricht $\Delta R(T_{\text{Kal}})$) bei einer Einpunktrekalibrierung bei $T_{\text{Kal}} = 70\text{ °C}$.

Das Ergebnis zeigt im Vergleich mit Abbildung 5, dass bei kleineren Abweichungen $\Delta T(T_{\text{Kal}})$ der Verlauf der Messunsicherheit in etwa im gleichen Bereich liegt, doch bei größeren Abweichungen erheblich größer ist. Im Bereich der Rekalibrierungstemperatur, allerdings, liegen die Unsicherheitskurven auch hier unterhalb der grauen Linie. Nichtsdestoweniger kann mit dem vorgestellten Modell und einem Kalibrierpunkt in der Mitte des Messbereichs, selbst bei einer festgestellten Abweichung von $\Delta T(T_{\text{Kal}}) = 0,1\text{ K}$, die Unsicherheit in weiten Teilen des Messbereichs unterhalb der grauen Kennlinie erhalten werden.

Durch diese Rechnung zeigt sich, dass für das Erreichen einer optimalen Messunsicherheit im interessierenden Temperaturbereich die Kalibrierpunkttemperatur entsprechend gewählt werden muss. In Fällen, in welchen über den gesamten Messbereich hohe Genauigkeiten gefordert werden, sind mehrere Messpunkte unabdingbar.

4. Zusammenfassung

In der durchgeführten Untersuchung konnte gezeigt werden, dass bereits bei einer Korrektur im Messumformer mittels Einpunktkalibrierung sich die Messunsicherheit deutlich verringern lässt. Der Aufwand einer solchen Einpunktkalibrierung mit Transmitter-Matching ist technisch und finanziell (ca. 50 EUR pro Kalibrierpunkt) vergleichsweise überschaubar. Der hohe Nutzen der weiteren Unsicherheitsminimierung sticht daher klar hervor. Dies gilt insbesondere im Bereich des Kalibrierpunktes.

5. Literatur

- [1] Ruppel, F. R.: Modeling a Self-Calibrating Thermocouple for Use in a Smart Temperature Measurement System; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 39 No. 6, 1990.
- [2] Ronsin, H. und Elgourdou, M.: Extension of the minicell thermocouple calibration technique to the palladium fixed point; TEMPMEKO '96, 6th Intern. Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Torino, Proceedings; 1996.
- [3] Boguhn D.: Miniatur-Fixpunktzellen als Basis selbstkalibrierender elektrischer Berührungsthermometer; Techn. Universität Ilmenau, Dissertation, 2002.
- [4] Abbildung von electrotherm Geraberg, entnommen aus Bernhard F., Handbuch der Thermischen Temperaturmessung 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [5] Erb, W. und Lehman, H.: Anwendung von Fixpunkt-Kalibrierstäben zur genaueren Bestimmung des Wirkungsgrades von Turbolader-Turbinen; Temperatur 2017, Tagung Berlin 17. und 18. Mai 2017, Tagungsband, Hrsg. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, ISBN: 978-3-944659-04-6, 2017.
- [6] Berhard, F.: Handbuch der Thermischen Temperaturmessung 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [7] Schalles, M. et al.: Investigations on Curie temperature of ferroelectric materials as a temperature fixed-point; AIP Conference Proceedings, 1552(1), 2013
- [8] Endress+Hauser Wetzler GmbH+Co. KG, Obere Wank 1, 87484 Nesselwang

Ganzheitliche Erfassung von Gewinden als Antwort auf gesteigerte Messunsicherheitsanforderungen

Dipl.-Ing. **Torsten Meß**,

Lehren- und Meßgerätewerk Schmalkalden GmbH;

M.Sc. **Vinzenz Ullmann**, Prof. Dr.-Ing. habil. **Eberhard Manske**,

Technische Universität Ilmenau

Kurzfassung

Die heutigen Definitionen von wichtigen Bestimmungsgrößen am Gewinde beschreiben geometrisch-ideale Gewinde und reichen nicht aus, um ein wirkliches Gewinde vollständig zu charakterisieren. Da die derzeit verwendeten messtechnischen Verfahren auf diesen Definitionen beruhen, besteht eine Hemmung der Innovationen in der Gewindemesstechnik. Messverfahren wie die Drei-Draht-Methode sind Stand der Technik und erfassen dennoch eine Gewindekenngroße nur punktuell. Neue optische Messverfahren im Bereich der Fokusvariation ermöglichen es, ein Gewinde in seiner Gesamtheit zu erfassen. Sie bieten die Möglichkeit, Kenngrößen wie den Paarungsflankendurchmesser wirklicher Gewinde zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden die mathematischen Grundlagen der relevanten Gewindekenngroßen neu erarbeitet und alle Einflussgrößen auf den Paarungsflankendurchmesser systematisch analysiert und beschrieben. Nachfolgend wurde die neu erarbeitete Theorie im Versuch am Paarungsausgleichsverhalten wirklicher Gewinde praktisch untersucht und bestätigt. Aus diesen Betrachtungen und Untersuchungen zum Paarungsausgleichbetrag und zum Paarungsflankendurchmesser eröffnen sich neue Möglichkeiten bei der funktionsgerechten Tolerierung aller relevanten Bestimmungsgrößen am Gewinde. Perspektivisch bilden die neuen, auf wirkliche Gewinde bezogenen Definitionen der Bestimmungsgrößen die Grundlage zur messtechnischen Überwachung und Steuerung der Einflussgrößen auf den Paarungsflankendurchmesser bei der Fertigung und zur ganzheitlichen Erfassung eines Gewindes als dreidimensionales Objekt in seiner realen Gestalt. Zur Umsetzung der ganzheitlichen Erfassung eines Gewindes kommt das optische Messverfahren der Fokusvariation zum Einsatz, dass im Rahmen des Beitrags hinsichtlich der erzielbaren Unsicherheit von Messergebnissen betrachtet wird. Die praktische Bedeutung der Messunsicherheit im Vergleich zwischen örtlich begrenzt messenden und ganzheitlich messenden Verfahren wird am Beispiel von Gewindekenngroßen diskutiert.

1. Bestimmungsgrößen am Gewinde

Die Grundlage für die sichere Funktion von Produkten ist stets eine entsprechende vollständige Spezifikation. Diese kann jedoch nur solche Merkmale umfassen, für die unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen verlässliche Prüfentscheidungen getroffen werden können. Diese Prüfentscheidungen beruhen dabei auf einer entsprechend geeigneten, also hinreichend kleinen Messunsicherheit als Bestandteil des Messergebnisses. Um die Vergleichbarkeit von Messergebnissen zu gewährleisten, sind zur Charakterisierung des betreffenden Geometrieelementes stets wohldefinierte Bestimmungsgrößen erforderlich. Im Falle der Gewinde sind die Bestimmungsgrößen in den Normen DIN 2244 [1] und ISO 5408 [2] festgelegt. Die dort enthaltenen Definitionen der Bestimmungsgrößen sind uneingeschränkt für geometrisch-ideale Gewinde gültig. Probleme entstehen allerdings bei der Übertragung einiger dieser Definitionen auf wirkliche Gewinde, da sie der dort vorliegenden, aufgrund der stets vorhandenen Abweichungen komplizierten Geometrie nicht vollständig und eindeutig entsprechen können.

Dieser Umstand stellt somit ein wesentliches Hemmnis für die Entwicklung neuer Gewindemessverfahren dar. Aus diesem Grunde und insbesondere auch mit Hinblick auf die weiter steigenden Anforderungen seitens der industriellen Anwender an die Messunsicherheit, ist eine Neufassung aller betreffenden Definitionen erforderlich geworden. Diese wurde für die in Tabelle 1 aufgeführten wichtigen Bestimmungsgrößen bereits durchgeführt [3].

Tabelle 1: Bestimmungsgrößen mit vorliegender Neufassung der Definitionen

Achse des Flankendurchmessers	Achse des einfachen Flankendurchmessers	Einschraublänge
Axialschnitt	einfacher Flankendurchmesser	Paarungsflankendurchmesser
Flankendurchmesser		
Flankendurchmesserlinie		
Flankendurchmesserszylinder		
Flankendurchmesserkegel		

Die neuen Definitionen wurden so ausgeführt, dass sie sich erstmals vollständig und eindeutig auch auf wirkliche Gewinde übertragen lassen. Es ist beabsichtigt, diese Definitionen bei der anstehenden Überarbeitung von DIN 2244 durch den Normenausschuss „Gewinde“ des DIN als Vorschlag einzubringen.

2. Messverfahren zur ganzheitlichen Erfassung von Gewinden

Zur vollständigen messtechnischen Charakterisierung von Gewinden sind Verfahren notwendig, die das Gewinde ganzheitlich, also als dreidimensionales Objekt in seiner realen Gestalt erfassen können. Neben taktilen Verfahren bieten sich hierbei insbesondere auch optische Verfahren, wie das Fokusvariationsverfahren [4] an.

Aus dem erfassten dreidimensionalen messtechnischen Modell des Gewindes, welches als Ergebnis der eigentlichen Messung vorliegt, lassen sich für die jeweils relevanten Bestimmungsgrößen, wie z. B. den Flankendurchmesser, die entsprechenden Messwerte ableiten. Die notwendige Grundlage dafür ist nun erstmals mit den neuen Definitionen für die in Tabelle 1 enthaltenen Bestimmungsgrößen gegeben. Diese sind dabei vollständig unabhängig von der Art des gewählten Messverfahrens gültig und anwendbar.

Die grundlegende Funktion von Gewinden besteht in der Paarungsfähigkeit mit dem zugehörigen Gegenstück. Diese wird grundsätzlich von allen geometrischen Merkmalen des Gewindes beeinflusst. Durch die Messung des Flankendurchmessers oder des einfachen Flankendurchmessers allein ist daher kein vollständiger Rückschluss auf die Paarungsfähigkeit im Bereich der Gewindeflanken des betrachteten Gewindes möglich. Die entscheidende Bestimmungsgröße zu deren Beurteilung ist vielmehr der Paarungsflankendurchmesser, da dieser die Einflüsse aller geometrischen Merkmale im Bereich der Gewindeflanken auf die Paarungsfähigkeit des Gewindes berücksichtigt. Die Prüfung des Paarungsflankendurchmessers und der Paarungsfähigkeit des Gewindes erfolgt bisher zumeist in einfacher, wirtschaftlicher und sicherer Weise durch die Anwendung von Gewinde-Gutlehren.

Entscheidend für die Erstellung einer funktionsgerechten und vollständigen Spezifikation von Gewinden ist jedoch die genaue Kenntnis der Wirkung aller Einflussgrößen auf den Paarungsflankendurchmesser. Eine entsprechende systematische Analyse wurde daher in [3] durchgeführt. Zu den betreffenden Einflussgrößen gehören, neben dem Flankendurchmesser selbst, alle Abweichungen des Gewindes von der idealen Geometrie im Bereich der Gewindeflanken. Im Einzelnen betrifft dies die Abweichungen der Teilung oder der Steigung, die Gewindeflankenwinkelabweichungen, die Geradheitsabweichungen der Gewindeflanken, die Rauheit der Gewindeflanken und die Formabweichungen des Flankendurchmesserszylinders (bei zylindrischen Gewinden) oder des Flankendurchmesserkegels (bei kegeligen Gewinden). Die Wirkung dieser Einflussgrößen wurde einer mathematischen Analyse unterzogen, in deren Ergebnis die näherungsweise Berechnung des Paarungsflankendurchmessers möglich ist. Die dabei durchgeführten umfangreichen theoretischen Betrachtungen wurden anhand von experimentellen Untersuchungen zum Paarungs-

ausgleichsverhalten wirklicher Gewinde praktisch nachvollzogen und in deren Ergebnis auch bestätigt.

Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung von Gewinden sind grundsätzlich zur messtechnischen Ermittlung und Auswertung aller Bestimmungsgrößen, deren Abweichungen den Paarungsflankendurchmesser beeinflussen, geeignet. Darüber hinaus bieten sie auch die Möglichkeit, den Paarungsflankendurchmesser eines Gewindes durch Messung zu bestimmen. In Verbindung mit den neuen, auf wirkliche Gewinde bezogenen Definitionen der Bestimmungsgrößen bilden die Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung von Gewinden perspektivisch die Grundlage zur messtechnischen Überwachung der Einflussgrößen auf den Paarungsflankendurchmesser bereits während der Fertigung des Gewindes und damit zur effizienten Steuerung des Fertigungsprozesses. Auch die Prüfung der gefertigten Gewinde hinsichtlich der zugehörigen funktionsorientierten und vollständigen Spezifikation kann zukünftig mit diesen Messverfahren erstmals im vollen Umfang realisiert werden. Sie sind damit geeignet, die seit langem etablierte Anwendung von Lehren, als eine unmittelbare und tatsächliche Prüfung der Paarungsfähigkeit des Gewindes, zukünftig in sinnvoller Weise zu ergänzen.

3. Gewindemessung mit dem Fokusvariationsverfahren – Grundlagen und Betrachtungen zur Messunsicherheit

Die Gewindemessung mit dem Fokusvariationsverfahren (siehe Bild 1) beruht auf der Aufnahme von Bilderstapeln eines Mikroskopbildfeldes. Während der Aufnahme der Einzelbilder wird die Schärfenebene automatisiert verschoben. Für jedes Einzelbild wird der zugehörige Positionswert gespeichert. Im Anschluss findet eine Kontrastauswertung der Pixel im Bildfeld statt. Dabei wird jedes Pixel mit den jeweils umgebenen Pixeln verglichen und genau das Einzelbild gesucht, in dem der Kontrast am größten ist. Die gemessene Position eines Datenpunktes wird aus der Pixelposition bestimmt. Ermittelt man die Höhenlage für alle Pixel im Bildfeld, entsteht ein 2,5-D-Segment aus Datenpunkten, die einen Teil der Oberfläche des Gewindes wiedergeben. Durch die Aufnahme weiterer Segmente ergibt sich die Möglichkeit, die vollständige Oberfläche des Gewindeprüflings zu erfassen. Die zusammengesetzten Segmente erlauben die Auswertung von vielen Profil- bzw. Axialschnitten, zwischen denen ein direkter messtechnischer Bezug besteht. Damit ist das Fokusvariationsverfahren grundsätzlich auch zur ganzheitlichen messtechnischen Erfassung von Gewinden geeignet.

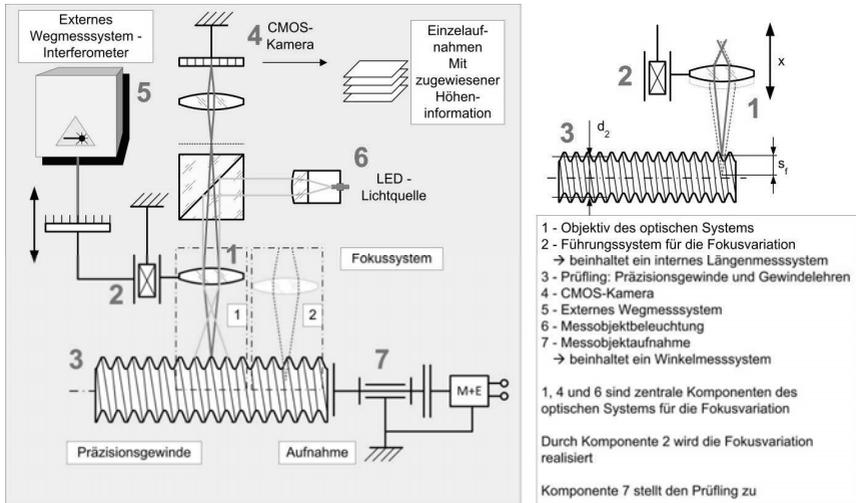


Bild 1: Fokusvariationsverfahren – Prinzip der Gewindemessung

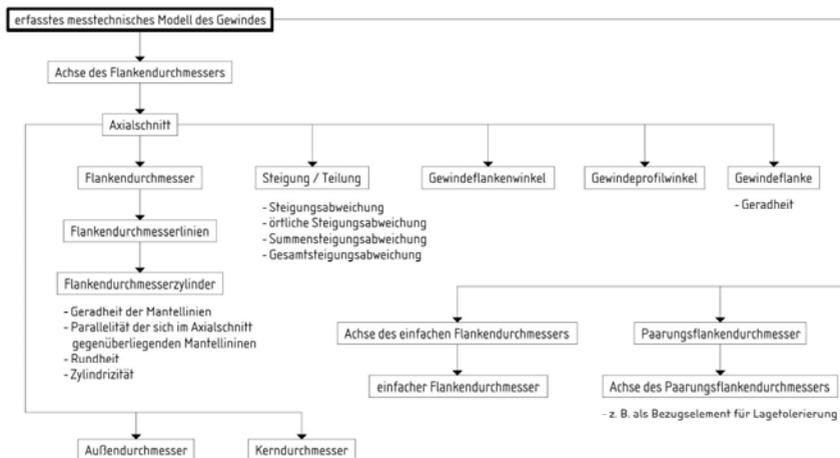


Bild 2: Fokusvariationsverfahren – auswertbare Gewindekenngrößen, Übersicht

Die am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau bestimmten Unsicherheiten eines Datenpunktes in drei Dimensionen für eine Messung mit dem

Fokusvariationsverfahren belaufen sich auf $U < 1,2 \mu\text{m}$ ($k=2$, $P=95\%$). Diese Angabe bezieht sich auf Messungen mit einem vor Ort verfügbaren kalibrierten Demonstrator. Die Unsicherheitsangabe gilt weiterhin einschränkend für Messergebnisse an Gewinden mit einem Außendurchmesser von zehn Millimetern. Aus den Unsicherheiten der Datenpunkte wurden schließlich für ausgewählte Gewindekenngrößen die resultierenden erweiterten Messunsicherheiten bestimmt (siehe Tabelle 2).

Das Fokusvariationsverfahren bietet aufgrund der ganzheitlichen messtechnischen Erfassung des Gewindes die Möglichkeit zur sinnvollen Bestimmung nahezu aller Gewindekenngrößen. Eine Übersicht über die auswertbaren relevanten Gewindekenngrößen wird in Bild 2 gegeben.

4. Bedeutung der Messunsicherheit – örtlich begrenzt messende und ganzheitlich messende Verfahren im Vergleich

In der industriellen Praxis sind bisher als Gewindemessverfahren die Drei-Draht-Methode für Außengewinde sowie die Zwei- oder die Drei-Kugel-Methode für Innengewinde sehr weit verbreitet. Diese Messverfahren sind seit Jahrzehnten etabliert und liefern mit verhältnismäßig geringem Aufwand Messergebnisse mit zumeist hinreichend kleinen Messunsicherheiten (vgl. Tabelle 2). Das Ergebnis einer Messung ist ein örtlicher einfacher Flankendurchmesser des betrachteten Gewindes. Zur umfassenderen Beurteilung des Gewindes können auch mehrere Messungen in jeweils zumeist zwei senkrecht aufeinander stehenden Messebenen durchgeführt werden. Aus den so ermittelten örtlichen einfachen Flankendurchmessern lassen sich Rückschlüsse auf die Rundheit sowie auf die Zylinderform des Gewindes ableiten. Es muss dabei allerdings beachtet werden, dass die ermittelten einfachen Flankendurchmesser keinen gemeinsamen geometrischen Bezug – in Form einer gemeinsamen Achse – aufweisen und daher als unabhängige Einzelwerte zu betrachten sind.

Eine gewisse Bedeutung unter den Gewindemessverfahren hat in den vergangenen Jahren auch das taktile Scannen des Gewindeprofils im Axialschnitt erlangt. Aus dem erfassten Gewindeprofil können so neben dem Außen-, dem Flanken- und dem Kerndurchmesser auch der einfache Flankendurchmesser sowie die Steigung und die Gewindeflankenwinkel bestimmt werden. Die bei der Ermittlung des Flankendurchmessers bzw. des einfachen Flankendurchmessers erreichbaren erweiterten Messunsicherheiten sind etwas größer als die erweiterten Messunsicherheiten nach der Draht- oder Kugel-Methode (vgl. Tabelle 2). Entsprechend der Länge des gescannten Axialschnittes werden für die genannten Bestimmungsgrößen jeweils mehrere örtliche Messwerte ermittelt. Auch bei diesem

Verfahren können zur umfassenderen Beurteilung des Gewindes Messungen in zumeist zwei senkrecht aufeinander stehenden Axialschnitten durchgeführt werden. Nachteilig ist jedoch auch hier, dass die in verschiedenen Axialschnitten erfassten Gewindeprofile keinen gemeinsamen geometrischen Bezug aufweisen. Dies muss bei abgeleiteten Aussagen bezüglich Rundheit, Zylinderform oder Steigungsabweichung ebenfalls beachtet werden.

Im Gegensatz zu den genannten, örtlich begrenzt messenden Verfahren stellt die Messung von Gewinden mit dem Fokusvariationsverfahren [4], wie bereits ausgeführt, ein ganzheitlich messendes Verfahren dar. Das betreffende Gewinde wird messtechnisch somit stets als dreidimensionales Objekt erfasst. Die interessierenden Bestimmungsgrößen können dabei in nahezu beliebigen Axialschnitten ermittelt werden, die ihrerseits nun tatsächlich einen gemeinsamen geometrischen Bezug – in diesem Fall die messtechnisch ermittelte Achse des Flankendurchmessers – aufweisen. Damit sind nun auch eindeutige Aussagen z. B. hinsichtlich Rundheit und Zylinderform des Flankendurchmesserzylinders oder hinsichtlich der Steigungsabweichung möglich. Die bezüglich des Fokusvariationsverfahrens für ausgewählte Bestimmungsgrößen exemplarisch für Gewinde M10 erreichbaren erweiterten Messunsicherheiten gehen aus Tabelle 2 hervor.

Tabelle 2: erreichbare erweiterte Messunsicherheiten verschiedener Verfahren im Vergleich, exemplarisch für Gewinde M10; Werte in μm

Messgröße	erweiterte Messunsicherheit für $k = 2$			
	örtlich begrenzt messende Verfahren			ganzheitlich messendes Verfahren
	Drei-Draht-Methode	Zwei- / Drei-Kugel-Methode	taktiler Scannen des Gewindeprofils im Axialschnitt	Fokusvariationsverfahren ¹
einfacher Flankendurchmesser	2,5	2,5	3,5	1,6
Flankendurchmesser	-	-	3,5	1,6
Steigung	-	-	1,0	1,6

¹ Die Angaben beziehen auf erste Versuche, ein optisches Verfahren für die Parameterbestimmung einzubeziehen. Es besteht ein sehr großes Potenzial, die Messunsicherheit zukünftig deutlich zu reduzieren.

Dabei ist zu beachten, dass die betreffenden in Tabelle 2 angegebenen Messunsicherheiten auf den am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau realisierten experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung von Gewindekenngrößen mit dem Fokusvariationsverfahren beruhen. Bei weiterer Optimierung der messtechnischen Rahmenbedingungen und der technischen Umsetzung des Verfahrens besteht die Möglichkeit, die Messunsicherheit der Positionswerte eines erfassten Datenpunktes zukünftig deutlich zu reduzieren. Dies bedeutet dann auch eine Reduzierung der Messunsicherheit der abgeleiteten Gewindekenngrößen. Die Entwicklung der Messsysteme speziell für diesen Anwendungsfall befindet sich noch im Ansatz und eine stetige Weiterentwicklung der Verfahren erfolgt. Perspektivisch sind, basierend auf Fokusvariationsmessungen an ebenen Flächen, Messunsicherheiten $<0,2 \mu\text{m}$ angestrebt und realisierbar.

Die notwendige Beurteilung des betrachteten Gewindes hinsichtlich seiner Spezifikationsgrenzen ist bei den örtlich begrenzt messenden Verfahren – trotz der zumeist geringen Messunsicherheit – aufgrund der geringen Anzahl der ermittelten örtlichen Messwerte, also aufgrund der unvollständigen messtechnischen Erfassung des betreffenden Gewindes, nicht immer sicher möglich. Auch Aussagen zur Paarungsfähigkeit des Gewindes lassen sich aus den entsprechenden Messungen nur sehr bedingt ableiten. Ganzheitlich messende Verfahren bieten in dieser Hinsicht wesentliche Vorteile. Hier kann in nahezu beliebigen Axialschnitten eine große Anzahl örtlicher Messwerte ermittelt werden. Somit ist – bei entsprechend geeigneter Messunsicherheit – eine sehr sichere Beurteilung des betrachteten Gewindes hinsichtlich der Spezifikationsgrenzen möglich. Darüber hinaus kann auch die messtechnische Bestimmung des Paarungsflankendurchmessers erfolgen.

Die Gegenüberstellung der Verfahren zeigt somit, dass der Vergleich der Messunsicherheiten allein zur Beurteilung der Eignung der betreffenden Messverfahren im Falle der Gewindemessung nicht ausreicht. Die Konformität eines Gewindes mit der betreffenden Spezifikation kann letztendlich nur auf der Grundlage einer entsprechend vollständigen, ganzheitlichen messtechnischen Erfassung mit großer Zuverlässigkeit nachgewiesen werden.

5. Ausblick

Die weitere Entwicklung von Messverfahren zur ganzheitlichen Erfassung von Gewinden bleibt derzeit noch als vordringliche Aufgabe bestehen. Grundlegende Ergebnisse dazu wurden mit dem Fokusvariationsverfahren bereits erzielt. Im nächsten Schritt muss, ausgehend von den bereits vorliegenden messtechnischen Prototypen, das Verfahren

hinsichtlich der vielgestaltigen Bedürfnisse industrieller Anwendungen weiterentwickelt werden. Hierbei spielen kurze Messzeiten, geringe Messunsicherheiten, leichte Bedienbarkeit und eine hohe Flexibilität hinsichtlich der messbaren Gewindearten und Gewindenennmaße eine entscheidende Rolle. Wichtig sind ebenso die Möglichkeit zur flexiblen Anpassung der messtechnischen Auswertung an die jeweils relevanten Bestimmungsgrößen sowie die entsprechend zugehörige Sollwertgenerierung.

Parallel zur eigentlichen Entwicklung der Messverfahren ist die Schaffung einheitlicher und wohldefinierter Bestimmungsgrößen zur Auswertung und Beurteilung der erfassten messtechnischen Modelle eine ebenfalls dringliche Aufgabe. Die unbedingt notwendige Einheitlichkeit der Bestimmungsgrößen kann letztendlich natürlich nur durch die Normung, also durch die Überarbeitung von DIN 2244 und ISO 5408 erreicht werden.

Wenn nach der Umsetzung dieser beiden grundlegenden Aufgaben den industriellen Anwendern die entsprechenden wirtschaftlichen Messverfahren zur Verfügung stehen, besteht erstmals die Möglichkeit, die vollständige und funktionsgerechte Tolerierung aller relevanten Bestimmungsgrößen am Gewinde vorzunehmen. So fehlen z. B. in ISO 965-1 [5] bisher noch für die beiden wichtigen Bestimmungsgrößen Steigung und Gewindeflankenwinkel jegliche Angaben bezüglich der Toleranzen bzw. der Grenzabmaße. Es ist somit davon auszugehen, dass die durch die neuen Messverfahren zukünftig bestehenden Möglichkeiten mittel- und langfristig auch Auswirkungen auf die in Normen vorgenommene Spezifikation von Gewinden haben werden.

- [1] Norm DIN 2244 : 2002-05. Gewinde – Begriffe und Bestimmungsgrößen für zylindrische Gewinde
- [2] Norm ISO 5408 : 2009. Screw threads – Vocabulary; Filetages – Vocabulaire
- [3] Meß, T.: Der Paarungsflankendurchmesser – Untersuchung des begrifflichen Umfeldes, der Einflussgrößen und der Bedeutung für die Funktion, Spezifikation, Fertigung und Prüfung von Gewinden., TU Ilmenau Diss. 2017
- [4] Ullmann, V., Meß, T., Wenzel, K., Machleidt, T. u. Manske, E.: A new Approach for Holistic Thread Profile Determination Supported by Optical Focus Variation Measurements. IWK 2017
- [5] Norm ISO 965-1 : 2013. ISO general purpose metric screw threads – Tolerances – Part 1: Principles and basic data; Filetages métriques ISO pour usages généraux – Tolérances – Partie 1: Principes et données fondamentales

Konformitätsbewertung von Formabweichungen am Beispiel Parallelendmaße

Dr. Michael Matus, BEV, Wien, Österreich

Kurzfassung

Ausgehen von Besonderheiten bei der Messunsicherheitsberechnung von Formparametern, werden die Konsequenzen auf die Entscheidungsregeln für die Feststellungen von Übereinstimmung mit Spezifikationen ausführlich behandelt. Am Beispiel der Abweichungsspanne von Parallelendmaßen wird die praktische Vorgangsweise erläutert.

1. Allgemeines

Formgrößen sind ein wichtiger Bestandteil jeder GPS-Arbeit (GPS: Geometrische Produktspezifikation und Verifikation). Typische Merkmale sind Ebenheit, Rundheit, Zylindrizität und viele andere mehr. Um die Vergleichbarkeit zu wahren und um überhaupt ein sinnvolles Messergebnis zu erhalten, müssen diese Größen besonders sorgfältig definiert werden. Oft wird aus einer großen Zahl dimensioneller Messungen der gesuchte Parameter mittels recht komplexer mathematischer Methoden ermittelt und sind Größen der Art „Länge“. Gleichwohl fügen sich diese Größen nicht ohne weiteres in das Bild ein welches man mit einem dimensionellen Maß verbindet. So ist eine Wellenlänge oder ein Teilstrichabstand ein zumindest konzeptionell eindeutiges Maß. Eine Rundheitsabweichung von zum Beispiel 5 μm kann jedoch in vielfältiger Weise realisiert sein und ist als solche nicht direkt am Werkstück festzumachen.

Formabweichungen können einen großen Einfluss auf die Funktionseigenschaften eines Werkstückes haben. Ihre korrekte Messung und Anforderungen sind daher seit Langem wichtige Eckpfeiler der GPS-Normung.

2. Messunsicherheit und Konformitätsentscheidungen

Wie bei jeden anderen Messwert sind Formabweichungen ohne Angabe ihrer zugeordneten Messunsicherheit wertlos. Für die Abschätzung der Messunsicherheit ist allgemein der GUM [1] anzuwenden. Dies ist auch im Falle der Formabweichung möglich wenn auch mit einigen Schwierigkeiten verbunden.

Erst beim Vorliegen eines Messergebnisses (also Messwert mit Messunsicherheit) ist es möglich die Übereinstimmung mit vorgegebenen Spezifikationen festzustellen. Die Vor-

gangsweise ist sowohl im Rahmen der GPS-Normenreihe [2] als auch allgemeiner ausführlich behandelt [3]. In der Praxis treten die Schwierigkeiten durch die unreflektierte Übernahme zweier gebräuchlicher Vorurteile auf.

Im Gegensatz zu den üblichen Abweichungen etwa eines Maßes, sind Formabweichungen meist positiv definit (es gibt keine kleinere Abweichung von der Ebenheit als gar keine Abweichung). Außerdem ist die Annahme einer Normalverteilung dieser Größen in den interessanten Fällen nicht gegeben.

3. Fallbeispiel Parallelendmaße

Endmaße [4] sind immer noch als relativ genaue Normale zur Rückführung auf die Längeneinheit in Industrie und Kalibrierwesen verbreitet. Ihre Eigenschaften werden ausführlich in der Literatur behandelt und sie sind seit langer Zeit Gegenstand der Normung.

Als Modellfall für die Behandlung von Formparametern bietet sich die sogenannte Abweichungsspanne v von Endmaßen an. Sie ist in der Norm [4] eindeutig definiert (siehe Bild 1) und es wird dazu eine praktikable Messmethode empfohlen (5-Punkt Messung). In der genannten Norm sind außerdem Spezifikationen für die Abweichungsspanne festgelegt.

Die mathematische Behandlung ist überschaubar, die Modellfunktion nach GUM beinhaltet lediglich fünf Eingangsgrößen: $v = f_o + f_u = \max(I_M, I_A, I_B, I_C, I_D) - \min(I_M, I_A, I_B, I_C, I_D)$

Trotz hoher Symmetrie bezüglich Vertauschung der Eingangsgrößen besitzt diese harmlos wirkende Modellgleichung eine unangenehme Eigenschaft: sie ist nicht an allen Stellen differenzierbar. Daraus folgt aber unmittelbar, dass der Mainstream-GUM [1] prinzipiell nicht anwendbar ist. In [5] zeigt der Autor die korrekte Vorgangsweise zur Messunsicherheitsberechnung in diesen Fall. Die bemerkenswerten Eigenschaften in diesen Fall sind: Bei einem theoretisch idealen Endmaß liefert eine Messung einen Erwartungswert für die Abweichungsspanne von ungleich null! Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung selbst weicht stark von einer Normalverteilung ab (siehe Bild 2).

4. Implikationen für Konformitätsentscheidungen

Diese an einem einfachen Modellfall gefundenen Eigenschaften sind typisch für die meisten Formparameter. Die naive Vorgangsweise ein spezifiziertes Toleranzband um die erweiterte Messunsicherheit (nach [1]) zu vergrößern bzw. zu verkleinern, kann zu grob falschen Entscheidungen führen.

Es wird gezeigt wie eine konsequente Anwendung der in [3] angeführten Prinzipien zu korrekten Entscheidungen führt. Da der notwendige Formalismus relativ aufwändig ist, werden praxisnahe Vereinfachungen vorgestellt.

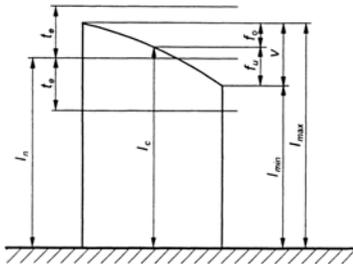


Bild 1: Definition der unterschiedlichen Maße eines Parallelendmaßes. Die Abweichungsspanne v ist Gegenstand dieser Arbeit. Aus [4].

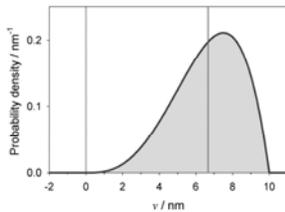


Bild 2: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für die Abweichungsspanne eines idealen Endmaßes, gemessen mit einem Komparator mit einer Auflösung von $0,01 \mu\text{m}$

5. Literaturangaben

- [1] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM 2008
- [2] DIN EN ISO 14253-1 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen. Entscheidungsregeln für die Feststellungen von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2016
- [3] JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. BIPM 2012
- [4] DIN EN ISO 3650 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Längennormale – Parallelendmaße. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 1998
- [5] Matus, M.: Uncertainty of the Variation in Length of Gauge Blocks by Mechanical Comparison: A Worked Example. Measurement Science and Technology 23 (2012)

Messunsicherheiten für Messungen sehr großer Kräfte, Drehmomente und Drücke

Anforderungen der Industrie den realisierbaren Messunsicherheiten gegenübergestellt

Dr.-Ing. **André Schäfer**,
Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Darmstadt

Kurzfassung

Die Messunsicherheiten, wenn es um die Messung sehr großer Kräfte, Drehmomente und Drücke geht, sind häufig recht groß. Die Angabe der Messunsicherheiten sind jedoch essentiell für den Nutzen der Messungen [1] - [4]. Gleichzeitig erfordern einzelne industrielle Anwendungen in der Praxis diese genau zu hinterfragen [5]. Daher sollen die Hauptursachen der Messunsicherheiten der Messkette, bezogen auf die jeweilige Messgröße, hier dargestellt bzw. untersucht werden. Schließlich sollen Aussagen dazu getroffen werden, wie Messunsicherheiten dennoch weiter verringert werden könnten.

Abstract

Measurement uncertainty, when it comes to measuring very large forces, torques and pressures are often quite large. These measurement uncertainties are, however, essential for the usefulness of measurements [1] - [4]. At the same time, industrial applications in practice require these to be questioned [5]. Therefore, the main causes of the measuring uncertainties of the measuring chain, based on the respective measured variable, are to be shown or examined here. Also statements are to be made about how uncertainties of measurement could still be further reduced.

1. Vergleich des Dehnungsmessstreifenprinzips mit anderen Wandlerprinzipien

Bei der Messung von mechanischen Größen werden ganz überwiegend Folien-Dehnungsmessstreifen (DMS) eingesetzt. Dies hat verschiedene Ursachen. Einmal stehen Folien-Dehnungsmessstreifen in einer großen Bandbreite, d.h. in vielen Formen und Größen zur Verfügung. Die Messung von Zug- oder Druckkraft, die Drehmomentmessung im und gegen den Uhrzeigersinn oder auch die Realisierung von Messkörpern zur Druckmessung - ausgeführt als Membran oder als sogenannte Rohrfeder – können durchweg mit minimalem Aufwand realisiert werden, weil hierfür bereits entsprechende Dehnungsmessstreifen-Designs existieren.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Realisierung einer breiten Palette von ganz unterschiedlichen Kraftaufnehmern, Wägezellen und Drehmomentaufnehmern möglich ist und dass hierfür Ausführungsformen zum Einsatz kommen, die allesamt jahrzehntelang erprobt und optimiert wurden. Aus der konstruktiven Perspektive gibt es keinen Grund, warum derartige Aufnehmer auf der Basis von Folien-Dehnungsmessstreifen nicht für höhere Nennlasten gebaut werden können.

Vielmehr hat das Messwandlerprinzip des DMS es erst ermöglicht, die Tür zu Messungen sehr großer Kräfte, Drehmomente und Drücke aufzustoßen. Dabei bedeuten höhere Messbereichsgrenzen nicht unvermeidlich auch große Geometrien. So können zum Beispiel Ultrahochdruck- oder Meganewton-Kraftaufnehmer sehr kompakt ausgeführt werden, wenn sie auf der Verwertung von Scherkräften basieren.

Beispielhaft sollen hier verschiedene Realisierungsmöglichkeiten von Druckaufnehmern verglichen werden, werden doch gerade für die Messgröße Druck eine ganze Reihe verschiedener Wandlerprinzipien angewendet. Die folgende Tabelle vergleicht Druckaufnehmer, die mittels Folien-Dehnungsmessstreifen, Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen, nach dem piezoresistiven Prinzip als MEMS-Realisierung oder als piezo-elektrische Realisierung, mit Piezokristall, realisiert sind, nach ihren Eigenschaften bzw. nach ihrer Leistungsfähigkeit.

Bewertung der Eigenschaften für verschiedene Realisierungen von Druckaufnehmern	Folien-DMS	Dünnschicht-DMS	Piezoresistives Prinzip als MEMS-Realisierung	Piezo-elektrische Realisierung	Abschätzung zur Wichtung des Kriteriums
Legende: sehr gut +++ gut ++ befriedigend + ausreichend o kaum vorhanden -					
Linearität	++	++	o	-	+
Lebensdauer, Anzahl der Lastwechsel, Überlast	++	+	o	+	+
Möglichkeit der Miniaturisierung, kleine Bauform	-	o	++	+	o
Anwendbarkeit für höhere Temperaturen	o	+	-	++	o
Anwendbarkeit für höhere Drücke	++	+	o	+	o
Verbesserung der Produktivität bei größerer Stückzahl	o	++	+++	-	+
Möglichkeit der kundenspezifischen Herstellbarkeit ab dem ersten Stück	++	+	o	+	+

Tabelle 1: Vergleich von Druckaufnehmern in Abhängigkeit vom verwendeten Wandlerprinzip.

Folien-Dehnungsmessstreifen-Lösungen erlauben nicht nur häufig den genauesten Lösungsansatz [6], auch kundenspezifische Realisierungen von nur einem einzigen Stück können sehr effizient bewerkstelligt werden. Zum Erschließen von Anwendungen, wo bisher eine direkte Messung unmöglich war, ist das ein unschätzbare Vorteil. Für höhere Drücke konnte gezeigt werden, dass das Wandlerprinzip mittels Folien-Dehnungsmessstreifen besonders überzeugen kann. Man kann also durchaus von einer Affinität dieses Wandlerprinzips für die „Extrembereiche“ sprechen, insbesondere hinsichtlich Kraft und Drehmoment. Letzteres soll im Folgenden gezeigt werden.

2. Messung sehr großer Kräfte und Drehmomente

Unter sehr großen Kräften wollen wir in diesem Zusammenhang Kräfte im MegaNewton-(MN) – Bereich verstehen, während wir unter sehr großen Drehmomenten solche im MegaNewtonmeter (MN·m) –Bereich verstehen wollen.

Da es viele Gemeinsamkeiten für diese beiden Messgrößen gibt, sollen diese auch in einem gemeinsamen Kapitel behandelt werden. Begonnen wird mit der Messgröße Kraft, hat sich doch gerade hier ein Markt entwickelt, an den einstmals niemand geglaubt hätte [6]. Besonders hilfreich sind MegaNewton-Kraftmess- und -rückführmöglichkeiten für Anwendungen wie Bauindustrie und Materialprüfung.



Abb. 1 Kraftaufnehmer C18



Abb. 2. Kraftaufnehmer U15



Abb. 3. Build-up System BU18

Für derartige Anwendungen und die erforderlichen hohen Nennkräfte werden zur Rückführung auf das nationale Normal Transferaufnehmer mit immer höherer Genauigkeit benötigt. Transferaufnehmer dienen schließlich dazu, die Messunsicherheit in industriellen Anwendungen zu reduzieren, ohne dass direkt auf das Normal zurückgegriffen werden muss. Andererseits werden Transferaufnehmer für Vergleichsmessungen von Labor zu Labor weitgereicht.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch Kräfte beteiligt sind, die nicht in Messrichtung wirken. Zwar wird die Hauptkomponente von der Kalibriermaschine kalibriert, aber wegen der nicht-axialen Belastung beeinflussen eben diese Komponenten die Unsicherheit der Messung zusätzlich.

Der in Abb. 1 gezeigte Referenz-Kraftaufnehmer C18 misst Druckkräfte nach dem Ring-Torsionsprinzip und ist damit besonders unempfindlich gegen Temperaturgradienten, Querkräfte und Biegemomente. Gemessen an den Nennkräften ist der Aufnehmer recht klein, leicht und somit sehr gut zu transportieren und an verschiedenen Einsatzorten einzubauen. Die Bauart aus hermetisch verschweißtem Edelstahl und die Schutzart IP68 sorgen für Robustheit und Langzeitstabilität. Für den in Abbildung 2 gezeigten Kraftaufnehmer der Serie U15, welcher sowohl mit Zug- als auch mit Druckkräften bis zu einer Nennlast 2.5 MN belastet werden kann, kann eine Genauigkeitsklasse (gemäß ISO 376:2011) 0,5 im Bereich

zwischen 10% und 100% der Nennkraft zugesichert werden. Dies ist auch durch den monolithischen Aufbau möglich, der auch eine signifikant geringere rel. Umkehrspanne (Hysterese) ermöglicht.

Ein in jüngster Zeit häufig beschrittener, weil effektiver Weg, um höhere Nennkräfte zu erreichen, sind sogenannte „Build-up Systeme“, also etwa zu übersetzen mit „Aufbausysteme“, wie z.B. das von HBM angebotene BU 18 (Abbildung 3). Diese werden immer populärer, da es sich um eine sehr effektive Methode zur Erhöhung des Nennbereichs handelt. Für die Kalibrierung von Kraftaufnehmern in nationalen Instituten werden in der Regel Direktbelastungsmaschinen eingesetzt. Mit sehr großen Kräften im Bereich von MN sind diese Kalibrieranlagen extrem groß und auch teuer.

Derartige Build-up Systeme sind auch für industrielle Anwendungen und Kalibrierlaboratorien geeignet. Das HBM-Build-Up System BU18, basierend auf 3 Kraftaufnehmern mit einer Nennkraft von je 1 MN, ist einsetzbar für Druckkräfte bis 3 MN. Ebenso kann ein Build-Up System, basierend auf 3 Kraftaufnehmern mit einer Nennkraft von je 2 MN angeboten werden, dann einsetzbar für Druckkräfte bis 6 MN. Die einzelnen Aufnehmer können dabei an Kalibrieranlagen mit niedriger Nennkraft von „nur“ 1 MN bzw. 2 MN kalibriert werden.

In den meisten Fällen ist jeder Kraftaufnehmer des Build-up Systems mit einem eigenen Verstärkerkanal verbunden. Die Berechnung der Kraft kann leicht durch die Summierung der Kräfte mit dem digitalen Ausgang des Präzisionsverstärkers im PC erfolgen. Alternativ können die Sensoren parallel geschaltet werden, dann ist aber der sogenannte R/C-Ableich wichtig. Hier werden die Ausgangssignale der 3 Einzelaufnehmer mittels einer Anschlussdose parallel geschaltet, d.h. summiert. Diese Lösung „Build-up System“ ist oft preislich deutlich günstiger als ein großer Referenzkraftaufnehmer. Auch bauen solche Build-Up Systeme deutlich niedriger. Sie sind somit platzsparend und haben gegenüber einer Realisierung als Einzelaufnehmer ein geringeres Gewicht [7].

Ein Build-up System besteht aus den Kraftaufnehmern und recht massiven Grund- und Deckplatten zur Lasteinleitung am oberen und unteren Ende. Die Steifigkeit der beiden Platten ist von höchster Bedeutung, da diese sich anderenfalls unter Last verformen und die Kraftsensoren nicht mehr präzise mit dem Kraftvektor übereinstimmen, was eine zusätzliche Messunsicherheit nach sich zieht. In [8] ist gezeigt, dass die Summe der Messwerte der Einzelaufnehmer nicht mit dem Gesamtergebnis gleichzusetzen ist.

Build-up Systeme können also als Beweis herangezogen werden, dass ein einfaches Upscaling, also eine simple Maßstabsvergrößerung, nicht durchführbar ist. Weitere Überlegungen, wie z.B. zu Mehrkomponentenaufnehmern sollen in diesem weitgefassten Beitrag nicht zusätzlich behandelt werden [9] - [14].

Die nachfolgenden Ausführungen betreffen Drehmomentmessungen im MN-m-Bereich. Zur Verdeutlichung der Anforderungen für derartige Aufnehmer soll ein Anwendungsbeispiel dienen: Um alle technischen Aspekte von Windenergieanlagen zu überprüfen, werden immer häufiger Komponenten- aber auch komplette Gondel - Prüfstände in Betrieb genommen. Ein entscheidender Parameter ist hierbei das Drehmoment, ergibt dieses doch multipliziert mit der Drehzahl die mechanische Leistung [15]. Die Ermittlung der mechanischen Ein- und Ausgangsleistung von Getrieben wiederum ist unumgänglich für die Wirkungsgradermittlung dieser Baugruppe. Unter diesem Aspekt widmet sich momentan ein EU Metrologie-Programm der Messung und Rückführung von Drehmomenten im MN-m Bereich. Das nationale Metrologie-Institut Deutschlands, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig (PTB), hat als Projektleiter begonnen, ein Kompetenzzentrum für Windenergie zu errichten, um die weitere Entwicklung der Windindustrie metrologisch zu unterstützen. Zur metrologischen Charakterisierung eines von HBM hergestellten 5MN-m - Referenz-Drehmomentaufnehmers wurde von diesem Projektpartner neben den Messungen auch die Modellierung in Angriff genommen und auch die Messunsicherheitsbeiträge werden hier sehr detailliert untersucht.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen zwei Ausführungsformen von Drehmomentaufnehmern für den MN-m-Bereich. Der im Bild 5 dargestellte Referenzdrehmomentaufnehmer für ein Nennmoment von 5 MN-m ist mit zwei Drehmomentkanälen, zwei Kanälen für Querkräfte, zwei Kanälen für Biegemomente sowie zwei Kanälen für Axialkräfte ausgestattet. Diese zusätzlichen Kanäle erlauben eine Untersuchung der Wirkung der Mehrkomponentenbelastung auf die Drehmomentmessung und die Bewertung entsprechender Cross-Talk-Effekte.



Abb. 4 und 5: Ausführungsformen von Aufnehmern für sehr große Drehmomente

Geht es um die Messunsicherheit von solch großen Drehmomentaufnehmern, dann sollte neben Linearitätsabweichungen einschließlich rel. Umkehrspanne (Hysterese), dem Temperatureinfluss auf den Nullpunkt (TK0) und dem Temperatureinfluss auf den Kennwert (TKC) auch die Wiederholbarkeit berücksichtigt werden. Besonders bei großen Systemen spielen hierbei parasitäre Belastungen wie Axialkraft, Querkraft und Biegemoment eine große Rolle [16]- [18].

3. Messung sehr großer Drücke

Die Verhältnisse bei der Druckmessung sind weitgehend anders, weshalb diesen ein eigenes Kapitel gewidmet werden soll.

Unter sehr großen Drücken sollen in diesem Zusammenhang Drücke im GigaPascal (GPa) – Bereich verstanden werden. Für Messungen in diesem Bereich werden Ultra-Hochdruckaufnehmer verwendet. Mit Ihrem monolithischen Aufbau sind diese nicht nur kompakt, sondern diese weisen vor allem eine höhere Lebensdauer auf [19]. Als Transferaufnehmer können sie ohne Umstände für Vergleichsmessungen von Labor zu Labor geschickt werden. Daher basieren leistungsfähige Ultra-Hochdruckaufnehmer grundsätzlich auf Dehnungsmessstreifen.

Die in Abbildung 7 dargestellte P3TCP-Baureihe, die es als 5 kbar (0,5 GPa) - bis 15 kbar (1,5 GPa) - Ausführung gibt, wurde mit dem Ziel höchster Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität für den internationalen Zwischenvergleich zwischen den Drucklaboratorien mehrerer nationaler Institute der Metrologie eingesetzt. Das PTB arbeitet im Moment daran, eine Rückführung bis zu einem Messbereich von 1,6 GPa [9] zu ermöglichen, was für Branchen wie Automobil-, Material- und Lebensmittelindustrie, aber auch zunehmend für Wasserstrahlschneiden von sehr großer Bedeutung ist. Der höhere Druck ermöglicht hier trotz effizienzbedingter Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ausreichende Konturqualität ohne Riefen und Ecken [20].

Die von HBM angebotene Ultra-Hochdruckaufnehmer der Serie Top Class P3M bewährten sich als Transferaufnehmer bei Vergleichsmessungen bei 1 GPa, an denen z.B. die nationalen Metrologie-Institute von Deutschland und Japan teilnahmen [21]. Um für derartige Aufnehmer auch noch bei 1,5 GPa angemessene Umkehrspanne und gute Linearität anbieten zu können, müssen zum ersten spezielle Materialien eingesetzt werden. Diese Materialien erlauben in der Praxis üblicherweise nur eine geringe Lebensdauer (Lastwechselzahl bis zum Ausfall). Deshalb wurde für die Industrie eine separate Serie, ebenso bis 1,5 GPa, aufgelegt. Um den Preis größerer Messunsicherheit weisen diese Aufnehmer eine längere Lebensdauer auf.



Abb. 6 Monolithischer Messkörper (1,5 GPa)



Abb. 7 Druckaufnehmer P3TCP (1,5 GPa) mit Doppelkegeldichtung

Dies führt zu einer recht hohen Linearitätsabweichung als hauptsächlichlichen Beitrag zur Messunsicherheit. Außerdem muss bei der Kalibrierung von Ultra-Hochdruckaufnehmern beim Anfahren der einzelnen Messpunkte sehr lange gewartet werden. Gründe dafür sind die über 1 GPa stark ansteigende Viskosität der Flüssigkeit (deren Druck gemessen wird) und gleichzeitig der aus Sicherheitsgründen erforderliche sehr geringe Durchmesser der Verrohrung. Wird dies nicht getan, kommt es zu Abweichungen, weil noch kein „eingeschwungener Zustand“ erreicht wurde.

4. Geeignete Messverstärker

Wenn, gewissermaßen in Superlativen, sehr große Kräfte, Drehmomente und Drücke gemessen werden sollen, dann ist auch eine entsprechende Auswahl geeigneter Messverstärker d.h. eine hochwertige Instrumentierung erforderlich. Der Messverstärker sollte zweckmäßigerweise so gewählt werden, dass sein Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit gegenüber dem hier benötigten Hochleistungsaufnehmer, welcher naturgemäß aufwendiger hergestellt werden muss und infolgedessen keine beliebig kleine Unsicherheit erreichen lässt, vernachlässigbar ist.

Dabei ist es heute realistisch, sehr hohe Anforderungen an den Verstärker zu stellen. Anspruchsvolle Präzisionsverstärker, die mit modernen Analog-Digital-Wandlern (ADU) arbeiten, sind heute sehr genau.

Die Auflösung, definiert als die kleinste detektierbare Änderung des Wertes eines Eingangssignals, hängt einmal von den ADU-Schritten ab, ist aber gleichzeitig durch das Signal-Rausch-Verhältnis als physikalische Grenze limitiert. Die thermische Rauschspannung, die durch den Widerstand der Wandler allein erzeugt wird, ist die absolute physikalische Grenze für die Signalauflösung. Die Rauschspannung eines 350Ω Aufnehmers kann dabei z.B. nur 2,4 nV/sqr (Hz) betragen und mit hervorragenden, rauscharmen Verstärkern kann das Gesamtrauschen der Messkette immer niedriger als die doppelte Aufnehmer-Rauschspannung gehalten werden, also kleiner als 5 nV/sqr (Hz) sein [22].

Allgemein werden für die Verstärkercharakterisierung andere Einzelgrößen herangezogen als bei den Aufnehmern, d.h. deren Klassengenauigkeit ergibt sich aus anderen Einzelfehlern. Abbildung 8 zeigt das digitale Präzisionsmessgerät DMP41 („Flaggschiff“), den genauesten Verstärker für auf Dehnungsmessstreifen basierenden Messungen mit einer Genauigkeitsklasse von 0.0005 [23]. Abbildung 9 zeigt das neue Präzisionsmodul MX238B der QuantumX-Familie mit einer Genauigkeitsklasse 0.0025 [24].



Abb. 8 „Flaggschiff“ DMP41



Abb. 9 Präzisionsmodul Quantum MX238

Für den hier behandelten Fall der Messung sehr großer Kräfte, Drehmomente und Drücke gilt es keine Reserven zu verschenken. Eine siebenstellige Auflösung ist daher ein Muss (vorzugsweise sollten 2 Millionen digitale Schritte vorgesehen werden), so dass mindestens die aus der Auflösung resultierende Unsicherheit kein wesentlicher Faktor für die Gesamtunsicherheitsberechnung ist. Auch Reproduzierbarkeit und Drift des Verstärkers sollten so niedrig sein, dass der gesamte Unsicherheitsbeitrag des Verstärkers mindestens eine Zehnerpotenz kleiner ist als die des Aufnehmers.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es gibt zwei große Trends, um in Produktion, Energieerzeugung oder Logistik effizienter zu werden: Der erste Trend ist schneller zu werden. Der zweite Trend sind größere Baueinheiten. Der letztgenannte Trend zeigt sich in vielen Anwendungen wie z.B. größeren Windenergieanlagen. Die Weiterentwicklung erfordert noch höhere Druck-, Kraft- und Drehmomentwerte. Aus Sicht des Ingenieurs gibt es aber keinen Grund, warum Kraftaufnehmer, die auf Folien-Dehnungsmessstreifen basieren, nicht der ideale Weg sein sollen, um auch zukünftige Bedürfnisse für alle drei Größen zu erfüllen. Die Dehnungsmessstreifen erlauben: hohe Zuverlässigkeit, erhebliche Messbereiche, hohe Dynamik, hohe Genauigkeit, robuste Bauweise.

HBM verfügt neben Lösungen von Messaufnehmern auch über ein umfangreiches Sortiment an Verstärkern, bietet aber insbesondere zugleich komplette Messketten, mit Produkten und Dienstleistungen zum Beispiel für die Kalibrierung, und jeweils auch mit der zugehörigen Software.

Perspektiven:

Man darf zusammenfassen, dass durch eine breite Palette von Kraftaufnehmern, Wägezellen, Drehmomentwandlern wie auch Druckaufnehmern das DMS-Prinzip eine ausgezeichnete Realisierungsform darstellt. Aus der konstruktiven Perspektive gibt es keinen Grund, warum diese Aufnehmer auf der Basis von Folien-Dehnungsmessstreifen nicht mit noch höheren Nennlasten gebaut werden könnten. Folien-Dehnungsmessstreifen sind dazu bestimmt, die Tür zu weiteren, neuen Anwendungen aufzustoßen und noch höhere Sphären zu besetzen.

Grenzen:

Allerdings sollte man sich eingestehen, dass die Messunsicherheiten für sehr große Kräfte, Drehmomente und Drücke nicht beliebig vermindert werden können. Die Gründe dafür sind vielfältig. Erstens gibt es eine Abhängigkeit vom Referenzsystem: Je höher das Vielfache der Referenzeinheit als Messbereich angestrebt wird, umso größer wird die initiale Messunsicherheit. Dabei erfordern diese höheren Nennwerte nicht einmal unvermeidlich große geometrische Abmessungen. Hohe Lasten erfordern aber einen massiven Aufbau und damit ein hohes Eigengewicht. Dies kann dann sehr leicht zu erheblichen Belastungen der Messebene bereits im lastfreien Zustand führen. Auch werden die Materialgrenzen erreicht, was dazu führt, dass bereits bei geringen Inhomogenitäten erhebliche Spannungsspitzen auftreten können. Mit der Größe geht auch ein erschwerter Einbau der Aufnehmer einher, was zu bleibenden Verspannungen führen kann.

Ausblick:

Schließlich sollte man jede Möglichkeit nutzen, bei der Konstruktion von Aufnehmern für sehr große Kräfte, Drehmomente oder Drücke diese z.B. unter Ausnutzung des Scherkraftprinzips sehr kompakt auszuführen. So lassen sich z.B. Hebelarmlängen reduzieren, die anderenfalls die Ursache für höhere Biegemomente/ parasitäre Momente sein können.

Die nächste Herausforderung für solch große Systeme sollte die Berücksichtigung dynamischer Faktoren sein. So ist der MN-m-Großprüfsand der PTB am Windkompetenzzentrum in Braunschweig für ± 600 kN·m bei einer Bandbreite von 3 Hz ausgelegt. Eine Dynamik von 3 Hz mag wenig anmuten, stellt jedoch in dieser

Größenordnung ganz besondere Anforderungen an die Prüfstandsbauer, aber auch an die Metrologen. Die Grundlagen dynamischer Messungen und die dynamische Kalibrierung werden momentan in mehreren EU-Projekten untersucht in denen HBM aktiv mitarbeitet [25].

Fazit:

Gemeinsam über alle besprochenen Messgrößen sind die Vorteile *monolithischer statt mehrteiliger* Bauweise [26]. Zumindest wirkt sich ein monolithischer Aufbau so aus, dass die Umkehrspanne/Hysteresese deutlich geringer ausfällt. Bei der Berechnung der Messunsicherheiten kommen, abhängig von der betrachteten Messgröße, unterschiedliche Messunsicherheitsbeiträge für die jeweilige Messkette zum Tragen, worauf im Vortrag und im Literaturverzeichnis genau eingegangen ist.

Literatur

- [1] G. Wübeler, S. Mieke; „Erweiterte Messunsicherheit“ Workshop der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Abteilung 8.4 , 2014
- [2] M. Krystek „ Berechnung der Messunsicherheit“ Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung, Messwesen Praxis Beuth Verlag 2012
- [3] VDI-Berichte 1805, 1867 und 1947: „Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen“ VDI/VDE Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, Tagungen 20.11.-21.11.2003, 30.11.-1.12. 2004 in Oberhof/Thüringen und 14.11.-15.11.2006 in Erfurt VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2003/2004/2006
- [4] K. - D. Sommer; R. Tutsch; Editorial „Messunsicherheit“; in Themenhefte Messunsicherheit tm - Technisches Messen, Band 84, Heft 2 (Feb 2017), De Gruyter Verlag, Oldenburg
- [5] A. Schäfer “Examples and proposed solutions regarding the growing importance of calibration of high nominal forces”, IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences, November 22–25, 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand
- [6] K. Hoffmann; “An Introduction to Measurements using Strain Gauges” , Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Germany, 1989, pp. 145
- [7] A. Schäfer “Answers to the need of higher orders of magnitude for force, torque and pressure measurement explained on the example of wind energy” IEEE I2MTC Conference; Graz, Austria, March 2012
- [8] M. Wagner, F. Ries „Messunsicherheit von Build-Up Systemen – Eine Betrachtung von Einflüssen und Methoden“ Tagungsband zur 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren & Messsysteme 2016, Nürnberg
- [9] R. Tränkler, L. Reindl „ Sensortechnik“; Handbuch für Praxis und Wissenschaft, Springer Vieweg-Verlag 2. Auflage, 2015

- [10] "Uncertainty of Force Measurements" EURAMET Calibration Guide cg-4 Version 2.0 (03/2011) Previously EA-10/04
- [11] T. Kleckers; A. Schäfer, "Force Calibration with Build Up Systems", International Metrology Conference, CIM 2017; Paris, Sept. 2017
- [12] H. Gang, Z. Zhang and Y. Zhang „Internal Large Force Comparison in China“, Mechanics and Acoustics Division, National Institute of Metrology, Beijing, P. R. China, Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque, Tokyo, Japan, 2009
- [13] G. Wegener; J. Andrae, "Measurement uncertainty of torque measurements with rotating torque transducers in power test stands," in Proceedings of IMEKO TC3, 2005, vol. 40, no. 7– 8, pp. 748–755.
- [14] J. Nitsche, S. Baumgarten, M. Petz, D. Röske, R. Kumme, R. Tutsch; "Measurement uncertainty evaluation of a hexapod-structured calibration device for multi-component force and moment sensors" Journal >>Metrologia<<, Volume 54, Number 2, IOP Science 2017
- [15] P. Hohmann; A. Schäfer, "Combined Calibration of Torque and Force in a 3in 1 Calibration unit", "APMF 2000", Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque, pp. 204, Tsukuba, Japan, 2000
- [16] G. Foyer, S. Kock "Measurement uncertainty evaluation of torque measurements in nacelle test benches" IMEKO TC3, TC5 and TC22 International Conference Juni 2017, Helsinki, Finland
- [17] C. Schlegel, H. Kahmann, P. Weidinger, R. Kumme "New perspectives for MNm Torque measurement at PTB", IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference, Juni 2017, Helsinki, Finland
- [18] G. Beaho, Webinar „Das 1 x 1 der Messunsicherheit bei Drehmomentmessungen“, www.hbm.com, Hottinger Baldwin Messtechnik Darmstadt, 2016
- [19] A. Schäfer, et al. "A new type of transducer for accurate and dynamic pressure measurement up to 15000 bar using foil type strain gauges", XVII IMEKO World Congress Dubrovnik, Croatia, 2003
- [20] A. Schäfer, "15000 bar im Visier", Zeitschrift fluid, Ausgabe November/Dezember 2004
- [21] I. Kobata; W. Sabuga u.a. "Final Report on Supplementary Comparison APMP.M.P-S8 in Hydraulic Gauge Pressure from 100 MPa to 1000 MPa", The Asia-Pacific Metrology Programme (APMP); European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) 1000 MPa, Hydraulic pressure interlaboratory comparison, 2010. Proceedings der 5th CCM Pressure Metrology Conference, Berlin, Mai 2010
- [22] M. Kreuzer; "High-Precision Measuring Technique for strain gage transducers", <http://www.disensors.com/downloads/1999-03-09>

- [23] A. Schäfer; "The ultra-precision instrument DMP41-first experience & appropriate filter settings", IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conferences, February, 2014, Cape Town, Südafrika
- [24] A. Schäfer; "A novel type of precision amplifier for strain gauge based transducers", 21st IMEKO TC4 International Symposium and 19th International Workshop on ADC Modelling and Testing Electrical and Electronic Measurement, September 2016
- [25] A. Schäfer; S. Eichstädt, "Evaluation of dynamic measurement uncertainty for industrial applications", IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference, Juni 2017, Helsinki, Finland
- [26] A. Schäfer "Force, strain and pressure transducers based on foil type strain gauges as well as the piezoelectric principle for the use in industrial applications" Proceedings of "Eurosensors 2008", Dresden, Germany, 2008

Messunsicherheiten im Verfahren der Darstellung der Kraft

Dipl. Ing. Dr. **Christian Buchner**, MSc., BEV- Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien, Österreich

Kurzfassung

Basierend auf allgemeinen und speziellen Vorgaben und Rahmenbedingungen wurde eine Totlastanlage im Bereich weniger N bis MN als primäre Kraftnormalanlage als nationales Normal der Kraft geschaffen. Dafür wurde Schritt für Schritt die Analyse der Vorgaben und mittels grundlegender Betrachtung der zu erwarteten Messunsicherheit die Erstellung eines detaillierten Anforderungskataloges beschrieben. Basierend auf einer detaillierten Messunsicherheitsbetrachtung des Verfahrens selbst wurde ein Konzept einer Anlage abgeleitet, das geeignet ist eine derartige Konstruktion zu schaffen die alle anlagenspezifischen Messunsicherheitsanteile minimiert. Dabei wurden vor allem systematisch alle Beiträge zur Messunsicherheit betrachtet und daraus die Grenze des technisch Möglichen ausgelotet. Zur Erreichung des Zieles der Umsetzung einer derartigen Kraftnormalanlage wurde zum Teil auf Methoden zurückgegriffen bzw. wurden Lösungen ausgearbeitet, die, verglichen mit bestehenden Realisierungsmöglichkeiten der Kraft, Modifikationen enthalten und Weiterentwicklungen darstellen. Es konnte detailliert gezeigt werden, wie abweichend von herkömmlichen und gleichwertigen Anlagen auftretenden Störgrößen kompensiert oder in Ihrer Messunsicherheit reduziert werden konnte, so dass man auf die Berücksichtigung dieser Störgrößen, wie sie durch internationale Kalibrierrichtlinien geregelt sind, bei der Auswertung und der dazugehörigen Messunsicherheitsbetrachtung verzichten kann. Durch Zusammenführung und Interpretation der Messergebnisse wurde bei internationalen Vergleichsmessungen die Prozessfähigkeit und Eignung der neuen Anlage belegt und ihre Einsatzfähigkeit nachgewiesen.

1. Einleitung und Zielsetzung

Zu Wahrung seiner gesetzlichen Aufgaben hat das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) als nationales Metrologieinstitut die Realisierung der Maßeinheiten darzustellen. So ist zu Beispiel für die Größe Kraft bzw. der SI-Einheit Newton, eine sogenannte primäre Kraftnormalanlage zu betreiben. Diese primären Kraftnormalanlagen realisieren Kräfte in direkter Ableitung aus der Masse, der Länge und der Zeit. Aus wirtschaftlicher und metrologischer Sicht ist eine Realisierung der Kraft für ein Metrologieinstitut nur dann sinnvoll, wenn zur Abdeckung des Bedarfs aus der Industrie und von Kalibrierlaboratorien ein umfangreicher Messbereich zur Verfügung steht und dabei die höchste Messgenauigkeit erreicht wird. Mangels Alternativen war es notwendig, eine Möglichkeit zu schaffen, eine umfassende und moderne, sich am Stand der Wissenschaft orientierende Anlage zu entwickeln, die den äußerst hohen Ansprüchen eines nationalen Metrologieinstituts gerecht wird.

Das Ziel war es, eine Methodik zur Ableitung des Anforderungsprofils an ein primäres Kraftnormalanlagensystem für die eingeschränkten Rahmenbedingungen im BEV zu

entwickeln. Das Ziel, welches primär verfolgt werden musste, ist den Messbereichsumfang zu optimieren bei gleichzeitiger Reduktion der Messunsicherheit. Dabei sollten auf alle bekannten, das Ergebnis beeinflussenden Faktoren Rücksicht genommen werden. Durch systematische Analyse der Technik und der Rahmenbedingungen sollten bis dato nicht berücksichtigte Einflussfaktoren aufgegriffen und in ihrer Größe abgeschätzt werden, um so nähere Erkenntnisse über das Verfahren zu erlangen. Unter dem Blickwinkel der zu erzielenden Messunsicherheit standen dabei Überlegungen im Mittelpunkt, auf welche angesichts der zu erwartenden Einflüsse ein besonderes Augenmerk zu richten war. Es war zur Ermöglichung einer Realisierung eines Kraftnormalanlagensystems eine Auswahl zu treffen, in der auf bewährte Lösungen bei der Realisierung der Kraft gesetzt und auf Technologien zurückgegriffen wurde, die bei einzelnen Kraftnormalanlagen bislang noch nicht umgesetzt worden sind. Diese innovativen Technologien ermöglichen aber einen alternativen Ansatz zur Lösung der Vorgaben. Diese betreffen in erster Linie messbereichernde Maßnahmen an der Totlastanlage, z.B. Gewichtskompensationen, Alternativen in der Methodik der Aufnahme von Transfornormalen (Zug und Druck in einer Einspannung), aber auch die gezielten Kompensationen einzelner Einflüsse, wie z.B. Kraft- und Deformationskompensationen. Zur Verifizierung dieser Lösungsmethoden wurden dabei grundlegende Analysen, messtechnische Beweisführungen und eine umfangreiche Betrachtung der zu erwartenden Messunsicherheit herangezogen. Das Ergebnis dieser Analysen hatte die Definition von Anforderungen zu sein, bei denen geeignete und fundierte Maßnahmen den Rahmenbedingungen angepasst wurden und somit deren Erfüllung garantierten.

Das bedeutet, dass hier gezielt durch ein umfangreiches Monitoring der zu erwarteten Messunsicherheit von jedem Beitrag während der gesamten Konzeptionierung gezielt eine Konstruktion geschaffen worden ist, deren Ziel die Minimalisierung der Messunsicherheit des Realisierungsverfahren gewährleisten kann.

2. Methodenbasierte Messanlagengestaltung

In einer Gegenüberstellung und Abwägung der Rahmenbedingungen, verfahrenstechnischer Vorgaben, konstruktiver Notwendigkeiten, steuerungstechnischer Möglichkeiten und mathematischer Grundlagen wurden die Einflüsse zur Messunsicherheitsbetrachtung bei der Kraftmessung analysiert. Diese Zusammenhänge wurden auf die erwarteten Beiträge zur Messunsicherheit der Messergebnisse mit einer derartigen Kraftnormalanlage umgelegt und bewertet. Dabei wurden in Kenntnis verschiedener Realisierungsmöglichkeiten und nach bekanntem Messprinzip in einigen Teilen der Messmethode Überlegungen angestellt, die Möglichkeiten zur Erfüllung der Anforderungen aufzeigen. Bei diesen Modifizierungen bewährter Methoden kommen technische Lösungen zum Tragen, die bekannte Einflussfaktoren bzw. Störgrößen bei der Realisierung von Kräften reduzieren. Dadurch ist man in der Lage, bei Messungen mit Kraftsensoren normativ vorgeschriebene Verfahren einzuhalten, wobei aber auf die Berücksichtigung einzelner festgelegter Korrekturfaktoren in der Auswertung verzichtet werden kann. In einer Abwägung der abgeleiteten Einflussgrößen bzw. eigentlich in der Abwägung von deren größenmäßigen Anteilen zur Gesamtmessunsicherheit wurden jene Kerngebiete ausgearbeitet, die den Hauptbeitrag zur Leistungsfähigkeit einer Kraftanlage unter den speziellen Rahmenbedingungen übernehmen.

Durch die Summe der Überlegungen im Zuge dieser Analyse wurden Anforderungen und Vorgaben definiert, die auch zum Teil bewusst entgegen bewährter Realisierungsmethoden zu einer Lösung führten.

Durch eine Grundanalyse von Unsicherheitsfaktoren bei der Kraftmessung im Rahmen einer Messunsicherheitsbetrachtung wurden dabei systematisch alle kritischen Faktoren analysiert und messtechnisch erfasst, die Einfluss auf die Realisierung der Kraft haben.

Aus prinzipiellen Überlegungen lassen sich bei der Realisierung einer Kraft die Komponenten der Krafteinflüsse von Normalkraftmaschinen in zwei Schlüsselbereiche aufteilen:

- in den Bereich der *Technik / Konstruktion* und
- in den der *verfahrenstechnischen* Komponenten.

Dabei sollen die Komponenten überlagert betrachtet werden, die als

- eine *maschineninterne Reaktion* erst durch die Realisierung der Kraft entstehen
- und eine Reaktion, abhängig vom Messprinzip auf den zu messenden *Kraftaufnehmer*.

Übergreifend sei der fünfte Teil der Einflusskomponenten zu sehen; der Teil, der den

Umgebungsbedingungen zuzuordnen ist.

Bei einer grundsätzlichen Betrachtung der Einflussparameter bei der Kraftdarstellung aus Sicht der erzielten Messunsicherheit ist aber zu unterscheiden:

- Betrachtung der Unsicherheitsfaktoren der gemessenen Kraft sowie die
- Betrachtung der Unsicherheitsfaktoren der realisierten Kraft.

Die Problematik liegt in der Verknüpfung der beiden Ansätze. Während die gemessene Kraft zu beurteilen ist, muss auf die realisierte Kraft geschlossen werden.

Es wurden grundlegende Anforderungen aufgezeigt und von der zu erwartenden Messunsicherheit der Kraft eine Abwägung von verschiedenen Einflüssen aus der Kraftmessung beschrieben. Ausgehend von der zu erzielenden Messgenauigkeit als Vorgabe wird dabei durch die Betrachtung der Dimension von bekannten Einflussgrößen versucht, die maximal erlaubte Messunsicherheit vorerst noch nicht abzuschätzender Einflüsse abzuleiten. Systematisch werden dabei jene Haupteinflüsse ausgearbeitet, die bei herkömmlichen Systemen den Hauptanteil für Einschränkungen im Messbereich und Messverfahren verursachen. Durch diese detaillierte Betrachtung ist es möglich, für diese Einflüsse alternative Lösungen auszuarbeiten. Somit kann gezeigt werden, dass die Messmöglichkeiten primärer Kraftnormalanlagen sowie Systeme aus Kraftnormalanlagen wesentlich erweitert werden können.

Dabei wurde in erster Linie auf die Ursachenanalyse der Unsicherheitsbeiträge bei der Realisierung der Kraft durch Totlastkraftanlagen eingegangen, um im Weiteren Grenzwerte für die Konzeptionierung zu definieren.

Aus den theoretischen Überlegungen der Messunsicherheitsbetrachtung und den konstruktiven Lösungen, sowie Erkenntnissen aus Testmessungen und Informationen von

bestehenden Kraftanlagen, können nachfolgende relevante Einflussgrößen zugeordnet werden:

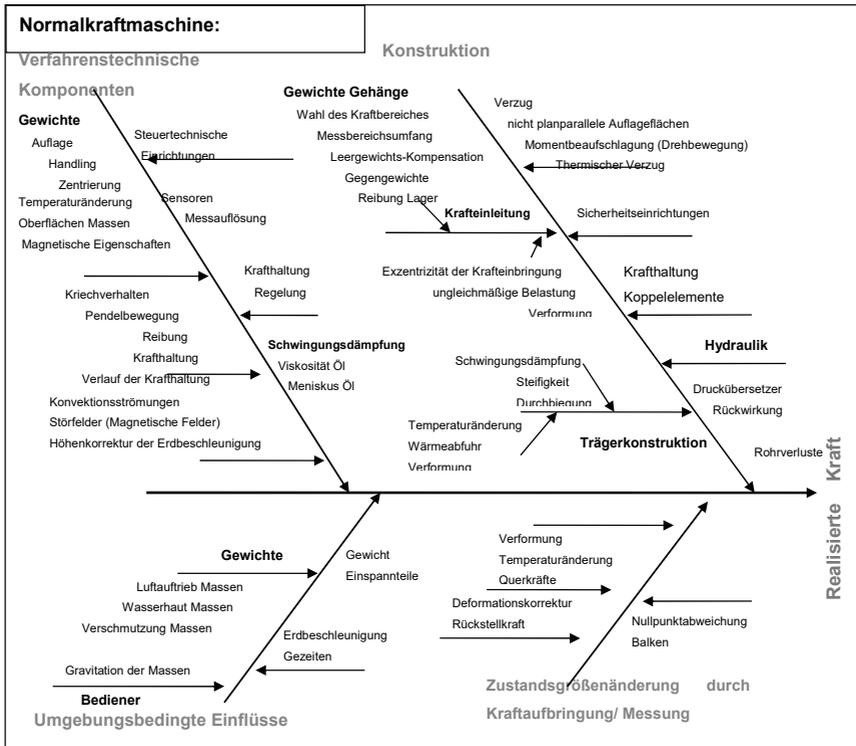


Abbildung 1: Messunsicherheitsrelevante Einflussgrößen der Kraftnormalanlagen bei der Realisierung einer Kraft

Die Einteilung dieser Einflussgrößen in Gruppen erfolgt rein nach allgemein technisch-physikalischen Überlegungen aufgrund der Zuordnung ihres Ursprunges. Diese Einflussgrößen sind im Anschluss einzeln zu betrachten und deren Größe ist in Bezug auf die Gesamtunsicherheit zu bewerten.

Die Einflussgrößen, die jedoch bei der Ermittlung der gemessenen Kraft relevant sind, also die auf die Messwerte des Kraftmessgerätes wirkenden Messunsicherheitsanteile, lassen sich weiter in zwei Bereiche teilen. Ein Bereich sind die Komponenten, die ihren Ursprung in der Realisierung der Kraft haben und somit anlagenspezifisch sind und einen Bereich bestehend aus jener Komponenten, die dem Messgerät zugeordnet werden können und somit messgerätespezifisch sind.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, scheinen Beiträge zur Messunsicherheit der gemessenen Kraft mehrere Faktoren gleichzeitig zu beeinflussen. Die Einflüsse und Störgrößen der Betriebszustände auf Maschinenseite, wie kontinuierliche Belastung (treppenförmiger, kontinuierlicher Lastanstieg und Lastabfall) und kontinuierliche Belastung im Dauerbetrieb, korrelieren streng miteinander, gleichgültig, ob sie konstruktiver oder verfahrenstechnischer Natur sind.

Ebenso lassen sich Einflüsse und Auswirkungen auf Seiten der Kraftaufnehmer und der dazugehörigen Einspannkomponenten nicht eindeutig trennen. Vergleichbar werden dadurch nur Ergebnisse identer Verfahren und Abläufe. Die Problematik wird verstärkt, da auch übergreifend zwischen Maschine und Aufnehmer eine völlige Abhängigkeit besteht. So können zum Beispiel konstruktive Maschineneinflüsse durch geeignete Einspannteile kompensiert oder durch Kraftaufnehmer bestimmter Bauart um ein Vielfaches verstärkt werden. Weiters kann ein Kraftaufnehmer anderer Bauart gegenüber dem gleichen konstruktiven Maschineneinfluss eine Unempfindlichkeit zeigen, während eine Abänderung der Einspannteile genau das Gegenteil bewirkt. Diese Effekte lösen weitere Störgrößen aus, die durch das Messprinzip selbst (Kraftaufbringung) verursacht werden.

Wie die Erfahrung zeigt, lassen sich derartige Zusammenhänge zwar systematisch aufzeigen, aber eine allgemein gültige oder mathematische Erfassung der Zusammenhänge scheint nicht möglich zu sein, da diese Zusammenhänge situationsabhängig sind und keine grundlegenden Strukturen aufweisen. Aufgrund der Vielzahl der Schnittstellen reicht eine geringfügige Veränderung einer einzigen Schnittstelle (z.B. geringe Verdrehung eines rotations-symmetrischen Körpers), um an allen Schnittstellen andere Ergebnisse festzustellen. Fertigungstoleranzen, Effekte der Reibung, Passungssysteme, geometrische Veränderungen durch die Kraftaufbringung, zum Teil systematischer, zum Teil zufälliger Natur, sind dafür verantwortlich. Messtechnisch gesehen ist so eine Situation natürlich problematisch. Die besten Ergebnisse erlangt man, wenn mit einer (oder besser mehreren) Messanordnungen idente Messungen durchgeführt werden, wobei man systematisch Komponenten der Messanordnung verändert oder tauscht. Vereinfacht gesagt entspricht dies einer systematischen aber empirischen Ermittlung. Von Vorteil ist es, wenn ein Großteil der Komponenten dieser Messanordnungen erprobt und bekannt ist.

Auf diese Weise lassen sich systematische und zufällige Einflüsse empirisch aufdecken und eliminieren; sind die Resultate der Messungen bekannt, lassen sich auch systematische Einflüsse mit geringem Ausmaß berücksichtigen. Die Messergebnisse sind aussagekräftiger, wenn sie aufgrund eines unterschiedlichen Messprinzips zustande gekommen sind; beruht die Ermittlung der Messergebnisse auf gleichem oder gleichwertigem Prinzip, so sind Korrelationen zu beachten. Der unbekannt und zufällige Anteil wird in der Messunsicherheit nach den anerkannten Methoden der Metrologie berücksichtigt.

3. Umsetzung eines Anlagensystems zur Realisierung der Kraft

Ausgehend von den definierten Anforderungen für eine Totlastkraftanlage wurde ein Grundkonzept für eine derartige Anlage erstellt, die den gesetzten Rahmenbedingungen gerecht wird. Bevor diese Konzeptionierung in eine Konstruktion übergeführt werden konnten, waren vor allem jene gewählten Lösungsansätze im Detail zu verifizieren, die neuartig sind und bei denen man nicht in der Lage war, auf Erfahrungswerte zurückzugreifen. Zu klären war, ob diese Anforderungen erfüllt werden und damit im

Umkehrschluss die definierten Anforderungen als ausreichend erachtet werden. Im Konkreten war zu verifizieren, ob jene ausgearbeiteten Kernfunktionen aus der Analyse der Anforderungen an diese Totlastkraftanlage soweit erfüllt werden, dass die vorliegenden Rahmenbedingungen dadurch eingehalten werden. Sowohl in der Verifikation des Konzeptes als auch in der anschließenden Verifikation der umgesetzten Lösungen wurden zuerst rechnerisch, dann messtechnisch, systematisch alle Faktoren dieser Anlage analysiert und erfasst, die Einfluss auf die Realisierung der Kraft haben. Der Kernteil war dabei natürlich auf jene Methoden und Lösungen gelegt, die auf innovativen Ansätzen beruhen und somit eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Kraftmessung darstellen.

In einem kooperativen Projekt zwischen dem BEV und dem Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik der TU Wien wurde ausgehend von der entstandenen Konstruktion dieses Kraftnormalanlagensystem im BEV aufgebaut und so aus mehreren Kraftanlagen ein System als primäres Kraftnormal für das BEV geschaffen. Diese Anlage stellt somit die messtechnische Basis nicht nur für die Kalibrierung von Kraftmessgeräten der höchsten Genauigkeitsklasse (00) dar, sondern soll auch für zukünftige wissenschaftliche Projekte im Bereich der Kraftmessung erweiterte Funktionen aufweisen. Nach der Implementierung des Systemes ist es möglich, im gesamten Messbereich Messungen der Kraft auf nationale Normale des österreichischen Etalons der Masse, der Länge und der Zeit rückführen zu können.

Durch Zusammenführung und Interpretation der Messergebnisse der Implementierungsphase wird die Prozessfähigkeit dieser Anlage belegt. Es wurde der Beweis erbracht, dass die bei bestehenden und gleichwertigen Anlagen auftretenden und durch internationale Kalibrierrichtlinien erfassten Störgrößen bei dieser Anlage in der Berechnung der Messergebnisse bzw. der Unsicherheitsbetrachtung keinen Einfluss finden.

4. Ausgewiesenes Messunsicherheitsbudget

Im Zuge der Aufschlüsselung der messunsicherheitsrelevanten Einflussgrößen der Kraftnormalanlagen, erfolgt eine Codierung der Beiträge zur Vorbereitung des Messunsicherheitsbudgets nach GUM-Work-Bench. Die Zuordnung zu den Variablen erfolgt nach physikalischen und mechanischen Gesichtspunkten und basiert auf Überlegungen, diese, aufgrund von Erfahrungswerten aus der Kraftmessung zuordnen und in ihrer Größe abschätzen zu können. Dazu wurden aufwendige Simulationen aller kraftführender Bauteile getätigt um verwertbare Aussagen zu erhalten. Werden Variablen mehrfach zugeordnet, so lassen sich die Einflussgrößen nicht eindeutig zuordnen oder werden bewusst zusammengefasst um sie simulationsmäßig oder messtechnisch erfassbar zu machen. So wurden z.B. die betrachteten Einflüsse der Erdschwere g , Höhenkorrektur, Gezeiten, Polschwankungen und Gravitation anderer Massen zusammengefasst, da sie im Nachfolgenden aus Überlegungen der Auswirkung auf das Messergebnis messtechnisch nicht separat aufgeschlüsselt werden können. Aus gleichen Überlegungen wurden für Simulationen zwar die Kernteile der Waagengehänge (z.B. Brücke) einzeln in ihrer Verformung und Verzug unter Belastung betrachtet, jedoch für die Beurteilung selbst sind hier die Komponenten zusammengefasst und werden in 4 Gruppen F_A - F_B aufgeteilt.

Ermittelte Störgröße für GUM	Berücksichtigung in der Variable
• Technik und Konstruktion:	-
Trägerkonstruktion	-
Durchbiegung	F _{St1}
Schwingungsdämpfung	F _{St2}
Steifigkeit	F _{St3}
Verformung durch Temperaturänderung	F _{St4} , F _Q
Wärmeabfuhr	F _{St12}
Verformung durch Kräfte	F _{St5}
Dimensionierung der Tragkonstruktion für Gewichte (Gehänge)	-
Wahl des Kraftbereiches	-
Messbereichsumfang	F _{StA} , F _{StB}
Leergewichtskompensation der Gehänge	F _{StC}
Gegengewichte	F _{StD}
Krafteinleitung und Druckplatten	-
nicht planparallele Auflageflächen	F _Q
Momentbeaufschlagung (Drehbewegung)	F _Q
Exzentrizität der Krafteinbringung	F _Q
Thermische Verformung	F _Q
• Technik und Verfahrenstechnik	-
Gewichte	m ₀
Einzelaufnahme / Auflage	F _{Q4}
Zentrierung (zentrische Krafteinleitung in Trägerkonstruktion)	F _Q
Pendeln	F _Q
Zentrische Justierbarkeit	F _{St6}
Temperaturänderung	V _G
Oberflächenausführung Massen	m ₁
Magnetische Eigenschaften	m ₂
Gehänge	-
Leergewichts-Kompensation der Gewichtsaufnahme	F _{StA} , F _{StB}
Sensitivität	F _{StA} , F _{StB} , F _{StC} , F _{StD}
Reibung Festkörperlager	F _{StC} , F _{StD}
Schwingungsdämpfung	F _{StC} , F _{StD}
Öldämpfer Auftrieb, Meniskusbildung	F _{StA} , F _{StB} , F _{StC} , F _{StD}
Meniskusdeformation Öldämpfer durch Belastung	F _{St7}
Kriechverhalten	m _{GehA} , m _{Gew}
Pendelbewegung, Schwingungen	F _Q C, F _Q D
Rückstellung	V _{GehA} , V _{Gew} , pL1,2,3,4
Krafthaltung	-
Koppelemente	F _{St8} , F _Q
Verlauf der Krafthaltung	F _{St9}
Sensoren Messauflösung	F _{St9}
Regelgenauigkeit	F _{St10}
Krafthaltung Konstanz	F _{St10}
Steuertechnische Einrichtungen	-
Korrektur der Verformung	F _{St11}
Schwingungsdämpfung	F _{St11}
durch Konvektionsströmungen in der Maschine ausgelöste parasitäre Kräfte	F _{St12}
Störfelder (magnetische Felder, elektrostatische Aufladung)	F _{St13}
Temperaturänderung durch Betrieb	F _{St14}
Sicherheitseinrichtungen	F _{St12} , F _{St16} -
Einfluss der Auffangvorrichtung durch erhöhte Sicherheit bei Auflagen und Gehänge	p
Höhenkorrektur der Erdbeschleunigung	g
• Maschinen interne Reaktion der Kraftaufbringung	-
Verformung durch Krafteinleitung, Durchbiegung	F _{St15}
Temperaturänderung durch Verformung	F _{St16}
Querkräfte durch Kraftschluss zu Kraftaufnehmer	F _Q
• Umgebungsbedingungen	-
Gewichte	m ₀
Luftauftrieb der Massen	V _G , pL
Wasserhaut bei Massen	m ₃

Ermittelte Störgröße für GUM	Berücksichtigung in der Variable
Verschmutzung der Massen	m_4
Gravitation der Massen	g
Bediener	Z
Erdbeschleunigung	g
Gezeiten, Polschwankungen	g

Tabelle 1: Zuordnung der Einflussgrößen auf Störkräfte und parasitäre Kräfte

Um Kraftmessgeräte der Genauigkeitsklasse 00 zu kalibrieren, wurde als ein Grenzwert für die angestrebte Genauigkeit und die Ausführung bzw. für die zu erreichende relative Unsicherheit über den gesamten Messbereich bis 250 kN von höchstens $2 \cdot 10^{-5}$ festgelegt. Betrachtet man bei drei exemplarisch dargestellten Laststufen (Abbildung 2) unter dem Aspekt der Verteilung die relativen Unsicherheitsanteile, so sind die unterschiedlichen Auswirkungen der Haupteinflusskomponenten bei höheren Lasten zu denen bei den niederen Lasten erkennbar. Während im oberen Messbereich der Haupteinfluss auf die Methode, sprich den Einfluss der Masse und der Erdbeschleunigung, zurückzuführen ist, dominiert im unteren Messbereich die Abhängigkeit vom Verfahren und der Konstruktion der Messanlage. Dazu gehören vorrangig die Einflüsse der Umgebungsbedingungen (Luftdichte), der Störgrößen F_{St} und der Einfluss des Bedieners (Z). Somit kann veranschaulicht werden, dass die messtechnischen Grenzen einer Totlastkraftanlage aus konstruktiven Gründen im unteren Messbereich dieser Anlage liegen. Jeder notwendige Bauteil weist aufgrund seiner konstruktiven Aufgabe und Ausführung einen nicht zu unterschreitenden Einfluss an der Gesamtunsicherheit auf. Daher sind herkömmliche Totlastkraftanlagen in diesem Unsicherheitsbereich in ihrem Messbereich äußerst beschränkt und enden im unteren Bereich bei etwa 2 bis 5 % der Nennlast.

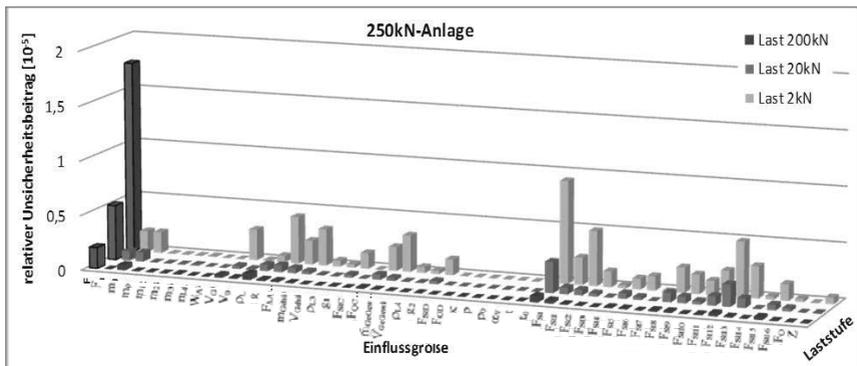


Abbildung 2: Beispielweise Relative Unsicherheit und deren Anteile für je drei Laststufen bis 250 kN

Wie in der Auslegung der Kraftanlage simuliert, verschiebt sich naturgemäß abhängig von der Last der Einfluss der Unsicherheitsbeiträge. Greift man auf die Summe der Unsicherheitsanteile aus der Summe der Störkräfte F_{St} zurück, so liegt der maximal erlaubte Anteil an der relativen Gesamtunsicherheit bei etwa 50%. Vergleicht man dagegen die Höhe

der F_S -Balken in Abbildung 3 der gleichen Laststufen, so erkennt man, dass das Verhältnis zur erreichten Gesamtunsicherheit zumindest bei den höheren Laststufen wesentlich geringer ist. Der Umstand, dass der Grenzbereich der erzielbaren Genauigkeit im unteren Belastungsbereich liegt, ist auch daran erkennbar, dass die faktisch erreichten Gesamtunsicherheiten und die maximal erlaubten Gesamtunsicherheiten sich nur im unteren Messbereich größtenteils decken. Während bei 200 kN nur ein Zehntel des Unsicherheitsbudgets von 4 N ausgeschöpft worden ist, ist die prognostizierte Unsicherheit bei 2 kN mit der erreichten bei etwa 0,04 N identisch mit der zulässigen Messunsicherheit.

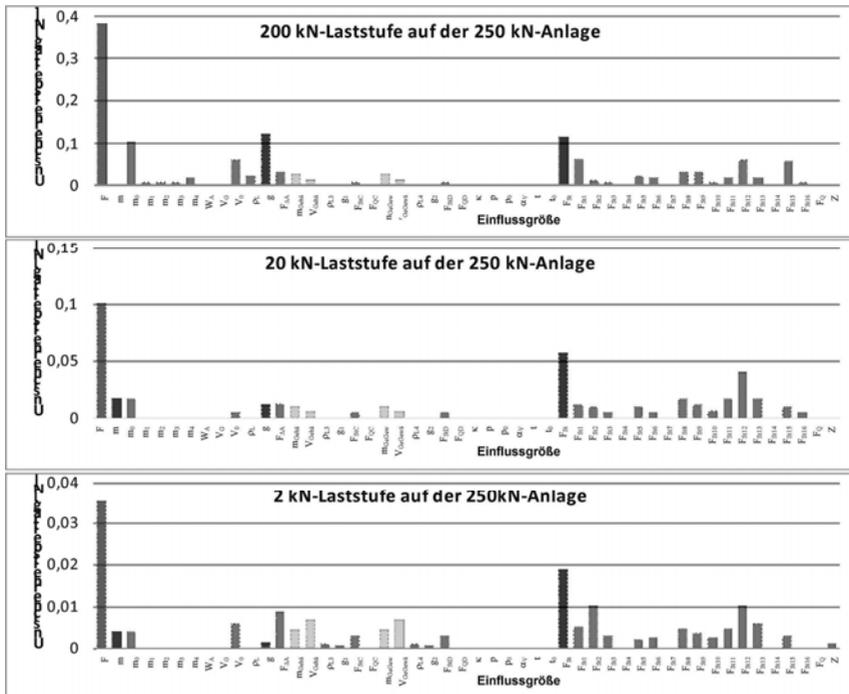


Abbildung 3: Verteilung Unsicherheitsanteile je Laststufe bis 250 kN

Der Grund dafür ist, dass bei den Störgrößen ein bedeutend kleinerer Wert der absoluten Unsicherheit erreicht werden konnte. Betrachtet man die absolute Verteilung der einzelnen Faktoren, so lassen sich die sensiblen Bereiche erkennen, deren Anteil entscheidend zur Gesamtmessunsicherheit beiträgt. Sowohl in Abbildung 3 als auch in Abbildung 4 zeigt sich die Abhängigkeit bei der Laststufe 200 kN und 2 kN ausgehend von der Masse m , dem Volumen V_G , der Massescheiben und der Erdschwere g .

Die einzelnen Anteile der Störgrößen sind verhältnismäßig gering. Betrachtet man den Trend der Anteile im Verhältnis zur Gesamtunsicherheit (rote Säule), so zeigt sich, dass bei abnehmenden Laststufen vor allem die Anteile der Komponenten im Verhältnis zu den anderen drastisch steigen, deren Größe von den Umgebungsbedingungen abhängig sind. Das betrifft in erster Linie entstehende Einflüsse und Reaktionen in den Kräfteverhältnissen bzw. deren Empfindlichkeit auf die Änderung des Luftauftriebes durch Änderungen der Umgebungsbedingungen. Durch Schwankungen des Luftdrucks, Änderung der Lufttemperatur oder der Anlagentemperatur und der dadurch bedingten Volumen- und Dichteanpassungen aller bewegter Teile, die als gewichtstragende Teile $V_{Geh\ddot{a}1}$ oder als Gegengewichte V_{GeGew1} zur Kompensation dienen (orange Säulen), resultieren die Zustandsänderungen mit dem Luftauftrieb.

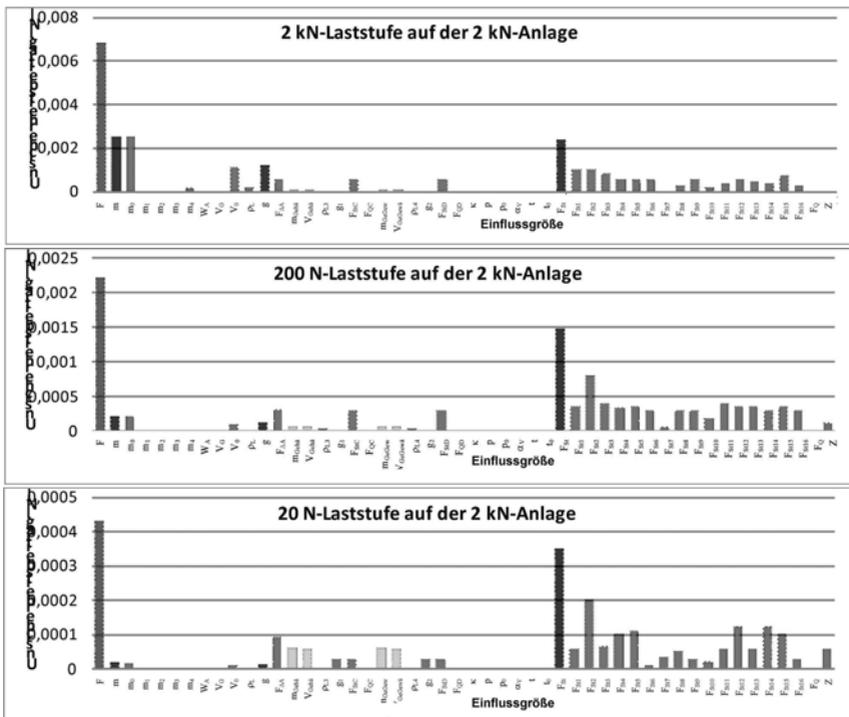


Abbildung 4: Verteilung Unsicherheitsanteile je Laststufe bis 2 kN

5. Analyse erzielter Unsicherheitsbeiträge

Die Reaktion auf den Luftauftrieb wirkt vor allem bei großen Volumina aller Bauteile entscheidend aus. So ist bei der 250 kN-Kraftanlage durch die Größe des Wägewertes und

dem Volumen des gesamten Gewichthalteapparates der Einfluss hier besonders hoch, da die Ausgleichskräfte größer sind. Analysiert man die anteilmäßige Verteilung der Störgrößen F_{St1} bis F_{St16} selbst, so entsteht der Haupteinfluss bei den hohen Lasten vor allem durch die Verformung von krafttragenden Anlageteilen und den daraus entstehenden Querkräften und bei großen, zum Eingriff kommenden Anlageteilen aufgrund der Größe der Angriffsflächen durch die Auswirkung von Konvektionsströmungen. Bei den kleineren Kraftstufen, vor allem unter 2 kN, steigt besonders der Anteil des Einflusses von störenden Reibkräften in den Lagerungen der bewegten Anlagenteile und in der Schwingungsdämpfung.

Totlastanlagen herkömmlicher Bauart, die in Unsicherheitsbereichen von $2 \cdot 10^{-5}$ arbeiten, weisen einen Messbereich bis etwa 10% der höchsten Laststufe auf. Auch Sonderkonstruktionen, in denen mehrere (bis zu drei) Messbereiche in einer Maschine vereint werden, sind in ihrem unteren Grenzbereich sehr limitiert. Der kleinste Lastwert ist in der Regel der Wert, der dem Eigengewicht des Gehänges entspricht. Auch wenn durch konstruktive Maßnahmen diese Grenze des Messbereichs minimiert wird, ist es kaum möglich unter 5% der Höchstlast zu kommen. Eine derartige Maßnahme ist z.B. die Teilung des Gehänges in zwei Teile, wobei die Massen dieser Teile die ersten beiden Laststufen abdecken.

Bei der im BEV realisierten 250 kN-Totlastanlage und der 2 kN-Totlastanlage liegen hingegen diese Minimalwerte in der Größenordnung von etwa 0,5% des maximalen Lastwertes. Analysiert man die erzielten Ergebniswerte, so zeigt sich, dass bei beiden Kraftnormalanlagen mit höchster Genauigkeit unterhalb des 1%-Punktes noch gemessen werden kann. Darunter ist die Darstellung bis zum Endwert möglich, allerdings steigt die erzielte Messunsicherheit kontinuierlich auf einen Wert von etwa $4 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-5}$. Dieser Wert bringt für Standardkalibrierungen noch immer ein hervorragendes Ergebnis.

Im Zuge der Validierung des Messverfahrens wurde eine Vielzahl von Messserien bei denselben Laststufen wiederholt durchgeführt, die Ergebnisse ausgewertet und die entsprechende Messunsicherheitsberechnung der einzelnen Laststufen verglichen und analysiert. Es hat sich gezeigt, dass es vor allem durch Schwankungen des Luftdruckes und den damit verbundenen Ausgleich des Gehänge-Gegengewichtsystems vor allem bei Laststufen kleiner 5 kN zu Schwankungen im Ergebnis der Unsicherheitsberechnung von $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ kommt. Bei größeren Laststufen konnte dieser Effekt nicht nachgewiesen werden, da er von den standardmäßigen Streuungen der Ergebnisse in diesem Messbereich überlagert wurde und dadurch messtechnisch nicht separiert werden konnte. Es zeigt sich über den gesamten Bereich, dass sich das Verhältnis der Einflussgrößen aus den darstellenden Größen (Masse, Dichte und Fallbeschleunigung) zu den Einflussgrößen der Mechanik (Störgrößen) mit fallender Last zu Ungunsten der mechanischen Einflüsse verschiebt. Somit zeigt sich auch hier, dass die Einflüsse der Mechanik aufgrund des relativen Zuwachses die Möglichkeiten von Totlastanlagen im unteren Bereich limitieren.

Um eine generelle, messbereichsübergreifende Aussage über die Leistungsfähigkeit der gesamten Anlage in Bezug auf Einhaltung der Messunsicherheitsgrenzen tätigen zu können, wäre es eigentlich notwendig, eine Messunsicherheitskalkulation in jeder realisierbaren Laststufe vorzunehmen. Daher sind zur umfangreichen Beurteilung des Messunsicherheitsbudgets die erläuterten Beispiele in drei Laststufen als nicht ausreichend

zu bewerten. Das mechanische Verhalten solcher Anlagen ist zwar theoretisch über den Messbereich / Lastbereich eher als linear einzustufen, aber betrachtet man die gebrachten Beispiele sowohl bei der 250 kN-Totlastanlage als auch bei der 2 kN-Totlastanlage, gewinnt man den Eindruck, dass in den Randbereichen des Messbereiches die Zunahme der Störgrößen relativ zur Last gesehen nicht mehr linear erfolgt. Verursacht wird dieser Effekt durch größer werdende Einflüsse wie z.B. Reibung, Strömungskräfte oder thermische Entladungen. Um ein Maß für eine realistische Messunsicherheitsangabe zu erhalten, war es daher notwendig, gerade in den Grenzbereichen zusätzliche Laststufen zu betrachten.

6. Resümee und Ausblick

Um der Verpflichtung als nationales Metrologieinstitut nachzukommen, für die gesetzlichen Maßeinheiten (entsprechend der SI-Einheiten) den nationalen Etalon der Messnormale bereit zu halten, dessen internationale Vergleichbarkeit und Anerkennung sicherzustellen und die Maßeinheiten durch Kalibrierungen von Bezugs- und Arbeitsnormalen für Wirtschaft und Industrie weiterzugeben, wurde im BEV eine Anlage zur Darstellung der Kraft in direkter Ableitung aus der Masse und der Erdschwere realisiert.

Ausgehend von der Darstellung der Problematik, die sich für das BEV im Fachbereich Kraft gestellt hat, wurden zielorientiert allgemeine und spezielle Vorgaben und Rahmenbedingungen zusammengefasst und beschrieben, die für die Schaffung einer primären Kraftnormalanlage als nationales Normal der Kraft zu erfüllen sind. Ein Vergleich der Vorgaben mit bestehenden Anlagen anderer Metrologieinstitute zeigt eine Reihe unvereinbarer Probleme. Zur Lösung der Diskrepanzen wurde zum Teil auf Methoden zurückgegriffen, die verglichen mit bestehenden Realisierungsmöglichkeiten der Kraft Modifikationen enthalten oder einen alternativen Lösungsansatz bieten.

Es erfolgt daraus die Analyse der Vorgaben und unter Betrachtung der Einflüsse jedes einzelnen Bauteiles, auf das Ergebnis wurde die Erstellung eines detaillierten Anforderungskataloges geschaffen. So konnte auf einer verfügbaren Grundfläche von 68 m² eine primäre Totlastkraftnormalanlage mit einem mechanischen Messbereich von 5 N bis 250 kN in Zug- und Druckrichtung mit einer relativen Unsicherheit von kleiner $2 \cdot 10^{-5}$ über den Messbereich realisiert werden. Implementiert wurden dabei zwei hydraulische Anlagen für 1MN und 5MN.

Die speziell auf die zu erwartende Messunsicherheit des Ergebnisses ausgerichtete Methodik der Entwicklung dieses Gesamtprojektes und in weiterer Folge die Methode der messtechnischen Beweisführung konnten den benötigten Nachweis über die Fähigkeit dieser neuartigen Anlage erbringen. Durch die in der Fachwelt akzeptierte Beweisführung über die Prozessfähigkeit dieser Anlage konnte die Richtigkeit der Methode zur Validierung dieser Kraftnormalanlage gezeigt werden.

Zur Aufrechterhaltung der Akzeptanz seitens des CIPM-MRA-Abkommens ist die Zusammenarbeit mit verschiedenen Metrologieinstituten und die Teilnahme an internationalen Vergleichsmessungen im Rahmen von CCM oder EURAMET Projekten notwendig. Darüber hinaus ist diese Zusammenarbeit der laufende Nachweis der Eignung der Anlage und der Grundstock für die Teilnahme an weiteren nationalen und internationalen wissenschaftlichen Projekten im Fachbereich Kraft.

Unsicherheitsabschätzung bei der Kalibrierung sechssachsiger Kraft-Momenten-Sensoren

Estimation of the calibration uncertainty of six-component force-moment-sensors

Dipl.-Ing. **Jan Nitsche**, Prof. Dr.-Ing. **Rainer Tutsch**,
Institut für Produktionsmesstechnik,
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig;
Dr.-Ing. **Dirk Röske**, Dr.-Ing. **Rolf Kumme**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Kurzfassung

Bei der Kalibrierung von mehrachsigen Kraft- und Momentensensoren spielt die Ausrichtung der Koordinatensysteme eine wichtige Rolle. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Koordinatentransformation sowie der Einfluss der Transformation auf den resultierenden Referenzvektor wird mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode analysiert.

Abstract (optional)

The alignment of coordinate systems plays an important role in the calibration of multi-axial force and moment sensors. The uncertainty of the identification of coordinate transformation parameters and the influence on the resulting reference vectors will be analysed using the Monte-Carlo-Method.

1. Einleitung

Klassische Kraft- und Drehmomentsensoren, die in diversen Bereichen der Industrie und Forschung weit verbreitet sind, messen Kräfte oder Momente entlang einer vorgegebenen Sensorachse. Bei Anwendungen mit wechselnden Lastfällen oder Richtungen müssen sie häufig neu ausgerichtet oder mehrere Sensoren kombiniert werden. Sensoren, welche mehrere Achsen in einem Gehäuse vereinen, werden Mehrkomponentensensoren (MKS) genannt. Dies kann im einfachsten Fall eine Kombination von zwei Achsen, z.B. Axialkraft und Drehmoment bei Reibwertmessköpfen [1], im idealen Fall eine Kombination von sechs Achsen, drei Kraft- und drei Momentenachsen, sein [2].

Für die Kalibrierung solcher MKS sind die herkömmlichen Kalibrierverfahren klassischer Kraft- und Drehmomentsensoren in Kraft- oder Drehmomentnormalmesseinrichtungen nur bedingt geeignet. Diese Verfahren sind nur für eine zu belastende Achse ausgelegt. Sensoren können um einzelne Sensorachsen rotiert werden, z.B. mit Hilfe von Winkeladaptoren. Dies ermöglicht zwar eine entsprechende Kalibrierung, allerdings erhöht sich die Kalibrierunsicherheit auf Grund der notwendigen Ausrichtung und Montage in den verschiedenen Einbaulagen.

Um die Problematik der Kalibrierung von MKS zu lösen, wurden in der Vergangenheit an unterschiedlichen Institutionen spezielle Kalibriereinrichtungen für MKS entwickelt und aufgebaut. Exemplarisch sollen die Anlagen des Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) in Italien [3] und der Gyeongsang National University in Korea [4] erwähnt werden.

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig existieren zwei Einrichtungen zur Kalibrierung von MKS. Eine Anlage ist in Form einer Zusatzeinrichtung zur Erzeugung von überlagerten Drehmomenten bis 1 kN·m in der 1 MN Kraftnormalmesseinrichtung realisiert [5], die zweite Anlage ist in Form einer Hexapodstruktur aufgebaut und für sechsachsige Kalibrierungen ausgelegt [6]. Diese Anlage wird im Folgenden genauer beschrieben.

2. Statische Referenzmesseinrichtung der PTB

Die hexapodförmige, statische Referenzmesseinrichtung der PTB ist zur Kalibrierung von MKS mit Lastbereichen bis zu 10 kN für Kräfte und 1 kN·m für Momente ausgelegt. Die Anlage wurde in den Jahren 2001 bis 2003 entwickelt und aufgebaut [6 - 8]. Bild 1 zeigt ein Foto der Referenzmesseinrichtung. Sie besteht aus zwei parallelkinematischen Einheiten, einer angetriebenen Einheit (1) und einer messenden Einheit (2). Durch den parallelkinematischen Aufbau ist die angetriebene Einheit in der Lage, eine bewegliche Plattform mit sechs Freiheitsgraden im Raum zu positionieren. Ein zu kalibrierender Sensor wird zwischen den beweglichen Plattformen der Antriebseinheit und der Messeinheit montiert. Durch die Positionsänderung der bewegten Plattform der Antriebseinheit wird ein Kraft-Momenten-Vektorpaar erzeugt, welches gleichermaßen auf den zu kalibrierenden Sensor und die Messeinheit wirkt. In den Beinen der Messeinheit sind uniaxiale Kraftsensoren montiert, welche die Kräfte entlang der einzelnen Beine erfassen und somit die Berechnung eines Referenzvektorpaars ermöglichen. Die Kalibrierung des Sensors erfolgt über einen Vergleich der Sensorwerte mit den Referenzvektoren aus der Messeinheit.

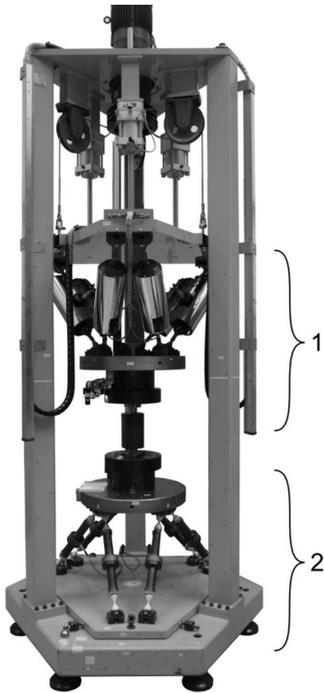


Bild 1: Statische Referenzmesseinrichtung der PTB

Die Anlage ist theoretisch in der Lage, ein beliebiges Kraft-Momenten-Vektorpaar im genannten Lastbereich zu erzeugen. In der Praxis wird die Genauigkeit, mit der ein solches Vektorpaar erreicht wird, durch die Nachgiebigkeit des Aufbaus und die Regelung der Ansteuerung begrenzt. Da die Lastvektoren jedoch gleichermaßen auf den zu kalibrierenden Sensor und die Messeinheit der Anlage wirken, kann die Abweichung zwischen Soll- und Istvektor stets berücksichtigt werden.

Die Berechnung der Referenzvektoren in der Messeinheit erfolgt über ein physikalisches Modell des Aufbaus. Dieses Modell berücksichtigt die Geometrie des Hexapods, thermische Ausdehnung der einzelnen Komponenten sowie die Verformung der uniaxialen Sensoren in den einzelnen Beinen unter Last [9]. Aus dem Modell resultieren die kartesischen Komponenten des anliegenden Kraft- und Momentenvektors.

3. Kräfte und Momente als Vektor

In der bisherigen Beschreibung von Kräften und Momenten wurde implizit vorausgesetzt, dass diese im physikalischen Sinne gerichtete Größen sind, welche durch ihren Betrag, ihren Angriffspunkt sowie ihre Orientierung im Raum vollständig beschrieben werden können. In klassischen, uniaxialen Kraft- und Drehmomentsensoren werden der Angriffspunkt und die Orientierung durch die Ausrichtung des Sensors vorgegeben und nur der Betrag als skalare Messgröße ermittelt. Beim Einsatz eines solchen Sensors in einer Messanwendung ist es entsprechend erforderlich, das Referenzkoordinatensystem so auszurichten, dass eine Koordinatenachse kollinear zur Sensorachse verläuft, oder die Orientierung des Sensors im Referenzkoordinatensystem zu ermitteln. Die Beschreibung der Ausrichtung erfolgt im einfachsten Fall über zwei Rotationswinkel, somit wird der Kraft- oder Momentenvektor in Form von Kugelkoordinaten repräsentiert (vgl. Bild 2).

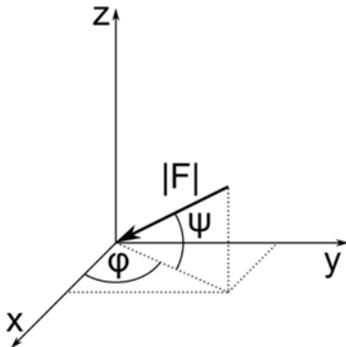


Bild 2: Darstellung eines Kraftvektors in Kugelkoordinaten

Im Gegensatz hierzu findet die Repräsentation eines Kraft- oder Momentenvektors in MKS typischerweise in Form von kartesischen Koordinaten statt. Der Vektor wird in seine kartesischen Komponenten zerlegt und über entsprechende Ausgänge ausgegeben. In einer Messanwendung erfordert diese Darstellung gleichermaßen eine Ausrichtung des Referenzkoordinatensystems oder eine Kenntnis über die Koordinatentransformation zwischen Sensor- und Referenzkoordinatensystem [10].

Die Transformation von kartesischen in Kugelkoordinaten erfolgt anhand der Gleichungen (1) - (3):

$$|F| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

$$\varphi = \arctan2(F_x, F_y)^1 \quad (2)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (3)$$

4. Messunsicherheit der Referenzvektoren

Für die in Kapitel 2 beschriebene Referenzmesseinrichtung der PTB wurde in [9] eine Messunsicherheitsanalyse durchgeführt. Durch ein verbessertes physikalisches Modell in Kombination mit einer optischen Geometriemessung des Messhexapods konnte dabei für die kartesischen Komponenten der Referenzvektoren eine relative erweiterte Unsicherheit ($k = 2$) von $\leq 2,2 \cdot 10^{-4}$ mit einigen Ausnahmen erreicht werden. Diese Unsicherheit bezieht sich auf das Koordinatensystem der Maschine. Zum Vergleich mit einem zu kalibrierenden Sensor muss der Einfluss der Koordinatentransformation berücksichtigt werden.

In [10] wurde eine Methode vorgestellt, welche die Bestimmung der Koordinatentransformation aus einem Datensatz von Referenzvektoren und Sensorsignalen erlaubt. Hierzu wird mit Hilfe eines iterativen Algorithmus die Gleichung

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_s - \mathbf{R} \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{T}) \cdot \mathbf{V}_r = 0 \quad (4)$$

gelöst. Hierin bezeichnet \mathbf{C} die Kalibriermatrix des Sensors, \mathbf{U}_s den Vektor der Sensorsignale, $\mathbf{R} = \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\psi \cdot \mathbf{R}_\theta$ die Rotationsmatrix der Koordinatentransformation, \mathbf{I} die Einheitsmatrix, \mathbf{T} die Verschiebungsmatrix, welche den Einfluss der Kraftkomponenten auf die Momente bei Translation der Koordinatensysteme berücksichtigt und \mathbf{V}_r die Referenzvektoren. Vom Algorithmus werden die Parameter $\varphi, \psi, \theta, T_x, T_y$ und T_z optimiert, sodass die Gleichung (4) bestmöglich erfüllt wird.

Aus den unsicherheitsbehafteten Eingangswerten folgt eine Unsicherheit für die ermittelten Parameter der Transformation. Dieser Einfluss soll mittels Monte-Carlo-Methode (MCM) [11] ermittelt werden.

Für die MCM werden folgende Annahmen getroffen:

- Normalverteilte Größe für Referenzvektoren \mathbf{V}_r
- Standardabweichung $\sigma = 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \mathbf{V}_r$ ($k = 1$)

¹ Funktion zur Berechnung des Polarwinkels in allen vier Quadranten über den Arkustangens.

- Sensorsignal U_s ohne Unsicherheit
- Kalibriermatrix C des Sensors bekannt und ohne Unsicherheit

Auf Basis dieser Annahmen wird entsprechend nur der Einfluss der unsicherheitsbehafteten Eingangsgröße der Referenzvektoren V_r berücksichtigt.

Als Datenbasis für die Berechnung wird eine Messreihe verwendet, bei der ein Kraftvektor mit dem Betrag von $|F| = 3 \text{ kN}$ in der X-Y-Ebene um 360° in Schritten von 20° rotiert wird. Die Datenreihe enthält entsprechend 18 Datensätze von Referenzvektoren und Sensorwerten. Die Verläufe der kartesischen Komponenten der Kraft- und Momentenvektoren im Anlagenkoordinatensystem sind in Bild 3 dargestellt. Durch die Rotation des Kraftvektors ergibt sich ein sinusförmiger Verlauf für die X- und Y-Komponenten. Die Z-Komponente des Kraftvektors sollte im Idealfall zu Null werden, allerdings ist dies auf Grund der Anlagensteuerung nicht möglich.

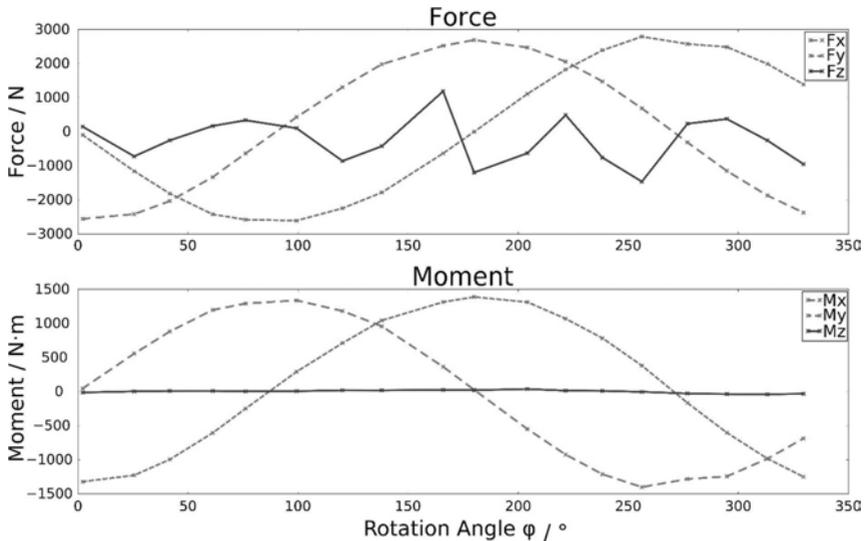


Bild 3: Kartesische Komponenten der Kraft- und Momentenvektoren im Anlagenkoordinatensystem

Zur Generierung normalverteilter Zufallszahlen wird das Python-Paket *numpy.random.randn* eingesetzt. Die so erzeugten Zufallszahlen mit $\mu=0$ und $\sigma=1$ werden mit dem Faktor $1,1 \cdot 10^{-4}$ multipliziert und mit den Eingangsvektoren verrechnet:

$$V_{rM} = V_r \cdot (1 + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \mathit{randn}) \quad (5)$$

Die Standardabweichung der so erzeugten Eingangsvektoren V_{TM} ist in Bild 4 zu sehen. Durch die Annahme einer rein relativen Unsicherheit in Abhängigkeit der Messgröße zeigt die absolute Unsicherheit der X- und Y-Komponenten eine Abhängigkeit vom Winkel des Lastvektors. Mit den erzeugten Referenzvektoren V_{TM} erfolgt die Berechnung der Rotations- und Translationsparameter über den iterativen Levenberg-Marquardt Algorithmus [12] im *scipy.optimize.root* Paket. Die Startwerte für die Parameter werden aus der Ausrichtung des Sensors zu $\varphi = \pi/4$, $\psi = \pi$, $\theta = 0$, $T_x = 0$ m, $T_y = 0$ m und $T_z = -0,433$ m gesetzt. Über $n = 100000$ Wiederholungen werden die optimierten Parameter ermittelt. In Tabelle 1 sind die Startwerte, die Mittelwerte μ und die Standardabweichungen σ der berechneten Parameter dargestellt.

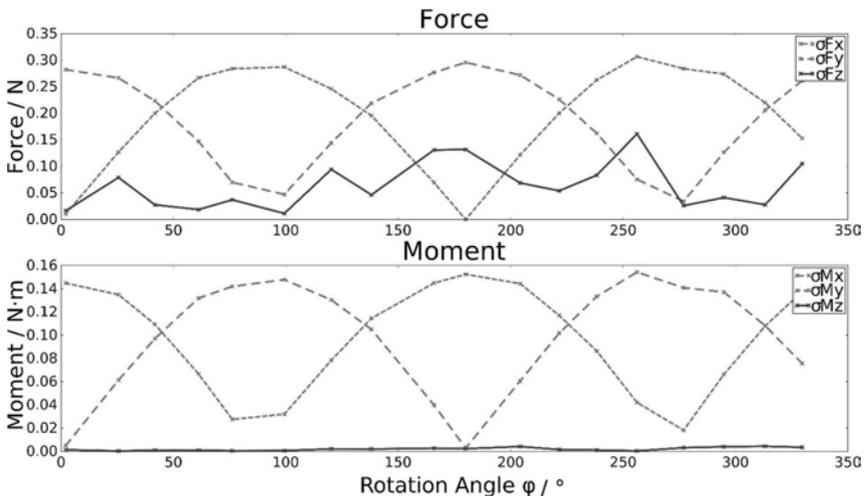


Bild 4: Standardabweichung der Eingangskomponenten für die Monte-Carlo Berechnung

Tabelle 1: Parameter der Koordinatentransformation

	φ in rad	ψ in rad	θ in rad	T_x in m	T_y in m	T_z in m
Start	0,7854	3,14159	0	0	0	-0,433
μ	0,79973	3,14153	$-1,72 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$-8,2 \cdot 10^{-5}$	-0,4340
σ	$1,31 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$

Es ist zu erkennen, dass die Standardabweichungen σ für die einzelnen zusammengehörenden Parameter (Rotationswinkel, X-Y-Verschiebung) in der gleichen Größenordnung liegen.

Im zweiten Schritt wird die Transformation der Referenzvektoren betrachtet. Die Transformation erfolgt nach der Vorschrift:

$$\mathbf{V}_{rT} = \mathbf{R} \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{T}) \cdot \mathbf{V}_r. \quad (6)$$

Die transformierten Referenzvektoren sind somit abhängig von den fehlerbehafteten Größen \mathbf{V}_r und den zuvor ermittelten Transformationsparametern. Beide Größen werden mit den entsprechenden Unsicherheiten nach dem gleichen Vorgehen in einer Berechnung nach MCM über $n = 100000$ Wiederholungen berücksichtigt. Die Mittelwerte der resultierenden Komponenten der Kraft- und Momentenvektoren \mathbf{V}_{rT} sind in Bild 5 dargestellt, Bild 6 zeigt die Standardabweichung der transformierten Komponenten.

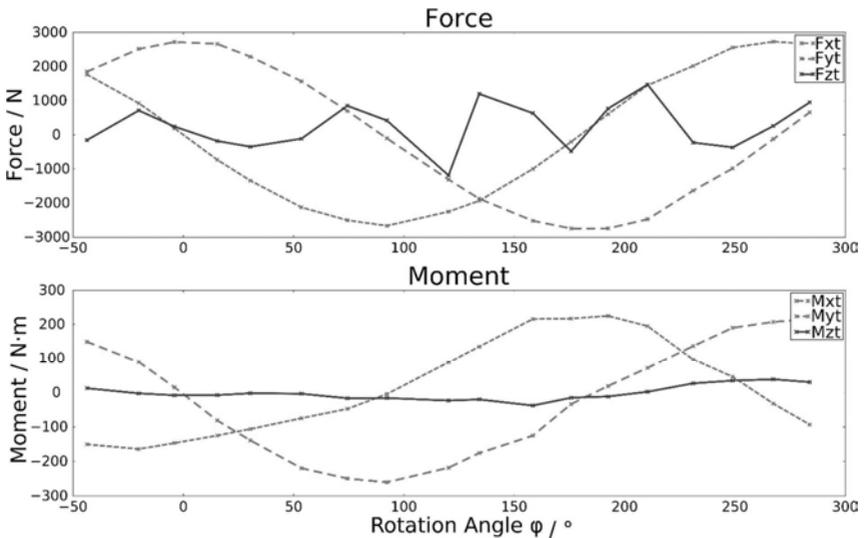


Bild 5: Kartesische Komponenten der Kraft- und Momentenvektoren im transformierten Koordinatensystem

Für die Kraftkomponenten ist eine Verschiebung der Phasen gegenüber der Komponenten im Anlagenkoordinatensystem zu erkennen. Für die Momente ist zusätzlich eine Reduzierung der Amplitude zu erkennen. Die Reduzierung ergibt sich aus der Z-Verschiebung des Koordinatensystems ($T_z = -0,434$ m) und den einzelnen Kraftkomponenten (z.B. $F_x(0^\circ) = -2557$ N) zu

$$\Delta M_y(0^\circ) = F_x(0^\circ) \cdot T_z = -2557 \text{ N} \cdot -0,434 \text{ m} = 1109 \text{ N} \cdot \text{m}. \quad (7)$$

Bei der Standardabweichung der Kraft- und Momentenkomponenten in X und Y ist auffällig, dass gegenüber den Komponenten im Anlagenkoordinatensystem die Standardabweichung einen konstanten Absolutbetrag von 0,2 N bzw. 0,14 N·m aufweist. Demgegenüber hat die Standardabweichung der Eingangsvektoren den Verlauf des Betrags einer Sinus-Funktion. Betrachtet man die zugrundeliegenden Parameter der Koordinatentransformation ist zu erkennen, dass hierbei eine Rotation um 45° um die Z-Achse durchgeführt wird.

Aus dieser Rotation ergibt sich ein identischer Beitrag der X- und Y-Komponenten und deren Unsicherheiten aus dem ursprünglichen Koordinatensystem. Dies hat zur Folge, dass die Unsicherheitseinflüsse der einzelnen Komponenten sich aufteilen und eine Mittelung für die einzelnen Komponenten stattfindet.

Für die Kraftkomponenten liegt die resultierende Standardabweichung bei 70% der maximalen Abweichung im untransformierten Koordinatensystem, während bei den Momenten die Abweichung im transformierten Koordinatensystem der maximalen Abweichung im ursprünglichen Koordinatensystem entspricht. Hier zeigt sich der zusätzliche Einfluss der auf die Momente wirkenden Translation bei der Koordinatentransformation.

Aus den sich ergebenden Unsicherheiten für die transformierten Komponenten der Kraft- und Momentenvektoren ergibt sich die Frage, ob für MKS eine Angabe der Messunsicherheit als relative Größe der Einzelkomponenten eine sinnvolle Wahl ist. Uniaxiale Kraft- oder Momentensensoren werden in der Regel nicht in kleinen Lastbereichen betrieben, bei MKS ist dies aber durch die Ausrichtung nicht für alle Komponenten immer machbar oder sinnvoll. Des Weiteren zeigt sich speziell für die Momente ein Einfluss der Unsicherheit der Koordinatentransformation auf die Unsicherheit der transformierten kartesischen Komponenten.

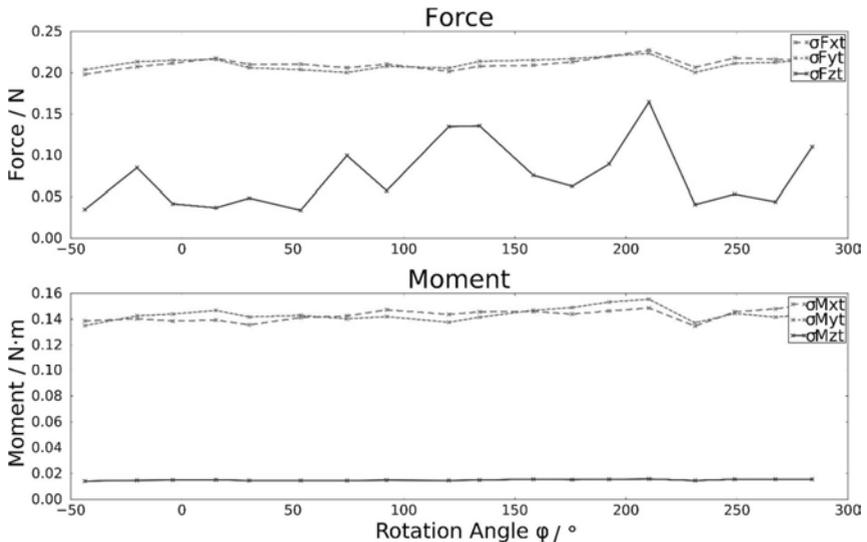


Bild 6: Standardabweichung der Kraft- und Momentenkomponenten im transformierten Koordinatensystem

5. Zusammenfassung

Bei der Messung von Kräften und Momenten als Vektoren spielt die Ausrichtung des Bezugskordinatensystems eine wichtige Rolle. Speziell bei der Kalibrierung von Mehrkomponentensensoren muss eine entsprechende Koordinatentransformation zwischen Referenz- und Sensorkoordinatensystem durchgeführt werden. Die Bestimmung der Transformation mit einer entsprechenden Unsicherheit hat somit einen Einfluss auf die zu erreichende Kalibrierunsicherheit eines Sensors. Mittels Berechnungen mit der Monte-Carlo-Methode wurde für einen Satz an Messungen in der statischen Referenzmesseinrichtung der PTB die Unsicherheit der Transformationsparameter bestimmt. Dabei wurde die Unsicherheit der Eingangskomponenten für die Referenzvektoren berücksichtigt. Aus der so erhaltenen Unsicherheit für die Koordinatentransformation wurde mit der Unsicherheit der ursprünglichen Vektoren die Unsicherheit für die Referenzvektoren im transformierten Koordinatensystem bestimmt. Dabei zeigte sich eine Transformation von einer konstanten relativen Unsicherheit der kartesischen Komponenten in eine konstante absolute Unsicherheit. Für die Kraftkomponenten liegt die Standardabweichung nach der Transformation konstant bei 0,2 N, was 70% der maximalen Standardabweichung vor der Transformation entspricht. Für Momente liegt die Standardabweichung bei 0,14 N, was der maximalen Standardabweichung vor der Transformation entspricht.

Die Erhöhung der Unsicherheit bei den Komponenten des Momentenvektors spiegelt den Einfluss der Unsicherheit der Translation des Koordinatensystems wider.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieses Projekts unter den Förderkennzahlen Tu 135/24 und Ku 3367/1.

- [1] Baumgarten, S., Röske, D., Kahmann, H., Mauersberger, D. u. Kümme, R.: Force/Torque measuring facility for friction coefficient and multicomponent sensors. In *Proceedings SENSOR 2013*, S. 28 – 33.
- [2] Genta G, Germak A, Barbato G and Levi R: Metrological characterization of an hexapod-shaped multicomponent force transducer. *Measurement* 78 (2016) S. 202 – 206
- [3] Ferrero C, Zhong L Q, Marinari C and Martino E: New automatic multicomponent calibration system with crossedflexure levers. In *Proc. of the 3rd Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics* S. Cm.I-31–Cm.I-39, 1993.
- [4] Kim G-S: The development of a six-component force/moment sensor testing machine and evaluation of its uncertainty. *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000) S.1377–1382
- [5] Baumgarten, S., Kahman, H. u. Röske, D.: Metrological characterization of a 2 kN m torque standard machine for superposition with axial forces up to 1 MN. *Metrologia* 53 (2016) 5, S. 1165 – 1176.
- [6] Röske, D., Peschel, D. u. Adolf, K.: The Generation and Measurement of Arbitrarily Directed Forces and Moments: The Project of a Multicomponent Calibration Device Based on a Hexapod Structure. In *Proceedings of the 17th International Conference of IMEKO TC3*, S. 339–349, 2001.
- [7] Röske, D.: Investigation of Different Joint Types for a Multi-component Calibration Device Based on a Hexapod Structure. In *Proceedings of the 18th IMEKO TC3 Conference*, 2002.
- [8] Röske, D.: Metrological Characterization of a Hexapod for a Multi-Component Calibration Device. In *Proceedings of the 17th IMEKO World Congress*, S. 347–351, 2003.
- [9] Nitsche, J., Baumgarten, S., Röske, D., Kümme, R. u. Tutsch, R.: Measurement uncertainty evaluation of a hexapod-structured calibration device for multi-component force and moment sensors, *Metrologia* 54 (2017) 2, S. 171 – 183.

- [10] Nitsche, J., Röske, D. u. Tutsch, R.: Influence of coordinate system alignment on the calibration of multi-component force and moment sensors. In *Proceedings of the 23rd IMEKO TC3 Conference*, 2017.
- [11] JCGM 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, JCGM 101:2008 (Paris: JCGM)
(www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf)
- [12] Marquardt D W 1963 An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters
J. Soc. Ind. Appl. Math. **11** 431–41

3. VDI-Fachtagung

Prüfprozesse in der industriellen Praxis

Vorwort

Unter dem Stichwort Industrie 4.0 wird nun schon seit einigen Jahren ein großer Entwicklungssprung in der Produktionstechnik diskutiert. Die Interpretationen gehen dabei aufgrund der Dimensionen des Themas weit auseinander.

Unbestritten ist aber wohl, dass ein Kern dieser Entwicklung eine immer stärkere Digitalisierung der Produktionsprozesse ist. Durch die zunehmende Verfügbarkeit von Informationen über die Produkt- und Prozessqualität wird die Produktion besser beherrschbar und Qualität auch planbarer.

Entscheidend für die Wirksamkeit digitaler Qualitätsregelkreise sind verlässliche Informationen über die Produkt- und Prozessqualität, die über Sensoren mit bekannter und hinreichend geringer Unsicherheit erfasst werden. Nur so gelingt es, das volle Potential der Industrie 4.0 zu nutzen und gleichzeitig die Qualität zu steigern und Kosten zu senken.

Die 3. VDI Fachtagung „Prüfprozesse in der industriellen Praxis“ beleuchtet alle Themen des Prüfprozessmanagements – die Prüfplanung, das Prüfmittelmanagement und den Nachweis der Prüfprozesseignung. Das Ziel ist der fachliche Austausch, angeregt durch Vorträge zu Best Practice Lösungen aus der Praxis produzierender Unternehmen.

Allen Referenten danke ich für Ihren Beitrag zur Fachtagung und freue mich auf angeregte Diskussionen.

Wir freuen uns, Sie auf der 3. VDI-Fachtagung Prüfprozesse in der industriellen Praxis vom 15. bis 16. November 2017 in Erfurt begrüßen zu dürfen.

Dr.-Ing. Philipp Jatzkowski

Tagungsleiter

TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln

Kalibrierung in der Bundeswehr: Organisation der Kalibrierung, Ausbildung des Personals

Oberstleutnant Diplom-Ingenieur (FH) **Gerhard Mihm**,
Wehrtechnische Dienststelle 81, Greding

1. Kurzfassung

Die Bundeswehr unterhält eigenes Personal zur Instandsetzung des eingesetzten und auftragsbezogen vorgehaltenen Materials. Anfallende Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten erfolgen unter Verwendung erforderlicher Mess- und Prüfgeräte. Auf Grund der Vielzahl der Mess- und Prüfgeräte (Anzahl, Typenvielfalt, Baujahr) und zur Erfüllung gesetzlicher Bestimmungen unterhält die Bundeswehr eigene Kalibriereinrichtungen. Die Kalibrierorganisation der Bundeswehr stellt diese Dienstleistung flächendeckend durch den Betrieb einer Kalibrierzentrale und einem Netz von Kalibrierlaboren sicher. Für den Krisenreaktions-Einsatz steht eine Flotte von mobilen Kalibrierlaboren zur Verfügung.

Ein den jeweils gültigen Normen konformes Qualitätsmanagement sorgt für die Minimierung von Schwachstellen und die kontinuierliche Anpassung an die jeweilige Auftragslage der Bundeswehr.

2. Grundlagen der Kalibrierung in der Bundeswehr

Die Bundeswehr ist darauf ausgerichtet, ihren Auftrag auch in Krisengebieten und im Krieg durchführen zu können. Hierzu werden eigene Kräfte für die Instandhaltung und Instandsetzung des Wehrmaterials ausgeplant und eingesetzt. Diese Kräfte sind mit den erforderlichen Werkzeugen, Sonderbetriebsmitteln und Mess- und Prüfgeräten ausgestattet.

Derzeit verfügt die Bundeswehr über 125.000 kalibrierpflichtige Mess- und Prüfgeräte, die grundsätzlich durch Personal des Kalibrierzentrums der Bundeswehr kalibriert werden. Besonderheit ist hierbei die enorme Typenvielfalt (ca. 15.000 verschiedene Hersteller-Teilekennzeichen) als auch das Alter (Herstellungsjahr) dieser messtechnischen Produkte.

Grundsätzlich werden Mess- und Prüfgeräte durch das Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr zentral beschafft und mit der Aufnahme im Zentralen Mess- und Prüfgeräteverzeichnis der Bundeswehr für die Nutzung in der Bundeswehr zugelassen. In diesem Zentralen Mess- und Prüfgeräteverzeichnis sind neben den produktspezifischen Merkmalen (Materialnummer, Hersteller, Teilekennzeichen) auch die für die Kalibrierungen erforderlichen Daten (z.B. Kalibrierintervall, Kalibriervorschrift /-die für die Kalibrierung erforderlichen Daten (z.B. Kalibrierintervall, Kalibriervorschrift /-anweisung, zu-

ständige Kalibriereinrichtung (Mobil, stationär)) geführt. Die messtechnisch relevanten Spezifikationen des Mess- und Prüfgerätes werden in einem Datenblatt hinterlegt.

Sofern Mess- und Prüfgeräte mit dem Paketdienst der Bundeswehr versandt werden können, werden diese in spezialisierten stationären Kalibriereinrichtungen bearbeitet. Ortsgebundene Mess- und Prüfgeräte, also messtechnische Produkte, die nicht mit dem Paketdienst versandt werden können, die ortsfest, oder sich zum Beispiel bei Verbänden / Einheiten im Auslandseinsatz befinden, werden grundsätzlich durch mobile Kalibriertrupps der Bundeswehr am Einsatzort kalibriert. Hierfür hält das Kalibrierzentrum der Bundeswehr entsprechend ausgebildetes Personal als auch die hierfür erforderliche materielle Ausstattung vor.

Für die Nachweisführung des Materialbestandes der Bundeswehr wird eine auf die speziellen Belange der Bundeswehr angepasste SAP-Software genutzt (SASPF). Hiermit erfolgt automatisiert die Überwachung der Fälligkeit zur Kalibrierung, die Erzeugung erforderlicher Meldungen, die Disposition der Mess- und Prüfgeräte zur und von der Kalibriereinrichtung, Veranlassung des Transportes als auch die Beauftragung der Kalibriereinrichtung. Mittels SASPF kann jederzeit der Bestand an Mess- und Prüfgeräten als auch der Bedarf an Kalibrierungen und die Durchlaufzeit in der Kalibrierung überwacht werden. Weiterhin können die Kalibrierintervalle anhand der Auswertung der Kalibrierungen unter Beachtung der geforderten Zuverlässigkeit des Mess- und Prüfgerätes durch die zuständige zentrale Dienststelle angepasst werden.

Auf Grund der mit den Verbündeten in der NATO abgestimmten Grundlagen für die Kalibrierung (ISO 17025) und standardisierte Dokumentation der erbrachten Kalibrierdienstleistung (Kalibrierschein und Kalibrierenaufkleber / -sticker nach ALogP-33) können nicht nur die Mess- und Prüfgeräte der Bundeswehr, sondern, sofern vertraglich vereinbart, auch Mess- und Prüfgeräte von Bündnispartnern bearbeitet werden (stationär als auch im Einsatz). Das im Rahmen der NATO vereinbarte Standardisierungsabkommen STANAG 4704 wurde in die nationale Verteidigungsgerätenorm (VG) 96910 umgesetzt, die die fachliche Grundlage für die Kalibrierung von Mess- und Prüfgerät der Bundeswehr bildet.

Da seit Inkrafttreten der Mess- und Eichverordnung im Januar 2015 bei der Ermittlung von Leistungen, die zwischen Streitkräften verschiedener Nationen ausgetauscht werden das Eichgesetz als auch die Mess- und Eichverordnung in der Bundeswehr nicht anzuwenden sind, verfügt die Bundeswehr sowohl über eigenes Personal auch über die erforderliche

Ausstattung um die erforderlichen messtechnischen Kontrollen und Kalibrierungen durchzuführen.

3. Ausbildung der Kalibriertechniker der Bundeswehr

Mit der Forderung nach maximaler Flugsicherheit wurde Ende der 60er Jahre in der Luftwaffe mit dem Aufbau eines Systems zur Kalibrierung von Mess- und Prüfgeräten nach amerikanischem Vorbild begonnen. Richtlinien, Vorschriften und Standards wurden zunächst von der US-Air Force übernommen. In den fliegenden Verbänden der Marine und des Heeres wurden die logistischen Verfahren der Luftwaffe angewandt. Die Ausbildung zum Kalibriertechniker der Bundeswehr erfolgte in den Anfangsjahren der Bundeswehr durch die amerikanische Luftwaffe in Lowry Air Force Base, Colorado und wurde in den 90iger Jahren in der Technischen Schule der Luftwaffe 1 in Kaufbeuren mit eigenem Personal durchgeführt. Im Jahr 2001 wurden die Grundlagen für die Ausbildung überarbeitet und die Ausbildung neu konzipiert. Die Anforderungen an die Ausbildung wurden in Form einer Leistungsbeschreibung durch das Bundesamt für Wehrtechnik der Bundeswehr erstmalig in 2002 öffentlich ausgeschrieben und im Zuge des Wettbewerbs vertraglich an einen industriellen Auftragnehmer vergeben. In der Leistungsbeschreibung wurden die in Form eines Lehrgangs zu vermittelnden Grobziele durch die Bundeswehr festgelegt, die durch den Auftragnehmer operationalisiert und vermittelt werden sollten. Eine der Bedingungen für die Teilnahme an dem Wettbewerb war und ist, dass neben den theoretischen Kenntnissen insbesondere die praktischen Anteile durch fachlich kompetentes Personal zu vermitteln sind. In der Ausbildung sind neben den Grundlagen und Verfahren zur Kalibrierung, die erforderlichen mathematischen Grundkenntnisse und Berechnungen der Messunsicherheit, die erforderlichen Bestimmungen am Arbeitsplatz, insbesondere die entsprechenden, vorwiegend auf die zu kalibrierenden Mess- und Prüfgeräte im Einsatz zugeschnittenen Fachtechniken im mechanischen als auch elektrotechnischen Bereich zu vermitteln. Hierbei wird zunächst die Funktionsweise exemplarisch ausgewählter Mess- und Prüfgeräte dargestellt, der Aufbau des erforderlichen Messplatzes erarbeitet, als auch die Vorgehensweise der Kalibrierung erklärt mit praktischer Anleitung und anschließender Durchführung der Kalibrierung durch den Lehrgangsteilnehmer.

Seit 2004 wurden durch die Firma Trescal 30 Lehrgänge für die Kalibrierung mechanischer Größen mit 139 Teilnehmern sowie 58 Lehrgänge Kalibrierung elektrischer Größen mit 205 Teilnehmern durchgeführt. Dauer der Ausbildung: Grundlagen 2 Wochen, Physik 10 Wochen, Elektronik 14 Wochen. Seit 2011 sind die Kurse als IHK-Zertifikatslehrgang anerkannt.

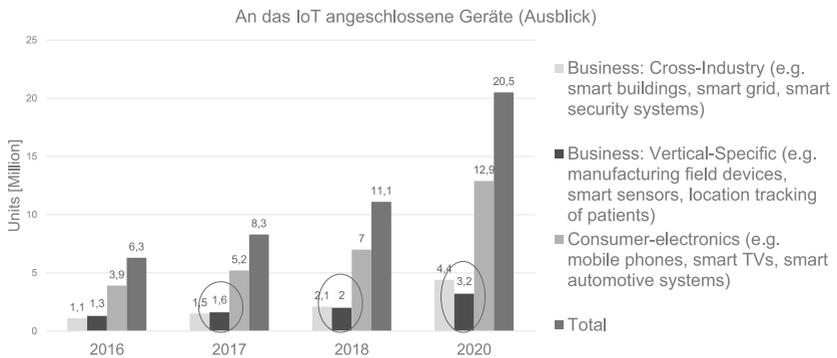
Das Internet of Production: Modellbasierte Qualitätssicherung in der digitalisierten Produktion

Prof. Dr.-Ing. **Robert Schmitt**, WZL der RWTH Aachen



Sind Daten auch der Treibstoff der zukünftigen Produktion?

Megatrend Das Internet der Dinge und Dienste

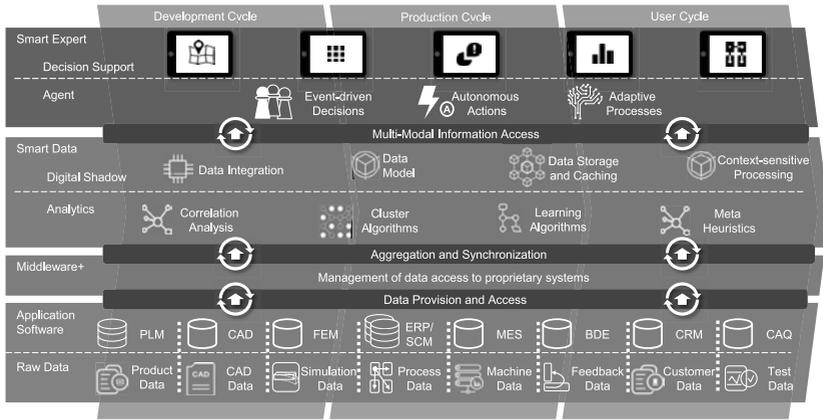


Die unternehmensinterne IoT-Anbindung von Sensoren, Maschinen etc. hängt im Vergleich zurück. Es wird jedoch ein rasantes Wachstum prognostiziert!

Quelle: Gartner2017

© WZL/Fraunhofer IPT

Megatrend Das Internet of Production – Die Aachener Perspektive



Quelle: WZL

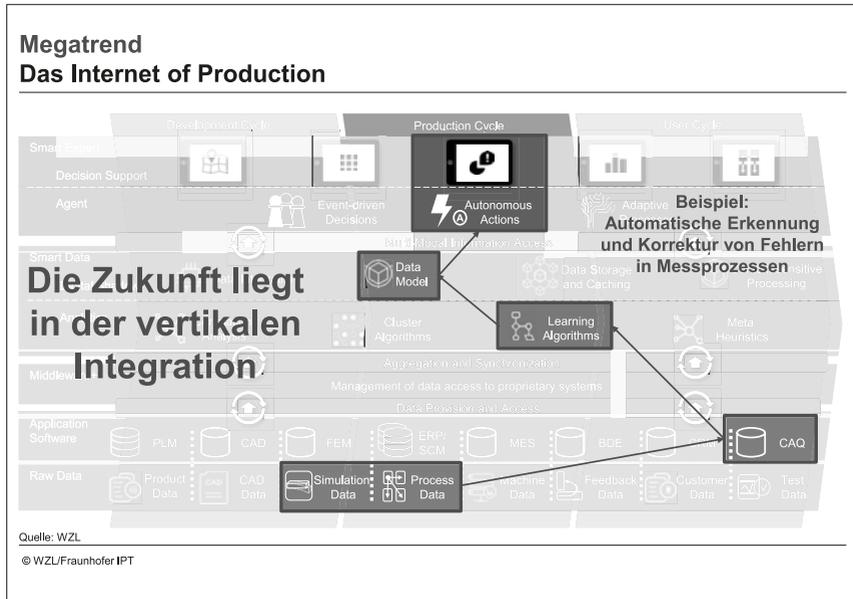
© WZL/Fraunhofer IPT

Megatrend Das Internet of Production



Quelle: WZL

© WZL/Fraunhofer IPT



Messtechnik sorgt für die Datengrundlage im Internet of Production

Welche Anforderungen ergeben sich daraus?

Anforderungen an die Messtechnik These

Mit der vorhandenen Messtechnik kann bereits jetzt alles mit hinreichender Unsicherheit gemessen werden.

Die Zukunft liegt in der Flexibilisierung und Vernetzung der Messtechnik, um sie wirtschaftlicher innerhalb des Internet of Production einsetzen zu können!

Bild: dena.de

© WZL/Fraunhofer IPT

Anforderungen an die Messtechnik Ein flexibler Einsatz!

Flexible Messaufgaben



- Hoch individualisierte Produkte erfordern flexible Messtechnik
- Anpassung an verschiedene Mess- und Prüfaufgaben ohne Rekonfiguration
- Anpassung der Messunsicherheit an die Prüfaufgabe

Flexible Anbindung



- Universelle Schnittstellen und Protokolle bereitstellen
- Anschluss an das Internet der Dinge und Dienste

Aktuelle Anforderungen an die Messtechnik

Flexible Messorte



- Keine feste Messstellen mehr
- Flexible Messung im Prozess oder am Produkt
- Trotz Flexibilität geringe Messunsicherheiten auch in der Fertigungsumgebung

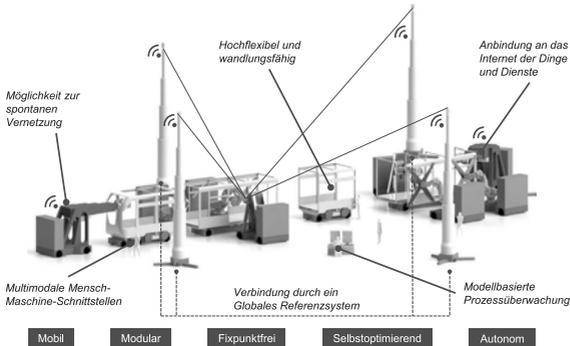
Flexible Handhabung



- Integration in die virtuelle Prozessplanung
- Autonome Inbetriebnahme
- Selbstkalibrierung
- Spontane Kombination mit anderer Messtechnik oder Integration in andere Services (z. B. Sensornetzwerk)

© WZL/Fraunhofer IPT

Beispiel: Light Controlled Factory Was müssen Prüfprozesse in Zukunft können?



- Prüfung individualisierter Produkte
- Flexibler Einsatz im Arbeitsraum
- Überwachung und Navigation von Produkten und Ressourcen im Arbeitsraum
- Vernetzung mit dem Internet der Dinge und Dienste

Quelle: WZL

© WZL/Fraunhofer IPT

Welche Themen werden uns in Zukunft beschäftigen?

Zukunftsvision

Modellbasierte Qualitätssicherung und Information-rich metrology

Information-rich metrology (IRM) bezeichnet die „Nutzung jeglicher Art von zusätzlich verfügbaren Informationen, um einen Messprozess zu verbessern.“

Quellen: ptb.com, rapidobject.com, Leach2017
© WZL/Fraunhofer IPT

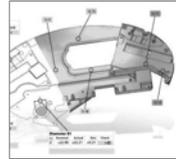
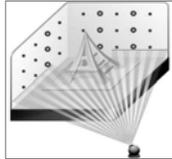
Modellbasierte Qualitätssicherung

Messen am Modell

Bilder: ptb.com, rapidobject.com
© WZL/Fraunhofer IPT

Messen am Modell

Beispiel: 3D Digitalisierung von Bauteilen



Die Digitalisierung der Bauteile und die Erfassung des Bauteilverhaltens wird unabhängig von einer konkreten Messaufgabe durchgeführt

Beliebige geometrische Merkmale können anschließend am digital shadow (z. B. als 3D-Modell) erfasst und geprüft werden.

Jedoch: Die reine 3D-Digitalisierung reicht nicht aus, es müssen die Einflüsse auf die Messung mit in das Modell des Bauteils aufgenommen werden!

Bilder: ai2-3d.com; gom.com; degnerpartner.com, 3d-manufaktur-seevetal.com

© WZL/Fraunhofer IPT

Modellbasierte Qualitätssicherung

Virtuelle Messprozesse



Messen am Modell

- Digital shadow / Digital twin
- 3D - Modell des Bauteiles
- Modell für das Bauteilverhalten



Virtuelle Prozessplanung

- Virtuelle Prüfplanung
- Modellbasierte Überwachung von Produktionsprozessen
- Verteilte Messsysteme

Modellbasierte Qualitätssicherung

Virtuelle Messprozesse

- Der virtuelle Messraum
- Modellierung von Messprozessen und Umgebungseinflüssen
- Simulation von Messprozessen



Virtuelle Kalibrierung

- Virtuelle Normale
- Selbstkalibrierung
- Autonome Kalibrierung durch Sensornetzwerk



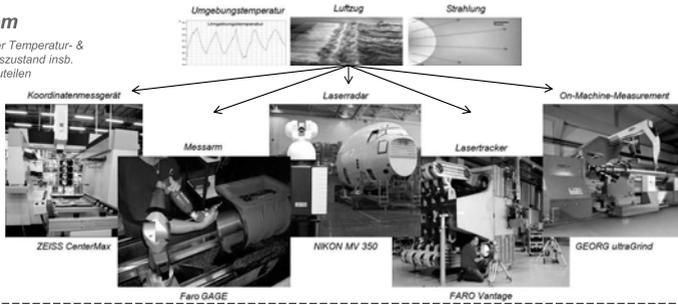
Bilder: ptb.com, rapidobject.com

© WZL/Fraunhofer IPT

Der virtuell klimatisierte Messraum Thermoelastische Bauteilverformungen beim Messen

Problem

Unbekannter Temperatur- & Verformungszustand insb. bei Großbauteilen



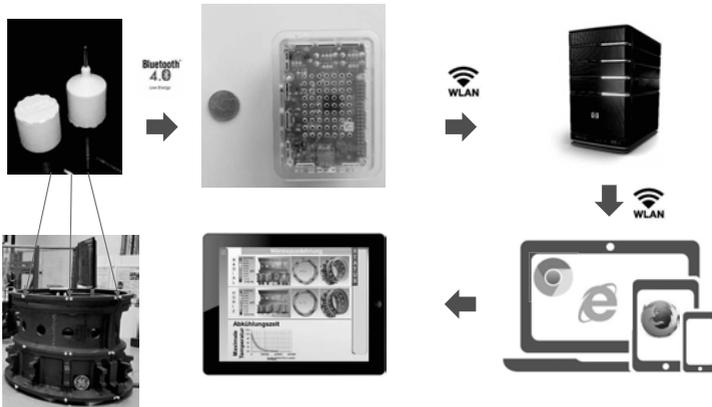
Lösung

Sensor- und modellbasiertes Temperatur-Monitoring zur Verformungsbestimmung

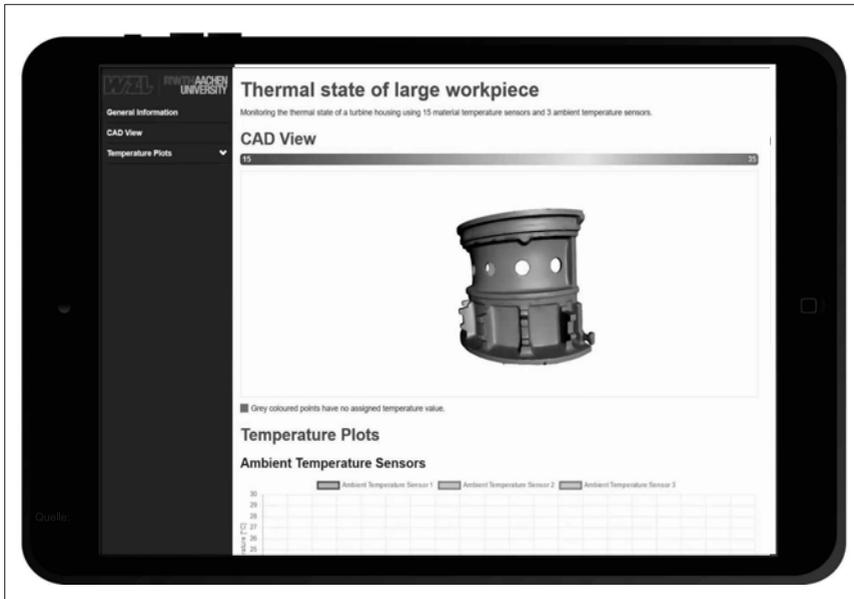


© WZL/Fraunhofer IPT

Der virtuell klimatisierte Messraum Kabellose Mini-Temperatursensoren für die Online-Simulation



© WZL/Fraunhofer IPT



Virtuelle On-Machine-Measurements Sensorik und Software zur Überwachung der Störeinflüsse



Geometrieüberwachung der Maschine

Integrierte optische Sensoren nehmen geometrische Maschinenfehler regelmäßig Abständen auf.

Temperaturüberwachung der Maschine

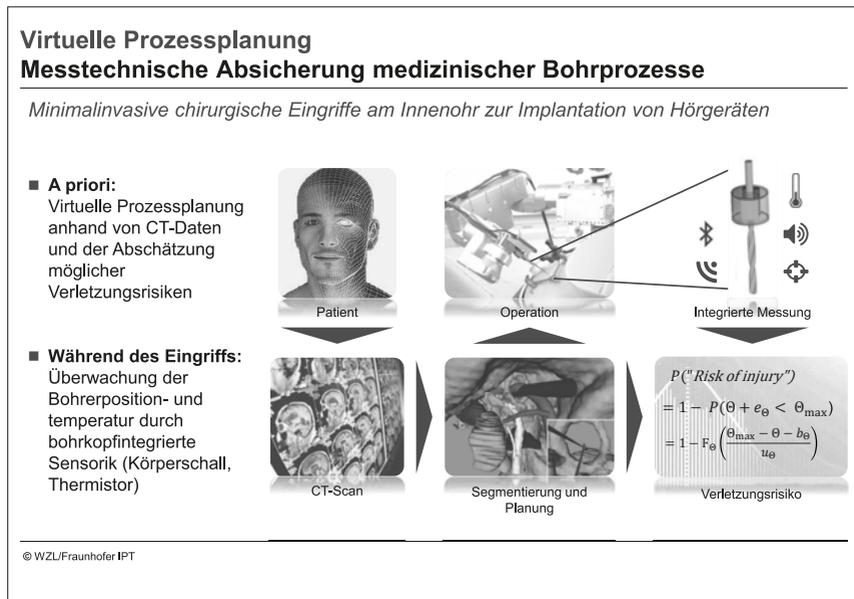
Temperaturen und deren Wechselwirkungen werden an neuralgischen Punkten erfasst

Überwachung weiterer Maschinenzustände

Leicht integrierbare Sensoren nehmen zusätzlich Zustände wie Beschleunigung, Schwingung und Orientierung auf.

- Datenspeicherung in der Cloud und universeller Zugriff auf die Maschinenhistorie
- Vorhersage kritischer Fehler in der Bauteilgeometrie
- Angabe der Messunsicherheit für On-Machine-Messungen
- Bestehendes Modellwissen wird generisch über selbstlernende Algorithmen erweitert.

© WZL/Fraunhofer IPT



Modellbasierte Qualitätssicherung Virtuelle Kalibrierung



Messen am Modell

- Digital shadow / Digital twin
- 3D - Modell des Bauteiles
- Modell für das Bauteilverhalten



Virtuelle Prozessplanung

- Virtuelle Prüfplanung
- Modellbasierte Überwachung von Produktionsprozessen
- Verteilte Messsysteme

Modellbasierte
Qualitäts-
sicherung

Virtuelle Messprozesse

- Der virtuelle Messraum
- Modellierung von Messprozessen und Umgebungseinflüssen
- Simulation von Messprozessen



Virtuelle Kalibrierung

- Virtuelle Normale
- Selbstkalibrierung
- Autonome Kalibrierung durch Sensornetzwerk



Bilder: ptb.com, rapidobject.com

© WZL/Fraunhofer IPT

Virtuelle Normale Selbstkalibrierung und Softwarereferenzen

Situation:

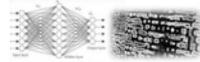


- Stark steigende Anzahl an Low-Budget-Sensoren
- Kalibrierung aller Sensoren wirtschaftlich nicht möglich
- ODER: Sensorik nicht mehr zugänglich

Selbstkalibrierung

- Aus Langzeitsensoren kommend (z.B. Meteorologie)
- Intern verbaute Referenzen:
 - z.B. Mikrochips, welche Referenzkräfte erzeugen können
- Externe Referenzen:
 - z.B. Längeninformationen im Bildbereich (Kamera)
 - Baugleiche Sensoren in der Umgebung

Situation:



- Modellbasiertes Messen basiert teilweise auf Simulation, Black-Box Ansätzen oder komplexen Implementierungen
- Wie stellt man die Rückführbarkeit und Vergleichbarkeit der Implementierungen sicher?

Virtuelle Kalibrierung

- „Kalibrierung“ der Software
- Testdatensätze, anhand derer Verfahren und Implementierungen validiert werden können
- Beispiele:
 - TraCIM-Projekt für Softwarevalidierung (PTB)
 - ISO 11462-3
 - Referenzdatensätze für Rauheitsmessungen (PTB)

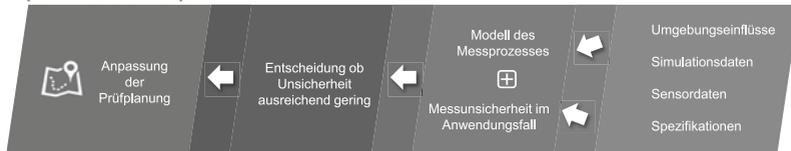
© WZL/Fraunhofer IPT

Modellbasierte Qualitätssicherung Umsetzung im Internet of Production

Internet of Production (IoP)



Beispiel: Virtuelle Prüfprozesse



© WZL/Fraunhofer IPT

Fazit und Ausblick



- Das Internet of Production verwandelt die Produktion
- Dies resultiert in hohen Anforderungen an die Flexibilität und Integrierbarkeit der Messtechnik
- Modellbasierte Messtechnik und Information-rich metrology sind der Schlüssel zur Flexibilisierung
- Trends der modellbasierten Messtechnik
 - Messen am Modell
 - Virtuelle Messprozesse
 - Virtuelle Prozessplanung
 - Virtuelle Kalibrierung

Bild: InnovationNRW

© WZL/Fraunhofer IPT

Kontakt

www.wzl.rwth-aachen.de



Prof. Dr.-Ing.
Robert Schmitt

Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und
Qualitätsmanagement

Telefon: +49 241 80-20283

Fax: +49 241 80-22193

E-Mail: R.Schmitt@wzl.rwth-aachen.de



© WZL/Fraunhofer IPT

 **Fraunhofer**
IPT



Seite 29

Prüfmittelmanagement im regulierten Umfeld

Dipl.-Ing. Marc Baumeister, ZimmerBiomet, Winterthur/Schweiz

1. Kurzfassung

Prüfmittelmanagement im regulierten Umfeld, zum Beispiel in der Medizintechnikbranche hat diverse Facetten, die man unbedingt beachten sollte, bevor man dies implementiert. Die Medizintechnikbranche hat besondere Anforderungen gemäß EN ISO 13485 Qualitätsmanagementsysteme für Medizinprodukte und für den amerikanischen Markt gemäß 21CFR 820 Quality System Regulations.

2. Implementierung einer Prüfmittelsoftware

Um eine Prüfmittelsoftware im regulierten Bereich (Medizintechnik) implementieren zu können, sollten folgende Punkte berücksichtigt werden.

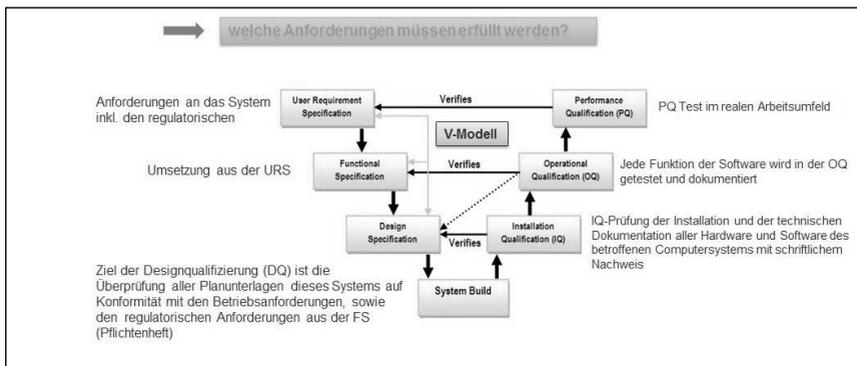


Bild1: Das V-Modell ist ein Vorgehensmodell in der Softwareentwicklung, bei dem der Softwareentwicklungsprozess in Phasen organisiert wird.

2.1 Messmittel

Jedes Mess-Prüfmittel sollte eindeutig gekennzeichnet und in der Prüfmitteldatenbank klar gruppiert werden:

- Messschieber
- Bügelmessschrauben
- Grenzlehrdorne

Das bedeutet, die verschiedenen Mess-Prüfmittel werden in sogenannten Familien gruppiert, damit diese später einfacher für die Anwendung und Filterung zu Verfügung stehen. Die Mess-Prüfmittel müssen eindeutig gekennzeichnet sein, mit dem letzten Kalibrierdatum und dem kommenden Ablaufdatum, sowie die Person oder Abteilung, welche die Kalibrierung durchgeführt hat. Ein 2D Matrix Code oder Barcode hat sich in vielen Betrieben bewährt, so können diese Informationen mittel Scanner abgerufen oder auch weiterverarbeitet werden.

3. Einbringen neuer Mess-Prüfmittel in die Produktion

Bevor ein Mess-Prüfmittel in der Produktion zur Anwendung kommt, müssen die folgenden Punkte beachtet werden:

- a) Bei produktspezifischen Lehren müssen diese evtl. neu konstruiert werden.
Als Grundlage dient die Produktezeichnung mit den kritischen Dimensionen, welche vermessen werden müssen.

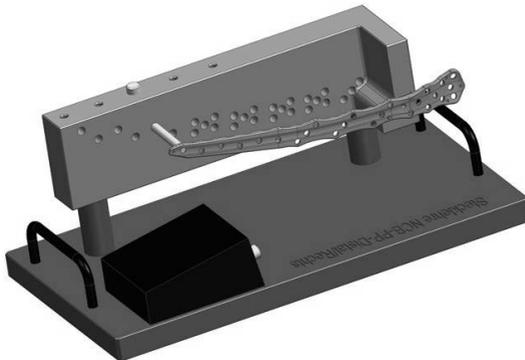


Bild 2: produktspezifische Lehre für NCB Platten (Medizintechnik ZimmerBiomet)

- b) Es muss ein sogenanntes Anforderungsblatt erstellt werden, welches eindeutig definiert, wie das Mess-Prüfmittel am Produkt anzuwenden ist, welchen Intervall das Mess-Prüfmittel haben wird und ob eine MSA (Messsystem Analyse) durchgeführt werden muss.

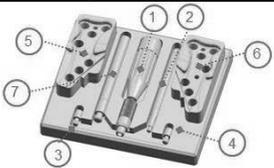
General Allgemein	Measurement equipment ID: <i>PM-Nummer:</i>	063.323.800-V50	Type: <i>PM-Typ:</i>	Sonderlehre	Doc-Rev <i>Dok.-Rev.</i>	B	
	Drawing: <i>Zeichnung:</i>	063.323.800	Revision: <i>Revision:</i>	A	Type of gauge: <i>Lehrentyp:</i>	Stecklehre	
Application: <i>Anwendung:</i>							
NCB-PP prox. Femur right 02.03263.0XX NCB-PP prox. Femur left 02.03263.1XX NCB-PP prox. Femur short 02.02263.000 NCB-PP prox. Femur short 02.02263.100							
Testing schedule: <i>Prüfplan</i>			Intervals of calibration: <i>Kalibrierintervall:</i>				
Environmental conditions: <i>Umgebungsbedingungen</i>			6 Monate				
Preservation and storage: <i>Bewahrung und Aufbewahrung:</i>		Prüfmittelbox					
Handling <i>Handhabung</i>							
<p>1. Das Lehren-Set zur Prüfung von NCB-PP prox./distal Femur right/left Platten besteht aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Handgriff für Schraubendreher (1) - Schraubendreher (2) - 2 Fixationsschrauben (3 und 4) - Prüfblock rechts/links (5 und 6) - Gewindedorn (7) 							
 <p>Abb. 1: Gesamtübersicht Lehren-Set</p>							
<p>2. Fixation der NCB-PP Plate Prüfblock links bzw. rechts mittels montierten Schraubendreher (1, 2) und Fixationsschrauben (3, 4). Die Fixation der Platten rechts/links ist identisch.</p>							
 <p>Abb. 2: Fixation der NCB-PP Plate auf Prüfblock</p>							
<p>3. Überprüfen der sieben Gewindebohrungen in der NCB-PP Plate mittels zugehörigen Gewindedorn (7). Die Prüfung ist bestanden, wenn sich der Gewindedorn (7) in alle sieben Bohrungen einschrauben lässt. Lässt sich der Gewindedorn nicht in alle sieben Bohrungen einschrauben, gilt die Prüfung als nicht bestanden.</p>							
 <p>Abb. 3: Überprüfung der Gewindebohrungen</p>							
Release <i>Freigabe</i>	Metrological confirmation: <i>Metrologische Bestätigung:</i>	Initial calibration: <i>Erstkalibrierung:</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSA:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
			YES	NO	YES	NO	
A.Schwammberger		H. Weber	F. Calderan				
Name Development Engineer, Date, Signature		Name Quality Engineer, Date, Signature	Name Planner, Date, Signature				

Bild 3: Anforderungsblatt für Mess-Prüfmittel ZimmerBiomet

4. Mess-Prüfmittel in der Anwendung

Bei der Anwendung von Mess-Prüfmitteln muss darauf geachtet werden, dass jeder Einsatz des Mess-Prüfmittels dokumentiert ist. Das heißt die Traceability des Mess-Prüfmittels muss gewährleistet sein.

Hierzu kann das eingesetzte Mess-Prüfmittel auf den Auftragspapieren vermerkt werden oder es kommt eine Software zum Einsatz. Bei ZimmerBiomet wird SAP zusammen mit der EQMI Software verwendet.

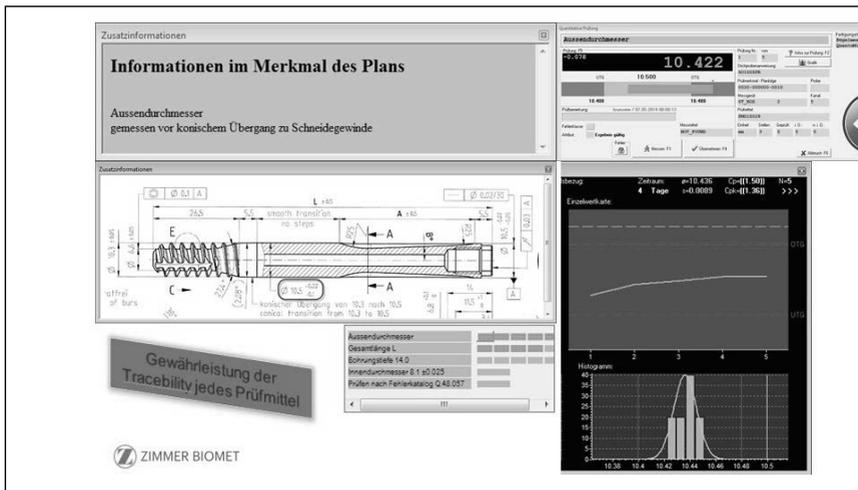


Bild 6: Ausschnitt EQMI Software

Hierzu wird die Mess-Prüfmittel Nummer im System eingegeben. Das System (SAP) prüft, ob das Mess-Prüfmittel valide ist, d. h. ist es noch kalibriert und ist es für diesen Prüfschritt zugelassen. Diese Informationen sind alle im SAP und im EQMI vorhanden, sodass eine sofortige Meldung ausgegeben werden kann. Sind die Prüfschritte in Ordnung, kann die Messung gemäß Vorgabe absolviert werden. Ist eine Messung außerhalb der Toleranz, wird erneut eine Meldung ausgegeben. Mit diesem System ist eine Traceability des Mess-Prüfmittels vs. Produkt gegeben und die Informationen stehen jederzeit zur Verfügung.

5. Vorgehen bei Abweichungen

Falls bei der Re-Kalibrierung festgestellt wird, dass sich ein Mess-Prüfmittel außerhalb der Toleranz befindet, muss im reguliertem Bereich ein sogenannter NCR (Non Conform Report) erstellt werden. In diesem Report wird festgehalten, welche Aufträge (Produkte) mit dem Mess-Prüfmittel gemessen worden sind und ob die Abweichung einen Einfluss auf die Produktqualität hat (Patientenrisiko). Dies kann im schlimmsten Fall zu einem Recall (Rückruf) des Produktes führen.

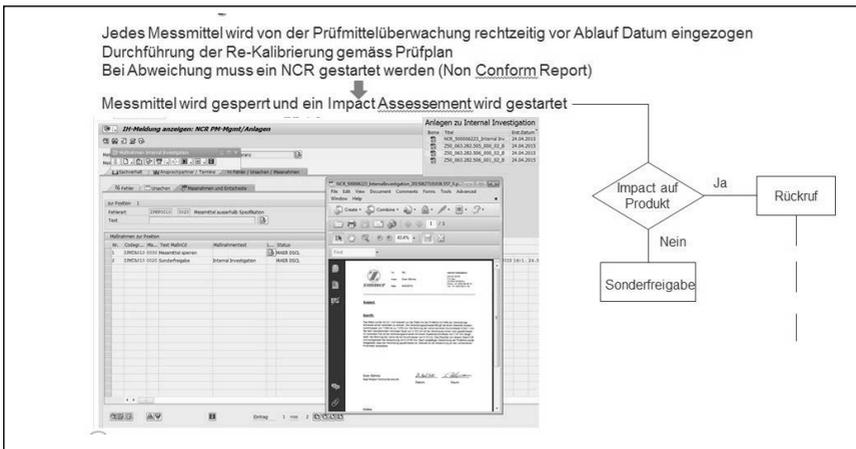


Bild 7: Ausschnitt NCR Report SAP ZimmerBiomet

6. Audit Trail

Die FDA definiert in Ihrem Leitfaden 21CFR Part11 einen Audit-Trail als eine sichere, computergenerierte und zeitgestempelte elektronische Aufzeichnung, die es erlaubt, den Verlauf von Ereignissen nachzuvollziehen, die etwas mit dem Erstellen, dem Ändern oder dem Löschen von elektronischen Aufzeichnungen zu tun haben.

Der 21 CFR Part 11 findet immer dann Anwendung, wenn Informationen elektronisch erzeugt, verändert, gespeichert, übertragen oder auf diese zugegriffen werden sollen. Dabei kann es sich um die verschiedensten Typen an Informationen handeln wie beispielsweise

- Texte
- Bilder, Videos oder
- Audiodateien

Alternative GPS-Standardspezifikationen und -Auswertemethoden

Alternative GPS Standard Specifications and Evaluation Methods

Dr.-Ing. **Michael Hernla**, Dortmund

Kurzfassung

Die meisten GPS-Spezifikationen sind nicht eindeutig, und in vielen Fällen sind gar keine Standardspezifikationen festgelegt. Das Zweipunktmaß als Standard-Maßdefinition in ISO 14405-1 liefert kein eindeutiges Messergebnis, sondern im Prinzip beliebig viele Messwerte. Die heute übliche Auswertung der funktionell interessanten angrenzenden Elemente (einbeschrieben, umschrieben oder tangential) führt zu großen Messunsicherheiten. Nur die mittleren Elemente nach Gauß sind eindeutig und haben die kleinsten Messunsicherheiten. Die Gauß-Methode ist auch auf angrenzende Elemente anwendbar. Außerdem sind für die meisten Form- und Lagemerkmale in ISO 1101 zwar die Toleranzzonen, nicht aber die Abweichungen definiert. Das führt häufig zu unterschiedlichen Messergebnissen.

Abstract

The most GPS Specifications are ambiguous, and in many cases no standard specifications are defined. The ISO 14405-1 default of extracted local size does not result in an unambiguous measurement result, but provides many various measurement values. The evaluation of the functionally interesting associated (inscribed, circumscribed or tangent) geometric features usual today yields to large measurement uncertainties. The mean gaussian features only are unambiguous and have the least measurement uncertainties. The gaussian method is also applicable to the associated geometric features. Besides, for the most characteristics of form, orientation, location and run-out in ISO 1101 only the tolerances are defined, but not the deviations. This often yields to different measurement results.

1. Einleitung

Seit 1996 wird bei der Internationalen Normungsorganisation (ISO) an dem Normensystem für Geometrische Produktspezifikationen (GPS) gearbeitet. Hintergrund ist die zunehmende Internationalisierung der Industrieproduktion mit der Notwendigkeit der weltweiten Austauschbarkeit von Einzelteilen, Produkten und Messergebnissen.

Grundlage dafür sind vollständige und eindeutige technische Zeichnungen mit realistischen Toleranzen. Damit werden die Voraussetzungen für genaue und reproduzierbare Qualitätsprüfungen geschaffen. Dabei sind moderne, rechnergestützte Konstruktionssysteme (CAD) und Messgeräte (CAQ) heute Standard. Die wesentlichen Normen in diesem GPS-Normensystem sind ISO 8015 GPS-Grundlagen [1], ISO 1101 Form und Lage [2], ISO 5459 Bezüge und Bezugssysteme [3], ISO 14405-1 Längenmaße [4], ISO 14405-2 Andere als lineare Maße [5] und ISO 20170 Zerlegung von geometrischen Merkmalen [6].

Die zentrale Norm ist die ISO 8015 GPS-Grundlagen. In ihr sind 13 Grundsätze definiert, von denen hier nur einige angeführt werden sollen:

1. Grundsatz des Aufrufens: Bei Angabe einer GPS-Norm (bzw. mindestens eines Symbols aus einer GPS-Norm) auf der Zeichnung gilt das gesamte GPS-Normensystem
5. Grundsatz des Unabhängigkeit: Alle Anforderungen müssen unabhängig von anderen erfüllt werden, solange nichts anderes festgelegt ist (Unabhängigkeitsprinzip)
7. Grundsatz der Standardfestlegung: In Normen werden vollständige GPS-Standard-spezifikationen definiert (andere Spezifikationen sind möglich)
10. Grundsatz der Dualität: Die Spezifikation legt eine Folge von eindeutigen Operationen in definierter Reihenfolge fest, unabhängig vom Messverfahren – Abweichungen davon vergrößern die Messunsicherheit

Nach dem Grundsatz des Aufrufens kann man davon ausgehen, dass praktisch für jede Zeichnung, die ab Erscheinungsdatum der ISO 8015 neu herausgegeben wurde, das GPS-Normensystem gilt. Damit sollten auch die GPS-Standardspezifikationen wirksam werden. Diese sind allerdings bisher für die meisten Anwendungen nicht definiert.

2. Beispiel Bohrungsabstand

In vielen Zeichnungen finden sich noch klassische Eintragungen von Längenmaßen bzw. Abständen wie im Bild 1 a). Hier ist nicht klar, ob mit den beiden senkrechten Mittellinien die Achsen der Bohrungen (innen) oder der Zapfen (außen) gemeint sind.

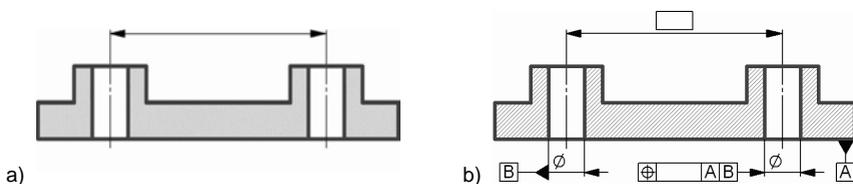


Bild 1: a) Nicht eindeutige Zeichnung mit dem Maßpfeil an den Mittellinien;
b) eindeutige Zeichnung mit Bezug und Positionstoleranz an den Bohrungsachsen

Deshalb werden solche Zeichnungsangaben in ISO 14405-2 als nicht eindeutig bezeichnet, und als Alternative wäre eine Positionstoleranz nach ISO 1101 einzutragen, siehe Bild 1 b). Für den Bezug B in der linken Bohrung sind die Istkoordinaten des Mittelpunktes in der ISO 5459 eindeutig definiert: Es wird die Achse des angrenzenden Zylinders senkrecht zur Ebene Bezug A mit dem größtmöglichen Durchmesser gebildet, siehe Bild 2 a). Das Gegenstück ist eine Platte mit zwei Stiften (Zapfen), die unten an der Ebene Bezug A anliegt. So ist auch die zur Prüfung eingesetzte Funktionslehre gestaltet.

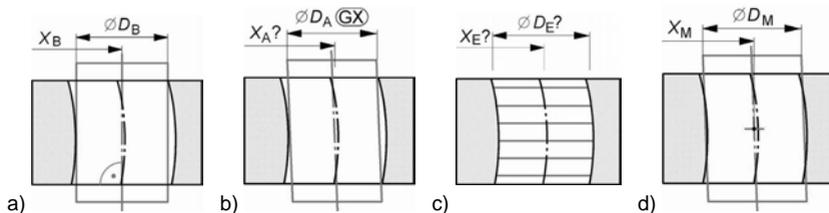


Bild 2: a) Linke Bohrung Bezug B aus Bild 1 b): Eindeutige Koordinate;
 b) Größtes einbeschriebenes Maß mit Symbol GX , nicht eindeutige Koordinate;
 c) Rechte Bohrung aus Bild 1 b): Zwei-Punktmaß und Koordinate nicht eindeutig;
 d) Mittlerer Zylinder mit eindeutiger Koordinate und Durchmesser

Allerdings ist der Bohrungsdurchmesser nicht eindeutig. Nach ISO 14405-1 gilt das Zwei-Punktmaß zwischen jeweils gegenüberliegenden Oberflächenpunkten als Standard-Maßdefinition. Aufgrund der Formabweichungen der Oberfläche erhält man so aber beliebig viele Zwei-Punktmaße. Auch gibt bisher keine GPS-Standardspezifikation, die festlegt, wie viele Zwei-Punktmaße gemessen und dokumentiert werden müssen, um nachzuweisen, dass die Anforderung erfüllt ist. Außerdem entspricht das Zwei-Punktmaß nicht der oben genannten Funktion: Auch wenn alle diese Maße in der Toleranz liegen, kann es ein, dass die Lehre bzw. das Gegenstück nicht in die krumme Bohrung passt. Um das zu erreichen, müsste nach ISO 14405-1 am Durchmesser das Symbol GX für das größte einbeschriebene Maß eingetragen werden (Bild 2 b). Damit ist aber noch nicht sichergestellt, dass die Achse dieses einbeschriebenen Zylinders senkrecht zum Bezug A steht.

Für den Durchmesser des tolerierten Elements im Bild 2 c) gilt dasselbe, und hier ist auch die Koordinate der Achse nicht eindeutig definiert: Nach ISO 1101 müssen alle Punkte des tolerierten Elementes innerhalb der Toleranzzone liegen. Dazu wird in jedem Querschnitt der Mittelpunkt des Ausgleichskreises bestimmt. Zur Anzahl der Messebenen gibt es wieder keine Standardspezifikation. Auch ist die Positionsabweichung in ISO 1101 nicht definiert.

Streng genommen brauchte also gar kein Messwert angegeben werden. Wird am Durchmesser zusätzlich das Symbol Gx für das größte einbeschriebene Maß eingetragen (Bild 2 b), ist damit noch nicht die Achse dieses einbeschriebenen Zylinders toleriert. Dazu müsste ein weiteres Symbol im Toleranzrahmen von Bild 1 b) angegeben werden, das ist aber bisher in keiner Norm definiert. Damit ist also keine funktionsgerechte Tolerierung möglich. Erst der aktuelle Entwurf von ISO 1101 (2015) bietet diese Möglichkeit. Die ideale Gerade als Achse dieses einbeschriebenen Zylinders muss dann auf ihrer ganzen Länge innerhalb der Toleranzzone liegen.

3. Angrenzende Elemente

Auch die funktionsgerechte Auswertung der angrenzenden Elemente (einbeschrieben, umschrieben oder tangential) aus den erfassten Messpunkten ist problematisch. Diese Elemente liegen nur an wenigen Punkten der Oberfläche an und werden deshalb durch einzelne (Mess-)Abweichungen an diesen Stellen stark beeinflusst, d.h. sie sind sehr empfindlich gegen Ausreißer, was sich in großen Messunsicherheiten niederschlägt. Diese betreffen nicht nur die Durchmesser [7], sondern auch die Koordinaten und die Winkel. Deshalb kann diese Auswertemethode nicht empfohlen werden.

Die Standard-Auswertemethode in der Messtechnik allgemein und speziell in der geometrischen ist die Ausgleichsrechnung, d.h. die Methode der kleinsten Summe der Abweichungsquadrate (MKQ) nach Gauß. Sie zeichnet sich durch zwei Vorteile aus: Sie liefert immer ein eindeutiges Messergebnis, und immer mit der kleinstmöglichen Messunsicherheit gegenüber allen anderen möglichen Auswertemethoden. So wurde sie praktisch auch zur Standardauswertung in der industriellen Koordinatenmesstechnik, und zwar sowohl bei den tolerierten Elementen als auch bei den Bezügen [7]. Genau deshalb ist sie auch die Grundlage zur Angabe der Messunsicherheit nach dem GUM [8]: Dort wird immer wieder vorausgesetzt, dass der Messwert der beste Schätzwert der Messgröße sein muss. Diese Voraussetzung wird nur vom Mittelwert erfüllt, nicht aber von einem Extremwert.

Für das Beispiel im Bild 1 b) würden dann sowohl beim Bezug als auch beim tolerierten Element der Durchmesser des Ausgleichszylinders und die Koordinaten eindeutig in der Mitte der Achse dieses Zylinders bestimmt werden, siehe Bild 2 d). An dieser Stelle haben sie die kleinstmöglichen Messunsicherheiten [9].

Die Achse dieses mittleren Zylinders steht allerdings nicht senkrecht zur Ebene Bezug A, und der mittlere Durchmesser entspricht nicht dem Durchmesser des Gegenstücks, das entsprechend der Funktion in die Bohrung passen soll. Deshalb werden häufig angrenzende Elemente auf Basis von gefilterten Oberflächenmesswerten bestimmt, siehe Abschnitt 5.

4. Beispiel Stufenmaß

In ISO 14405-2 werden viele übliche Maßeintragungen als nicht eindeutig bezeichnet, z.B. Stufenmaße, versetzte Maße, Koordinatenmaße, Radien und Maße an abgeleiteten Geometrieelemente (Achsen, Symmetrieelemente), die wie im Bild 1 a) auf der Zeichnung als Mittellinien erscheinen. Das Bild 3 a) zeigt ein Stufenmaß.

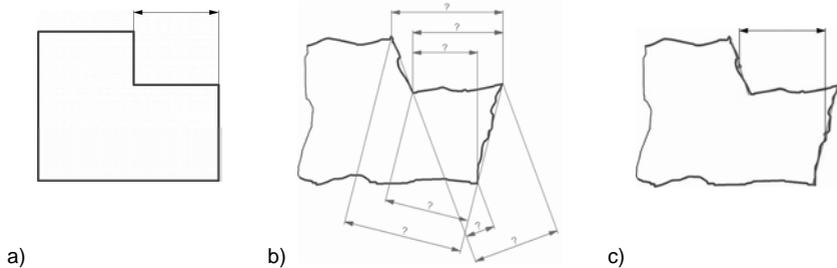


Bild 3: a) Zeichnungseintragung für ein Stufenmaß, b) beliebig viele Messwerte, c) Messergebnis bei Auswertung der mittleren Elemente in der Mitte

Je nach gewähltem Eckpunkt und Auswerterichtung ergeben sich fast beliebig viele verschiedene Messwerte (Bild 3 b). Nach ISO 14405-2 müsste für eine eindeutige Zeichnung eine Positionstoleranz mit mindestens einem Bezug eingetragen werden.

Wird ein solches Teil mit einem Koordinatenmessgerät gemessen, werden in der Regel die mittleren Elemente mit den Koordinaten in der Mitte (im Schwerpunkt der Messpunkte) sowie ihren Winkeln ausgewertet, siehe Bild 4 c). Die Auswerterichtung entspricht der Orientierung des Bezugssystems, das an jedem Werkstück sowieso zuerst bestimmt werden muss. Ist auf der Zeichnung keines definiert, legt es der Messtechniker selbst fest. Damit erhält man immer eindeutige Messergebnisse mit kleinstmöglichen Messunsicherheiten.

Wie oben bei den Bohrungen entsprechen die mittleren Elemente aber nicht unbedingt der Funktion, d.h. bei engen Passungen passt das Gegenstück mit demselben Maß nicht. Um den Nachteil der großen Messunsicherheit bei den angrenzenden Elementen zu verringern, werden die Messwerte häufig gefiltert. Zur Auswahl und Festlegung dieser Filter gibt es bisher aber keine objektiven Regeln.

5. Filterung

In den Normen ISO 1101, 5459 und 14405-1 wird ausdrücklich festgelegt, dass die Messwerte gefiltert werden müssen. Allerdings sind die Filterbedingungen nicht festgelegt. Die ISO 14405-1 setzt zwar voraus, dass die erfassten Geometrielemente (d.h. die mittleren

Oberflächen) betrachtet werden sollen, gibt aber keine Symbole und Regeln zur Eintragung der Filterbedingungen an. ISO 5459 gibt im Anhang A die zugeordneten Geometrieelemente vor, ohne jedoch die entsprechenden Verfahren festzulegen. Dazu wird auf die nächste Ausgabe der Norm verwiesen. Der aktuelle Entwurf aus dem Jahr 2016 legt kugelförmige morphologische Filter fest, ohne jedoch den Kugeldurchmesser und die sonstigen Filterbedingungen zu definieren. Die ISO 1101 enthält ebenfalls keine konkreten Vorgaben, und der aktuelle Entwurf aus dem Jahr 2015 gesteht lediglich ein, dass keine Einigung über die Default-Filtereinstellungen für Form erzielt werden konnte. Deshalb gibt es nur Symbole und Regeln für die Eintragung in Zeichnungen. Von den anderen Toleranzarten (Richtung, Ort und Lauf) ist gar keine Rede.

Entgegen dem Versprechen in ISO 8015 (Grundsatz der Standardfestlegung) werden in den Normen bisher keine vollständigen GPS-Standardspezifikationen definiert. Im Gegenteil wird die Festlegung der Messbedingungen dem Ersteller der Zeichnung, d.h. dem Konstrukteur übertragen. Er soll jetzt das übernehmen, woran die Experten bereits gescheitert sind.

Die Sache wird noch dadurch kompliziert, dass auf technischen Zeichnungen häufig für dieselben Geometrieelemente verschiedene Eigenschaften toleriert sind, siehe Bild 4 a).



Bild 4: Toleranzen für Form, Richtung und Ort an zwei Oberflächen mit Bezug;

a) ohne und b) mit Filterbedingungen nach den ISO-Normenentwürfen

Für jede einzelne Eigenschaft müsste der Konstrukteur die Filterbedingungen einzeln auf der Zeichnung festlegen, und diese könnten dann für die verschiedenen Eigenschaften an derselben Oberfläche auch noch unterschiedlich ausfallen (Bild 4 b). Schon heute ist aber kein Konstrukteur auch nur ansatzweise in der Lage, die Konsequenzen seiner Festlegungen zu überblicken. Die meisten scheitern schon am Verständnis für die vielen Symbole und Regeln (das geht übrigens auch den meisten Messtechnikern so).

Das ist auch nicht verwunderlich, denn das Thema wird in der Ingenieur- und Techniker-ausbildung sehr stiefmütterlich behandelt bzw. an den meisten Hochschulen gar nicht vermittelt – und praktisch nirgends so, wie es erforderlich wäre. Dementsprechend gibt es heute so gut wie keine eindeutige Zeichnung und kaum eindeutige Messergebnisse.

Für jede der verschiedenen Eigenschaften an denselben Oberflächen im Bild 4 könnten nach den heutigen Normen unterschiedliche Filterbedingungen auf der Zeichnung festgelegt werden. Objektive Regeln gibt es dafür nicht. Andererseits ist die Funktion der Oberflächen in jedem Fall gleich, egal, ob es sich um Maß, Form, Lage oder einen Bezug handelt. Die Messbedingungen sollten deshalb nicht für einzelne Eigenschaften, sondern nach der Funktion der Geometrieelemente festgelegt werden, und zwar für alle Eigenschaften gleich. Sie könnten in Anlehnung an ISO 1302 [10] eingetragen werden, siehe Bild 5.

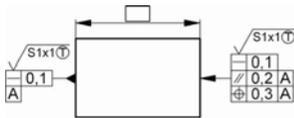


Bild 5: Messbedingungen in Anlehnung an ISO 1101 (Entwurf 2015) und ISO 1302

Das ist aber nur erforderlich, wenn es besondere Funktionsanforderungen an die Geometrielemente gibt. Das trifft in der Regel nur bei wenigen Oberflächen eines komplexen Werkstücks zu. Deshalb sollten Standardspezifikationen definiert werden, die einfach, leicht verständlich und praxisgerecht sind sowie unabhängig von Filtern und Zuordnungen.

Die Filterbedingungen sollten objektiv und unabhängig vom Kenntnisstand des Konstrukteurs oder Messtechnikers sein. Die ursprüngliche Idee der Filterung war, die zufälligen Messwertanteile (das „Rauschen“) abzuschneiden. Heute werden in der Regel Softwarefilter mit festgelegten, grob gestuften Grenzwelanzahlen bzw. -längen eingesetzt, ohne zu prüfen, ob tatsächlich nur zufällige oder nicht auch systematische Messwertanteile abgeschnitten werden. Damit lassen sich fast beliebige Ergebnisse erzielen.

In [11] wird eine besser geeignete Vorgehensweise beschrieben. Die auf diese Weise objektiv gefilterten Oberflächen können zur Bestimmung angrenzender Elemente verwendet werden, für die sich auf der Basis des GUM Messunsicherheiten angeben lassen. Bei wenigen Messpunkten mit großen Abständen dazwischen ergeben sich relativ große Messunsicherheiten, bei mehr Punkten mit kleineren Abständen wird die Messunsicherheit kleiner. Durch den Vergleich der Messunsicherheit mit der Toleranz des Prüfmerkmals lässt sich bewerten, ob die Messung unter den aktuellen Bedingungen genau genug ist [12] [13].

6. Abweichungen

Ähnlich wie oben am Beispiel Position erwähnt, sind auch für die anderen Eigenschaften in der Norm ISO 1101 zwar die Toleranzen und Toleranzzonen, nicht aber die entsprechenden

Abweichungen definiert. Da betrifft fast alle Toleranzarten (Form, Richtung, Ort und Lauf). Nur für die Geradheit, Ebenheit, Rundheit und Zylindrizität an Oberflächen ist im Anhang B festgelegt, wie die entsprechenden Abweichungen bestimmt werden sollen. Dafür gilt die Minimumbedingung, d.h. die Abweichung soll jeweils so klein wie möglich sein. Das gilt allerdings nur für diese vier Eigenschaften, für alle anderen nicht, also z.B. auch nicht für die Geradheit einer Achse mit einer zylindrischen Toleranzzone. Sonst gibt es nur die Forderung, dass alle Punkte des tolerierten Elementes innerhalb der Toleranzzone liegen müssen. Wie die Abweichung bestimmt werden soll, ist nicht definiert.

Bei einem klassischen Abstand ist die Grenzabweichung gleich der halben Toleranz (Bild 6 links). Bei einer Positionstoleranz legt zunächst das theoretische Maß die Nennlage fest. Die Toleranzzone mit der Zahl im Toleranzrahmen angegebenen Breite liegt symmetrisch zur Nennlage (Bild 6 mitte).

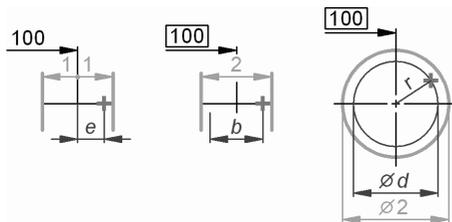


Bild 6: Toleranzen und Abweichungen: Links Abstand, mitte Position in einer Richtung, rechts Position in beliebiger Richtung mit kreisförmiger Toleranzzone

Jetzt könnte man die Positionsabweichung wie im Bild 6 links als größte Abweichung von der Nennlage auswerten. Praktisch wird dagegen der Abweichungsbetrag von e aus dem Bild 6 links in der Messgerätesoftware mit dem Faktor 2 multipliziert, um einen direkten Vergleich mit der Toleranz (hier 2 mm) zu ermöglichen. Die so berechnete Abweichung b im Bild 6 mitte ist jedoch nicht mehr anschaulich darzustellen.

Zusätzlich geht bei der Betragsbildung die Richtungsinformation verloren, so dass keine Korrekturwerte für die Fertigung angegeben werden können. Dann werden in der Regel die Originalkoordinaten zu Hilfe genommen. Dasselbe gilt sinngemäß bei kreis- bzw. zylinderförmigen Toleranzzonen mit der doppelten Abweichung d (Bild 6 rechts).

Das ist erst einmal nur eine Verständnisfrage. Richtig teuer kann jedoch die verdoppelte Abweichung werden, wenn daraus Prozessfähigkeitskennwerte wie c_p und c_{pk} berechnet werden. Dabei wird jeweils die Toleranz ins Verhältnis zur sechsfachen Streuung des Fertigungsprozesses gesetzt. Die Toleranz ist im Bild 6 jeweils gleich groß (2 mm), die

Abweichungen sind bei Position jedoch doppelt so groß wie beim Abstand. Damit verdoppelt sich auch die Streuung. Das heißt, dass die Position nur eine halb so gute Bewertung des (selben) Fertigungsprozesses liefert wie der klassische Abstand [14].

Das wird durch die praktische Erfahrung bestätigt: Viele Unternehmen haben gerade bei den Ortstoleranzen (Position, Symmetrie und Koaxialität) große Schwierigkeiten, die geforderten Prozessfähigkeiten einzuhalten. Deshalb wird dringend empfohlen, die Abweichungen nicht zu verdoppeln, sondern z.B. mit den Originalkoordinaten zu rechnen. Derselbe Prozess liefert dann sofort und ohne Mehrkosten eine doppelt so gute Bewertung [9] [14].

Dasselbe trifft bei der Bewertung der Prüfprozesseignung zu, z.B. nach den Richtlinien VDI/VDE 2600-1 [12] und -2 [13]. Auch hier sollte immer mit den einfachen Abweichungen gerechnet werden.

7. Zerlegung

Wie bereits dargestellt, sind für die meisten Anwendungen keine GPS-Standardspezifikationen und auch keine Abweichungen definiert. Die festgelegten Spezifikationen gestatten keine funktions- bzw. fertigungsgerechte Tolerierung und Messung. Um wenigstens einen Teil dieser Probleme zu lösen, wurde der Normenentwurf von ISO 20170 erarbeitet. In der Einleitung wird festgestellt, dass die in ISO 1101 definierten geometrischen Eigenschaften nicht zur Fertigungssteuerung geeignet sind. Deshalb soll diese Norm zur Unterstützung der Fertigung und Prüfung dienen, indem danach Zahlenwerte für geometrische Eigenschaften bestimmt werden können. Diese Zahlenwerte sind jedoch ausdrücklich nur zur Fertigungskorrektur, nicht aber für Konformitätsaussagen eines Werkstücks bestimmt. Dazu dient allein die ISO 1101 mit den oben genannten Unzulänglichkeiten.

Es kann also leicht die paradoxe Situation entstehen, dass geometrische Eigenschaften nach ISO 1101 die Spezifikation erfüllen, aber nicht zur Bewertung der Funktion bzw. Fertigung geeignet sind, und dass umgekehrt die Funktion gegeben ist, aber das Werkstück wegen Überschreitung der Spezifikationsgrenzen aussortiert wird.

Damit ist aber niemandem gedient. Deshalb wird die Norm ISO 20170 von Deutschland in der ISO abgelehnt. Es gibt aber noch eine andere Möglichkeit, nämlich alternative GPS-Standardspezifikationen zu definieren, die die folgenden Mindestforderungen erfüllen:

- Einfach, leicht verständlich und praxisgerecht
- Entsprechend der eingeführten messtechnischen Praxis
- Jeweils unabhängig von anderen Eigenschaften
- Unabhängig von Filtern und Zuordnungen
- Standardspezifikationen für Oberflächen

- Mit vorzeichenrichtigen Abweichungen
- Geeignet zur Beschreibung der Funktion
- Geeignet zur Fertigungskorrektur
- Geeignet zur Konformitätsbewertung

8. Alternative

Für die Geometrielemente ohne besondere Funktionsanforderungen sollten die Standard-spezifikationen möglichst einfach, leicht verständlich und praxisgerecht sein. Wie bereits oben erwähnt, wird heute in der geometrischen Messtechnik ganz überwiegend sowieso schon die Methode der kleinsten Quadratesumme (Ausgleichsrechnung nach Gauß) angewendet. Alle Messgeräte können danach arbeiten und tun das in der Regel auch. Das praktische Problem ist nur, dass keine der aktuellen Zeichnungsnormen darauf Rücksicht nimmt, sondern immer andere Standardfestlegungen enthält.

Um diese bewährte Auswertemethode zur Standardspezifikation zu machen, muss sie in einem gesonderten Dokument festgelegt werden, das dann im Zeichnungsschriftfeld mit dem Symbol (AD) für „Altered Default“ (geänderte Standardfestlegung) eingetragen wird, wie es in ISO 8015 ausdrücklich vorgesehen ist, siehe Bild 7. Das kann z.B. die Werknorm eines Unternehmens oder eine branchen- oder verbandsspezifische Richtlinie sein. Die wesentlichen Inhalte sind in Tabelle 1 zusammengestellt (nächste Seite).

Tolerierung ISO 8015 (AD) – WN1234:2017-11

Bild 7: Beispiel zur Angabe der Werknorm WN1234 mit Ausgabedatum im Schriftfeld

Die alternativen GPS-Standardspezifikationen bauen auf dem GPS-Normensystem auf und ergänzen es. Die dort definierten Symbole und Regeln können ohne weiteres angewendet werden. Weder einzelne, vorhandene Normen noch das GPS-Normensystem als ganzes sollen ersetzt werden. In die Zeichnung werden dann nur noch die Angaben eingetragen, die von den Standardspezifikationen abweichen.

9. Zusammenfassung

Die heutigen GPS-Normen entsprechen nicht den Anforderungen der Praxis: Einfach, eindeutig und leicht verständlich. Die Spezifikationen sind häufig nicht funktions- und fertigungsgerecht, und in vielen Fällen sind keine Standardspezifikationen definiert.

Tabelle 1: Inhalt der Werknorm für alternative GPS-Standardspezifikationen

Stichwort / Thema	Standardspezifikationen
Auswertemethode	Methode der kleinsten Quadratesumme (MKQ, Ausgleichsrechnung nach Gauß)
Geometrieelemente	Mittlere Elemente nach MKQ
Parameter der Geometrieelemente	Maß, Form, Koordinaten und Winkel der mittleren Elemente (oder der angrenzenden), jeweils unabhängig voneinander
Koordinaten	In der Mitte der Geometrieelemente (im Schwerpunkt der Messpunkte), unabhängig vom Bezugssystem
Maße und Abstände	Zwischen den Punkten in der Mitte der Geometrieelemente
Bezüge	Wie alle anderen Geometrieelemente
Bezugssysteme	Anlage der Bezüge in der Mitte der Geometrieelemente
Auswerterichtung	Entsprechend der Orientierung des Bezugssystems → Das muss dazu auf jeder Zeichnung definiert werden
Angrenzende Elemente	Symbol für das Geometrieelement (einbeschrieben, umschrieben oder tangential) mit allen Parametern
Filterung	Objektive Trennung der zufälligen und systematischen Messwertanteile; nur bei Bedarf Zeichnungsangabe am Geometrieelement für alle Eigenschaften (und die Bezüge)
Anwendung	Bewertung der Fertigung, Funktion und Konformität

Deshalb wird empfohlen, alternative GPS- Standardspezifikationen auf Basis der mittleren Elemente (Methode der kleinsten Summe der Abweichungsquadrate, Ausgleichsrechnung nach Gauß) festzulegen. Dann werden auch alle Parameter für diese mittleren Elemente bestimmt: Maß, Form, Koordinaten und Winkel. Damit lassen sich alle Abweichungen unabhängig voneinander definieren und auswerten, und sie können zur Bewertung der Fertigung, der Funktion und der Konformität herangezogen werden.

Andere Geometrieelemente (einbeschrieben, umschrieben oder tangential) werden mit dem entsprechenden Symbol auf der Zeichnung angegeben, und alle Parameter werden dafür bestimmt. Spezielle Filterbedingungen brauchen nicht eingetragen werden, wenn die zufälligen Messwertanteile objektiv von den systematischen getrennt werden.

Literatur

Abkürzung: GPS = Geometrische Produktspezifikation(en)

- [1] DIN EN ISO 8015: GPS – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln. Beuth Verlag Berlin 2011
- [2] DIN EN ISO 1101: GPS – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Beuth Verlag Berlin 2014
- [3] DIN EN ISO 5459: GPS – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme. Beuth Verlag Berlin 2013
- [4] DIN EN ISO 14405-1: GPS – Dimensionelle Tolerierung – Teil 1: Lineare Größenmaße. Beuth Verlag Berlin 2017
- [5] DIN EN ISO 14405-2: GPS – Dimensionelle Tolerierung – Teil 2: Andere als lineare Maße. Beuth Verlag Berlin 2012
- [6] DIN EN ISO 20170: GPS – Zerlegung von geometrischen Merkmalen für die Fertigungskontrolle. Beuth Verlag Berlin 2016 (Entwurf)
- [7] Hernla, M.: Illusion und Wirklichkeit. Geometrische Produktspezifikationen und -prüfung in der Praxis. QZ Qualität und Zuverlässigkeit, München 60 (2015) 5, S. 108-111
- [8] JCGM 100:2008-09: Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres (www.bipm.org/en/publications/guides)
- [9] Hernla, M.: Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen. Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit durch Unsicherheitsbilanzen. expert verlag Renningen 2016
- [10] DIN EN ISO 1302: GPS – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation. Beuth Verlag Berlin 2002
- [11] Hernla, M.: Mathematische Modellierung geometrischer Messverfahren. VDI-Fachtagung "Messunsicherheit praxismäßig bestimmen" 2015. VDI-Bericht 2269, Düsseldorf 2015, S. 183-194
- [12] VDI/VDE 2600-1: Prüfprozessmanagement – Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozessen. Beuth Verlag Berlin 2013
- [13] VDI/VDE 2600-2: Prüfprozessmanagement – Ermittlung der Messunsicherheit komplexer Prüfprozesse. Beuth Verlag Berlin 2017 (Entwurf)
- [14] Hernla, M.: Auswertung von Messabweichungen. Messunsicherheit und Fähigkeit für Ortstoleranzen. QE Quality Engineering, Leinfelden-Echterdingen (2009) 7-8, S. 14-15 (www.dr-hernla.de)

Messunsicherheit und Tolerierung

Measurement Uncertainty and Tolerancing

Prof. Dr.-Ing. **Frank Lindenlauf**, Hochschule Pforzheim (Fakultät für Technik)

Kurzfassung

Seit über 90 Jahren ist bekannt, dass Messunsicherheiten bei der Variablenprüfung und damit auch für die Tolerierung von Bedeutung sind. Trotzdem wird in der industriellen Praxis die überwiegende Zahl der Messergebnisse heute immer noch als einfache Messwerte ohne Messunsicherheit angegeben. Bei der Tolerierung spielt die Messunsicherheit praktisch keine Rolle. Nach einer Analyse der Ausgangssituation werden mögliche Ursachen hierfür betrachtet und Lösungsvorschläge zur Diskussion gestellt. Durch Verwenden von standardisiert ermittelten Basismessunsicherheiten, prüfbareren Toleranzen anstelle von Messunsicherheiten, einfachen Regeln zur Berücksichtigung der Messunsicherheit bei der Tolerierung und Prüfung sowie einer häufigeren Ausweisung von Messunsicherheiten in Dokumenten könnte viel erreicht werden auf dem Weg zum Ziel der routinemäßigen Verwendung der Messunsicherheit.

Abstract

For over 90 years it has been known that measurement uncertainties are important in testing by variables and thus also in tolerancing. Nevertheless, in industrial practice today the overwhelming number of measurement results is still stated as simple measured values without measurement uncertainty. In tolerancing measurement uncertainty practically plays no role. After an analysis of the initial situation, possible causes are considered and suggestions for solutions are given for discussion. By using standardized basic uncertainties, testable tolerances instead of measurement uncertainties, simple rules for applying measurement uncertainty in tolerancing and testing as well as a more frequent designation of measurement uncertainties in documents, much could be achieved on the way to the goal of using measurement uncertainty routinely.

Schlüsselwörter: Tolerierung, Konstruktion, Konformitätsbewertung, Prüfung, Variablenprüfung, Qualitätssicherung, Messtechnik, Geometrische Produktspezifikation (GPS), Messunsicherheit

Key Words: Tolerancing, Design, Conformity Assessment, Testing, Testing by Variable, Quality Assurance, Metrology, Geometric Product Specification (GPS), Measurement Uncertainty

1. Einleitung

Seit mindestens 90 Jahren liegt die Erkenntnis vor, dass die Messunsicherheit für Variablenprüfungen von Bedeutung ist und in irgendeiner Form zu berücksichtigen sei [1]. Dieses Wissen beschränkt sich jedoch fast ausschließlich auf Spezialisten der Fertigungsmesstechnik. Viele Anwender von Fertigungsmesstechnik, z. B. Maschinenbediener in der Fertigung, kommen bis auf wenige Ausnahmen auch heute noch ohne Messunsicherheit gut zurecht. Obwohl viele Messergebnisse protokolliert und elektronisch gespeichert werden, sind auf kaum einem Messprotokoll Messunsicherheiten angegeben. Die einzige Ausnahme bilden Kalibrierscheine [34] und Prüfberichte von akkreditierten Laboratorien. Bei der Auslegung von Toleranzen durch Konstrukteure spielt die Messunsicherheit als limitierendes Element eine kaum erkennbare Rolle. Insbesondere im allgemeinen Maschinenbau stellt sich oft erst bei der ersten Prüfung eines Merkmals heraus, dass die vorhandene Messtechnik für eine belastbare Konformitätsbewertung nicht hinreichend genau ist. In vielen Fällen scheinen die Funktionsgrenzen nicht identisch mit den Spezifikationsgrenzen zu sein, so wie es die ISO 8015 [10] fordert. Sonst wären bei Abweichungen keine, auch keine zeitlich befristeten Sonderfreigaben möglich. Trotz all dieser Defizite bei der Auslegung und Prüfung funktionieren viele Bauteile. Wie kann das sein? Was können wir daraus lernen, und was können wir tun, um dem Ziel einer durchgehenden und routinemäßigen Anwendung der Messunsicherheit näher zu kommen?

2. Ausgangssituation

Sollen Wege gefunden werden, wie die Messunsicherheit Eingang in die Tolerierung finden kann, ist es hilfreich, zunächst deren Rolle bei der Variablenprüfung zu beleuchten.

Die Messunsicherheit bei der Variablenprüfung

Die Goldene Regel der Fertigungsmesstechnik legt für Variablenprüfungen den Bereich von $1/10$ bis $2/10$ für das Verhältnis der Messunsicherheit zur Toleranz fest und wurde von BERNDT in den 1920er Jahren formuliert [1]. Bereits 1936 behandelte die International Federation of the National Standardizing Associations (ISA)¹ die Frage, ob die Messunsicherheit für Abnehmer und Hersteller in Bezug auf die Toleranzgrenzen unterschiedlich zu verwenden sei [25]. In ihrem Artikel *Funktionstoleranz und Meßunsicherheit* [2] diskutierten BERNDT und Kollegen vor nunmehr genau 50 Jahren verschiedene Ansätze zum Umgang mit der Messunsicherheit bei der Variablenprüfung. Mit der Norm ISO 14253-1 [11] erschien vor etwa 20 Jahren erstmals eine, von einem internationalen Gremium abgestimmte Entscheidungsregel zur Berücksichtigung der Messunsicherheit bei Konformitätsbewertungen, mit dem Ziel, weltweit auf gleiche Weise solche Entscheidungen zu treffen. In der Folge gaben weitere

¹ Die ISA ist die Vorgängerorganisation der ISO. Sie wurde 1926 gegründet und 1947 aufgelöst [26, 41].

Standardisierungsinstitutionen vergleichbare Entscheidungsregeln heraus [19, 24, 29]. Alle diese Ansätze folgen der Idee von 1936, die Messunsicherheit an den Toleranzgrenzen für die Annahme- und Rückweisungsentscheidung unterschiedlich zu verwenden. Sie führen damit zwei Entscheidungsgrenzen ein: eine für die Annahme und eine für die Rückweisung. Eine Alternative hierzu, die nur (und wieder) – wie bereits von LEINWEBER [30] und BERNDT [1] gefordert – mit einer Entscheidungsgrenze auskommt, wurde jüngst von LINDENLAUF/KRÄMER (erneut) vorgeschlagen [33] und weiter entwickelt [32]. Die ISO 14253-4 [7] beschreibt, wie die Prinzipien der ISO 8015 [10] und die Regeln der ISO 14253-1 [11] der Praxis angenähert werden können. Alle diese Methoden haben zur Folge, dass bei der Annahmeentscheidung der Übereinstimmungsbereich eine echte Teilmenge des Toleranzbereichs ist: Wegen der Messunsicherheit und dem damit verbundenen Entscheidungsrisiko liegen die Annahmegrenzen einen – vom jeweiligen Modell abhängigen – Sicherheitsabstand von den Toleranzgrenzen entfernt [32]. Die Toleranz wird eingeschränkt.

Der IEC Guide 115 geht einen anderen Weg und stellt zwei Verfahren zur Konformitätsbewertung bereit [23]. Beim *Verfahren 1 (Messunsicherheit berechnet)*² gilt die Anforderung als bestätigt, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass der (richtige) Messwert innerhalb der Toleranz liegt, mindestens 50 % beträgt³. Das *Verfahren 2 (Genauigkeitsmethode)*⁴ verzichtet auf die Ermittlung der Messunsicherheit, setzt aber voraus, dass diese hinreichend klein ist und die Messungen unter kontrollierten Bedingungen von qualifiziertem Personal durchgeführt werden.

Interessant ist es, dass Kalibrierscheine zwar die Messunsicherheit bei der Prüfentscheidung berücksichtigen, indem sie die Toleranz an den Toleranzgrenzen um die Messunsicherheit einschränken, aber vorher die Toleranz an den Grenzen um die Messunsicherheit erweitern, siehe z. B. [34].

Die EU-Verordnung 2016/646 zur Regelung der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6) geht noch weiter [18]. Ausgehend von den *Emissionsgrenzwerten* der Verordnung EG 715/2007 [16], legt sie *verbindliche Emissionsgrenzwerte* fest. Diese werden durch Multiplikation der Emissionsgrenzwerte mit einem Übereinstimmungsfaktor $CF > 1$ berechnet. Befristet kann der *vorläufige Übereinstimmungsfaktor* $CF = 2,1$ in Anspruch genommen werden. Danach gilt der *endgültige Übereinstimmungsfaktor* $CF = 1 + m = 1,5$. Der Anteil $m = 0,5$ ist eine Toleranz für die Messunsicherheit des Portable Emission Measurement System (PEMS) [18].

Die Erkenntnis, dass die Messunsicherheit für Variablenprüfungen von Bedeutung ist und in irgendeiner Form zu berücksichtigen sei, ist nun seit mindestens 90 Jahren verfügbar. Die Frage, in welcher Form dies genau zu tun sei, ist bis heute nicht abschließend beantwortet. Die Verantwortung hierfür

² Procedure 1: uncertainty of measurement calculated

³ „The measurement complies with the requirement if the probability of its being within the limits is at least 50 %.“

⁴ Procedure 2: accuracy method

liegt auf jeden Fall beim Messtechniker, denn die ISO 17450-2 trennt scharf: „*Der Spezifikationsprozess [Verifikationsprozess] liegt in der Verantwortung des Konstrukteurs [Messtechnikers]*“ [13].

Ein wichtiger Aspekt wurde bisher kaum betrachtet: Bis auf die Verfahren des IEC Guide 115 [23] und der EU-Verordnung 2016/646 [18] setzen alle anderen Ansätze voraus, dass die festgelegte Toleranz die aus der Messunsicherheit abgeleitete Einschränkung zulässt, sodass hiernach ausreichend viel Toleranz für die Herstellung und Prüfung verfügbar bleibt. Ist dies nicht möglich, wird erwartet, dass die Messunsicherheit so verkleinert werden kann, dass nach der Einschränkung mit der neuen Messunsicherheit die verbleibende Toleranz wiederum ausreicht.

Die Messunsicherheit bei der Tolerierung

Die Frage, wie im Rahmen des Konstruktionsprozesses die zu erwartenden Messunsicherheiten Eingang in die Toleranzen finden, wird in der Literatur wenig behandelt. Weder aktuelle GPS-Normen [10, 12, 13] noch die zentrale VDI-Richtlinie zum Thema Konstruktion [36] geben Hinweise, dass und wie Messunsicherheiten in der Tolerierung berücksichtigt werden müssen, damit sich nicht erst bei der Prüfung eine zu kleine Fertigungstoleranz herausstellt. Selbst in einem Standardlehrbuch zur Konstruktionslehre [21] mit über 800 Seiten Umfang findet sich das Stichwort *Messunsicherheit* nicht, einzig der Eintrag *Mess- und Prüfnormen*. Im Kapitel *Gestaltungsrichtlinien* sind in 16 eigenen Unterkapiteln Konstruktionsaufgaben von *ausdehnungsgerecht* über *klebegerecht* bis *schweißgerecht* und *verschleißgerecht* detailliert beschrieben. Nur *prüfgerecht* ist nicht dabei.

Die Kostenfunktion der Richtlinie VDI 2225-4 setzt sich nur aus Material- und Fertigungskosten zusammen, Prüfkosten sind nicht erwähnt [37]. Einen ersten Ansatz zum Umgang mit der Messunsicherheit bei der Maßtolerierung stellte schon vor zwanzig Jahren WECKENMANN vor [40]. HERNLA zeigt einen Weg bei der Lagetolerierung [22]. Ein Fachbuch für Experten [3] stellt für geometrische Merkmale den Zusammenhang zwischen Produktentwicklung, Prozessüberwachung und Qualitätsprüfung her.

Eines der wenigen Dokumente, das die Messunsicherheit mit der Toleranz verbindet, ist die genannte EU-Verordnung 2016/646 [18]. Hier heißt es unter 2.1.1. *Endgültige Übereinstimmungsfaktoren*: „Toleranz‘: ein Parameter, welcher die durch die PEMS-Ausrüstung hinzugekommenen zusätzlichen Messunsicherheiten berücksichtigt, die jährlich überprüft werden und nach einer Verbesserung der Qualität des PEMS-Verfahrens oder technischem Fortschritt zu revidieren sind.“⁵

⁵ Der definierte Begriff *Toleranz* kommt weder in 2.1.1 noch sonst in der Verordnung vor. In der Tabelle zu 2.1.1 steht *margin*, wie in der englischen Fassung [17]. Anscheinend wurde nur an einer Stelle *margin* durch *Toleranz* ersetzt.

Eine häufig anzutreffende Arbeitsweise

Die für die Variablenprüfung einzusetzenden Messgeräte werden aufgrund von Erfahrung in Anlehnung an die Goldene Regel der Messtechnik ausgewählt. Dabei wird deren Genauigkeitsklasse und die zu prüfende Toleranz berücksichtigt. Messwerte werden als absolut richtig angenommen. Die zugehörige Messunsicherheit wird bei Prüfentscheidungen nicht berücksichtigt, und der komplette Toleranzbereich (Spezifikationsbereich) wird als Übereinstimmungsbereich ausgenutzt. Da eine Messunsicherheit stets vorhanden ist, bedeutet dies eine implizite Toleranzerweiterung um die jeweilige Messunsicherheit. Dieses Vorgehen entspricht dem Verfahren 2 (Genauigkeitsmethode) des IEC Guide 115. Unterschiede in den Messwerten führen häufig zu Entscheidungsproblemen.

Feststellung

Die Angabe einer Messunsicherheit zu jedem Messergebnis hat sich in der Industrie nicht durchgesetzt. Bis auf wenige Ausnahmen spielt sie bei der Tolerierung praktisch keine Rolle. Trotzdem funktionieren die Einzelteile und die aus ihnen gebauten Produkte. Die verwendeten Abstimmungsprozesse und Messverfahren scheinen die vorhandenen Messunsicherheiten implizit zu berücksichtigen.⁶

3. Mögliche Ursachen

Das Komplexitätsproblem

Die Ermittlung der aufgabenbezogenen Messunsicherheit ist eine komplexe Aufgabe. Sie setzt mindestens fortgeschrittene Kenntnisse in Mathematik und Statistik voraus.⁷ Insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen ist es kaum möglich, Mitarbeiter mit den erforderlichen Kompetenzen einzustellen und zu beschäftigen.⁸ Zu der Komplexität in der Sache kommt die schiere Anzahl an unterschiedlichen Dokumenten zum Thema Messunsicherheit.

Das Mengenproblem

Unabhängig davon, wie erwartete Messunsicherheiten bei der Tolerierung und Prüfung berücksichtigt werden, besteht die eigentliche Herausforderung darin, die zwar grundsätzlich ermittelbare Messunsicherheit tatsächlich auch für jede Messaufgabe verfügbar zu haben. Für wenige Messaufgaben ist eine individuelle Erhebung der Messunsicherheit möglich, aber für sehr viele sicher nicht mehr. Besonders Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus müssen oft kleine Fertigungslose bei

⁶ Die Ausführungen basieren auf persönlichen Beobachtungen in der Lieferkette des Automobilbaus, im Maschinen- und Anlagenbau und nachgelagerten Industrien, insbesondere der Papierverarbeitung. In anderen Branchen, z. B. bei Unternehmen der Messtechnik, kann die Situation – auch in Teilen – anders sein.

⁷ Hierzu genügt ein Blick in die Standardwerke, wie [5, 6, 15, 27, 28, 35, 38].

⁸ Leider gibt es immer noch keinen Ausbildungsberuf in der Messtechnik. Auch entsprechende Studiengänge sind selten und meistens elektrotechnisch ausgerichtet in Richtung Mess- und Regelungstechnik.

gleichzeitig großer Variantenvielfalt verarbeiten. Mehrere hunderttausend Materialstämme von Bauteilen mit bis zu über hundert Merkmalen, die in Losen von vier Stück und weniger gefertigt oder zugekauft werden, sind hier keine Seltenheit. Bedenkt man noch die einzelnen Herstellschritte, die jeweils eigene Prüfungen bedingen, lässt sich erkennen, weshalb Messunsicherheiten nicht für jede Messaufgabe individuell ermittelt werden können. Gleichzeitig wiederholen sich viele Messaufgaben, nicht nur in einem Unternehmen, sondern über viele Organisationen hinweg.

Das Kommunikationsproblem

In der industriellen Praxis werden Messergebnisse in der weit überwiegenden Zahl ohne Messunsicherheit angegeben: Kaum ein Messprotokoll weist eine Messunsicherheit aus. In den seltensten Fällen findet sich in einem Dokument ein vollständiges Messergebnis aus Messwert und Messunsicherheit mit Vertrauensniveau. Nur bei Kalibrierscheinen und Prüfberichten von akkreditierten Kalibrierlaboratorien ist die Angabe der Messunsicherheit heute üblich, obwohl die ISO/IEC 17025 [14] anderes zulässt. Hier heißt es: *„Angaben zur Unsicherheit sind in Prüfberichten dann erforderlich, wenn sie für die Gültigkeit oder Anwendung der Prüfergebnisse von Bedeutung sind, wenn sie vom Kunden verlangt wurden oder wenn die Unsicherheit die Einhaltung von vorgegebenen Grenzen in Frage stellt.“* und *„Der Grad der Strenge, die bei der Schätzung der Messunsicherheit erforderlich ist, hängt von Faktoren ab wie z. B. – die Anforderungen der Prüfmethode; – die Anforderungen des Kunden; – das Vorhandensein enger Grenzen für die Entscheidung bezüglich der Einhaltung einer Spezifikation“*. Die Bereitschaft, sich mit dem messtechnischen Konzept *Messunsicherheit* vertraut zu machen, ist außerhalb der messtechnischen Gemeinde sehr gering. Wenn dann der Begriff in der Praxis kaum vorkommt, wundert es nicht, dass nur wenige Spezialisten damit arbeiten.

Das Ausbildungsproblem

Das Berücksichtigen messtechnischer Belange wird kaum als Teil der Lösung von Konstruktions- und Entwicklungsaufgaben verstanden. In den Lehrbüchern zur Produktentwicklung, z. B. [31], und Konstruktionslehre, z. B. [21], kommen entsprechende Inhalte nicht vor. Die Verantwortung zur Durchführung messtechnischer Aufgaben liegt bei den Messtechnikern. Die Verantwortlichkeit für prüfgerechte Entwicklung, damit das Produkt validiert werden kann, und prüfgerechte Konstruktion, damit das Produkt verifiziert werden kann, ist nicht erkennbar. Es wird scheinbar vorausgesetzt, dass die Messtechniker dies mit ihrer Messtechnik einfach können. Ist der Fertigungstechniker noch nahe an der Messtechnik, so sind Konstrukteure und Entwickler eher weiter davon entfernt.

4. Lösungsvorschläge

Die richtige Sprache finden

Nahezu alle Arten von Abweichungen⁹ werden, außer von Messtechnikern, unter dem Begriff *Toleranz* zusammengefasst. Dazu kommt, dass Entwickler und Konstrukteure bei ihrer Arbeit Toleranzen festlegen müssen. Ihr Fokus liegt also auf diesem Begriff. Was spricht dagegen, wenn wir Messtechniker den Konstrukteuren entgegen kommen und Messunsicherheiten in Toleranzen übersetzen? Statt über *Messunsicherheiten* zu reden, lassen Sie uns über (*kleinste*) *prüfbare Toleranzen* sprechen. Damit können wir sicherlich eine große Hürde nehmen.

Mehr klassenbezogene Messunsicherheiten nutzen

Allein die Zahl der Normen, Fachartikel und Schulungsangebote zum Thema Messunsicherheit drückt die große Bedeutung und gleichzeitig die Komplexität des zugrunde liegenden Stoffes aus. Eine breitere Anwendung verlangt zwingend eine Reduzierung der Komplexität. Ich stelle folgende Annahme zur Diskussion: Weshalb sollte sich etwa die Messung eines Bohrungsdurchmessers mit einer Innenmessschraube nach DIN 863-4 [4] wesentlich unterscheiden, wenn sie in Kiel, Köln oder Konstanz von einem qualifizierten Mitarbeiter unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt wird? Wenn wir das akzeptieren, könnten für alle genormten, einfachen Messgeräte, die unter gültigen Betriebsbedingungen eingesetzt werden, bereits vom Hersteller erwartete *Basismessunsicherheiten* $U_0(x)$ angegeben werden, die vom Messwert x abhängen können.

Diese *Basismessunsicherheiten* ließen sich für jede *Messgeräteklasse* in einer, z. B. vom DIN, VDI oder sonstigen Organisation betriebenen, Datenbank im Sinne einer Norm zusammenführen. Auch die zugehörigen Messbedingungen wären hier zu spezifizieren. Der Käufer eines Messgeräts könnte damit die Zugangsberechtigung zu der Datenbank erhalten. In einem weiteren Schritt könnten Geräte mit einer Ziffernanzeige diese *Basismessunsicherheit*, ähnlich wie beim virtuellen Koordinatenmessgerät, auch anzeigen. So würde sich automatisch ein operatives Gefühl für die Messunsicherheit entwickeln. Dieser Weg wäre vergleichbar mit dem Übergang von Maßanzügen zur Konfektionskleidung. Obwohl die menschlichen Körper wahrscheinlich sehr viel individueller sind als die meisten industriellen Messungen, lassen sich doch die Körpermaße so standardisieren, dass eine vom einzelnen Menschen weitestgehend unabhängige Massenproduktion möglich ist [9].¹⁰

Es erscheint mir der Sache dienlicher, überhaupt mit einer Messunsicherheit zu arbeiten, selbst wenn sie nur grob ermittelt wurde, als Messergebnisse ohne Messunsicherheit anzugeben, weil

⁹ häufig auch Schwankungen

¹⁰ Erst dadurch war für viele Menschen bessere und bezahlbare Kleidung erreichbar. Die Basismessunsicherheiten wären in diesem Sinne „Messunsicherheiten von der Stange“.

der individuelle Aufwand – wie beim Maßanzug – zu groß ist. Was würde es bedeuten, wenn die Basismessunsicherheiten mit einer eigenen Unsicherheit von 25 % bekannt wären? Anstatt etwa mit $U = 16 \mu\text{m}$ müssten wir mit $U = 20 \mu\text{m}$ arbeiten. Wie dramatisch wäre das?

Eine Regel zur Berücksichtigung der Messunsicherheiten vereinbaren

Sobald eine Messunsicherheit U verfügbar ist, lässt sich damit die zugehörige kleinste prüfbare Toleranz $T_{\min} = G \cdot U$ berechnen. Dies stellt die Umkehrung der Eignungsanforderung für Prüfmittel dar [38]. Für das Verhältnis $V = U/T$ der erweiterten Messunsicherheit U zur Toleranz T ist ein Grenzwert g erforderlich, sodass $V \leq g$. Die kleinste prüfbare Toleranz erfüllt gerade die Grenzbedingung $V_{\max} = U/T_{\min} = g$. Damit ist $T_{\min} = U/g = G \cdot U$ und $G = 1/g$. Die Goldene Regel der Messtechnik bedeutet für G Werte zwischen 5 und 10. Das Ziel sollte sein, eine solche oder vergleichbar einfache Regel im Unternehmen zu vereinbaren und anzuwenden. Mit dieser Regel können die Basismessunsicherheiten U_0 in *Basistoleranzen* $T_0(x) = G \cdot U_0(x)$ umgerechnet werden.

Prüfbare Toleranzen in Katalogen bereit stellen

Prüfbare Toleranzen sind alle Toleranzen $T \geq T_{\min}$ größer oder gleich der kleinsten prüfbaren Toleranz. Die mit einem bestimmten Messgerät prüfbaren Toleranzen können in Tabellen bereit gestellt werden. Etwa in der Originaltabelle des ISO-Toleranzsystems [8] kann der Bereich der Toleranzen gekennzeichnet werden, der sich mit einem bestimmten Messgerät prüfen lässt. Das jeweilige Merkmal, z. B. Welle oder Bohrung sollte mit angegeben werden. Auch kann markiert sein, wo es sich um Werte handelt, die individuell ermittelt wurden, oder solche, die aus Basismessunsicherheiten abgeleitet wurden. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für eine Innenmessschraube mit 3-Linienberührung. Die dunkel hinterlegten Toleranzen sind mit diesem Messgerät prüfbar. Die schraffierten Felder basieren auf einer durchgeführten Messunsicherheitsanalyse. Man erkennt direkt, mit welchen Maßen und Toleranzen man sich innerhalb oder außerhalb der vorhandenen Möglichkeiten bewegt. Die Bereitstellung dieser Daten kann z. B. online als Tabelle erfolgen. Für Konstrukteure ist deren Nutzung sicher einfacher, wenn sie im CAD-System hinterlegt ist. Das CAD-System kann für jedes Maß-Toleranz-Paar die Tabellen auswerten und anzeigen, welche Messgeräte im Hause für eine Prüfung verfügbar sind. Gibt es hierfür kein Messgerät, kann eine Warnmeldung erfolgen.

Zunehmend vollständige Messergebnisse verwenden

Wenn wir Messtechniker nicht mit gutem Beispiel vorangehen, wie können wir dann erwarten, dass fachferne Kolleginnen und Kollegen mit messtechnischen Konzepten zurecht kommen? Gerade bei Koordinatenmessgeräten ließe sich dieses Defizit leicht beheben, z. B. durch die konsequente Verwendung des virtuellen Koordinatenmessgeräts [39] auch im industriellen Einsatz und nicht



Bohrungen: *D* bis 500 mm

Innenmessschraube mit 3-Linienberührung
Skalenteilungswert = 1 µm

über	bis	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT11	IT12	IT13
mm	mm	µm	µm	µm	IT18									
1	3	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	

Abbildung 1: In der Tabelle der ISO 286 [8] sind die mit der Innenmessschraube prüfbaren Toleranzen markiert. Die schraffierten Felder basieren auf einer durchgeführten Analyse.

nur in Kalibrierlaboratorien [20]. Der Ansporn muss also sein: Wir Messtechniker geben in allen Dokumenten vollständige Messergebnisse an. Hierdurch gewöhnen sich unsere Partner an den Begriff Messunsicherheit. Sie lernen damit operativ umzugehen. Alle, die mit Messergebnissen und Toleranzen arbeiten, brauchen eine Vorstellung vom Konzept Messunsicherheit und deren Werten. Aber nicht jeder muss Messunsicherheiten ermitteln können.

Implizite Berücksichtigung der Messunsicherheit bei der Tolerierung zulassen

Insbesondere zum Umgang mit vorhandenen Zeichnungen ist zu bedenken, ob nicht die implizite Berücksichtigung der Messunsicherheit bei der Tolerierung beibehalten und nur bei neuen Zeichnungen individuell vorgegangen wird. Dies würde die umgekehrte Anwendung der Genauigkeitsmethode nach IEC Guide 115 bedeuten. Auch Regelwerke wie die ISO/TS 14253-4 rücken von der strengen Auslegung der Spezifikationsgrenzen als Funktionsgrenzen ab und ermöglichen damit dieses Vorgehen [7]. Können Konstrukteure auf Kataloge oder CAD-Unterstützung zugreifen, können sie einfach entscheiden, wo sie mit Basismessunsicherheiten arbeiten und diese implizit bei der Tolerierung berücksichtigen, oder wo sie deren explizite Verwendung bevorzugen.

Toleranzen mit explizit zu berücksichtigender Messunsicherheit kennzeichnen

Merkmale, für die bei der Prüfung die Messunsicherheit explizit berücksichtigt werden soll, müssen gekennzeichnet sein. Hier sind zwei Klassen denkbar: Etwa *Annahme mit reduzierter Toleranz*

(ART) oder *Annahme mit erweiterter Toleranz (AET)*. Nicht gekennzeichnete Toleranzen fallen in die dritte Klasse, vergleichbar mit der Anwendung von Allgometoleranzen: *Annahme mit fester (voller) Toleranz (AFT)*. Für den Großteil der Toleranzen und die Prüfpraxis würde sich gegenüber heute nichts ändern. Die Kennzeichnungspflicht würde zu mehr Bewusstsein im Umgang mit der Messunsicherheit bereits während der Tolerierung führen und die Entscheidung für eine Toleranzeinschränkung auf Einzelfälle eingrenzen. Dies würde die Anzahl aufgabenbezogener Messunsicherheitsbetrachtungen und in der Folge die Komplexität reduzieren. Prüfungsentscheidungsregeln braucht es trotzdem.

5. Ausblick

Der Weg in die Zukunft zur routinemäßigen Verwendung von Messunsicherheiten sollte lauten: Lieber viele grob bekannte und wenige aufgabenbezogene Messunsicherheiten bewusst verwenden als unbewusst keine. Erst dort, wo mit diesem Vorgehen Grenzen erreicht werden, scheint die nächste Stufe möglich, nämlich mehr individuell ermittelte und bei der Tolerierung explizit verwendete Messunsicherheiten. Auf die Anwendung der bekannten Methoden durch Spezialisten in begründeten Fällen und in der metrologischen Kette sollte natürlich nicht verzichtet werden.

Literaturangaben

- [1] BERNDT, Georg: *Goldene Regel der Fertigungsmesstechnik*. (1924 – 1930), zitiert nach [2]
- [2] BERNDT, Georg ; HULTZSCH, Erasmus ; WEINHOLD, Herbert: Funktionstoleranz und Meßunsicherheit. *Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden* 17 (1968), Nr. 2, S. 465 – 471
- [3] COLOSIMO, Bianca M. (Hrsg.) ; SENIN, Nicola (Hrsg.): *Geometric Tolerances; Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring*. London : Springer (2011), 336 S.
- [4] DIN 863-4:1999-04: *Prüfen geometrischer Größen – Meßschrauben – Teil 4: Innenmeßschrauben – Begriffe, Anforderungen, Prüfung*
- [5] DIN 1319-3:1996-05: *Grundlagen der Meßtechnik – Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße – Meßunsicherheit*
- [6] DIN 1319-4:1999-02: *Grundlagen der Meßtechnik – Auswertung von Messungen – Meßunsicherheit*
- [7] DIN CEN ISO/TS 14253-4 – DIN SPEC 1177:2010-11: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 4: Aspekte zur Auswahl von Entscheidungsregeln (Vornorm)*
- [8] DIN EN ISO 286-1:2010-11: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen*
- [9] DIN EN ISO 7250-1:2010-06: *Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung – Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte*

- [10] DIN EN ISO 8015:2011-09: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln*
- [11] DIN EN ISO 14253-1:2013-12: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen*
- [12] DIN EN ISO 17450-1:2012-04: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung*
- [13] DIN EN ISO 17450-2:2013-04: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 2: Grundsätze, Spezifikationen, Operatoren, Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten*
- [14] DIN EN ISO/IEC 17025:2005-08: *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*
- [15] DIN V ENV 13005:1999-06: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*
- [16] EG 715/2007: *Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge*
- [17] EU 2016/646: *Commission Regulation of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6)*
- [18] EU 2016/646: *Verordnung der Kommission vom 20. April 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6)*
- [19] EURACHEM/CITAC GUIDE: *Use of uncertainty information in compliance assessment*. Uppsala (2007)
- [20] FEINMESS: *Kalibrierschein 73162:2015-10 D-K-18311-01-00. Prüfkörper* (2015)
- [21] FELDHUSEN, Jörg (Hrsg.) ; GROTE, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre; Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Auflage, Berlin : Springer Vieweg (2013)
- [22] HERNLA, Michael: *Orientierung für die Lage*. *KEM Konstruktion* 2009, Nr. 6, S. 74 – 75
- [23] IEC Guide 115:2007-09. *Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector*
- [24] ILAC-G8:03/2009: *Guidelines on the Reporting of Compliance with Specification*. Silverwater (Australia) : International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)
- [25] ISA: *Berücksichtigung der Messunsicherheit für Abnehmer und Hersteller*. International Federation of the National Standardizing Associations, Bulletin No. 25 (1936), zitiert nach [2]
- [26] ISO: *Friendship among Equals. Recollections from ISO's first fifty years*. Genf : ISO Central

Secretariat (1997), 87 S.

- [27] ISO 22514-7:2012-09: *Statistical methods in process management – Capability and performance – Part 7: Capability of measurement processes*
- [28] JCGM 100:2008. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement – GUM 1995 with minor corrections*
- [29] JCGM 106:2012. *Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment*
- [30] LEINWEBER, Paul: Messunsicherheit und Sicherheitsbereich – ein Vorschlag zum ISO-Lehrensistem. *Werkstatttechnik* 48 (1958), S. 521 – 528, zitiert nach [2]
- [31] LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3. Auflage. Berlin : Springer (2009)
- [32] LINDENLAUF, Frank: Zurück zum eindeutigen Prüferscheid. Risikobasierte Variablenprüfung unter Berücksichtigung der Messunsicherheit – eine Alternative zur ISO 14253-1. *VDI-Berichte* 2269 (2015), S. 245 – 255
- [33] LINDENLAUF, Frank ; KRÄMER, Bernhard: Sichere oder eindeutige Konformitätsaussagen? Ein alternativer Ansatz zur Berücksichtigung der Messunsicherheit bei Variablenprüfungen. *tm - Technisches Messen* 81 (2014), Nr. 9, S. 409 – 421
- [34] TRESKAL: *Kalibrierschein DP/17-013051. Innenmeßschraube mit 3-Linienberührung – Form C1* (2017)
- [35] VDA 5:2011: *Prüfprozesseignung. Eignung von Messsystemen, Mess- und Prüfprozessen. Erweiterte Messunsicherheit. Konformitätsbewertung*.
- [36] VDI 2221:1993-05: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*
- [37] VDI 2225-4:1997-11: *Konstruktionmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Bemessungslehre*
- [38] VDI/VDE 2600-1:2013-10: *Prüfprozessmanagement. Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozessen*
- [39] VDI/VDE 2617-7:2008-09: *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation*
- [40] WECKENMANN, Albert ; KNAUER, Martin ; GUBESCH, A.: *Prüfgerechte Toleranzen für Maß, Form und Lage*. 8. Symposium „Fertigungsgerechtes Konstruieren“. Schnaittach (1997), S. 61 – 68
- [41] YATES, JoAnne ; MURPHY, Craig N.: *Coordinating International Standards: The Formation of the ISO*. Cambridge (MA) : MIT Sloan Working Paper 4638-07 (2007), 38 S.

Eignung komplexer Prüfprozesse

Verfahren für den Nachweis der Prüfprozesseignung

Dipl.-Math. **Christoph Voigtmann**,
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Aachen;
Dr.-Ing. **Lijian Hou**,
Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach;
Dr.-Ing. **Michael Hernla**,
Unternehmensberatung Dr. Michael Hernla, Dortmund;
Dipl.-Ing. **Georg Reichel**, Robert Bosch GmbH, Reutlingen

Kurzfassung

Aus der ISO 9000, 9001 und der IATF 16949 kommt die Forderung nach einem Eignungsnachweis für Prüfprozesse. Der Artikel stellt das Vorgehen der VDI/VDE 2600-2 vor, welches einen aufwandsreduzierten Nachweis der Prüfprozesseignung ermöglicht. Das Blatt 2 erweitert damit das aufwandsreduzierte Vorgehen für den Eignungsnachweis der VDI/VDE 2600-1. Es werden speziell komplexe Prüf- und Messprozesse behandelt und die Modellbildung für diese Prozesse im Rahmen der Messunsicherheitsanalyse. Zum einen wird das mehrstufige Verfahren Schritt für Schritt erklärt, zum anderen werden Beispiele skizziert, an denen das Verfahren angewendet wurde.

1. Einleitung

Der Fertigungsmesstechnik kommt sowohl durch die voranschreitende Vernetzung der Produktionssysteme als auch durch die stetig steigenden Anforderungen an die Produktqualität eine wachsende Bedeutung als Lieferant für valide Daten über Produkte und Produktionsprozesse zu. Die durch den Einsatz von Messtechnik erhobenen Daten bilden nicht nur die Grundlage für die Prozessregelung und -optimierung, sondern auch im Fall der Qualitätsprüfung als Nachweis der Produktqualität. In welchem Maß diese Daten tatsächlich Wissen über die Prozesse und ihre Erzeugnisse darstellen, ist von der Messunsicherheit der eingesetzten Prüfprozesse abhängig. Ist diese im Vergleich zur Toleranz zu groß, ist der Prüfprozess nicht geeignet und die Messdaten nicht aussagekräftig. Die Folge sind falsche Entscheidungen bei der Prozessregelung und der Produktkonformität. Um dies zu vermeiden, fordern viele Normen und Richtlinien einen Eignungsnachweis für Prüfprozesse. Sowohl mit der Auswahl der geeigneten

Norm oder Richtlinie als auch mit der Durchführung von Eignungsnachweisen ist üblicherweise ein hoher Aufwand verbunden. Im VDI/VDE-GMA Fachausschuss 1.12 – „Eignung von Prüfprozessen“ werden daher Richtlinien entwickelt, die bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens unterstützen und die dabei helfen, den Aufwand für den Nachweis komplexer Prüfprozesse zu reduzieren.

2. Ausgangssituation

Eine Prüfung unterscheidet sich von der reinen Messung durch die zusätzliche Entscheidung darüber, ob die gemessenen Merkmalswerte innerhalb vorgegebener Spezifikationsgrenzen liegen. Um hierbei Fehlentscheidungen zu vermeiden, sind die genaue Kenntnis der Messunsicherheit des zugehörigen Messprozesses und der Abgleich der Messunsicherheit mit dem für die Prüfung vorgegebenen Grenzwert nötig. Die Messunsicherheit wird dazu im Verhältnis zur Toleranz betrachtet. Relevant für diesen Eignungsnachweis von Prüfprozessen sind daher auf der einen Seite Methoden und Vorgehensweisen zur Bestimmung der Messunsicherheit und auf der anderen Seite Normen und Richtlinien, welche Grenzwerte für die Eignung von Prüfprozessen festlegen.

Die Grundlage für die Ermittlung der Unsicherheit von Messprozessen ist der „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) [1]. Ein wesentliches Konzept des GUM ist die Bestimmung des mathematischen Zusammenhangs zwischen der Messgröße und den Eingangsgrößen. Anhand der Unsicherheiten der Eingangsgrößen wird eine Unsicherheitsbilanz aufgestellt und die kombinierte Unsicherheit des Messergebnisses nach dem Prinzip der Varianzfortpflanzung berechnet. Das Vorgehen des GUM ist die umfassendste und exakteste Vorgehensweise zur Bestimmung von Messunsicherheiten. Dies ist zugleich auch der Nachteil des GUM im Hinblick auf die Anwendbarkeit im industriellen Einsatz. Das Verfahren enthält keine Komponenten zur Aufwandsreduktion. Insbesondere die Komplexität der Modellbildung und das erforderliche Expertenwissen zur Durchführung des Vorgehens erlauben keine wirtschaftliche Anwendung [2]. Seit der Veröffentlichung des GUM wurde daher eine Vielzahl weiterer Normen und Richtlinien veröffentlicht, wie z. B. die ISO 22514-7, die DIN EN ISO 14253-2, die MSA, die VDA 5, die Ergänzungen des GUM, oder die Leitfäden des DAkkS-DKD, die die Methoden zur Abschätzung der Messunsicherheit und den Nachweis der Prozessfähigkeit konkretisieren und vereinfachen [3–8]. Für eine Übersicht über die Entwicklung der Methoden siehe auch [9–13].

Die Forderung nach einem Eignungsnachweis von Prüfprozessen kam zunächst in der Automobilindustrie auf, weshalb die zwei aktuell wichtigsten Richtlinien, die VDA 5 und die MSA, von Vertretern der Automobilhersteller erstellt wurden. Die beiden Richtlinien verfolgen sehr

praxisnahe Ansätze, bei denen die Messunsicherheit größtenteils experimentell ermittelt wird. Bei der Berechnung der kombinierten Unsicherheit nach dem Prinzip der Varianzfortpflanzung wird von einem linearen Zusammenhang ausgegangen, sodass die Berechnung der Sensitivitätskoeffizienten entfällt. Die Vorgabe des Modells hat den Vorteil einer einfacheren Anwendbarkeit und damit Praxistauglichkeit der Richtlinie. Bei der Anwendung der Vorgehensweise auf nichtlineare Messprozesse ist die Validität der Ergebnisse jedoch nicht mehr gewährleistet.

3. Defizite der aktuellen Verfahren

Mit den aktuell verfügbaren Verfahren ist es für einen Großteil der Prüfprozesse möglich, die Eignung nachzuweisen. Eine Herausforderung bleibt allerdings der Nachweis der Prüfprozesseignung, wenn kein standardisiertes metrologisches Modell anwendbar ist. In diesem Fall bezeichnet man den Prüfprozess als komplexen Prüfprozess. Die Gründe für die Nicht-Beherrschbarkeit von komplexen Prüfprozessen sind vielfältig. So können zum einen die Voraussetzungen für eine Anwendung des allgemeinen GUM Verfahrens nicht gegeben sein, da die nötige Modellgleichung nicht aufgestellt werden kann, oder es kann sein, dass die Modellbildung zu umfangreich ist, um in einem wirtschaftlich erträglichen Zeitaufwand hergestellt werden zu können. Beispiele hierfür sind Prüfprozesse mit zu vielen Einflussfaktoren, einem zu umfangreichem Messsystem, un stetigen Prüfobjektgeometrien oder der Unmöglichkeit zu Wiederholmessungen [14].

Zum anderen benötigen die Standardverfahren für den Eignungsnachweis eine Mindestanzahl an Wiederholmessungen, die vor allem bei der Kombination aus Variantenvielfalt und kleinen Stückzahlen, z. B. bei zerstörenden Prüfungen oder bei vorhandenen Inhomogenitäten innerhalb der Prüfkörper, nicht durchgeführt werden können. Vor diesem Problem stehen unter anderem Unternehmen im Bereich der industriellen Forschung und Entwicklung. Hier fehlt in den Normen und Richtlinien ein Verfahren, mit dem die mangelnde Wiederholbarkeit durch Erfahrungswissen, wie z. B. die Fähigkeit des Fertigungsprozesses oder die Eignung ähnlicher Bauteile, kompensiert werden kann.

Die Schwierigkeiten mit dem Thema Eignungsnachweis verdeutlicht eine Studie des Werkzeugmaschinenlabors, bei der über 2.000 Unternehmen zur Handhabung ihrer Prüfprozesse befragt wurden [14]. Bei der Frage nach den Gründen für das Fehlen von Eignungsnachweisen wird in sieben Prozent der Fälle die Komplexität der eingesetzten Prüfprozesse genannt, die dazu führt, dass ein Eignungsnachweis nach den gängigen Verfahren nicht durchgeführt werden kann. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen haben hiermit Schwierigkeiten, da hier die Ressourcen zur eigenständigen Entwicklung eines Verfahrens für den Eignungsnachweis nicht zur Verfügung stehen.

Im Zuge der Forschungsarbeiten des WZL wurde das Verfahren der VDI/VDE 2600 Blatt 2 an Beispielen aus dem Maschinen- und Anlagenbau, der Luftfahrt sowie der Automobil- und Bahnindustrie angewendet [16]. Dabei wurde deutlich, dass im Maschinen- und Anlagenbau aufgrund der kleinen Stückzahlen kaum Prozessfähigkeiten erhoben werden und damit ein impliziter Nachweis meist nicht möglich ist. Dafür ist hier in knapp 80% der Fälle eine Abschätzung der Eignung ausreichend. Den Gegensatz dazu bildet die Automobilindustrie, bei der allein schon knapp 80% der Prüfprozesse implizit nachgewiesen werden können. Ein Großteil der verbleibenden Eignungsprüfungen kann repräsentativ durchgeführt werden.

4. Umgang mit komplexen Prüfprozessen

Aktuell wird im Fachausschuss VDI/GMA 1.12 an der Richtlinie VDI/VDE 2600-2 [20] an einer Vorgehensweise zur Messunsicherheitsbestimmung komplexer Messprozesse gearbeitet. Ein Prüfprozess wird im Sinne dieser Richtlinie als komplex eingestuft, wenn für die Messunsicherheitsbestimmung ein mathematisches Modell des Prüfprozesses (bei Messprozessen basierend auf GUM) erstellt werden muss und gleichzeitig nicht auf vorhandene Modelle oder vereinfachte Verfahren (z. B. aus anderen Normen und Richtlinien) zurückgegriffen werden kann. Ziel der Richtlinie ist es, die Prüfprozesseignung auf Basis einer geeigneten Kombination aus exakter Modellierung und aufwandsreduzierender Komplexitätsverminderung nachzuweisen. Die Richtlinie richtet sich damit an Anwender in der Industrie, welche zwar ihre komplexen Prüfprozesse bewerten, dies aber mit limitiertem Aufwand und wenig Vorwissen durchführen müssen.

Die Richtlinie VDI/VDE 2600-2 ergänzt Schritt 4 (Ermittlung der Messunsicherheit) der Richtlinie VDI/VDE 2600-1 [15]. Die Richtlinie kann aber auch unabhängig von Blatt 1 als Systematik zur Bestimmung der Messunsicherheit von Messprozessen genutzt werden.

Eine Gesamtübersicht über das Vorgehen zur Bestimmung der Messunsicherheit ist in Abbildung 1 dargestellt. Das iterative Verfahren selbst unterteilt sich in 5 Schritte, welche denen des GUM ähnlich sind. Die Schritte sind:

1. Bestimmung der Einflüsse auf den Messprozess
2. Relevanzbestimmung für die Einflussfaktoren
3. Modellbildung/ Aufstellen der Messgleichung
4. Modellvalidierung
5. Aufstellen der Unsicherheitsbilanz und Bestimmung der Messunsicherheit

Die wesentlichen Ergänzungen zum GUM sind zum einen der Schritt „Relevanzbestimmung“ und zum anderen der Schritt „Modellvalidierung“. Durch eine erste Relevanzbestimmung und Gruppierung der einzelnen Einflussgrößen vor dem Schritt der Modellbildung wird bewusst die

Komplexität des Systems und damit der Aufwand zur Durchführung der weiteren Schritte reduziert. Für die Modellbildung selbst werden auf der einen Seite theoretische Überlegungen und Kenntnisse über die zugrunde liegenden physikalischen Zusammenhänge genutzt, wie beispielsweise die Methode der Signalfflussanalyse [18]. Auf der anderen Seite können nicht bekannte Zusammenhänge auch direkt aus Experimentaldaten, z. B. mittels der Methoden des Design of Experiments (DoE), ermittelt und in das Modell der Messung integriert werden. Eventuell begangene Fehleinschätzungen werden in der Phase der Modellvalidierung aufgedeckt und können durch ein erneutes Durchlaufen des Verfahrens korrigiert werden. Um die Anwendbarkeit zu demonstrieren, wurde das Verfahren aktuell auf vier Beispielmessprozesse innerhalb der Firmen der Mitarbeiter des Fachausschusses angewandt und bewertet. Die Ergebnisse wurden in die Richtlinie VDI/VDE 2600-2 [20] als Beispiele integriert, welche im November 2017 als Gründruck erscheint.

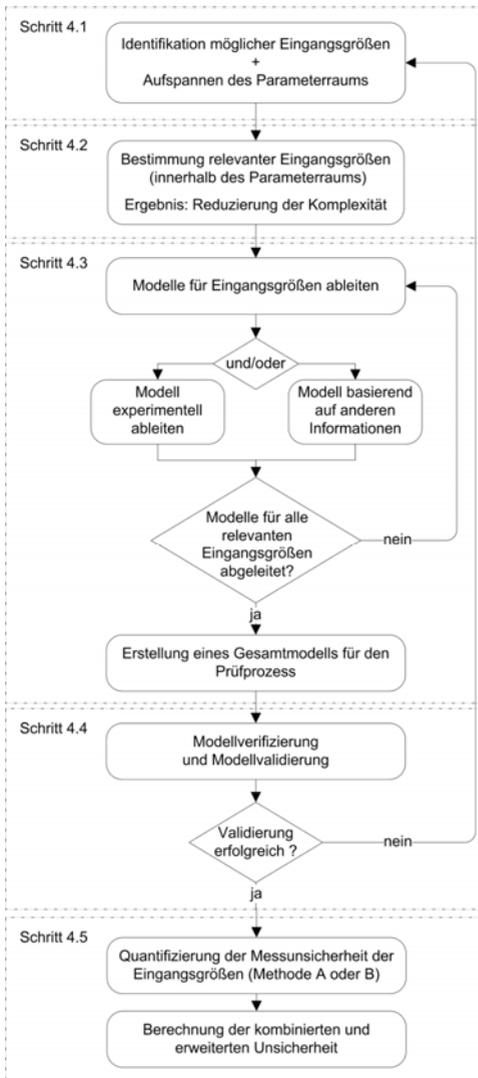


Bild 1: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Messunsicherheit nach VDI/VDE 2600-

5 Beispiele

In der Richtlinie sind fünf Beispiele dargestellt. Diese wurden so ausgewählt, dass sie unterschiedliche Problemstellungen, Komplexitätsgrade und unterschiedliche Methoden in der Anwendung abdecken. Die Beispiele sind:

a) Messunsicherheit bei der Bestimmung von Chipwiderständen

Anhand einer komplexen Widerstandsmessung wird die Entwicklung und Anwendung eines White-Box-Modells und die vollständige Modellierung eines Messprozesses gezeigt. Durch die Anwendung der 5M-Systematik zur Auswahl und Bewertung der Einflussgrößen werden die relevanten Eingangsgrößen ermittelt und anschließend nach dem GUM Methode B quantifiziert. Dabei werden systematischen Abweichungen des Messergebnisses durch den Einfluss des Messverfahrens sowie vorhandener Korrelationen berücksichtigt.

b) Messunsicherheit bei selbst gebauten Sensoren am Beispiel von DMS-Applikationen für Drehmomentmessung

Ein Beispiel für die einfache Anwendbarkeit des Verfahrens ist die Drehmomentmessung mit DMS-Sensoren. Die Bestimmung der Einflüsse auf die Messunsicherheit erfolgt aufwandsreduziert und die Ermittlung der Messunsicherheit entsprechend nach GUM Methode A mit Hilfe eines Black-Box Modells, bei dem wenig Erfahrungswissen durch den Anwender eingebracht werden muss.

c) Bestimmung der Messunsicherheit bei der Ermittlung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten

Die Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten dient als Beispiel für ein einfaches Modell für den linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Längenänderung. Es wird getestet, welches Modell am besten zu den Daten passt und anschließend der Einfluss der Korrelationen zwischen den Parametern der Modellfunktionen betrachtet. Auf Basis von Erfahrungswissen und Experimentaldaten wird eine Messunsicherheitsbilanz für die wesentlichen Eingangsgrößen aufgestellt.

d) Bestimmung der Messunsicherheit bei der Durchmesser-Messung mit einem Koordinatenmessgerät

Das Beispiel stammt aus der VDA 5 und dient dem Vergleich des vorgestellten Verfahrens mit einem bereits vorhandenen Verfahren. Behandelt wird die Vergleichsmessung mit einem kalibrierten Werkstück nach VDI/VDE 2617-8 [19]. Dazu wird ein Black-Box-Modell mit zusätzlichen Eingangsgrößen, u.a. die nicht korrigierte systematische Abweichung oder der Einfluss von Rauheit und Form aus zusätzlichen Wiederholungsmessungen, verwendet. Die Modellvalidierung entspricht der Entstehungsgeschichte der VDI/VDE 2617-8.

6 Zusammenfassung

Der Nachweis der Eignung von Prüfprozessen, wie er immer häufiger in Lieferantenbeziehungen gefordert wird, stellt aufgrund der Vielzahl und Komplexität der Prüfprozesse zunächst eine große Herausforderung dar. Die Arbeit im Fachausschuss der VDI/VDE-GMA gibt Anwendern wichtige technische Regeln an die Hand, die Aufwände für Eignungsnachweise drastisch reduzieren können. Wenn für komplexen Prüfprozesse ein Nachweis erbracht werden muss und vereinfachte Verfahren nicht zur Verfügung stehen, kann das Blatt 2 der Richtlinie in Zukunft wertvolle Hilfestellung geben. Um eine optimale Anwendbarkeit der Richtlinie in allen relevanten Industriezweigen zu gewährleisten wurden bereits 4 Beispiele mit der Richtlinie behandelt. Der Fachausschuss 1.12 lädt jedoch herzlich zum Besuch der viermal jährlich stattfindenden Sitzungen ein, um weitere Beispiele oder Herausforderungen aus der industriellen Anwendung zu diskutieren.

Literatur

- [1] JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf (accessed on 01.08.2015).
- [2] Schmitt R, Lose J, Harding M: The Management of Measurement Processes - key to robust and cost optimal production of high quality products. International Journal of Metrology and Quality Engineering 1(1):1–6, 2010.
- [3] ISO 22514-7: Statistical methods in process management: Capability and performance: Part 7: Capability of measurement processes, Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [4] DIN EN ISO 14253-2:2011 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); Deutsche Fassung. Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [5] MSA:2011 AIAG Measurement System Analysis (MSA). 4th ed, 2011
- [6] VDA Band 5 Verband der Automobilindustrie e.V. Prüfprozesseignung (Band 5). 2nd ed. VDA, Berlin, 2010.
- [7] 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, 2008. http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf (accessed on 01.08.2015).

- [8] JCGM 102:2011 Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Extension to any number of output quantities, 2011. http://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_102_2011_E.pdf (accessed on 01.08.2015).
- [9] Schmitt R, Nau M, Nisch S Challenges and methods of measurement process validation for machine integrated product inspection. ISMTII 2011 - International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. Daejeon. 2013
- [10] Kacker R, Sommer K, Kessel R Evolution of modern approaches to express uncertainty in measurement. Metrologia 44(6):513–29. 2007
- [11] Dietrich E, Schulze A Eignungsnachweis von Prüfprozessen: Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. 4th ed. Hanser, München. 2014
- [12] Dietrich E, Schulze A Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation: Mit 61 Tabellen. 7th ed. Hanser, München, Wien. 2014
- [13] Montgomery DC Statistical quality control: A modern introduction: International student version. 7th ed. Wiley; John Wiley [distributor], Hoboken, N.J., Chichester. 2012
- [14] Schmitt R, Lose J Praxisanforderungen an das Prüfprozessmanagement. QZ (Qualität und Zuverlässigkeit), 2011, Nr. 08, S. 28-31.
- [15] VDI/VDE 2600 Blatt 1 Prüfprozessmanagement - Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozessen. Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [16] Damm J Risikobezogene Aufwandsreduktion für Eignungsnachweise von Prüfprozessen in der Produktion. 1st ed. Apprimus-Verlag, Aachen. 2015
- [17] Schmitt R, Wiederhold M, Damm J, Harding M, Jatzkowski P, Ottone R Cost-efficient measurement system analysis for small-batch production: Selected, peer reviewed papers from the 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, (ISMTII 2013), July 1-3, 2013, Aachen, Germany. Measurement technology and intelligent instruments XI (Volume 613). 2013
- [18] Sommer K D, Siebert B R L Systematic approach to the modelling of measurements for uncertainty evaluation. Metrologia 43(2006) S.200–210.
- [19] VDI/VDE 2617-8:2017 (Entwurf) Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten Kenngrößen und deren Prüfung; Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten. Beuth Verlag Berlin
- [20] VDI/VDE 2600-2:2017 (Entwurf) Prüfprozessmanagement – Ermittlung der Messunsicherheit komplexer Prüfprozesse. Beuth Verlag Berlin

„Trennschärfe“: Innovatives Abnahmeverfahren für diskret prüfende Systeme

Dipl.-Ing. (FH) **Thomas Stöbel**, Dr.-Ing. **Johannes Weickmann**,
Robert Bosch GmbH, Bamberg

Kurzfassung

Aufgrund stetig steigender Qualitätsanforderungen bei gleichzeitig zunehmender Automatisierung werden in der industriellen Praxis vermehrt prüfende Systeme (Bildverarbeitung, Nondestructive testing etc.) zur Kategorisierung von Werkstückzuständen eingesetzt. Diese Prüfsysteme müssen auf Eignung untersucht (= „abgenommen“) werden. In dieser Veröffentlichung wird das „Trennschärfeverfahren“ – ein neuartiges Abnahmeverfahren für Prüfsysteme diskreter Merkmale – vorgestellt. Das Trennschärfeverfahren lindert wesentliche Defizite bestehender Abnahmeverfahren für Prüfsysteme diskreter Merkmale. Es zeichnet sich seinerseits durch einen reduzierten Prüfaufwand und Ressourcen-Effizienz bei gleichzeitig gesteigerter Aussagesicherheit aus. Es kann nicht nur für Bildverarbeitungssysteme, sondern für viele diskrete Prüfprozesse/-systeme mit n voneinander unterscheidbaren Kategorien angewandt werden. Im Hause Bosch hat sich das Trennschärfeverfahren in einigen Geschäftsbereichen bereits als Standard etabliert und wird daher bei der nächsten Revision in die zentrale Bosch Qualitätsrichtlinie „Heft 10 – Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen“ aufgenommen.

1. Motivation

Um die Belieferung des Kunden mit der erwarteten Produktqualität sicherzustellen, werden Rohstoffe, Halbzeuge, Fertigungsprozesse und Erzeugnisse hinsichtlich Spezifikationskonformität abgesichert. Dazu ist es nötig, die Eignung eingesetzter Mess- und Prüfsysteme zur Erfüllung Ihrer Aufgabe nachzuweisen, siehe auch [1] und [2]. Die Mess- und Prüfsysteme werden „abgenommen“.

Für kontinuierliche Merkmale (d.h. Maße, Gewichte etc.) werden sinnvollerweise Messsysteme verwendet. Anhand des Messergebnisses (Zahlenwert, Einheit und zugeordneter Messunsicherheit) wird dann die Spezifikationskonformität bezogen auf eine

Toleranz oder einen Grenzwert festgestellt (=Prüfaussage). Bekannte und in der Praxis bewährte Abnahmeverfahren für Messsysteme sind unter anderem:

- GRR Studie, siehe [3] und [4] Verfahren 2 und 3.
- Gauge capability test (cg, cgk), siehe [4] Verfahren 1.
- Qualität Messprozess Q_MP, siehe [5], [6].

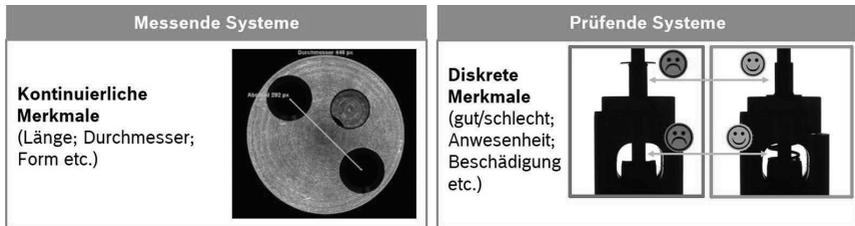


Bild 1: Links ein Beispiel für eine Messung, rechts ein Beispiel für eine diskrete Prüfung

Bei Prüfaufgaben, die eine binäre Klassifikation verlangen, wie etwa gut/schlecht-Aussagen, Anwesenheitskontrollen, die Beurteilung korrekter Montage etc., ermittelt ein Prüfsystem weder einen Zahlenwert, noch erfolgt der Abgleich eines Messwertes gegen eine Toleranz. Stattdessen wird die Prüfaussage direkt anhand diskreter (attributiver) Merkmale getroffen.

Bekannte Abnahmeverfahren für diskret prüfende Systeme sind unter anderem:

- κ -Methode (auch bekannt als „Kreuztabelle“ oder „Verfahren 7“), [3],[4].
- Methode der Signalerkennung (auch bekannt als „Verfahren 6“), [3],[4].
- Abnahme nach VDI2632-3, [7].

Wesentliche Defizite der Abnahmeverfahren für diskret prüfende Systeme sind:

- Keine „0-Fehler-Strategie“, da z.B. bei der κ -Methode bis zu 10% Schlupf zulässig sind.
- Hoher Abnahmeaufwand (z.B. Teileanzahl, Prüfdurchläufe etc.).
- Bedingte Anwendbarkeit; z.B. werden bei der Methode Signalerkennung 50 rückgeführt gemessene Teile benötigt. Dies führt in der Praxis häufig zu hohen Kosten.
- Die Verfahren ermöglichen oft keine quantitative Abstufung einer Klassifizierung.

Aus diesen Gründen wird die Prüfung diskreter Merkmale z.B. in VDI2632-3 [7], Bosch Heft 10 [4] und MSA [3] nicht empfohlen. Gleichzeitig wird die Prüfung mittels kontinuierlicher Merkmale präferiert. Häufig ist die Kundenforderung jedoch diskret beschrieben. Aus diesem Spannungsfeld heraus leitet sich der Bedarf für ein neues Abnahmeverfahren für diskrete Prüfungen ab, welches...

- ... die Vorzüge der Prüfung eines kontinuierlichen Merkmals bietet.
- ... praxistauglich (z.B. handhabbarer Prüfumfang, flexibel) ist.
- ... universell anwendbar ist.

Die im Folgenden beschriebene Abnahmemethode „Trennschärfe“ erfüllt diese Anforderungen.

2. Das Abnahmeverfahren „Trennschärfe“

2.1. Geltungsbereich

- Das Abnahmeverfahren Trennschärfe dient der Überprüfung der Eignung von Prüfsystemen (z.B. automatisierte Bildverarbeitungssysteme), indem die Eindeutigkeit binärer Prüfentscheide auf der Grundlage von gemessenen Merkmalen überprüft wird.
- Die Entscheide werden anhand eines Grenzmuster-Katalogs validiert.
- Das Verfahren darf nicht angewendet werden für kontinuierliche Merkmale mit Toleranzangabe (z.B. Maße).
- Die Trennschärfe ist auch auf diskrete Prüfaufgaben für $n > 2$ Klassifizierungen anwendbar. Die Erweiterung erfolgt analog dem nachfolgend beschriebenen Vorgehen. Beispiele hierzu geben die Autoren in [8].

2.2. Grundgedanke und Verfahrensschritte

Der Grundgedanke des Trennschärfeverfahrens ist beispielhaft in Bild 2 dargestellt: Man geht davon aus, dass diskrete Zustände (Klassen) über kontinuierliche Merkmale beschrieben werden können. Deren Werteräume liegen so weit auseinander, dass sie unter Berücksichtigung der Messunsicherheit und allgemeiner Abnahmeregeln (siehe z.B. ISO14253-1 [9]) eindeutig voneinander unterschieden („getrennt“) werden können.

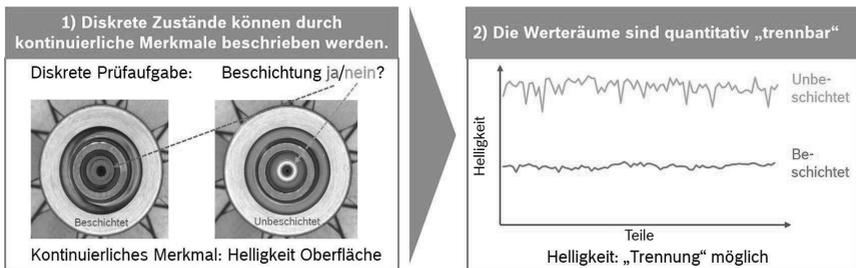


Bild 2: Beispielhafte Erläuterung des Grundgedankens des Trennschärfeverfahrens

Das Trennschärfeverfahren wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- Schritt 1. Trennscharfe Merkmale erarbeiten/auswählen (s. Kap. 2.3)
- Schritt 2. Stichproben beschaffen und messen (s. Kap. 2.4)
- Schritt 3. Obere / Untere Übereinstimmungsgrenze (OÜG/UÜG) festlegen (s. Kap. 2.5)
- Schritt 4. Bestimmen Wiederholpräzision für beide Merkmalausprägungen (s. Kap. 2.6)
- Schritt 5. Bewertung: Untersuchung auf Trennschärfe durchführen (s. Kap. 2.7)
- Schritt 6. Übertrag auf den Betrieb des Prüfsystems (s. Kap. 2.8)

2.3. Trennscharfe Merkmale erarbeiten

Um eine gestellte diskrete Prüfaufgabe lösen zu können, sind zuerst quantifizierbare Merkmale zu erarbeiten bzw. auszuwählen. Es sind nur solche Merkmale geeignet, deren Wertebereiche $W1$ und $W2$ für die beiden Zustände so weit voneinander entfernt sind, so dass eine trennscharfe Erfassung möglich wird. Einige Beispiele folgen weiter unten.

2.4. Stichproben (Prüflinge) beschaffen und messen

Basis des Verfahrens Trennschärfe sind repräsentative und eine statistisch hinreichende Anzahl an Serienteilen der betrachteten Klassen (z.B. GUT und SCHLECHT). Von diesen Stichproben sind die Zahlenwerte der Merkmale zu ermitteln. Hierbei sollten die Merkmalwerte der Teile möglichst über den potentiellen Werteraum verteilt sein. Die Werteräume $W1$ und $W2$ dürfen sich nicht überlappen (Bild 3), andernfalls kann dieses Merkmal nicht zur Unterscheidung herangezogen werden.

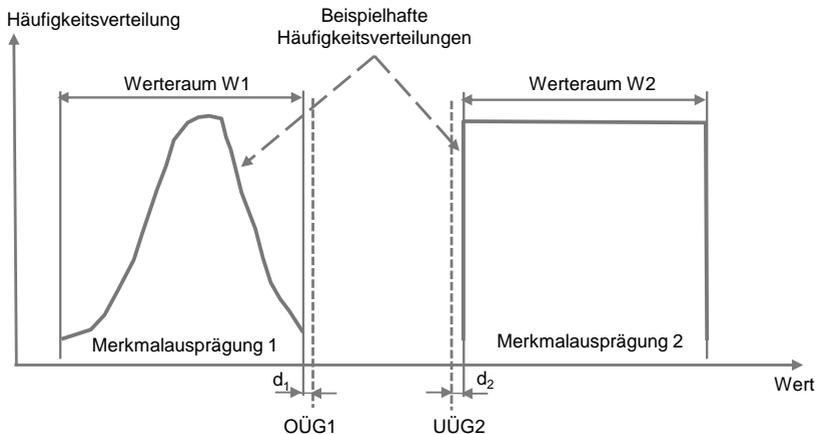


Bild 3: Skizzenhafte Darstellung des Trennschärfeverfahrens

Hinweise zur Wahl der Messteile:

- Für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist zwingend darauf zu achten, dass die Teile eindeutig (!) einer der Klassen zugeordnet werden können! Dies ist abzusichern, z.B. durch mehrere unabhängige und unvorbelastete Sichtprüfer. Bereits durch die falsche Klassenzuordnung eines einzigen Teils ist das Verfahren nicht mehr aussagekräftig.
- Weiterhin ist zu beachten, dass die ausgewählten Stichproben sowohl den Erfolg des Abnahmeverfahrens als auch die späteren Entscheidungsgrenzen im Prüfsystem beeinflussen. Es ist daher auf eine ausgewogene, ganzheitliche und realitätsnahe Beistellung von Abnahmeteilen zu achten. Die Teileauswahl ist zwischen Kunde, Lieferant und Qualitätssicherung abzustimmen.
- Die Serienteile müssen in einer ausreichenden Anzahl zur Verfügung gestellt werden. Es werden für die Abnahme mindestens 25 Teile je Klasse benötigt. In Ausnahmefällen kann angelehnt an die MSA GRR Studie [3] eine geringere Anzahl an Messobjekten akzeptiert werden. Die Gründe sind zu dokumentieren.

2.5. Übereinstimmungsgrenzen OÜG und UÜG festlegen

Die sogenannte obere Übereinstimmungsgrenze der Merkmalausprägung 1 (OÜG1) sowie die untere Übereinstimmungsgrenze der Merkmalausprägung 2 (UÜG2) müssen im Folgenden festgelegt werden. Diese beiden Grenzen versinnbildlichen den minimalen „Abstand“ zwischen beiden Merkmalausprägungen, Bild 3. OÜG1 und UÜG2 dürfen nicht zusammenfallen, müssen trennbar sein und dürfen keinen der Wertebereiche schneiden. Im Extremfall sind die jeweiligen „Randwerte“ der Werteräume zulässig, d.h. $d1 = d2 = 0$.
Hinweise zur Wahl der Übereinstimmungsgrenzen:

- Es hat sich bewährt, die Abstände $d1$ bzw. $d2$ der OÜG und der UÜG von den Grenzen der Werteräume $W1$ und $W2$ identisch zu wählen ($d1 = d2$), siehe Bild 3.
- Je weiter die beiden Grenzen auseinander liegen, umso besser ist die Trennschärfe.
- Je größer $d1$ und $d2$ sind, desto geringer ist im späteren Betrieb der Ausschuss.

2.6. Untersuchung der Wiederholpräzision für beide Merkmalausprägungen

Wurden Stichproben gezogen, deren Merkmalwerte sich gemäß Punkt 2.4. nicht überlappen, so wird mit der Ermittlung der Wiederholpräzision $EV = GRR$ [3] fortgefahren.

Die Stichproben der Klassen sind (im Normalfall) jeweils unter Wiederholbedingungen an definierten Messpunkten in je 2 Messreihen zu messen.

Anwendungshinweise:

1. Es werden die Kennwerte EV bzw. GRR ermittelt, nicht der Fähigkeitsindex %GRR.
2. Die Berechnung der Wiederholpräzision (EV bzw. GRR) kann nach der Methode ARM oder ANOVA durchgeführt werden.
3. Sollten keine 25 Teile je Merkmalgruppe zur Verfügung stehen, so ist die Anzahl der Wiederholmessungen unter Beachtung der Freiheitsgrade zu erhöhen, [4].
4. Sehr große Merkmalausprägungen (z.B. große Defekte) können zu einer erhöhten Streuung (hohes EV/GRR) der Messreihen führen. Dies führt zu einer Vergrößerung des Unsicherheitsbands, obwohl die Streuung der sehr großen Merkmalausprägungen (z.B. n.i.O.-Teile) in der Regel nicht kritisch ist, da die Werte sehr weit von den Übereinstimmungsgrenzen entfernt sind. Um eine solche nicht prüfrelevante Verschlechterung der GRR bzw. EV zu vermeiden, ergeht folgende Empfehlung: Teile nahe der Übereinstimmungsgrenze herausuchen und hiermit Untersuchung wiederholen.

2.7. Abnahme: Untersuchung auf Trennschärfe durchführen

In diesem Schritt wird bewertet, ob das Mess-/Prüfverfahren unter Berücksichtigung der OÜG und UÜG sowie der ermittelten Wiederholpräzision GRR bzw. EV trennscharf ist. Ausgehend von [9] sind an den Spezifikationsgrenzen die Messunsicherheiten vorzuhalten. Vereinfacht angenommen wären dies mindestens 2x GRR. Unter der Prämisse „gelebte 0-Fehler-Strategie“ werden im Hause Bosch je 4x GRR an den Grenzen vorgehalten, Bild 4.

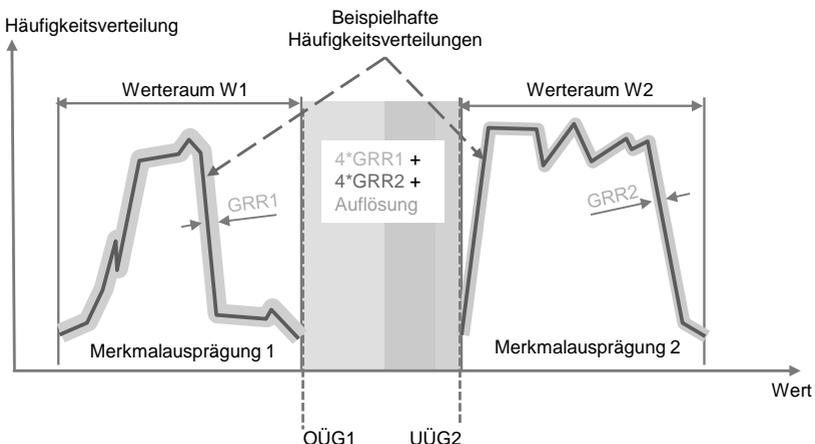


Bild 4: Fähigkeitsbewertung mittels Trennschärfeverfahren.

Ist folgende Forderung erfüllt, so gilt das Verfahren als trennscharf abgenommen:

$$|UÜG_2 - OÜG_1| \geq 4 * GRR_1 + 4 * GRR_2 + 1 * \text{Auflösung}_{\text{Messsystem}} \quad (1)$$

Gemäß [6] kann die Berücksichtigung der Auflösung entfallen, sofern gilt:

$$2 * EV_{\min} > \text{Auflösung}_{\text{Messsystem}} \quad (2)$$

mit $EV_{\min} = \min(EV_1, EV_2)$

Umgang mit N.i.O.-Ergebnissen

Wird das Trennschärfe-Kriterium nach (1) nicht erreicht, kann die Funktionsfähigkeit des Prüfsystems mit dem gewählten Merkmal nicht nachgewiesen werden. Diese Vorrichtung darf bis auf weiteres nicht für Serienmessungen herangezogen werden. Einzelne oder mehrere folgender Maßnahmen können Abhilfe schaffen:

- Prüfeinrichtung verbessern.
- Anderes Merkmal auswählen.
- Anpassen der Übereinstimmungsgrenzen (sofern $d1 > 0$ und $d2 > 0$).
- Wahl eines anderen Abnahmeverfahrens (inklusive der jeweiligen Defizite).

2.8. Übertrag auf das Prüfsystem

Im Folgenden wird beschrieben, wie mit Trennschärfe abgenommene Prüfsysteme in der Serie betrieben werden können. Der Normalfall ist die Übernahme der $OÜG_1$ und $UÜG_2$ als Entscheidungsgrenzen ins Prüfsystem.

Beispiel in Bild 5: Alle Werte unterhalb $OÜG_1$ gehören zur Merkmalausprägung 1 (Beispiel: GUT, „grüner Bereich“). Alle Werte oberhalb $UÜG_2$ gehören zur Merkmalausprägung 2 (z.B. SCHLECHT, „roter Bereich“, Ausschuss). Messwerte im Bereich zwischen $OÜG_1$ und $UÜG_2$ können keiner Klasse zugeordnet werden (gelber Bereich) und müssen als Pseudoausschuss abgewiesen werden. Mitunter kann für solche Teile eine Nachprüfung (z.B. fähige Sichtprüfung) vereinbart werden.

Falls das Prüfsystem nur eine Entscheidungsgrenze (= nur eine i.O./n.i.O.-Entscheidung) zulässt, so ist diejenige Übereinstimmungsgrenze als Entscheidungsgrenze im Prüfsystem zu wählen, die höchstens zu Pseudoausschuss (α -Fehler), aber keinesfalls zu Schlupf (β -Fehler) führt. Dies wäre im Beispiel Bild 5 die $OÜG_1$.

Eine nachträgliche Anpassung der Entscheidungsgrenzen im Prüfsystem (z.B. im Laufe des Betriebs) ist nur mit einer erneuten Abnahmeuntersuchung nach Trennschärfe mit den angepassten Grenzen zulässig.

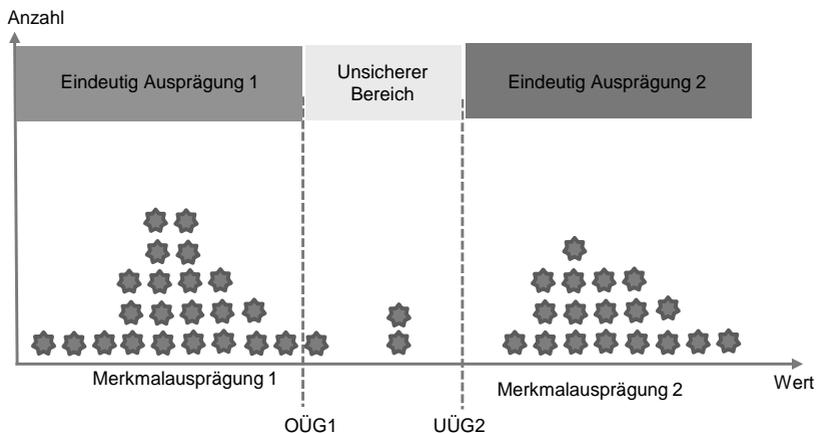


Bild 5: Beispielhafte Anwendung im Prüfsystem

Die Überwachung im produktiven Betrieb ist durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen. Im Hause Bosch wird hierzu die Messbeständigkeit in Anlehnung an [Heft 10] „Verfahren 5“ mit folgenden Eingriffsgrenzen EG durchgeführt:

$$EG = x_m \pm 3 \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{mit} \quad s = EV = GRR \quad (3)$$

n = Anzahl der Wiederholmessungen

x_m = Referenzwert eines Referenzteils

Darüber hinaus wird empfohlen, in einem sinnvollen Intervall Wiederholuntersuchungen der Trennschärfe als Prozessbestätigung durchzuführen.

3. Beispiele

Beispiel 1: Materialunterscheidung mittels Wirbelstromprüfung

In einer vollautomatisierten Fertigung sollen Halbzeuge für Einspritzdüsenkomponenten aus unterschiedlichen Stahllegierungen auf Vermischung zu 100% untersucht werden. Dies erfolgt mit Hilfe einer zerstörungsfreien Wirbelstromprüfung. In einer Voruntersuchung (Verfahrensschritt 1) wird zuerst aus den Sendefrequenzen und dem komplexen Empfangsspannungssignal (x -Wert – Realanteil, y -Wert – Imaginäranteil) der geeignete Spannungsanteil extrahiert. Als geeignetes kontinuierliches Merkmal wurde hier der Y -Imaginäranteil identifiziert, Bild 6.

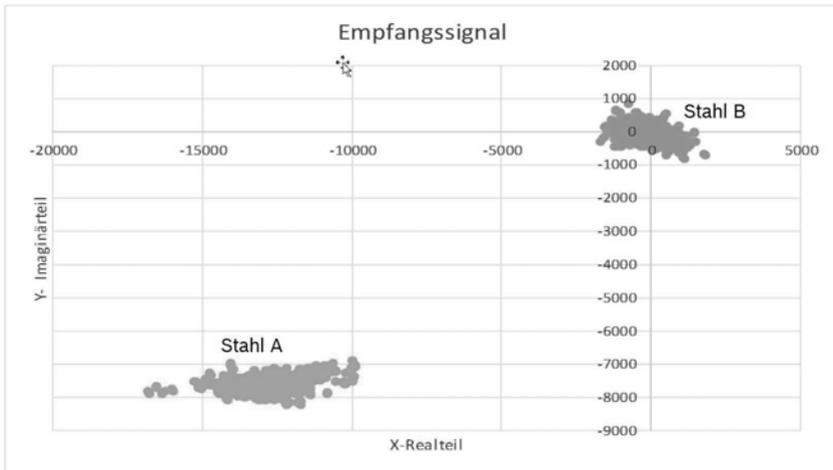


Bild 6: Schritt 1- Wahl des geeigneten kontinuierlichen Prüfmerkmals

Wie aus Bild 7 ersichtlich, war die Abnahme des Wirbelstromprüfsystems für diese Aufgabe mittels des gewählten Merkmals sehr gut durchführbar. Der Prozess wurde inzwischen um andere Stahllieferungen erweitert, wobei für jede Legierungsart ein geeignetes kontinuierliches Merkmal ermittelt wurde. Die Prozessabnahme erfolgte nach den gleichen Prozessschritten. Dies zeigt, dass das Trennschärfe-Verfahren auch für die Erkennung von mehr als zwei Zuständen (=Klassen) geeignet ist. Eine Prozessvalidierung aufgrund von Chargenschwankungen wird regelmäßig mit einer Wiederholuntersuchung durchgeführt.

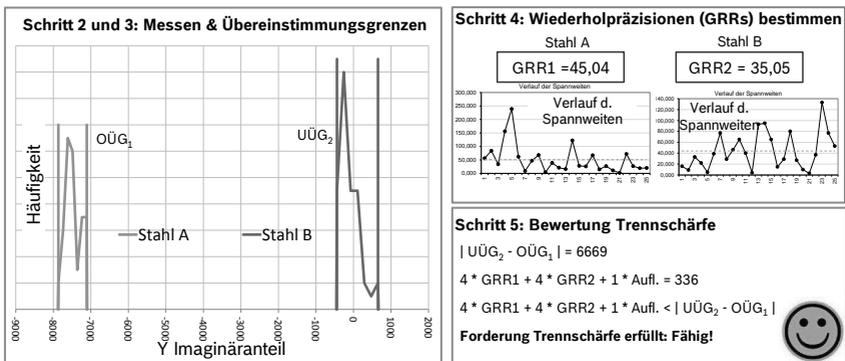


Bild 7: Abnahme des Wirbelstromprüfsystems mit Hilfe der Trennschärfe

Beispiel 2: Beurteilung Oberflächenbehandlung mittels Bildverarbeitung

Die Prüfaufgabe in diesem Beispiel umfasst die Verifizierung, ob eine Oberflächenbearbeitung am Schaft einer Einspritzdüse erfolgt ist, Bild 8. Da eine 100% Prüfung bei geringer Taktzeit gefordert ist, wird die Prüfung mittels automatisierter Bildverarbeitung durchgeführt. Die Herausforderungen dabei sind:

- Unterschiedliche Lichtverhältnisse, Verschmutzung/Alterung der Beleuchtung.
- Reflexionen durch Bearbeitungsstoffe (z.B. Öl).
- Reflexionen durch das Bauteil selbst.

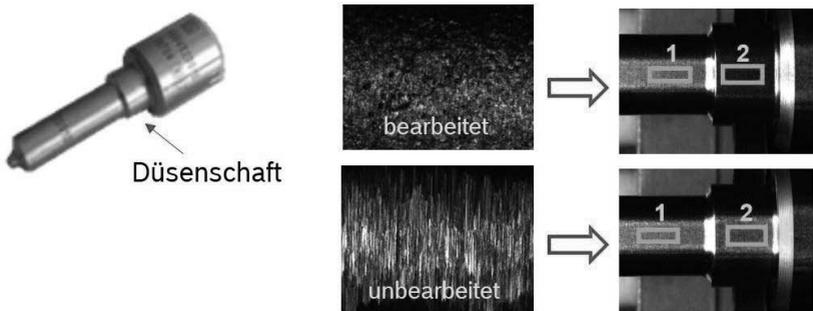


Bild 8: Prüfaufgabe (links) und Verfahrensschritt 1 – Wahl des Merkmals (rechts)

Im Verfahrensschritt 1 (s. Kap. 2.2) wurde als kontinuierliches Merkmal der Quotient des Grauwertes aus Messfenster 1 (Referenz unbearbeitet) und Messfenster 2 (Bearbeitungsbereich) definiert. Dies bietet auch bei Prozessschwankungen und im Laufe des Betriebs (z.B. driftende Beleuchtungsverhältnisse) eine gesteigerte Prozessrobustheit.

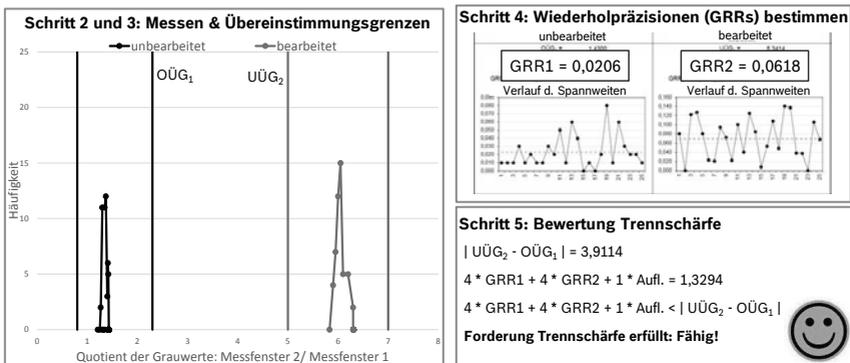


Bild 9: Auszug aus dem Trennschärfe-Abnahmeprotokoll des Bildverarbeitungssystems
 Bild 9 zeigt das weitere Vorgehen bis zur erfolgreichen trennscharfen Abnahme des Prüfsystems. Dieses läuft mit den gewählten Übereinstimmungsgrenzen seit mehreren Jahren mit 0% Pseudoausschuss und 0% Schlupf.

4. Bewertung und Ausblick

Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Aufsatzes ist das Trennschärfeverfahren seit über 5 Jahren bei Bosch im Einsatz, es wurden mehr als 50 Prüfsysteme in mehreren Werken trennscharf abgenommen. Das Trennschärfeverfahren hat sich bewährt und ist inzwischen auch bei wesentlichen Zulieferern von Mess- und Prüfsystemen als Standard akzeptiert.
 Grenzen der Anwendbarkeit: Das Trennschärfeverfahren darf nur angewendet werden, wenn alle in Bild 10 dargestellten Voraussetzungen vor Start der Systemabnahme erfüllt sind. In der Praxis sind die wesentlichen Herausforderungen, dass im Vorfeld entweder kein geeignetes „trennbares“ Merkmal erarbeitet wurde, oder hinreichend viele eindeutige Test- und Abnahmeteile fehlen.

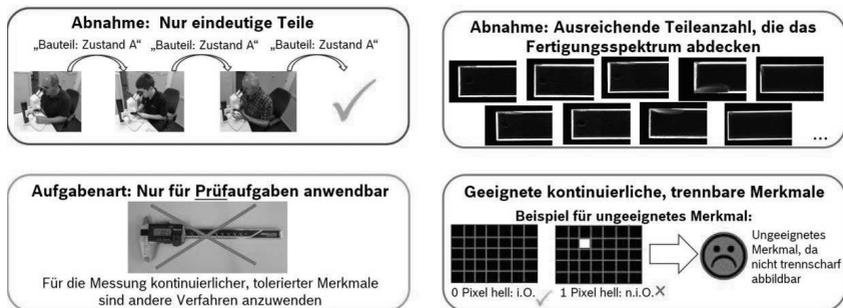


Bild 10: Voraussetzungen zur Anwendung des Trennschärfeverfahrens

Als Benefit reduziert das Trennschärfeverfahren wesentliche Defizite bei bestehenden Abnahmeverfahren für attributive/diskrete Merkmale und bietet seinerseits folgende Vorteile:

- Effizient: Abnahmeaufwand reduziert.
- Universell: Prüfung auf 2 bis n diskrete Zustände möglich (Aus Gründen des steigenden Aufwandes wird die Unterscheidung von mehr als 5 Zuständen jedoch nicht empfohlen).
- Universell: Eignung für die meisten diskreten Prüfaufgaben.
- Gelebte 0-Fehler Strategie (Qualität ↑).
- Geringerer Ausschussanteil (Kosten ↓).

- Statistische Aussage durch kontinuierliche Merkmale:
 - Prozessmonitoring ist möglich.
 - Stabilitätsüberwachung des Prüfsystems wird ermöglicht.

Aufgrund oben dargestellter Praxisbewährung ist vorgesehen, das Trennschärfeverfahren bei der nächsten Überarbeitung in die zentrale Bosch Qualitätsrichtlinie „Heft 10 – Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen“ [4] aufzunehmen. Langfristiges Ziel ist die weitere Verbreitung der Trennschärfe durch Verankerung in einer VDI-Richtlinie (z.B. 2632-3 [7]).

Literatur

- [1] DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015)
- [2] IATF 16949: Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie
- [3] AIAG Core Tools, Measurement Systems Analysis (MSA), 4th edition (2010)
- [4] Schriftenreihe Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe, Technische Statistik, Heft Nr. 10, Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen
- [5] ISO 22514-7:2012:09, Statistical methods in process management – Capability and performance, Part 7: Capability of measurement
- [6] VDA5, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Band 5, Prüfprozesseignung, 2. vollständig überarbeitete Auflage 2010, aktualisiert Juli 2011, Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Berlin, ISSN 0943-9412
- [7] VDI/VDE/VDMA 2632-Blatt 3: Industrielle Bildverarbeitung Abnahme klassifizierender Bildverarbeitungssysteme
- [8] Weickmann, J., Stößel, T.: BV-Abnahmeverfahren „Trennschärfe“: Prozesssichere Prüfung diskreter Merkmale neu gedacht, 4. VDI-Fachkonferenz „Industrielle Bildverarbeitung, 2017
- [9] DIN EN ISO 14253-1:2013-12, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen (ISO 14253-1:2013)

Die virtuelle Großserie

Planung und Steuerung der Einzel- und Kleinserienfertigung

Dr.-Ing. **Michael Wiederhold**, INFORM GmbH, Aachen;
M.Sc. **Jonathan Greipel**, WZL der RWTH Aachen

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine Vorgehensweise beschrieben, um Methoden der Statistischen Prozessregelung (SPC) in der Einzel- und Kleinserienfertigung anzuwenden.

Abstract

This paper describes a procedure for the application of Statistical Process Control (SPC) in small-batch and job production.

1. Fähige Fertigung – Die Herausforderung der kleinen Stückzahlen

Die industrielle Fertigung, insbesondere in Hochlohnländern, unterliegt einem Trend zu immer stärkerer Individualisierung von Produkten. Der daraus resultierenden *Mass Customization* schreiben REICHWALD und PILLER [1] folgende Eigenschaften zu: „Auf einem (relativ) großen Markt werden die individuellen Bedürfnisse jedes einzelnen Kunden befriedigt. Die Herstellung erfolgt zu einem für ein Standardprodukt vergleichbaren Preis.“

Dies zwingt Hersteller dazu, die klassische Großserienproduktion durch eine Fertigung in kleinen Serien oder sogar Einzelteilen zu ersetzen. Neben anderen wichtigen Bereichen, wie der Produktentwicklung oder der Produktionsplanung, hat dies auch Auswirkungen auf die Prozessüberwachung und -regelung und damit den Prüfaufwand.

In der klassischen Serienfertigung ist es unüblich, jedes Zwischen- und Endprodukt zu 100% zu prüfen. Stattdessen wird Stichprobenprüfung mit Methoden der Statistischen Prozessregelung (SPC, Statistical Process Control) kombiniert. Dabei wird mit Hilfe von Qualitätsregelkarten überwacht, ob ein Prozess sich stabil verhält, d.h. Lage und Streuung der Abweichungen vom gemessenen Wert zum Sollwert sich nicht mit der Zeit verändern. Mit Prozessfähigkeitsindizes wird geprüft, wie Lage und Streuung der Abweichungen im Verhältnis zu den Toleranzgrenzen stehen, womit eine Aussage über die zu erwartende Anzahl von Ausschussteilen getroffen werden kann. Um SPC anwenden zu können, sollten als Richtwert zumindest 50 Stichproben geprüft werden. [2]

In der Einzel- und Kleinserienfertigung besteht die Herausforderung, nicht genug Qualitätsdaten zur klassischen Anwendung von SPC zu haben. Daraus ergeben sich zwei Probleme: Hersteller können die Fähigkeit ihrer Produktionsmittel nur schwer anhand belastbarer Zahlen beurteilen und müssen bei der Produktionsplanung und im Vertriebsgespräch mit groben Schätzungen arbeiten. Außerdem sind sie zur 100%-Prüfung der Teile gezwungen.

2. Die virtuelle Großserie als neue Sichtweise auf die Einzel- und Kleinserienfertigung

Der klassische Ansatz der SPC geht davon aus, dass ein bestimmtes Merkmal eines bestimmten Produkts überwacht wird. Diese Herangehensweise ist aber unnötig limitierend, denn sie entspricht eher einer Statistischen *Produkt*-Regelung, als einer Statistischen *Prozess*-Regelung. Betrachtet man bspw. den Prozess des Drehens eines Durchmessers, so wird deutlich, dass es nicht darauf ankommt, *welcher Wellentyp* gedreht wird, sondern welche Prozessbedingungen herrschen (z. B. Material, Werkzeug, Nennmaß).

Unter dieser Voraussetzung fällt die Betrachtung von Einzel- und Kleinserien anders aus: Hier werden zwar häufig wechselnde Produkte gefertigt, doch die Arbeitsschritte, Fertigungsprozesse und resultierenden Merkmale sind oft ähnlich. In Bild 1 wird dies an einem Beispiel verdeutlicht. Dort sind 3 Wellen abgebildet, von denen bisher jeweils 30, bzw. 20 Stück gefertigt wurden. Anhand dieser Stückzahl wäre keine statistische Bewertung des Prozesses möglich.

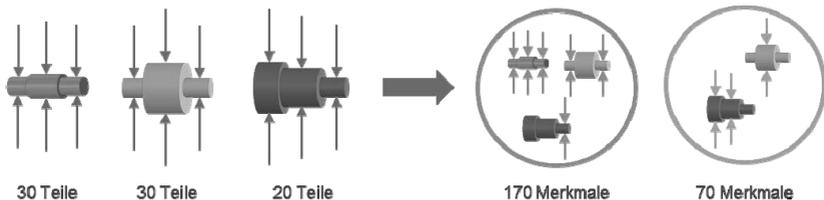


Bild 1: Beispielhafte Darstellung einer Kleinserienproduktion: Alle Wellen sind unterschiedlich, bestehen aber aus verschiedenen gedrehten Durchmessern, die zu ähnlichen Gruppen zusammengefasst werden können.

Stattdessen wird der Drehprozess betrachtet und geprüft, welche der 9 gefertigten Durchmesser ähnliches Prozessverhalten (insb. in Bezug auf Lage und Streuung zum Sollwert) aufweisen. Dies kann z.B. durch Expertenwissen, Simulation oder Experimente erreicht werden [3], in [4] wurde außerdem ein Algorithmus entwickelt, der auf Basis historischer Messdaten eine automatische Einteilung in Gruppen ähnlicher Merkmale vornimmt.

Bei der Überprüfung stellt sich im Beispiel heraus, dass alle „kleinen“ Durchmesser untereinander ein vergleichbares Prozessverhalten aufweisen und alle „großen“ untereinander ebenfalls. Nun werden die Messwerte der Merkmale innerhalb der Gruppen zusammengefasst zu 2 *virtuellen Großserien* mit einer für die Anwendung von SPC ausreichenden Datenbasis von 170, bzw. 70 Merkmalen. Für diese können nun die Stabilität überwacht und Fähigkeitskennwerte erhoben werden. Die so gewonnen Erkenntnisse können auf alle zukünftig zu fertigenden Merkmale übertragen werden, die in eine der beiden Gruppen fallen (Bild 2).



Bild 2: Verfahren zur Anwendung von SPC in der Einzel- und Kleinserienfertigung.

3. Umsetzung in der Praxis

Das Vorgehen wurde von den Autoren zuerst im Rahmen des EU-Forschungsprojekts *IFaCOM* von 2011 bis 2015 am WZL der RWTH Aachen entwickelt. Dort wurde es auf die Fertigung von Linearführungen für Werkzeugmaschinen bei der ALESAMONTI Srl, Italien, angewendet und zusätzlich in der Fertigung bei Heidelberger Druckmaschinen und GE Power Mannheim getestet. Dabei zeigte sich, dass mehr als 70% der Kleinserienbauteile zu virtuellen Großserien ausreichender Größe zusammengefasst werden konnten.

Im April 2017 hat die Vorgehensweise Einzug gehalten in die ISO 7870-8 [5]. Am WZL läuft derzeit das Nachfolgeprojekt *GriPS* (Softwaregestützte Gruppierung ähnlicher Merkmale für die Prozesslenkung bei kleinen Stückzahlen), in dem das Verfahren weiterentwickelt wird mit dem Ziel, eine Software-Unterstützung des Gruppierungsverfahrens zu ermöglichen.

- [1] Reichwald, R., Piller, F.: Interaktive Wertschöpfung. Open Innovation, Individualisierung und neue Formen der Arbeitsteilung. Wiesbaden 2006
- [2] Dietrich, E., Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen-und Prozessqualifikation. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG 2014
- [3] Wiederhold, M., Greipel, J., Schmitt, R., Ottone, R.: Gemeinsam sind sie stark - Statistical Process Control bei kleinen Stückzahlen. Qualität und Zuverlässigkeit: QZ 61 (2016) 3 S. 30-34
- [4] Wiederhold, M.: Clustering of Similar Features for the Application of Statistical Process Control in Small Batch and Job Production. Aachen: Apprimus Verlag 2017
- [5] ISO 7870-8: Control charts – Charting techniques for short runs and small mixed batches 2017

Erweiterte Anwendungsmöglichkeiten durch verbesserte Auswertung von MSA-Typ-3-Daten

Dipl.-Ing. **Georg Reichel**,
Robert BOSCH GmbH, Halbleiter- und Sensor-Testzentrum Reutlingen

1. Kurzfassung

Mit dem hier vorgestellten verbesserten Auswerteverfahren wird das bestehende Verfahren 3 zur Messgerätefähigkeitsanalyse auf einfache Weise aufgewertet, ohne dass dadurch eine eigenständige und neue Methode zur Messgerätefähigkeitsanalyse eingeführt und freigegeben werden muss. Es ist konform zum Verfahren 3 gemäß BOSCH-Heft 10.

Bei diesem neuen Auswerteverfahren für Daten des Verfahrens 3 wird ein zweifaktorielles Varianzanalysemodell (Faktoren: Prüflinge (PART) und Messdurchläufe (RUN)) ohne Messwiederholungen als ein Sonderfall vom Verfahren 2 angewendet. Unter Beibehaltung der bisherigen Datenaufnahme können so möglicherweise verdeckte bzw. schwer erkennbare zusätzliche Effekte über die Messdurchläufe mittels eines üblichen Signifikanztests sicher erkannt und separat ausgewiesen werden.

Für die praktische Anwendung eröffnet diese neue Auswertemethode erweiterte Anwendungsmöglichkeiten zur einfachen Erkennung und bewussten Untersuchung zusätzlicher Effekte. Gerade im Bereich der Absicherung der sehr komplexen Prüftechnik für kundenspezifische Schaltkreise sowie Sensoren mit teilweise sehr großen Datenmengen und einem hohen Freigabeaufwand ist eine solche verbesserte Auswertung ergänzend sehr sinnvoll. Der Informationszugewinn liefert außerdem ohne Mehraufwand und ohne Überforderung des Anwenders möglicherweise ein schnelleres und besseres Verständnis des Messprozesses.

2. Einleitung

Für den Eignungsnachweis von Prüf- und Messprozessen wird bei kontinuierlichen Merkmalen sehr oft das Verfahren 3 angewendet. Dabei ist die einfache Datenaufnahme ein großer Vorteil. Auf Grund des standardmäßig verwendeten Auswerteverfahrens muss jedoch vorher unbedingt geprüft werden, ob es einen möglichen zusätzlichen Einfluss auf den Messprozess geben kann, z.B. durch Bediener. Falls ein solcher zusätzlicher Einfluss nicht sicher ausgeschlossen werden kann, ist üblicherweise das Verfahren 2 anzuwenden. In einigen Fällen ist jedoch die Benutzung des Verfahrens 2 aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nur bedingt oder überhaupt nicht möglich.

Für diesen Fall, dass ein Effekt über die Messdurchläufe zu erwarten und nur das Verfahren 3 in Frage kommt, ist für die Separierung eines zusätzlichen Einflusses die Anwendung eines anderen anerkannten Analyseverfahren der Statistik erforderlich. Für die Analyse eines solchen zusätzlichen Einflussfaktors kommt ein zweifaktorielles Varianzanalysemodell ohne Messwiederholungen in Frage. Die Faktoren sind wie bisher die Prüflinge (PARTs) und neu die Messdurchläufe (RUNs). Dieses Modell ist ein Sonderfall bezogen auf die Auswertung gemäß dem bekannten Verfahren 2. Allerdings soll hier nicht ein Verfahren 2* eingeführt werden, sondern das Verfahrens 3 unter der strikten Beibehaltung der Vorgaben für die Datenaufnahme aufgewertet werden.

Natürlich kann auch das verbesserte Auswertemodell keine weiteren unbekanntem Streuungsanteile von der Reststreuung des verwendeten Modells trennen (z.B. Wechselwirkungen der Prüflinge und des Messablaufs oder fehlerhafte 1:1-Datenzuordnung). Die schnelle Erkennung solcher verdeckten Anteile erfordert modellunabhängig stets zusätzliche Maßnahmen. Obwohl dieses Thema in der Praxis immer wieder bei sehr großen Datenmengen (z.B. Merkmalsanzahl >500) von großer Bedeutung ist, kann es hier nur jeweils kurz behandelt werden.

Das nachfolgende Kapitel beschreibt detailliert die wichtigsten Berechnungsgrundlagen und stellt sie zusätzlich den einzelnen Größen des Standardauswerteverfahrens gegenüber. Für den Anwender ist neben dem bekannten EV-Wert eine zusätzliche Streuung RV (RUN-Variation) über die Messdurchläufe zu beachten und vor allem als Informationszugewinn zu interpretieren.

Eine wesentliche Grundvoraussetzung für die Akzeptanz des verbesserten Auswerteverfahrens ist die Gleichheit der GRR-Werte aus beiden Berechnungsmethoden. Im Kapitel 4 wird darauf als Konformitätsnachweis gegenüber Verfahren 3 BOSCH-Heft 10 eingegangen.

Zur Veranschaulichung werden im Kapitel 5 mehrere Beispiele im Vergleich zur Standardauswertung behandelt. Die Interpretation der Ergebnisse in Verbindung mit den Grenzen der Auswerteverfahren sowie nachgelagerten Überprüfungen sind sicherlich dabei von praktischem Interesse.

3. Grundlagen für Auswertungen nach Verfahren 3

Die nachfolgende Zusammenstellung gibt einen Überblick hinsichtlich der relevanten Berechnungen im Vergleich der beiden Auswerteverfahren. Verschiedene Berechnungsgrößen des verbesserten Verfahrens werden hier noch zusätzlich mit * gekennzeichnet. Mit dem Nachweis der Gleichheit von GRR und GRR* (siehe Kapitel 4) entfällt zukünftig diese unterschiedliche Darstellung. Die jeweiligen Formeln für die Vertrauensintervalle werden wegen ihrer Komplexität hier nicht dargestellt.

Tab. 3-1: Varianzanalysemodelle für Verfahren 3

Bezeichnung Kenngröße	verbesserte Auswertung BOSCH-Testzentrum		Berechnung BOSCH-Heft 10
Auswerte- modell	zweifaktorielle Varianzanalyse <u>ohne</u> Messwiederholungen je Prüfling		einfaktorielle Varianzanalyse <u>ohne</u> Messwiederholungen je Prüfling
Faktoren	- Prüflinge (PARTs) - durchgeführte Messreihen (RUNs)		- Prüflinge (PARTs)
Modell- gleichung	$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij}^*$		$x_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij}$
Streuungs- zerlegung	$TSS = SS_p + SS_R^* + SS_e^*$ $\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_{..})^2 = \\ k \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{x}_{..})^2 + \\ n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x}_{..})^2 + \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \bar{x}_{..})^2 \end{aligned} \right\} \begin{array}{c} \text{identische} \\ \text{Elemente!} \end{array} \left. \right\}$		$TSS = SS_p + SS_e$ $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_{..})^2 = \\ k \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{x}_{..})^2 + \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$
Summe Quadratabweichungen der Messdurchläufe	$SS_R^* = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x}_{..})^2;$ $DF_R^* = k - 1;$ $MS_R^* = SS_R^* / DF_R^*$		--
Summe Quadratabweichungen der Residuen	$SS_e^* = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \bar{x}_{..})^2$ $DF_e^* = (n-1)(k-1)$ $MS_e^* = SS_e^* / DF_e^*$		$SS_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$ $DF_e = n(k-1)$ $MS_e = SS_e / DF_e$
F-Test bzgl. Einfluss des Faktors „Runs“	$F_{emp} = \frac{MS_R^*}{MS_e^*}$ (Verwendung zur Modellvereinfachung)		--
Signifikanztest	Faktor „Run“ signifikant $F_{emp} \geq F_{tab DF_R^*, DF_e^*, \alpha}$	Faktor „Run“ nicht signifikant $F_{emp} < F_{tab DF_R^*, DF_e^*, \alpha}$	--
Equipment Variation EV	$EV^* = \sqrt{MS_e^*}$ (3-1)	Modellvereinfachung: $EV^* = \sqrt{\frac{SS_e^* + SS_R^*}{n(k-1)}}$ (3-2)	$EV = \sqrt{MS_e}$
Run Variation RV	$RV^* = \sqrt{\frac{MS_R^* - MS_e^*}{n}}$ (3-3)	$RV^* = 0$	Auf Grund des Modells nicht bestimmbar!
GRR	$GRR^* = \sqrt{EV^{*2} + RV^{*2}}$ (3-4)		$GRR = EV$

Legende:

x_{ij} Messwerte i, j : $i=1, \dots, n$: Prüflingsindex; $j = 1, \dots, k$: Index über die Messdurchläufe

n Anzahl n der verwendeten Prüflinge (PARTs)

k Anzahl k der Messdurchläufe (RUNs)

$\bar{x}_{..}, \mu$ $\bar{x}_{..} = \frac{1}{nk} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n x_{ij} = \frac{1}{nk} x_{..}$ $x_{..} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n x_{ij}$ Gesamtmittelwert

\bar{x}_i $\bar{x}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k x_{ij} = \frac{1}{k} x_{i.}$ $x_{i.} = \sum_{j=1}^k x_{ij}$ Prüflingsmittelwert i über alle Messdurchläufe

\bar{x}_j $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} = \frac{1}{n} x_{.j}$ $x_{.j} = \sum_{i=1}^n x_{ij}$ Gesamtmittelwert des Messdurchlaufs (RUN) j

α_i Einfluss des Prüflings (PART) i im Modell

β_j Einfluss des Messdurchlaufs (RUN) j im Modell

e_{ij}, e^*_{ij} im jeweiligen Modell die zufällige Abweichung (Modellfehler)

SS Summe der quadratischen Abweichungen (**S**um of **S**quares)

DF Anzahl der Freiheitsgrade (**D**egrees of **F**reedom)

MS Mittelwert der quadratischen Abweichungen (**M**ean of **S**quares) bezogen auf DF

Durch die automatische Erkennung eines nichtsignifikanten Einflusses über die Messdurchläufe wird das verbesserte Modell automatisch komplett in das bekannte Standardauswertemodell überführt. Im anderen Fall ergibt sich eine Aufteilung des GRR^* -Werte in einen RV^* -Anteil und einem besser geschätzten EV^* -Wert (siehe Simulationen im Kapitel 5.2). Auch bei den Vertrauensbereichen der einzelnen Größen ergibt sich modellbedingt ein Unterschied zur Standardverarbeitung (siehe ausführliches Beispiel Kapitel 5.1).

4. Konformitätsbetrachtung zum Standardauswerteverfahren

Für die Akzeptanz des verbesserten Auswerteverfahrens wird für eine Konformitätsaussage zur bestehenden Auswertung beim Verfahren 3 die zuvor postulierte Gleichheit der GRR -Werte nachgewiesen.

Tab. 4-1: Nachweis der Gleichheit beider GRR-Ergebnisse

	verbesserte Auswertung BOSCH-Testzentrum	Berechnung BOSCH-Heft 10- Verfahren
Ausgangsformeln mit Einsetzungen	$GRR^{*2} = EV^{*2} + RV^{*2}$ $GRR^{*2} = MS^*_e + \frac{MS^*_R - MS^*_e}{n} = \frac{MS^*_R + MS^*_e(n-1)}{n}$	$GRR^2 = EV^2$ $GRR^2 = MS_e$
Einsetzen der SS-Anteile	$GRR^{*2} = \frac{SS^*_R + SS^*_e}{n(k-1)}$	$GRR^2 = \frac{SS_e}{n(k-1)}$
Ersetzen von SS^*_R , SS^*_e bzw. SS_e durch TSS und SS_p	$GRR^{*2} = \frac{TSS - SS_p}{n(k-1)}$	$GRR^2 = \frac{TSS - SS_p}{n(k-1)}$

Auf Grund der identischen Terme auf der rechten Seite der jeweiligen quadrierten GRR-Formeln ist somit der Nachweis für die Gleichheit beider GRR-Werte erbracht.

Aus der zuvor durchgeführten Untersuchung müssen die Anteile $SS^*_R + SS^*_e$ und SS_e identisch sein. In verkürzter Form wird nachfolgend deren Nachweis erbracht. Er ist nicht zwingend erforderlich und wird zusätzlich als weitere allgemeine Bestätigung durchgeführt. Ausgangspunkt sind wieder die o.g. Formeln zur Streuungserlegung beider Modelle.

Tab. 4-2: Nachweis der Gleichheit der Anteile $SS^*_R + SS^*_e$ und SS_e

verbesserte Auswertung BOSCH-Testzentrum	Berechnung BOSCH-Heft 10-Verfahren
$TSS = SS_p + SS^*_R + SS^*_e$	$TSS = SS_p + SS_e$
Reduktion auf folgende Hypothese auf Grund der Gleichheit von TTS und SS_p : $SS^*_R + SS^*_e = SS_e$	
Einsetzen und Ausmultiplizieren der jeweiligen SS-Anteile: $SS^*_R + SS^*_e =$ $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 - 2 \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x}_{..}) \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j - \bar{x}_i + \bar{x}_{..})$ Der Term $\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j - \bar{x}_i + \bar{x}_{..})$ ist gleich Null! $SS^*_R + SS^*_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 - 2 \sum_{i=1}^n (\bar{x}_j - \bar{x}_{..}) * 0$	$SS_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$
Zusammenfassung: $SS^*_R + SS^*_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 = SS_e$	

Mit der Übereinstimmung der relevanten Quadratsummenabweichungen $SS'_R + SS'_e$ und SS_e sowie den identischen GRR-Berechnungsformeln ist die Gleichheit der GRR-Werte bei den beiden Auswerteverfahren auch mathematisch nachgewiesen. Daraus ergeben sich auch gleiche EV-Werte bei nichtsignifikantem Einfluss über die Messdurchläufe. Erwartungsgemäß erfolgt im anderen Fall eine Aufspaltung der Streuungsanteile in einen RV-Anteil und einen dann besser geschätzten EV-Wert. Auf dieser Nachweisbasis kann das verbesserte Auswerteverfahren als konform zum Standardauswerteverfahren nach BOSCH-Heft 10 betrachtet werden.

Zukünftig erfolgt keine Unterscheidung mehr zwischen GRR und GGR'.

5. Beispielauswertungen für Daten zum Verfahren 3

In den nachfolgenden Abschnitten werden verschiedene Beispiele vorgestellt. Mit dem ersten Beispiel werden ausführlich die Ergebnisse der beiden Berechnungsmethoden beschrieben. Ein weiteres Unterkapitel befasst sich mit verschiedenen Simulationsvarianten, die möglicherweise für die Praxis interessant sein könnten.

5.1. Vergleichsrechnungen mit Referenzdaten

An Hand des folgenden Beispiels mit vier simulierten Referenzmessreihen von 25 Prüflingen werden die Ergebnisse beider Verfahren vorgestellt. Die Korrektheit der hier durchgeführten EXCEL-Berechnungen wurde für das Standardverfahren mit der Auswertesoftware „solara“ der Firma Q-DAS bestätigt.

Tab. 5-1: Referenzmessdaten als Beispiel für Verfahren 3 (Maßeinheit mA)

PART#	Mess_1	Mess_2	Mess_3	Mess_4	PART#	Mess_1	Mess_2	Mess_3	Mess_4
1	7,609	7,691	7,550	7,435	16	7,342	7,487	7,455	7,127
2	7,205	7,286	7,253	7,100	17	7,315	7,402	7,070	7,091
3	7,124	7,398	7,179	7,153	18	7,976	8,050	7,860	7,780
4	7,544	7,731	7,460	7,368	19	7,304	7,440	7,266	7,165
5	7,422	7,592	7,472	7,299	20	7,360	7,583	7,426	7,305
6	7,498	7,821	7,569	7,301	21	7,791	7,833	7,760	7,622
7	7,230	7,408	7,293	7,063	22	7,489	7,622	7,535	7,405
8	7,351	7,439	7,309	7,230	23	7,504	7,555	7,387	7,230
9	8,141	8,115	8,092	7,896	24	7,430	7,752	7,534	7,382
10	7,358	7,637	7,467	7,244	25	8,028	8,208	7,922	7,762
11	7,291	7,475	7,346	7,138					
12	7,756	8,020	7,696	7,741					
13	6,900	7,152	6,870	6,804					
14	7,574	7,712	7,701	7,412					
15	7,030	7,211	7,035	6,841					

Mit den nachfolgenden verschiedenen Diagrammen – Box-Plots per Prüfling (PART) / Boxplots per Messdurchlauf (RUN) / Normal-Probability-Plot je Messdurchlauf (vergleichbar mit Wahrscheinlichkeitsnetz) – werden die oben genannten Daten in einfacher Weise veranschaulicht.

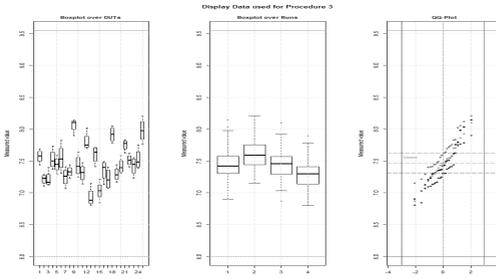


Bild 5-1: Darstellung der Referenzdaten zum Verfahren 3

An Hand des mittleren Boxplot-Diagramms sowie des rechten Normal-Probability-Plots sind deutliche Unterschiede zwischen den Messdurchläufen unschwer zu erkennen. Die Anwendung des Auswerteverfahrens 3 nach BOSCH-Heft 10 wäre bei den hier erwarteten Unterschieden unzulässig. Die Datenaufnahme müsste gemäß dem Verfahren 2 wiederholt werden, falls das technisch überhaupt möglich ist.

A) Auswertung auf Basis einer einfaktoriellen Varianzanalyse (Standardverfahren):

Tab. 5-2: Ergebnisse der Varianzanalyse nach BOSCH-Verfahren 3

MSA-V3-ANOVA Standard		SS	DF	MS		F-Test emp.	F-Test tab.	Annahme	
Faktor „Prüfling“ (PART)	SS _P	7,459	24	0,311	MS _P	MS _P / MS _e	15,893	1,663	0,0%
Messgerät (Reststreuung)	SS _e	1,467	75	0,020	MS _e				
Gesamtstreuung	TSS	8,926	99	0,090	MS _{total}				

Der enthaltene F-Test bzgl. des Faktors „PART“ bedeutet, dass die Mittelwerte der Prüflinge untereinander nicht gleich sind. Die Annahmewahrscheinlichkeit der Null-Hypothese H₀ „Gleichheit der Prüflingsmittelwerte“ ist hier 0,0%. Dieser statistische Test zeigt, dass eine wichtige Bedingung für das Verfahren 3, nämlich die Verwendung unterschiedlicher Prüflinge, eingehalten wurde.

B) Auswertung auf Basis einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (verbessertes Verfahren):

Tab. 5-3: Ergebnisse der erweiterten Varianzanalyse nach dem Testzentrum-Verfahren

MSA-V3-ANOVA Testzentrum		SS	DF	MS			F-Test emp.	F-Test tab.	Annah- me
Faktor „Run“	SS _R	1,196	3	0,399	MS _R	MS _R / MS _e	105,924	2,732	0,0%
Faktor „PART“	SS _P	7,459	24	0,311	MS _P	MS _P / MS _e	82,593	1,669	0,0%
Messgerät (Reststreuung)	SS _e	0,271	72	0,004	MS _e				
Gesamtstreuung	TSS	8,926	99	0,090	MS _{total}				

Auch hier werden Signifikanztests durchgeführt. Der F-Test über den Faktor „PART“ wurde zuvor bereits erwähnt. Der zweite F-Test bzgl. der Gleichheit der Mittelwerte über die Messdurchläufe – Faktor „Run“ – führt ebenfalls zur Ablehnung von deren Null-Hypothese. Eine Modellvereinfachung kann somit hier nicht vorgenommen werden.

Die nachfolgende Tabelle ist eine Zusammenfassung und weitere Aufbereitung der Ergebnisse von beiden Auswerteverfahren ergänzt hinsichtlich der jeweiligen Vertrauensintervalle, einem Bestimmtheitsmaß R^2 und dem Test auf Normalverteilung der Residuen.

Tab. 5-4: Zusammenfassender Vergleich der Auswertungen

Kenngroße	Standard- verfahren	Verbessertes Verfahren	Bemerkung
Bestimmtheitsmaß R^2 nach McKelvey & Zavoinas ¹	0,8357	0,9696	bessere Modellanpassung durch das verbesserte Verfahren
Shapiro-Wilk-Test ² auf Normalverteilung der Residuen	W = 0,9831 p = 0,2318	W = 0,9935 p = 0,9176	→ Annahmewahrscheinlichkeit
EV	0,1398	0,0613	modellbedingter Unterschied!
EV-Vertrauensgrenze			
- unten	0,1206	0,0528	modellbedingte Unterschiede!
- oben	0,1664	0,0733	
RV	--	0,1257	
RV-Vertrauensgrenze			
- unten	--	0,0679	
- oben	--	0,4720	
Kenngroße	Standard- verfahren	Verbessertes Verfahren	Bemerkung
GRR	0,1398	0,1398	
GRR-Vertrauensgrenze			
- unten	0,1206	0,0866	modellbedingte Unterschiede!
- oben	0,1664	0,4775	
%GRR	23,64%	23,64%	

Wie erwartet sind die GRR- und natürlich auch die %GRR-Werte identisch. Das verbesserte Auswertemodell liefert gemäß dem Bestimmtheitsmaß R^2 eine bessere Modellanpassung. Auch die Residuen entsprechen besser einer Normalverteilung gemäß dem hier angewandten Shapiro-Wilk-Test.

5.2. Simulationen verschiedener Einsatzfälle mit Vergleichsrechnung

Es wäre wünschenswert aus einer Vielzahl von praktischen Beispielen repräsentative Einfälle hier darzustellen. Da dies kaum zu erfüllen ist, wurden die wichtigsten Einflüsse basierend auf den fünf 5M-Hauptkomponenten – Mensch – Messobjekt – Messgerät – Methode – Mittelwert – zuvor systematisch zusammengestellt. Ausgesuchte Fälle werden nachfolgend basierend auf Simulationen (Basis: R-Software [5]) veranschaulicht.

¹ siehe Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Pseudo-Bestimmtheitsma%C3%9F#McKelvey_26_Zavoinas_R2

² siehe Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Shapiro-Wilk-Test>

Für diese virtuelle Messung wird aus einer sehr großen Prüflingsmenge mit stochastisch erzeugten und normal verteilten Daten eine definierte Anzahl zufällig gezogen. Diese extrahierte Datenmenge erhält dann entsprechend den gewünschten Messprozesseigenschaften (Wiederholstreuung, Drift, Ausreißer, Versatz usw.) wiederum zufällige Daten überlagert. Mit diesen bekannten Vorgabeeigenschaften erfolgt dann die Auswertung durch die beiden Auswertverfahren und deren Visualisierung.

Die nachfolgenden Darstellungen enthalten folgende Informationen:

- Box-Plot über die Prüflinge zur einfachen Visualisierung der Unterschiede zwischen den Messdurchläufen
- Box-Plot über die Messdurchläufe
- Normal-Probability-Plot (vergleichbar mit Wahrscheinlichkeitsnetz) gruppiert je Messdurchlauf
- je ein Normal-Probability-Plot der Residuen pro Auswertverfahren
- Zusammenfassung der Ergebnisse u.a. mit Ausgabe des EV-Vorgabewertes sowie der Wahrscheinlichkeit der Varianzgleichheit über die Runs (Levené-Test)

Simulationsergebnisse für ausgewählte Varianten:

1.) Variante mit unterschiedlichen Wiederholstreuungen und keinem Offset zwischen den Messdurchläufen

Vorgabewert für Wiederholstreuungen: 1.Run: 0,333 / 2.Run: 3,333

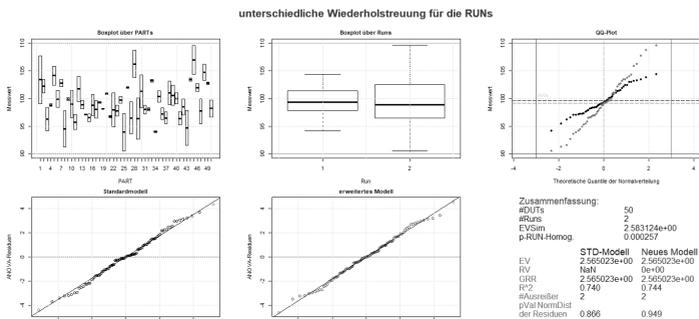


Bild 5-2: Simulation mit unterschiedlichen Wiederholstreuungen und ohne Offset

Ein solch gravierender Unterschied der Wiederholstreuungen ist hier bereits mit Hilfe der Grafiken gut erkennbar. Jedoch können beide Auswertverfahren prinzipbedingt die Vor-

gabewerte nicht extrahieren. Die geringe Wahrscheinlichkeit von 0,03% (Levené-Test) für die Gleichheit der Varianzen signalisiert hier deutliche Unterschiede. Allerdings sind kleinere Varianzunterschiede statistisch kaum feststellbar.

2.) Variante mit identischen Wiederholstreuungen und einer Drift beim zweiten Run

Vorgabewert für Wiederholstreuung in jedem Run: 0,333

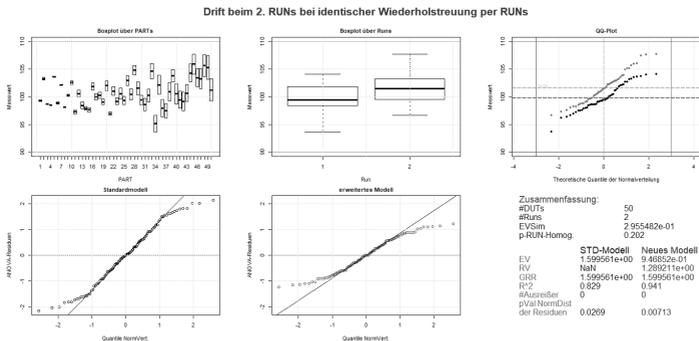


Bild 5-3: Variante mit identischen Wiederholstreuungen sowie Drift beim 2. Messdurchlauf

Der von der Simulation hinterlegte Wiederholstreuungswert von 0,333 wird wie erwartet von beiden Auswerteverfahren nicht korrekt bestimmt. Der erhebliche RV-Anteil beim verbesserten Auswerteverfahren signalisiert zwar einen Unterschied zwischen den Messdurchläufen. Jedoch erst mittels dem Boxplot über die Prüflinge ist der Drifteffekt erkennbar.

3.) Mehrere Messdurchläufe mit erhöhter Wiederholstreuung bei einem Durchlauf
 Vorgabewert für Wiederholstreuungen: 0,333 / 1,667

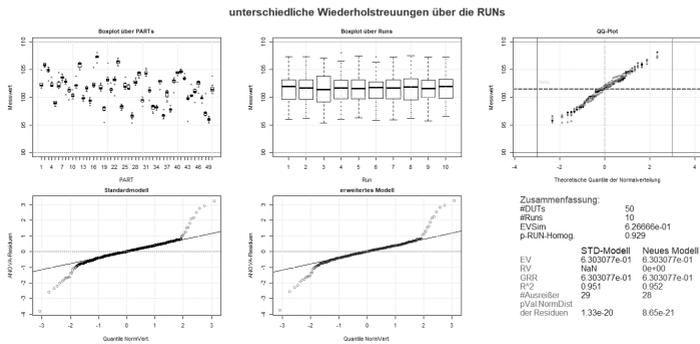


Bild 5-3: Mehrere Messdurchläufe mit einem auffälligen Messablauf

Die verwendeten Plots und auch der Levené-Test können den auffälligen Messdurchlauf nicht hervorheben. Erst nach einer Aufbereitung der Residuen per Messdurchlauf ist der auffällige dritte Messdurchlauf deutlich zu erkennen.

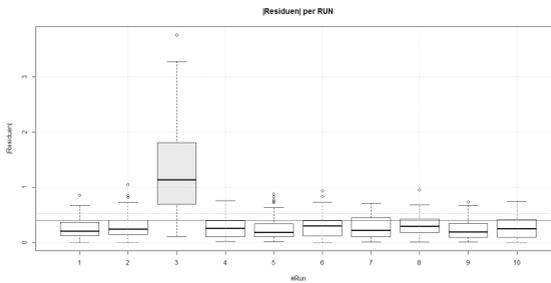


Bild 5-4: Aufbereitete Residuen mehrerer Messdurchläufe mit dem auffälligen 3. Durchlauf

Für die Absicherung von vielen parallelen und gleichartigen Messstellen bei Messprozessen für elektronische Bauteile und Sensoren ist ein solcher Versuchsplan kombiniert mit dem Verfahren 1 für alle Messstellen sehr sinnvoll. Die sonst übliche separate Einzelabsicherung für jede Messstelle wäre mit den üblichen Verfahren viel zu aufwendig.

6. Zusammenfassung

Mit dem hier beschriebenen verbesserten Auswerteverfahren für Messgerätefähigkeitsanalysen vom Typ 3 wird das bestehende Standardauswerteverfahren aufgewertet. Mit dem erweiterten zweifaktoriellen Varianzanalysemodell ohne Messwiederholungen kann ein zusätzlicher Einflussfaktor leicht erkannt und separat ausgewiesen werden. Bei auffälligen Unterschieden zwischen den Messdurchläufen ergibt sich eine bessere Schätzung des EV-Wertes sowie ein zusätzlicher RV-Anteil (RV: RUN Variation). Falls durch den internen Signifikanztest statistisch gleiche Messdurchläufe ermittelt wurden, vereinfacht sich das verbesserte Auswertemodell zum Standardauswertemodell. In jedem Fall sind die GRR-Ergebnisse bei beiden Auswerteverfahren identisch.

Das verbesserte Auswertemodell für Daten nach Verfahren 3 ist im Wesentlichen konform zum Standardauswerteverfahren. Die Einführung und Freigabe eines neuen Verfahrens ist somit nicht erforderlich.

Mit diesem verbesserten Auswertemodell lassen sich nun die Anwendungsfälle einfach erweitern. Die Entwicklung und Freigabe von Sonderlösungen ist für die gezielte Untersuchung von einem zusätzlichen Einfluss über die Messdurchläufe gar nicht erst erforderlich.

7. Literatur

- [1] Robert BOSCH GmbH, C/QMM (Hrsg.) (05/2010): Qualitätssicherung in der BOSCH-Gruppe - Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen. Heft Nr. 10, Stuttgart
- [2] Sachs, Lothar (2003): Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden. 11. Auflage, Berlin: Springer-Verlag
- [3] Sachs, Lothar / Hedderich, Jürgen (2009): Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R. 13. Auflage, Berlin: Springer-Verlag
- [4] Dietrich, Edgar / Schulze, Alfred (2007): Eignungsnachweis von Prüfprozessen – Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. 3. Auflage, München: Carl Hanser Verlag
- [5] The R Foundation (04/2017): The R Project for Statistical Computing. (R x64 3.4.0) [Software], <http://www.r-project.org/>

Validierung von Software für die Messung und Auswertung geometrischer Merkmale

Quality Inspection of Dimensional Objects and Sizes (Quindos)

Dr. rer. nat. **Tuan Anh Le**, Hexagon Manufacturing Intelligence, Wetzlar

Kurzfassung

In der modernen Koordinatenmesstechnik lässt sich bei komplexen Messaufgaben vermehrt beobachten, dass Fehler in der eingesetzten Mess- und Auswertesoftware gegenüber den klassischen Messabweichungen und den Messgerätefehlern dominant sein können. Das kann auf eine ungeeignete Wahl der mathematischen Algorithmen, eine fehlerbehaftete Implementierung oder einfache Vorzeichenfehler zurückgeführt werden. Demzufolge nimmt, insbesondere im Zusammenhang mit der Sicherheit von Messergebnissen, die Frage, wie eine Überprüfung der verwendeten Software auszusehen hat, einen immer größer werdenden Stellenwert in der Messtechnik ein. In diesem Beitrag werden exemplarisch an der Hexagon-KMG-Software „Quindos“ einige vorhandene Validierungsmethoden sowie Software-Normale vorgestellt und diskutiert.

1. Warum überhaupt Software-Validierung?

Spätestens mit der „Industrie 4.0“ ist Software als zentrale Komponente aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Im Bereich der 3D-Koordinatenmesstechnik stellt sie einen essentiellen Bestandteil einer Messung dar, indem sie zunächst die reinen Messdaten der unterschiedlichen, im Messsystem integrierten Sensorik ausgleicht, um anschließend diese korrigierten Messwerte zu analysieren und letztendlich aus ihnen das gewünschte Messergebnis abzuleiten. Ein vollständiges Messergebnis besteht jedoch stets aus der Angabe eines Messwertes und der dazu korrespondierenden (erweiterten) Messunsicherheit, die wiederum vom Messsystem, der Umgebung und zum großen Teil von der Stabilität sowie Genauigkeit der genutzten rechenintensiven Auswertelgorithmen abhängig ist. Aufgrund der Komplexität der involvierten mathematischen Berechnungen, v.a. bei nichtlinearen Modellen, deren Resultate meist iterativ bzw. rekursiv ermittelt werden müssen, kann nicht von vornherein ausgeschlossen werden, dass die Implementierung der zugrundeliegenden Algorithmen fehlerfrei funktioniert. Zudem ist es für den Anwender der Software selten ersichtlich,

ob die Startiterations-, Konvergenz- oder Toleranzkriterien intern richtig gesetzt worden sind, so dass für den jeweiligen Anwendungszweck auch hinreichend genaue und korrekte Ergebnisse von der Software geliefert werden. Diese Problematik und auch die ISO-Richtlinien selbst machen den Nachweis einer validierten Software, wie es in der Pharma- und Medizinbranche bei behördlich regulierten Unternehmen schon längst verpflichtend ist, zwingend erforderlich.

2. Software-Validierung: Definition und Anforderungen nach DIN EN ISO 9000/9001

Innerhalb der Software-Qualitätssicherung ist mit dem Begriff „Validierung“ die Prüfung der Eignung bzw. den Wert einer Software im Hinblick auf seinen Verwendungszweck gemeint. Die Basis dieser Eignungsprüfung bildet ein vorher auf aufgestelltes Anforderungsprofil. In der DIN EN ISO 9000 ist Validierung beschrieben als „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderung für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifisch beabsichtigte Anwendung erfüllt worden ist.“ Durch die Anwendung von Konformitätsbewertungen in Form von Beobachtungen und Beurteilungen sowie gegebenenfalls zusammen mit weiteren Messungen, Tests und Vergleichen kann solch ein Beweis erbracht werden. Soll darüber hinaus im Rahmen der Zertifizierung eines Qualitätsmanagementsystems die Software einem Audit unterzogen werden, so schreibt die DIN EN ISO 9001 vor, dass die Software zur Überwachung und Messung festgelegter Anforderungen auf Eignung für die beabsichtigte Anwendung überprüft werden muss. Diese Prüfung muss unbedingt vor dem ersten Gebrauch der Software vorgenommen werden und, falls notwendig, auch später erneut bestätigt werden.

3. Ausgewählte Software-Validierungsprozesse in Quindos

Da bei der Software Quindos die Messergebnisse aus den Messprozessen, beispielsweise in Form von Best-Fits, weiterverarbeitet werden, fließen zusätzlich noch die Anforderungen aus der DIN EN ISO 10012 mit ein. Das bedeutet, dass Quindos und jede aktualisierte Version davon vor dem ersten Einsatz geprüft bzw. validiert, für den Einsatz freigegeben und archiviert werden muss. Ferner muss die Software dokumentiert, gekennzeichnet und überwacht werden, um ihre Eignung für den fortgesetzten Einsatz zu gewährleisten.

Zur Sicherstellung der genannten Anforderungen laufen (täglich bis zu viermal) nach jedem Build einer Quindos-Tagesversion die sogenannten „Quindos_UnitTests“ vollautomatisiert über den hauseigenen Hexagon-Build-Server ab. Darunter versteht man eine Reihe von vordefinierten und ISO-konformen Validierungstests für verschiedene Funktionalitäten der KMG-Software Quindos. Dazu gehören u.a.:

- die Einpassung von Regelgeometrien (Ebene, Kreis, Zylinder, etc.) nach Gauß oder Tschebyschow;
- die Auswertungen verschiedener Zahnradtypen anhand von GEAR-Normalen (Quindos-Option „GEAR“);
- die Tests von Kenngrößen und Verfahren zur Oberflächencharakterisierung mittels Software-Normalen vom Typ F1 und F2 (vgl. DIN EN ISO 5436-2);
- Monte-Carlo-Simulationen zur Bestimmung von Messunsicherheiten nach GUM-S1 (Quindos-Option „VCMM“, Virtual Coordinate Measuring Machine).

Das Ergebnis jedes einzelnen UnitTest wird protokolliert, gespeichert und, insofern ein Test fehlschlug, ein detailliertes Log für die Fehleranalyse angefertigt.

4. Validierungsbeispiel: Best Fits nach Gauß- und Tschebyschow-Kriterium

Auf der Grundlage der DIN EN ISO 10360-6 zur Genauigkeitsprüfung von KMG-Software wird von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) eine internetbasierte Validierungsmöglichkeit für die Einpassung ausgewählter Standardgeometrien nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate oder der MiniMax-Methode bereitgestellt. Bei diesem Validierungsprozess, welches unter dem Akronym „TraCIM“ (Traceability for Computationally-Intensive Metrology) bekannt ist, wird dem Messgeräte- oder Softwarehersteller 3D-Punktewolken zur Verfügung gestellt, die von der zu validierenden Software nach Gauß oder Tschebyschow auszuwerten ist. Die von der Software berechneten Resultate werden anschließend mit den auf dem TraCIM-Server hinterlegten numerischen Referenzdaten, den Software-Normalen der PTB, verglichen. Ein TraCIM-Test gilt als bestanden, falls für alle Ergebnisparameter die Differenz aus berechnetem Ist- und tatsächlichem Referenzwert kleiner ist als ein zuvor vom Kunden festgelegter Grenzwert. Diese maximal zulässige Abweichung (bei Quindos 0.1 μm bzw. μrad) kann in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen wie der Größe des Arbeitsbereichs des verwendeten Messgeräts oder dem Anwendungszweck variieren.

Sowohl im Sinne der vollständigen Rückfahrbarkeit physikalischer Messgrößen auf die SI-Einheiten als auch der Validierung von (KMG-)Auswertesoftware im größerem Umfang ist eine Erweiterung des PTB-Online-Softwareangebot um beispielsweise Tschebyschow-Kegeln, Tori, Pferch- und Hüllbedingungen oder Best Fits unter Constraints durchaus wünschenswert. Der erste vielversprechende Schritt ist mit dem EMRP-Forschungsprojekt „Validation of software development and analysis tools using TraCIM (ValTraC)“ zwischen der PTB, dem NPL und der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften bereits unter-
nommen worden.

Aktuelle Herausforderungen bei der metrologischen Rückführbarkeit dimensioneller Messgrößen

Current challenges in metrological traceability of dimensional measurands

Karin Kniel, Jens Flügge, Harald Bosse,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Kurzfassung

Es wird über aktuelle Herausforderungen zur metrologischen Rückführbarkeit dimensioneller Messgrößen und hierfür eingesetzter Messmethoden berichtet, bei denen es bislang (noch) keine geeigneten Normale für die Realisierung einer klassischen Rückführungskette gibt. Es werden Beispiele aus dem Bereich der industriellen CT (Computed Tomography), der Messung komplexer Bauteil-Geometrien, sowie der Charakterisierung von Nanostrukturen diskutiert.

Abstract (optional)

We will report on current challenges in metrological traceability for dimensional measurands and measurement methods, where currently appropriate measurement standards are lacking to realize classical traceability chains. Examples are discussed from the area of industrial CT (Computed Tomography), from the measurement of complex geometries, and from characterization of nanostructures.

1. Metrologische Rückführbarkeit

Das Internationale Wörterbuch der Metrologie [1] definiert die *metrologische Rückführbarkeit* als „Eigenschaft eines Messergebnisses, wobei das Ergebnis durch eine dokumentierte, ununterbrochene Kette von Kalibrierungen, von denen jede zur Messunsicherheit beiträgt, auf eine Referenz bezogen werden kann“. Die *metrologische Rückführungskette* wird beschrieben „als Folge von Normalen und Kalibrierungen, die verwendet wird um ein Messergebnis auf eine Referenz zu beziehen“. Die Bedeutung von *kalibrierten Normalen* für die Etablierung der metrologischen Rückführung von Messergebnissen ist hier klar adressiert. Sowohl die nationalen Metrologieinstitute, wie z.B. die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) [2], als auch die durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAKKS) akkreditierten Kalibrierlaboratorien [3] bieten die Kalibrierung von dimensionellen Normalen für die verschiedenen Berei-

che der Fertigungsmesstechnik an. Es gibt allerdings auch Beispiele, in denen geeignete Normale (noch) nicht zur Verfügung stehen bzw. die zurzeit erreichbaren Messunsicherheiten für die Normale (noch) nicht den aktuellen Anforderungen genügen. Einige dieser Bereiche werden im Folgenden beschrieben.

2. Industrielle Computertomografie (CT)

Die in der Industrie angewandte CT wurde in den letzten 20 Jahren von einem Verfahren für die Defekterkennung in Materialien zu einem Messverfahren für 3D-Koordinaten weiterentwickelt. Es ergänzt somit die taktile und optische Koordinatenmesstechnik sinnvoll und stellt für innere Geometriemerkmale oftmals die einzig mögliche Messmethode dar. Die industrielle CT basiert auf der Messung der Transmission von Röntgenstrahlung durch das Messobjekt, welches in verschiedenen Orientierungen zum Röntgenstrahl gedreht wird. Die dabei als Bildstapel aufgenommenen Messdaten werden analysiert und die 3D-Objektdateien mathematisch rekonstruiert [4]. Die Normung der industriellen CT für die 3D-Koordinatenmesstechnik erfolgt in der WG 10 des ISO TC 213 und lehnt sich an das Vorgehen für die etablierten 3D-Koordinatenmesssysteme an. Hier stehen somit Methoden für die Bestimmung der Antastabweichung (probing error), der Längenabweichung (length measurement error) sowie der maximal zulässigen Abweichung (maximum permissible error, MPE) im Vordergrund. Die für diese Methoden erforderlichen unterschiedlichen Normale wurden entwickelt, wobei die normativen Festlegungen technologieoffen bzgl. des Einsatzes geeigneter Typen von Normalen sind [5].

Weitere CT-spezifische Herausforderungen für die metrologische Rückführbarkeit von CT-Messergebnissen resultieren aus dem unterschiedlichen Transmissionsverhalten verschiedener Materialien bei der Messung von Multi-Material-Bauteilen [6], aber auch bei der Verifikation der Messergebnisse an innenliegenden Geometriemerkmale. Auch hierzu wurden bereits verschiedene Testkörper entwickelt. In der Normung wird eine Unterteilung in verschiedene Materialklassen mit ähnlichen Transmissionseigenschaften diskutiert.

2. Komplexe Bauteil-Geometrien

Die metrologische Rückführung der Messergebnisse an geometrischen Standardelementen wie Ebene, Kreis, Zylinder, Kugel, etc. ist durch etablierte Normale gut realisierbar. Bei komplexeren Bauteil-Geometrien ist die Situation vielschichtiger. Als wichtigste Komponente in Antriebsträngen sind Verzahnungen von großer industrieller Bedeutung. Hierfür stehen inzwischen geeignete Normale für den Standard-Größenbereich (automotive, ...), aber auch für den Bereich der Mikro- [7] und Groß-Verzahnungen [8] zur Verfügung. Entwicklungen für

den Bereich anderer komplexer Bauteil-Geometrien, wie z.B. für Nockenwellen [9], sind allerdings noch nicht vollständig in industrielle Rückführungsketten integriert.

3. Nanostruktur-Charakterisierung für die Halbleiterindustrie

Die Anforderungen an die Fertigung in der Halbleiterindustrie und die zur Qualitätskontrolle der gefertigten Strukturen erforderliche Messtechnik werden in der ITRS [10] beschrieben. Für die gefertigten kleinsten Strukturen auf dem Silizium-Wafer, z.B. in der aktuellen 14 nm Technologie-Generation (Flash-Speicher mit 14 nm half pitch), mit entsprechenden Strukturgrößen von 56 nm auf den als Vorlage in der 1:4-Projektions-Lithografie verwendeten Masken resultieren Anforderungen an die Reproduzierbarkeit und die Genauigkeit der eingesetzten Prozessmesstechnik für die Strukturbreiten (CD) und die Position von Strukturen (Overlay) auf dem Wafer im sub-nm Bereich. Für die Messtechnik der Strukturcharakterisierung auf den Masken sind die Anforderungen nur geringfügig geringer, da die Strukturen auf den Masken auch kleinere Strukturdetails aufweisen, um die Qualität der optischen Projektion mit der verwendeten Belichtungswellenlänge von 193 nm (DUV) zu erhöhen. Die metrologische Rückführung der zur Prozesskontrolle verwendeten Messgeräte stellt somit eine besondere Herausforderung dar. In der PTB wurden Referenz-Messverfahren entwickelt, um geringe Messunsicherheiten für Breiten von Strukturen auf Masken und Si-Wafern mit erweiterten Messunsicherheiten von ca. 1-2 nm [11] sowie für die Positionen von Strukturen auf 152 nm-Masken und anderen Strukturteilungen von ca. 2 nm [12] zu erreichen. Dabei sind größere Beiträge zur Messunsicherheit bei der Strukturbreitenmessung durch die Qualität der Strukturen selbst sowie bei der hochgenauen Positionsmessung zusätzlich durch die Einflüsse des Substrates bedingt (Temperatur- und Lagerungseinflüsse).

- [1] VIM: International Vocabulary of Metrology,
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>
- [2] Kalibrier- und Messmöglichkeiten der Abteilung Fertigungsmesstechnik der PTB,
<http://www.ptb.de/cms/de/ptb/fachabteilungen/abt5/kalmess.html>
- [3] DAkKS Deutsche Akkreditierungsstelle: Datenbank akkreditierter Stellen,
<http://www.dakks.de/content/datenbank-akkreditierter-stellen>
- [4] Kruth, J.-P. et al., Computed tomography for dimensional metrology, CIRP Annals: 60 (2011), 2, 821 - 842
- [5] Bartscher M. et al., Current state of standardization in the field of dimensional computed tomography, Measurement Science and Technology: 25 (2014), 6, 064013-1 - 064013-14.
- [6] Bartscher M. et al., ISO test survey on material influence in dimensional computed tomography, in: Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation: 6B (2016), [Online only], 79 - 92
- [7] Neuschaefer-Rube, U. et al., Measurement of micro gears: comparison of optical, tactile-optical and CT-measurements, Proceedings of SPIE: 7864): (2011), 78640H-1 - 78640H-9
- [8] Stein M. et al., Rückführung von Großverzahnungsmessungen. GETPRO: 5 Kongress zur Getriebeproduktion: (2015)
- [9] Lin, S. et al., A least squares algorithm for fitting data points to a circular arc cam, Measurement: 102 (2017), 170 - 178
- [10] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), <http://www.itrs2.net/>
- [11] Dai, G. et al., Development and characterisation of a new line width reference material, Measurement Science and Technology: 26 (2015), 11, 115006-1 - 115006-11
- [12] Köning, R. et al., Implementing registration measurements on photomasks at the Nanometer Comparator, Measurement Science and Technology: 23 (2012), 9, 094010-1 - 094010-9

Sensorik in der Fahrzeugsicherheit Anforderungen, Lösungen und Rückführung

Sensors in vehicle safety development Requirements, solutions and Traceability

Dr.-Ing. **Roland Klinke**, B.Sc. **Marie-Therese Schablowski**,
mg-sensor, Rheinmünster

Kurzfassung

Die Crash Messtechnik ist im Wesentlichen von den gesetzlichen Vorgaben aus den USA, den gesetzlichen Vorgaben aus Europa sowie den weltweit genutzten Verbraucherschutztests wie EuroNCAP geprägt. Für die Einführung neuer Fahrzeugmodelle z.B. ECE-Homologationen ist die Untersuchung der Eigenschaften in physischen Crashtests mit Crashtest-Dummys vorgeschrieben. Deshalb sind die anthropologischen Prüfmittel, umgangssprachlich Crashtestdummy, die verbaute Sensorik, die Prüfungen und der Versuch bis ins kleinste Detail definiert. So sind bei den verbauten Sensoren nicht nur die Spezifikationen in der SAE J2570, sondern auch die Messunsicherheiten der Kalibrierungen in der ISO 6487 definiert. Die steigende Anzahl der Messkanäle führt aktuell dazu, dass die Messkanäle im Dummy digitalisiert und gespeichert werden, da die hohe Anzahl von Kanälen nicht mehr über Kabel in die Messwertverarbeitung gelangen kann. In diesem Artikel werden an ausgewählten Beispielen die besonderen Herausforderungen an die Sensorik, deren Kalibrierung und Lösungen zur dezentralen Datenvorverarbeitung vorgestellt.

Abstract

The Crash measurement is mainly defined by legal requirements from the USA and Europe. In addition consumer protection tests such as EuroNCAP defined the test procedures, too. The legal requirements for the introduction of new vehicle models, e.g. ECE homologations, demands the investigation of the properties in physical crash tests with Crashtest dummies. Therefore, the anthropological test equipment, the built-in sensors, the sensortests and the crash experiment are defined in detail. The installed sensors are not only defined with specifications in the SAE J2570, also the measurement uncertainties of the calibrations are defined in the ISO 6487. The increasing number of measuring channels currently leads to the fact that the measuring channels are digitized and stored in the dummy, because the connection of the high number of channels to the dataprocessing unit via cables is not practicable. In this article, the specific challenges of sensor technology, their calibration and solutions for decentralized data preprocessing are presented on selected examples.

1. Sensorik im Dummy

In den heute verwendeten Dummies können deutlich mehr als 50 verschiedene Sensoren verbaut sein. Bild 1 zeigt eine Übersicht der definierten Standardmessstellen eines Hybrid III 5% Dummies mit 68 Kanälen. Die Bezeichnung 5% kommt aus der Statistik des Dummies und bedeutet 5% der Bevölkerung ist kleiner (152 cm) und leichter (50 kg). Diese Erhebungsdaten stammen aus den 70iger Jahren. Dieser Dummytyp wird für Frontalaufprallversuche eingesetzt und kann bei Bedarf oder Anwendungsbereich mit über 120 Kanälen zusätzlich instrumentiert werden.

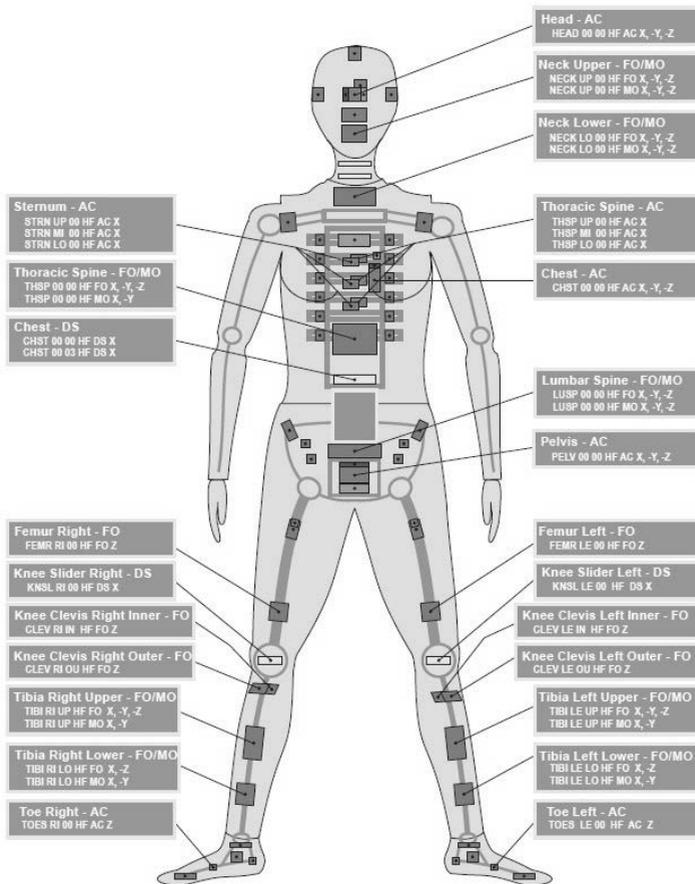


Bild 1: Standard Messstellen im Hybrid III 5% Dummy nach ISO-mme [3]

Aus Kostengründen und Gründen der Vergleichbarkeit der Crashtestergebnisse werden wiederverwendbare Sensoren in den Dummies eingebaut, die die Originalteile ersetzen und die identischen mechanischen Eigenschaften haben, anstatt individuell an den interessanten Stellen im Dummy Sensorik direkt zu applizieren. Durch die Kombination von Funktionalität und Sensorik erreichen die im Dummy verbauten Sensoren nicht die Präzision von Standardsensoren für die Messgröße. Als Beispiel ist in Bild 2 ein Sensor gezeigt, der einem Wirbелеlement im Nacken nachgebildet ist und 3 Kräfte und 3 Momente misst. Die Vorgabe für

Kräfte und Momente ist zum Beispiel eine Nichtlinearität von kleiner als 1% bei Übersprechen zwischen den Kanälen von kleiner als 5%.



Bild 2: Lower Neck Loadcell N6AKH11A

Eine weitere spezielle Messung ist die Kraftmessung des Gurtes auf den Thorax Bereich. Da die direkte Messung auf der Brust bisher nicht möglich ist, wird stattdessen die Kraft, die auf den Gurt wirkt, über Umlenkrollen gemessen.



Bild 3: F1B1B11A

Eine weitere gesetzliche Vorgabe ist die Bestimmung der Belastung der Rippen, diese soll in Zukunft nicht nur über Wegsensoren gemessen werden, sondern zusätzlich mittels optischen Systems. Dieses System kann parallel eine größere Anzahl von markierten Stellen auf den Rippen erfassen und somit 2 oder 3 dimensionale Verformungen der Rippen bestimmen.

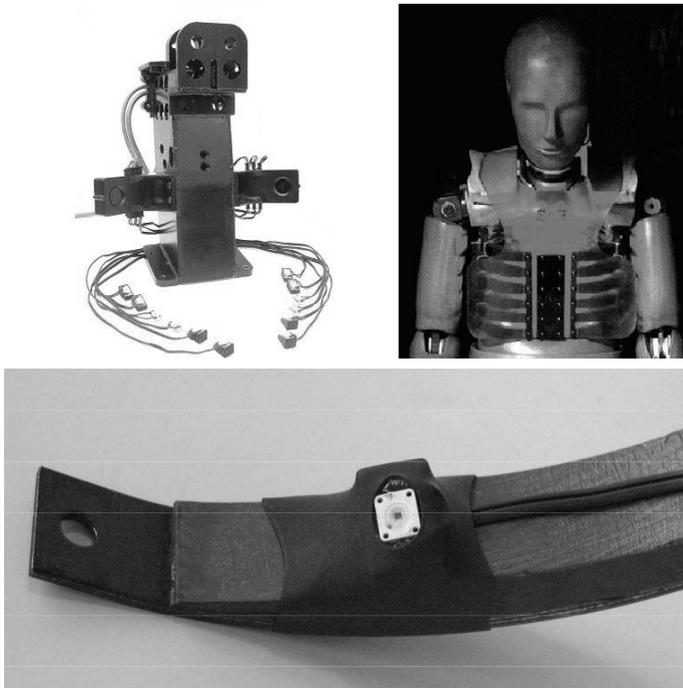


Bild 4: Boxboro System, Eindrückung wird mittels elektro-optischen Systems bestimmt

2. Kalibrierung der Sensoren

Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt mit Kalibrieranlagen, die auch für Kalibrierung von Standardsensoren eingesetzt werden. Allerdings benötigen viele Sensoren eine spezielle Adaption um die Messgrößen aufbringen zu können. Im folgenden Bild ist die Adaption für einen Sensor, der die Kraft am Schlüsselbein misst zu sehen.

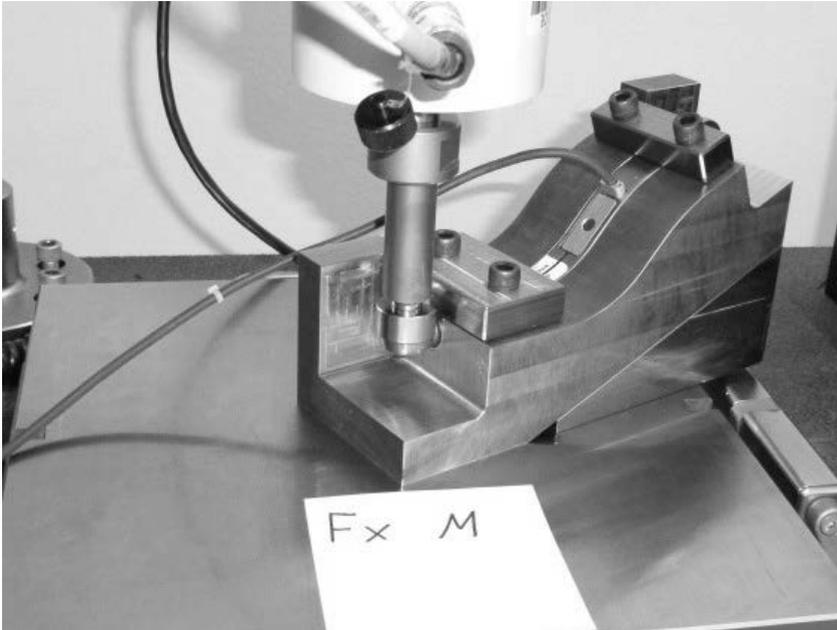


Bild 5: Thor Clavicle Kalibrierung

3. Rückführung der Sensoren

Durch die Vorgaben der DAkkS und der ISO 6487 müssen auch diese Sensoren in Zukunft rückgeführt kalibriert werden. Damit stellt sich nach der Forderung die Bremsprüfstände der Autowerkstätten rückgeführt zu kalibrieren, eine weitere Herausforderung für die akkreditierten Kalibrierlabore. Bild 6 zeigt den beantragten Akkkreditierungsumfang der mg-sensor um diese Anforderungen zu erfüllen.

Kraft ATD	0,05 kN bis 0,5 kN	KW-FO5001:2016	2,0 %	Druckkraft- Bezugsnormal- messeinrichtung mit Referenzaufnehmer
Kraft ATD	0,5 kN bis 22,2 kN	KW-FO5001:2016	0,5 %	Druckkraft- Bezugsnormal- messeinrichtung mit Referenzaufnehmer
Moment ATD	3,0 Nm bis 30 Nm	KW-MO5001:2016	2,0 %	Druckkraft- Bezugsnormal- messeinrichtung mit Referenzaufnehmer
Moment ATD	30 Nm bis 1130 Nm	KW-MO5001:2016	0,5 %	Druckkraft- Bezugsnormal- messeinrichtung mit Referenzaufnehmer

Bild 6: Auszug der mg-sensor Anlage des Akkkreditierungsantrag

Ausblick

Die Zukunft der Crashtests zeichnet sich in Computersimulationen ab. Jedoch sind die heutigen Rechnerkapazitäten noch nicht ausreichend sowie die Modelle noch nicht genau genug, um Computersimulationen ganzer Körpersysteme in solch komplexen Situationen durchzuführen. Die Abbildung aller relevanten Randbedingungen gestaltet sich schwierig, sowohl betreffend der Karosserie mit dessen Steifigkeiten als auch des umfassenden menschlichen Körpers. Der Vorteil von Computersimulationen ist jedoch, dass sie eine Grundlage für die Reproduzierbarkeit von Versuchen bieten und auch kostengünstiger angewendet werden können. Da Einflussparameter kontrollierter variierbar sind, können Computersimulationen den Bedarf an physischen Tests auf ein Minimum reduzieren.

Es ist davon auszugehen, dass in ferner Zukunft die Crashtests auf dem Computerbildschirm stattfinden werden und die realen Crashtests auf ein deutliches Minimum reduziert werden.

Literatur

- [1] SAE J2570:2009
- [2] ISO 6487:2015
- [3] ISO TC 22 / SC 12 / WG 3 / ISO-MME Task Force

Prüfmittelmanagement in kleinen und mittelständischen Unternehmen

Dirk Gleichauf, BMB Gesellschaft für Materialprüfung mbH, Heilbronn

Nach interner Umstrukturierung wurde nach der Übergabe der Prüfmittelverwaltung festgestellt, dass einige Prüfmittel nicht mehr in der Prüfmittelverwaltung aufgeführt waren. Aus diesem Grund musste eine neue Vorgehensweise mit Prüfmitteln erarbeitet werden.

1. Prüfmittel und ihre Definition

Unter dem Begriff „Prüfmittel“ sind unterschiedliche Geräte und Messmittel vereint. Es ist daher anzuraten diese zu benennen und nach ihrer Verwendung / Einsatzgebiet zu bewerten und zu gruppieren. Es sollte der Fokus darauf gelegt werden ob mit dem Prüfmittel ein direkter Einfluss auf die Güte des Bauteils besteht oder ob der Einsatz nur zur Identifikation dient. Daraus können das Prüfergebn und die Durchführung der Prüfung abgeleitet werden. Bei bestimmten Messgeräten bestehen auch Richtlinien, die die Überwachung vorgeben, z.B. bei Waagen. Diese müssen durch das Eichamt regelmäßig überprüft werden.

Arten von Prüfmitteln:

- Messgeräte:

Alle „Prüfmittel“ die dazu dienen, einen Wert zu messen. Der Messwert wird zur Bewertung des Produktes verwendet.

- Messschieber / Messschraube
- Härteprüfgerät
- Zugmessgerät
- Lehren:
 - Maßlehre
 - Grenzlehndorn
 - Formlehre
- Messhilfsmittel:
 - Messgerätehalter
- Vergleichskörper:

Sind Prüfmittel die zur Überwachung dienen und keinen Wert ermitteln. Vergleichskörper haben einen vordefinierten Wert und es wird damit überprüft, dass das zu überwachende Gerät diesen Wert ermittelt oder ob es Abweichungen anzeigt.

- Kontrollkörper

- Drahtprüfkörper
- Härtevergleichsplatte

2. Wie stellen wir sicher, dass alle Prüfmittel aufgenommen und überwacht sind?

Um sicherzustellen, dass alle Prüfmittel bei uns Aufgenommen werden, haben wir den Ablauf in unserem Managementprozess beschrieben und festgelegt.

- Alle Bedarfsmeldungen gehen an die QS. Dadurch ist die QS in den Bestellvorgang involviert und kann bei der Auswahl der „richtigen“ Prüfmittel mitwirken. Ebenso ist die QS informiert, dass neue Prüfmittel angeschafft werden.
- Wenn neue Prüfmittel kommen, müssen diese bei der QS registriert werden. Das heißt, sie werden in unsere Prüfmittelverwaltung aufgenommen und bekommen eine Identifikationsnummer. Unter dieser werden alle Überwachungen dokumentiert.

Es wird bei Routinedurchläufen immer darauf geachtet ob Prüfmittel verwendet werden und Stichprobenmäßig die Aktualität überprüft.

Bei internen Audits werden ebenfalls Prüfmittel (wo vorhanden) abgefragt und die Aktualität geprüft.

Regelmäßige Überprüfung der Prüfmittelverwaltung welche Prüfmittel fällig sind. Diese werden dann eingesammelt und geprüft.

Bild 1: Übersicht der bei BMB eingesetzten Prüfmittel

Bild 2: Übersicht der bei BMB eingesetzten Prüfmittel der Gruppe 001

3. Ein neues System und dessen Vorgaben zur Kalibrierung und Überwachung von Laboren (extern und intern)

Vorgaben sind für intern und extern gleich

Es muss folgende Punkte können:

- Eindeutige Zuordnung zum Prüfmittel
- Klare Aussage über den aktuellen Prüfzustand
 - Termin
 - Prüfergebnis
- Teilehistorie von Anschaffung bis zum Außerbetriebsname
- Auffindungsort
- Welche Kriterien zu überprüfen sind
- Wo welches Prüfmittel geprüft wird
 - Intern
 - Extern (und wer diese durchführt)

4. Entscheidung und Begründung pro/contra Softwareunterstützung

Softwareunterstützung	Manuelle Prüfmittelüberwachung
Starre Eingabe, nicht individuell	Kann individuell angepasst werden
Automatische Erinnerung bei Fälligkeiten (je nach Software)	Keine Erinnerung, muss regelmäßig überwacht werden
Ergebnisse werden dokumentiert und sind dem Prüfmittel zugeordnet	Ergebnisse werden dokumentiert und sind dem Prüfmittel zugeordnet
Kosten: hohe Kosten durch Lizenzgebühren Beispiel: System 290,-€ bis 990,-€ (Je nach Eigenschaften) + Arbeitsplatz / Firmenlizenzen 290,-€ bis 1690,-€	Kosten: geringe Kosten meist im vorhandenen Office Programm realisierbar

Legende:

negativ	Neutral	positiv
---------	---------	---------

5. Feedback des Externen Auditor

Es liegt uns noch kein Feedback eines Auditors vor.

Datenaustausch mit dem Kalibrierlabor

Neues zur VDI 2623

Dipl.-Phys. **Torsten Ring**, Böhme & Weihs Systemtechnik, Wuppertal

Kurzfassung

Die VDI 2623 beschreibt ein bidirektionales Datenaustauschformat zwischen einem Kalibrierbeauftragten und einem externen Kalibrierlabor. Als Datenaustauschformat wird eine XML-Datei verwendet, die mehrere Ebenen hat. Gekapselt ist alles in einem Kalibrierbefehl, der die Stammdaten der Prüfmittel, Daten des Kalibrierbeauftragten, Kalibrierpläne und Anweisungen an das Kalibrierlabor enthält und als Kalibrierergebnis vom Kalibrierlabor zum Kalibrierbeauftragten die ermittelten Messwerte zurücktransportiert. Damit soll die „Datenreibung“ durch redundante Datenpflege in verschiedenen Softwaresystemen minimiert werden und der Kalibrierprozess aus Datensicht effizienter gestaltet werden.

Wichtig für den Kalibrierprozess ist die Prüfmittelgruppe, die eindeutig sein muss und korrekt im Kalibrierlabor vorliegen muss, da die Prüfmittelgruppe die Grundlage für die Automatisierung und Kommunikation für den Kalibrierprozess im Kalibrierlabor bildet.

In der XML-Austauschdatei der VDI 2623 sind bei optimaler Nutzung schon alle Daten vorhanden, die für einen digitalen Kalibrierschein notwendig sind.

Abstract

The VDI 2623 describes a bidirectional data exchange format between a calibration application and an external calibration laboratory. The data exchange format uses a multi-level XML file. All this is summarized in a calibration order containing the test equipment master data, the data of the calibration application, calibration plans and instructions to the calibration laboratory and returning the determined measured values as calibration results from the calibration laboratory to the calibration application. This is intended to minimize data friction by redundant data management on different software systems and to make the calibration process more efficient from the data view.

The test equipment group is important for the calibration process. It must be unique. The calibration lab must have the correct group name, since the test equipment group is the basis

for the automation and communication during the calibration process in the calibration laboratory.

In case of an optimal use, all data being required for the digital calibration certificate is already available in the XML exchange file of VDI 2623.

1. Vorstellung, Ziele und Aufbau der VDI 2623

Ab 1985 mit der 1. Version der ISO 9000 wurde ein Prüfmittelmanagement in den Unternehmen gefordert, was unter anderem die regelmäßige Prüfmittelkalibrierung vorsah. Um ein Prüfmittelmanagement effizient zu gestalten, schafften sich viele Unternehmen eine spezielle Software für diesen Anwendungsfall an. Aufwendigere Kalibrierungen der Prüfmittel wurden an externe Kalibrierlabore vergeben.

Die externen Labore kalibrierten die Prüfmittel regelmäßig und erzeugten Kalibrierscheine. Ein Kalibrierschein benötigt eine Vielzahl an Informationen bzw. Daten, die zum einen in der Software des Prüfmittelleigentümers gepflegt wurden, zum anderen aber auch im externen Kalibrierlabor, da dieses ebenfalls mit einer speziellen Software arbeitet, um die Kalibrierungen durchzuführen und um den Kalibrierschein zu erzeugen.

Dieser doppelte Pflegeaufwand gerade bei Beginn eines Kalibrierauftrages im externen Labor und bei der Rückgabe des Prüfmittels nach der Kalibrierung im Unternehmen soll durch die VDI 2623 optimiert werden. Notwendige Daten sollen nur an einer Stelle in der Software gepflegt werden und anderen beteiligten Softwaresystemen im Kalibrierprozess zur Verfügung gestellt werden.

Um zu verdeutlichen, welche Daten in dem Kalibrierprozess zu erfassen sind, sind diese beispielhaft auf der Vorlage eines DAkKS-Kalibrierscheins markiert.

feld für die Angaben des ausstellenden Laboratoriums

akkreditiert durch die / *accredited by the*

Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

als Kalibrierlaboratorium im / *as calibration laboratory in the*

Deutschen Kalibrierdienst **DKD**



000000

D-K-

YYYY-ZZ-NN

||| mm

Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

Gegenstand
Object

Hersteller
Manufacturer

Typ
Type

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number

Auftraggeber
Customer

Auftragsnummer
Order No.

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate

Datum der Kalibrierung
Date of calibration

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI). Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

Datum
Date

Leiter des Kalibrierlaboratoriums
Head of the calibration laboratory

Bearbeiter
Person in charge

Bild 1: 1. Seite eines DAkkS-Kalibrierscheins, gelb gekennzeichnet sind die zu erfassenden Daten während des Kalibrierprozesses [1]

https://doi.org/10.51202/9792191022198 - Generiert durch IP 216.78.216.36, am 18.01.2025, 02:28:11. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in IT-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Seite 2 Page	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 2px;">00000</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 2px;">D-K- YYYY-ZZ-NN</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">jjj-mm</div>
Gliederung der Seite 2 und weiterer Folgeseiten des DAkKS-Kalibrierscheines:	
<ul style="list-style-type: none"> • Kalibriergegenstand 	
<ul style="list-style-type: none"> • Kalibrierverfahren 	
<ul style="list-style-type: none"> • Ort der Kalibrierung (bei Vor-Ort-Kalibrierungen und Kalibrierungen im mobilen Laboratorium) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Messbedingungen 	
<ul style="list-style-type: none"> • Umgebungsbedingungen 	
<ul style="list-style-type: none"> • Messergebnisse 	
<ul style="list-style-type: none"> • Messunsicherheit Folgende Anmerkung zu den Messunsicherheiten muss im Normalfall (Näheres s. DAkKS-DKD-5) im Kalibrierschein enthalten sein: Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß DAkKS-DKD-3 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Werteintervall. 	
<ul style="list-style-type: none"> • (ggf. Konformitätsaussage zur Übereinstimmung mit Normen oder normenähnlichen Dokumenten) 	
<ul style="list-style-type: none"> • (ggf. weitere Hinweise) z.B. folgender Hinweis zur Anerkennung der DAkKS-Kalibrierscheine im Ausland: Die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Die weiteren Unterzeichner innerhalb und außerhalb Europas sind den Internetseiten von EA (www.european-accreditation.org) und ILAC (www.ilac.org) zu entnehmen. 	
<ul style="list-style-type: none"> • (ggf. nicht zum Akkreditierungsumfang gehörige Messergebnisse) Kopien von Kalibrierscheinen mit Angabe nicht zum Akkreditierungsumfang gehöriger Messergebnisse sind beim nächsten Überwachungsbesuch dem Begutachter vorzulegen. (Näheres siehe DAkKS-DKD-5) 	

Bild 2: 2. Seite eines DAkKS-Kalibrierscheines, gelb gekennzeichnet sind die zu erfassenden Daten während des Kalibrierprozesses [1]

Diese Daten sind notwendigerweise teils durch den Prüfmitteligentümer und der restliche Teil durch das Kalibrierlabor zu erfassen. Der Aufwand, der in der Erfassung der Daten liegt,

soll die VDI 2623 minimieren, denn diese Daten sind für jedes Prüfmittel bei jeder Kalibrierung notwendig.

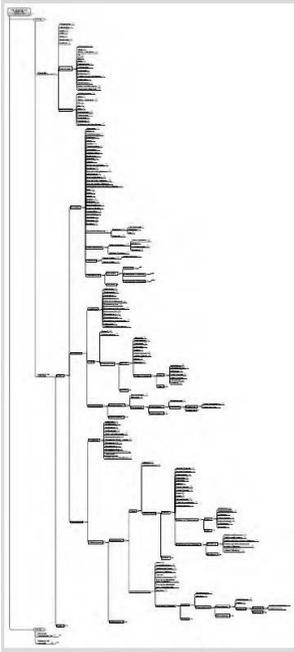
Das Datenformat des Datenaustausches, welches in der VDI 2623 beschrieben wird, ist eine Datei und zwar im XML-Format.

Struktur der XML-Datei:

Tabelle 1: XML-Struktur

Beschreibung	Tag							
	1	2	3	4	5	6	7	...
Kalibrieraufträge	<order>							
Auftrags-Kopfinformationen		<header section>						
Nummer			<id>					
Datum			<date>					
Zeit			<time>					
			<buyer>					
Daten des Eigentümers				Adresse				
				Ansprechpartner				
				Logistikdaten				
			<supplier>					
Daten des Labors				Adresse				
				Ansprechpartner				
				Akkreditierung				
Technische Daten		<technical section>						
Auftragsposition			<position>					
Stammdaten des Prüfmittels				<master data>				
				<buyer data>				
Daten des Eigentümers zur Logistik, Kalibrierplan sonstige Anweisungen					Logistikdaten			
					Kalibrierplan			
					Anweisung fürs ext. Labor			
Daten des Labors zur Logistik, Kalibrierplan, Messergebnisse, Komformität, Kalibrierschein				<supplierdata>				
					Logistikdaten			
					Kalibrierungen			
						Kalibrierplan		
						Ergebnis		

Damit wird deutlich, dass es eine Vielzahl an Ebenen innerhalb der XML-Struktur gibt. Es werden auch Rekursionen zugelassen, so dass damit zusammengebaute Prüfmittel in der Struktur abbildbar sind.



links Bild 3: XML-Tag-Struktur

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!-- XML example for VDI/VDE 2623 -->
<!-- Gramium VDI/VDE-GMA FA 3.14 IT Schnittstelle im Prüfmittelmanagement -->
<!-- Version: 08.12.2015 -->
<!-- -->
<!-- Beschreibung / description -->
<!-- Dieses XML Beispiel repräsentiert das Beispiel aus der Richtlinie und der -->
<!-- beigefügten Exceldatei -->
<!-- This XML example represent the example of the guideline and the excelfile -->
<!-- -->
<orders xmlns="http://www.vdi.de/xml/2623">
  <!-- -->
  <header_section>
    <id>5000365</id>
    <date>2010-03-14</date>
    <time>12:24:54</time>
    <language>de</language>
    <version>2010-06</version>
    <creator>PM Manager V. 3.54</creator>
    <receipt_id>987654321</receipt_id>
    <remark>Beispielwert</remark>
  <!-- -->
  <buyer>
  <!-- -->
  <supplier>
  <!-- -->
  </header_section>
  <technical_section>
    <inspection_plan>
      <master_data>
        <buyer_data>
        <!-- -->
        <logistic_data>
        <!-- -->
        <id>PP1234</id>
        <description>Messscheiter 150mm</description>
        <calibration_procedure>VDI/VDE/DGQ 2018 Blatt 9.1</calibration_procedure>
        <characteristics>
          <character>
            <id>1</id>
            <class>000</class>
            <designation>Messabweichung</designation>
            <type>002</type>
            <nominal_value>0</nominal_value>
            <upper_limit>30</upper_limit>
            <lower_limit>
              <unit>4H</unit>
              <remark>4H steht im Common Code für "µm"</remark>
            </lower_limit>
            <attributes>
              <!-- -->
              <attribute>
                <class>001</class>
                <designation>Umgebungstemperatur</designation>
                <value>20</value>
                <upper_limit>23</upper_limit>
                <lower_limit>18</lower_limit>
                <unit>CEL</unit>
                <remark>CEL steht im Common Code für Temperatur in Grad Celsius</remark>
              </attribute>
              <!-- -->
            </attributes>
          </character>
          <!-- -->
        </characteristics>
      </inspection_plan>
    <!-- -->
    <buyer_directives>
      <buyer_directive>
        <service_instruction>001</service_instruction>
        <remark>Bemerkung zur bestellten Werkkalibrierung</remark>
      </buyer_directive>
    </buyer_directives>
  </technical_section>
  <data_instructions>
    <instruction>000</instruction>
    <data_format>
      <data_format>
        <parameter>000</parameter>
        <value>00</value>
        <!-- -->
      </data_format>
    </data_instructions>
  </data_instructions>
</orders>

```

rechts Bild 4: XML-Beispieldatei [2]

Den Mitgliedern des VDI/GMA Fachausschusses 3.14 IT-Vernetzung im Prüfmittelmanagement ist bewusst, dass die Definitionen in der Schnittstelle zwischen den verschiedenen Systemen nicht vollständig sind. Deshalb ist eine offene Struktur gewählt worden, so dass Kataloginhalte sukzessive durch den Fachausschuss erweitert werden können und so jeweils neue Versionen der Schnittstelle erzeugt werden.

2. Gruppierungen der Prüfmittelgruppen

Wenn man vor der Aufgabe steht, einen automatischen Kalibrierschein als eine Art Serien-druck mit nur einem Exemplar zu erzeugen, stellt sich heraus, dass eines der wichtigsten Key-Felder die Prüfmittelgruppe ist.

In Abhängigkeit der Prüfmittelgruppe entscheidet sich, wo kalibriert wird, wie kalibriert, was kalibriert wird und mit welchem Aufwand eine Kalibrierung durchgeführt wird.

Aus diesem Grund beschäftigt sich der Fachausschuss 3.14 seit einiger Zeit schon damit, einen möglichst vollständigen Prüfmittelgruppenkatalog zu erzeugen. Damit soll sichergestellt werden, dass die VDI 2623 XML-Information der Prüfmittelgruppe eineindeutig ist und das Kalibrierlabor sich auf den Dateninhalt des Feldes <group> [2] verlassen kann.

Mit der Information der Prüfmittelgruppe sollen weitere notwendige Informationen oder Daten, die zur Kalibrierung gebraucht werden, gesteuert werden.

In den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts gab es eine Arbeit zur Klassifizierung für Prüfmittel in der industriellen Längenprüftechnik [3].

PRÜFMITTELGRUPPEN DER LÄNGENPRÜFTECHNIK									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Maßdarstellungen	Meßzeuge	Einkoordinaten-Meßgeräte	Mehrkoordinaten-Prüfgeräte (Länge und Lage)	Mehrkoordinaten-Prüfgeräte (Form und Oberfläche)	Mehrkoordinaten-Prüfgeräte (Mischformen)	Meßhilfsmittel mit Einbaumöglichkeit eines Längen- od. Winkel- aufnehmers	Meßhilfsmittel ohne Einbaumöglichkeit eines Längen- oder Winkel- aufnehmers	Längen- und Winkel- aufnehmer mit mechanischem Berühren des Prüflings	Längen- und Winkel- aufnehmer ohne mechanisches Berühren des Prüflings
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Gruppe 0 Seite A 4	Gruppe 1 Seite A 8	Gruppe 2 Seite A 12	Gruppe 3 Seite A 16	Gruppe 4 Seite A 18	Gruppe 5 Seite A 22	Gruppe 6 Seite A 24	Gruppe 7 Seite A 26	Gruppe 8 Seite A 30	Gruppe 9 Seite A 34

Bild 5: Hauptgruppen der Prüfmittelgruppen von dimensionellen Prüfmitteln [3]

PRÜFMITTELGRUPPE 0 : MASSDARSTELLUNGEN									
00 Strichmaße		01 Längenendmaße		02 Winkelm Maße		03 Innenmaßlehren		04 Prüfderne	
000	005	010	015	020	025	030	035	040	045
001	006	011		021	026	031	036	041	046
002	007	012	017	022	027	032	037	042	047
003	008	013	018		028	033	038	043	048
004		014	019	024	029	034	039	044	049

Bild 6: Beispielhaft für Messdarstellungen [3]

PRÜFMITTELGRUPPE 1: MESSZEUGE									
10 Meßschieber		11 Außenmeßzeuge, Bügelmeßschrauben		12 Innenmeßzeuge, Innenmeßschrauben		13 Höhenmesser		14 Tiefenmesser	
100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
101	106	111	116	121	126	131	136	141	146
102	107	112	117	122	127	132	137	142	147
103	108	113	118	123	128	133	138	143	148
104	109	114	119	124	129	134	139	144	149

Bild 7: Beispielhaft für eindimensionale Messzeuge [3]

Nach diesem Schema wird zur Zeit ein Prüfmittelgruppenkatalog aufgebaut. Begonnen wurde mit den bisher vorgekommenen Prüfmittelgruppen der Kalibrierlabore L & W GmbH, esz AG calibration & metrology, Testo Industrial Services GmbH und dem Prüfmittelkatalog von Bosch.

Die Vereinigungsmenge dieser Prüfmittelgruppen wurde bearbeitet, so dass Dopplungen und unterschiedliche Bezeichnungen für die gleiche Prüfmittelgruppe gelöscht wurden. So wurden aus weit über 1000 Prüfmittelgruppen knapp 400 Prüfmittelgruppen.

An oberster Stelle dieses Prüfmittelgruppenkatalogs steht die physikalische Größe, die mit einem Prüfmittel gemessen wird. Es gibt 10 Obergruppen.

ID	Gruppe
0	Sonstiges
1	Dimensionell
2	Mechanisch
3	Optisch
4	Chemisch
5	Akustik
6	Zeit
7	Elektromagnetisch
8	Thermodynamik
9	Atomphysik

Bild 8: 1. Ebene des Prüfmittelkatalogs.

In der Definition wird jeder Hauptgruppe eine ID gegeben, beispielsweise 1 für dimensionelle Prüfmittel. Die nächste Ebene des Prüfmittelkatalogs beschreibt die Messaufgabe.

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Länge
2	Winkel
3	Gewinde
4	Verzahnung
5	Form
6	Oberfläche

Bild 9: 2. Ebene, die Messaufgabe von dimensionellen Prüfmitteln

Hier wieder beispielsweise die ID 1 für eine Längenmessaufgabe.

Die 3. Ebene beschreibt, ob es sich um eine Maßverkörperung, ein Messgerät oder eine Messeinrichtung handelt.

ID	Kategorie
1	Messgerät
2	Maßverkörperung
3	Messeinrichtung

Bild 10: 3. Ebene, die Kategorie

In der 4. Ebene werden die Prüfmittelgruppen nur noch aufsteigend gezählt.

Prüfmittelgruppe	Katalog-ID
Impulszähler $\geq 100/s$	1-0-1-1
Kugelnorm	1-0-2-1
Bügelanzeiger	1-1-1-2
Bügelmessschraube	1-1-1-3
Bügelmessschraube mit auswechselbarem Amboss	1-1-1-4
Dickenmesser	1-1-1-5
Einbaumessschraube	1-1-1-6
Feinzeiger	1-1-1-7
Feinzeigermessschraube	1-1-1-8
Fühlhebelmessgerät	1-1-1-9
Höhenmessgerät	1-1-1-10
Höhenmessschraube	1-1-1-11
Höhenreißer	1-1-1-12
Induktiver Messtaster	1-1-1-13
Innenmessgerät	1-1-1-14
Innenmessschraube	1-1-1-15
Innenmessschraube mit 3-Linien-Berührung	1-1-1-16
Kantentaster	1-1-1-17
Längenmessbank	1-1-1-18
Mess- und Werkzeugmikroskope	1-1-1-19
Messlupe	1-1-1-20
Messmikroskop	1-1-1-21
Messschieber	1-1-1-22
Messtaster	1-1-1-23
Messuhr	1-1-1-24
Optischer Gratmesser	1-1-1-?
Profilprojektor	1-1-1-?
Rauheitsmessgerät	1-1-1-?
Schichtdickenmessgerät	1-1-1-?
Stereomikroskop	1-1-1-?
Tiefenmessbrücke mit Messeinsätzen	1-1-1-?
Tiefenmessschieber	1-1-1-?
Tiefenmessschraube	1-1-1-?
Wegaufnehmer	1-1-1-?
Zahnweitenfeinzeigermessschraube	1-1-1-?
Laserinterferometer	1-1-1-1

Bild 11: Prüfmittelgruppenkatalog mit der eindeutigen ID

Die Reihenfolge der 4. Ebene ist zur Zeit noch nicht festgelegt. Beispielhaft wurde hier alphabetisch sortiert, so dass ein Messschieber abschließend die ID 1-1-1-22 erhalten würde.

Das ist aber nur der 1. Schritt, denn mit jeder Prüfmittelgruppe, die an diesem Katalog teilnimmt, sollen für die Kalibrierung notwendige Kriterien ermittelt werden und über alle Prüfmittelgruppen gruppiert werden. Dies stellt sich zur Zeit wie folgt dar:

Bereich												
Mehrfach	von	bis	Anzeigeart	Auflösung	Bauform	Nenngröße	Passung	Toleranz	Klasse	Teilung		

Bild 12: mögliche Kriterien zu Prüfmittelgruppen

Um bei dem Beispiel des Messschiebers zu bleiben, wird die Prüfmittelgruppe eines Messschiebers mit den Kriterien wie folgt beschrieben:

Prüfmittelgruppe	ID	Mehrfach	von	bis	Anzeigeart	Auflösung	Bauform	Nenngröße	Passung	Toleranz	Klasse	Teilung
Messschieber	1-1-1-22		0	150	digital		0,01 DIN 862 Form B					
Messschieber	1-1-1-22		0	300	digital		0,01 DIN 862 Form B					
Messschieber	1-1-1-22		0	500	digital		0,01 DIN 862 Form B					
Messschieber	1-1-1-22		0	150	Nonius		0,05 DIN 862 Form A					

Bild 13: verschiedene Kriterien für Messschieber.

Die leeren Felder werden für einen Messschieber nicht benötigt. Wenn bei der sukzessiven Bearbeitung der Prüfmittelgruppen neue Kriterien dazukommen, müssen diese aufgenommen werden. Auch hier wird eine offene Stuktur notwendig sein.

3. Automatisierung des Kalibrierbetriebs

Mittels des gepflegten Prüfmittelgruppenkatalogs mit seinen Kriterien ist man im Kalibrierlabor in die Lage versetzt, dem Dateninhalt der Prüfmittelgruppe zu vertrauen, um eine weitere Automatisierung anzustreben.

Mit der Information der 1. Ebene, dass es sich bei einem Messschieber um ein dimensionelles Prüfmittel handelt, kann bei der Vereinnahmung des Kalibrierauftrages mittels VDI 2623 XML-Datei schon vor der eigentlichen Kalibrierung eine terminliche Planung von Kalibrieraufträgen im externen Labor erfolgen. Ebenfalls weiß das Management des Kalibrierlabors schon, dass das Prüfmittel ggf. in ein anderes Labor, eben für die dimensionellen Kalibrierungen, versendet werden muss.

Aus der Information der Bauform, des Messbereichs und der Auflösung kann man ablesen, welche Normale für die Kalibrierung notwendig werden. Auch damit kann das Kalibrierlabor seine Kalibriertätigkeiten effizienter gestalten. Es geht sogar so weit, dass die verwendete Kalibriersoftware im Labor durch die korrekte Information der Prüfmittelgruppe mit den zugehörigen Kriterien die verwendeten Normale oder Messprogramme präzise (an)steuern kann.

Der Kalibrierschein ist letztendlich nichts anderes als ein Serienbrief, welcher durch die notwendigen Daten der VDI 2623 XML-Datei des Prüfmittelleigentümers zum einen und vom Kalibrierlabor mit den restlichen Daten, die während der Kalibrierung anfallen, gefüllt wird.

Mit den zu kalibrierenden Merkmalen kann die Rückgabedatei der VDI 2623 XML-Datei an den Prüfmittelleigentümer zurückgesendet werden. Die Daten können im Idealfall im Prüfmittelmanagementsystem des Prüfmittelleigentümers komplett eingelesen werden und ermittelte Werte wie aktueller Durchmesser, Parameter, die für eine Verwendung des Prüfmittels in der Fertigung von Bedeutung sind, direkt in anderen Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden. (Stichwort: Industrie 4.0)

Ein weiterer Vorteil der VDI 2623 XML-Datei liegt in der Kommunikation der Kalibrierlabore untereinander. Wenn der Fall auftritt, dass ein Kalibrierlabor A nicht akkreditiert ist für die Kalibrierung einer Prüfmittelgruppe, kann der komplette Datensatz der XML-Datei an ein Kalibrierlabor B gesendet werden. Hierbei muss nur Prüfmittelleigentümer – Kalibrierlabor bzw. Buyer – Supplier gekreuzt werden.

4. Digitaler Kalibrierschein

Eine Formatvorlage eines DAkkS-Kalibrierscheins findet man in der DAkkS-DKD-5 Richtlinie. Alle notwendigen Informationen sollten als Teilnehmer in der VDI 2623 definiert sein. Im Prinzip bräuchte man bei der XML-Antwort des Kalibrierlabors nach der Kalibrierung eines Prüfmittels zum Kalibrierauftraggeber keinen Kalibrierschein mitzugeben, da alle Informationen im XML-File an definierter Stelle stehen. Wenn der Prüfmittelmanagement-Software des Kalibrierauftraggebers eine entsprechend korrekte Kalibrierschein-Formatvorlage vorliegt, kann dort der Kalibrierschein korrekt erzeugt werden, wenn ein Druck vom Kalibrierschein oder eine Erzeugung des Kalibrierscheins im PDF-Format notwendig ist.

Voraussetzung dafür ist aber, dass die im externen Kalibrierlabor ermittelten Messwerte komplett an den Kalibrierbeauftragten mittels VDI 2623 XML-Datei zurückgehen und dort in der genutzten Prüfmittelmanagement-Software eingelesen werden können.

Wenn das gegeben ist, kann man die XML-Datei, die nach der Kalibrierung im externen Labor an den Kalibrierbeauftragten gesendet wird, als digitalen Kalibrierschein bezeichnen. Die XML-Datei beinhaltet aber noch mehr Informationen, als „vom Kalibrierschein gefordert.“

5. Ausblick

Die weit bekannteren Richtlinien VDI 2618 und VDI 2622 haben sich über die Jahre weiterentwickelt, so dass nun auch Themen wie die Messunsicherheitsbetrachtung ggf. sogar mit einer Beispielrechnung Teil der Richtlinien sind.

Damit die Systematik des Prüfmittelgruppenkataloges mehr Verbreitung findet, wäre es wünschenswert, dass auch ein Kapitel zur Prüfmittelgruppe, die für die VDI 2623 von großer Bedeutung ist, in den Kalibrierrichtlinien wie VDI 2618 und VDI 2622 mit aufgenommen wird.

Im VDI-Fachausschuss 3.14 soll auch an Techniken gearbeitet werden, welche die Kommunikation bzgl. des Fehlermanagements und Neuerungen zum VDI 2623-Format mit den Anwendern erleichtert. Damit sollen dann Änderungen viel schneller in eine neue Version des VDI 2623-Formats der XML-Datei einfließen. Denn den Mitgliedern des Fachausschusses ist bewusst, dass die Vollständigkeit der Richtlinie nie 100% erreichen wird, sondern nur dagegen strebt und das hoffentlich möglichst schnell.

- [1] DAkkS-DKD 5
- [2] VDI 2623 – Februar 2012
- [3] R. Czetto: Klassifizierungssystem für Prüfmittel der industriellen Längenprüftechnik, 1978 Krausskopf-Verlag GmbH, Mainz

Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen

Dipl.-Ing. Elektrotechnik **Kurt Koch**,
Calibration Engineering,
CPMM Consulting Prüfmittelmanagement, Hildesheim

VDI/VDE-GMA Fachausschuss 3.12

Fachausschuss 3.12 Kalibrierung von Messmitteln für elektrische Größen



Richtlinie VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 "Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen" (Bild: Thomas Erming/LAIF)

Fachliche Schwerpunkte

- Kalibrieren und Überwachen von Mess- und Prüfeinrichtungen der Fertigungs- und Prozessmesstechnik.
- Erarbeitung von Kalibrierrichtlinien von Messmitteln für elektrische Größen.
- Messunsicherheitsbetrachtungen.

Warum gibt es den Fachausschusses 3.12

- Die Richtlinienreihe VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 legt Umfang und Ausprägung der Kalibrierung von elektrischen Messmitteln fest.
- Es fehlen Kalibrier-Normen für elektrische Messgeräte und sind Hersteller-Kalibrieranweisungen unabhängig?
- Die VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 hilft kompetenten Anwendern, nach einer allgemein anerkannten Vorgehensweise Messgeräte im Rahmen der Prüfmittelüberwachung selbst zu kalibrieren.
- Sie beschreibt herstellerunabhängig:
 - Kalibrierverfahren, Auswahl von Messpunkten und gibt Hinweise zur Bestimmung der Messunsicherheit.

Ziele des Fachausschusses 3.12

- Neutrales Fachgremium zum Erarbeiten von VDI/VDE-Richtlinien
- Kommunikation mit anderen Fachgremien
- Erfahrungsaustausch der Mitglieder
- Aufbau eines informellen Netzwerkes
- Förderung der industriellen Umsetzung

Ergebnisse des Fachausschusses 3.12

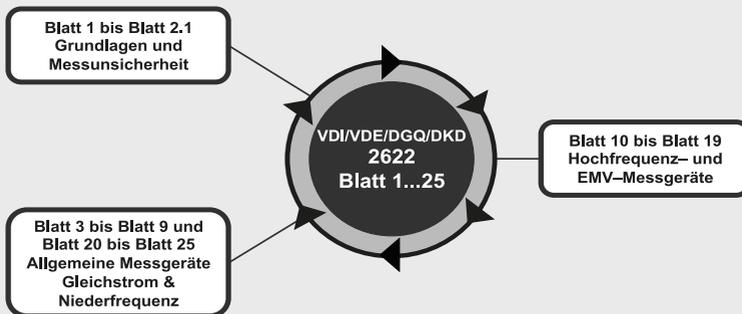
- Im Rahmen der Arbeit des Fachausschusses werden Richtlinien für die Kalibrierung von Messgeräten für elektrische Größen erstellt.
- Die Kalibrierrichtlinien sollen es den Anwendern ermöglichen, die zum Teil recht komplexen elektrischen Messgeräte selbst zu kalibrieren bzw. die Kalibrierleistung akkreditierter und nicht akkreditierter Laboratorien besser beurteilen zu können.
- Die Richtlinien geben Anweisungen für die Vorgehensweise bei der Kalibrierung von häufig eingesetzten Messmitteln für elektrische Größen.

Ergebnisse des Fachausschusses 3.12

- Die in diesen Richtlinien beschriebenen Kalibrierabläufe stellen sicher, dass die metrologischen Kennwerte unter Beachtung wirtschaftlicher Gesichtspunkte nach hinreichend aussagefähigen Methoden ermittelt werden und die Messwerte im Rahmen der angegebenen Messunsicherheiten richtig und vergleichbar sind.
- Alle verfügbaren Richtlinien aus der Reihe VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 sind unter www.vdi.de/2622 aufgelistet und über den Beuth Verlag bestellbar.
- www.beuth.de => Im Feld Suchen: **vdI 2622** eingeben.

Gliederung der Richtlinien

VDI/VDE/DGQ/DKD 2622



Gliederung der Richtlinien - Grundlagen

VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Blatt 1 Grundlagen

Blatt 2 Messunsicherheit

Blatt 2.1 Messunsicherheit praxisingerechte Vorgehensweise

Gliederung der Richtlinien – DC & NF: 1

VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Blatt 3 Digitalmultimeter

Blatt 4 Oszilloskope

Blatt 5 Funktionsgeneratoren

Blatt 6 Stromversorgungsgeräte

Blatt 7 Universalzähler

Blatt 8 Gleichstrom-Widerstände

Blatt 9.1 PG¹ – Elektrische Geräte nach DIN VDE 0701-0702

Blatt 9.2 PG¹ – *Elektrische Geräte in der Medizintechnik DIN VDE 0750 / 0751*

Blatt 9.3 PG¹ – Elektrische Anlagen nach DIN VDE 0100 / 0105

¹ PG: Prüfgeräte zur Feststellung der elektrischen Sicherheit *kursiv: Planung*

Gliederung der Richtlinien – HF: 1

VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Blatt 10 Hochfrequenz-Feldstärke-Messgeräte

Blatt 11 Spektrumanalysatoren

Blatt 12 Messempfänger

Blatt 13 *EMV-Impulsgeneratoren*

Blatt 13.1 *ESD-Generatoren*

Blatt 14.1 HF-Signalgeneratoren, analog modulierbar

Blatt 14.2 *HF-Signalgeneratoren, digital modulierbar*

kursiv: Planung

Gliederung der Richtlinien – HF: 2

VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Blatt 15.1 Netznachbildungen für Stromversorgungsanschlüsse

Blatt 15.2 Impedanznachbildungen

Blatt 15.3 Kopplungs- und Entkopplungsnetzwerke

Blatt 15.4 Passive Messmittel für EMV, Stromwandlerzangen

Blatt 16 Vektor Netzwerkanalysatoren

Blatt 18 *Antennen*

Blatt 19 Charakterisieren von HF-Kabeln

kursiv: Planung

Gliederung der Richtlinien – DC & NF: 2

VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Blatt 20.1 ~~Messverstärker für dynamische Messungen~~

Blatt 20.2 Gleichspannungsverstärker (zurzeit noch Blatt 20!)

Blatt 20.3 *Ladungsverstärker*

Blatt 21 Schreiber

Blatt 22.1 Multifunktionskalibratoren

Blatt 22.2 *Oszilloskopkalibratoren*

Blatt 22.3 *Multiproduktkalibratoren*

Blatt 23.1 Strommesszangen (DC und NF-AC)

Blatt 23.2 *Strommesszangen für Oszilloskope*

Blatt 23.3 *Stromwandler*

kursiv: Planung

Gliederung der Richtlinien – DC & NF: 2

VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Blatt 24 Leistungsmessgeräte (Power-Quality)

Blatt 25 *Phasennessgeräte*

kursiv: Planung

Richtlinien Layout

VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

ICS 17.220.20	VDI/VDE/DGQ/DKD-RICHTLINIEN	Juni 2014 June 2014
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT DEUTSCHER KALIBRIERDIENST	Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen Grundlagen Calibration of measuring equipment for electrical quantities Fundamentals	VDI/VDE/DGQ/ DKD 2622 Blatt 1 / Part 1 Ausg. deutsch/englisch Issue German/English
DIEZUFNR	Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.	The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Beispiel

Vom Manuskript zum Gründruck und Weißdruck

ICS 17.220.01		VDI/VDE/DGQ/DKD-RICHTLINIEN		##### 2012	
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT DEUTSCHER KALIBRIERDIENST	Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen Prüfgeräte zur Feststellung der elektrischen Sicherheit Elektrische Anlagen nach DIN VDE 0100 und DIN VDE 0105	VDI/VDE/ DGQ/DKD 2622 Blatt 9.3	Manuskript wird nicht veröffentlicht		
ICS 17.220.20		VDI/VDE/DGQ/DKD-RICHTLINIEN		Juni 2014	
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT DEUTSCHER KALIBRIERDIENST	Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen Multifunktionskalibratoren	VDI/VDE/DGQ/ DKD 2622 Blatt 22.1	Entwurf 		
ICS 17.220.20		VDI/VDE/DGQ/DKD-RICHTLINIEN		Mai 2004 Mai 2004	
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT DEUTSCHER KALIBRIERDIENST	Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen Gleichstrom-Widerstände Calibration of measuring equipment for electrical quantities Direct-current resistors	VDI/VDE/DGQ/ DKD 2622 Blatt 8 / Part 8	Weißdruck veröffentlicht 		

Veröffentlichungen der letzten drei Jahre VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

2015-02	Blatt 14.1	HF-Signalgeneratoren, analog modulierbar
2015-06	Blatt 19	Charakterisieren von HF-Messkabeln
2015-08	Blatt 2	Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit
2016-09	 Blatt 8	Gleichstromwiderstände (<i>Erstausgabe 2004-05</i>)
2016-11	 Blatt 9.3	Prüfgeräte zur Feststellung der elektrischen Sicherheit – Elektrische Anlagen nach DIN VDE 0100 und DIN VDE 105 (<i>Erster Entwurf</i>)
2017-02	Blatt 23.1	Stromzangen (DC und NF-AC)

Status:  Entwurf /  Überprüft / *kursiv* Planung

Geplante Zusammenführung von Richtlinien VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Messunsicherheit

2015-08	Blatt 2	Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit
2011-10	Blatt 2.1	Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit – Anmerkungen zur praxisgerechten Vorgehensweise

Seit April 2016 kümmert sich eine Arbeitsgruppe um die Zusammenführung von Blatt 2 und Blatt 2.1.

Hintergrund: Bei der Drucklegung haben sich in Blatt 2 auf Seite 9, 14 und 15 Fehler eingeschlichen und das Blatt 2.1 soll Bestandteil von Blatt 2 werden.

Geplante Zurückziehung von Richtlinien VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Kalibratoren

2014-06	 Blatt 22.1	Multifunktionskalibratoren
	Blatt 22.2	<i>Oszilloskopkalibratoren</i>
	Blatt 22.3	<i>Multiproduktkalibratoren</i>

Im April 2017 wurde beschlossen das Blatt 22.1 zurückzuziehen!
Auf der nächsten FA-Sitzung wird festgelegt was aus dem Blatt 22.2 und Blatt 22.3 werden soll.

Status:  Entwurf /  Überprüft / *kursiv* Planung

Klärung der Richtlinien für Messverstärker VDI/VDE/DGQ/DKD 2622

Verstärker

Blatt 20 Messverstärker

Blatt 20.1 *Messverstärker für dynamische Messungen*¹

2013 Blatt 20.2 Gleichspannungsverstärker (zurzeit noch Blatt 20!)

Blatt 20.3 *Ladungsverstärker*

- ¹ Zurzeit DKD-R 3-2 (2014). Einbindung in VDI/VDE/DGQ/DKD 2622? Richtlinienreihe seitens DKD nicht erwünscht.
- Neugliederung wegen Streichung des Blattes 20.1.

Status:  Entwurf /  Überprüft / *kursiv* Planung

Fachausschusstagungen

- 36 Mitglieder und zurzeit 7 Gäste
- Mitglieder und Gäste kommen von Instituten, Kalibrier- und Prüflaboratorien, F/E Bereiche sowie von Geräte-Herstellern
- 2 „Plenar“-Sitzungen pro Jahr, 2 Tage, mit bis zu 30 Teilnehmern
- Tagungsort: Bei den Firmen der Mitglieder oder beim VDI
- Bis zu 8 Arbeitsgruppen während der jeweiligen Sitzung

Richtlinienarbeit

- Nach 5 Jahren erfolgt innerhalb des VDI/VDE-GMA Gremiums eine Abstimmung, ob die jeweiligen zum Weißdruck veröffentlichten Richtlinien überarbeitet oder weiter gelten sollen.



Kennzeichnung

<= in der Richtlinie

in diesem Script =>

- Verschiedene VDI/VDE-GMA 3.12 Mitglieder sind sowohl im VDI als auch in DKD-Fachausschüssen tätig.

Richtlinienarbeit

- Für Hinweise, Kritiken und Ergänzungen zur laufenden Bearbeitung von Richtlinien ist der Fachausschuss dankbar.
- Vorschläge zur Erstellung von Kalibrierrichtlinien für weitere Messmittel sind willkommen.

Einspruchsverfahren von VDI-Richtlinien

- Einsprüche sind in formaler schriftlicher Form an die zuständige VDI-Fachgesellschaft einzureichen.
- Die VDI-Fachgesellschaft prüft innerhalb von 3 Monaten nach Ablauf der Einspruchsfrist alle Stellungnahmen.
- Eine Entscheidung wird gemäß VDI-Richtlinienarbeit herbeigeführt.
- Jede/jeder Einsprechende wird über das Ergebnis der Prüfung ihres/seines Einspruchs schriftlich informiert.

Auslegestellen für alle VDI-Richtlinien

<https://www.vdi.de/technik/richtlinien/auslegestellen/>



DIN EN 9100 Spezielle Anforderungen an einen Luftfahrttechnischen Betrieb

Dipl.-Ing. **Michael Rieck**, Lufthansa Technik AG, Hamburg

Kurzfassung

Die EN 9100 wurde Ende der 1990er Jahre entwickelt, Grundlage war die ISO 9001. Zielsetzung war es einen branchenspezifischen Standard zu schaffen. Die bis dato üblichen individuellen Qualitätsanforderungen zwischen Kunden und Lieferanten forderten einen hohen Aufwand bei der Produktion und Dienstleistung.

Der Markt um luftfahrttechnische Dienstleistung, also Konstruktion, Entwicklung, Produktion, Montage und Wartung, war und ist ein globaler Markt mit entsprechend weitgefächerten Anforderungen an die Betriebe die diesen Markt bedienen. So ist es nicht verwunderlich dass sowohl Qualitätsanforderungen der Luftfahrzeughersteller sowie die Richtlinien von Bundesverbänden Grundlage der DIN EN 9100 wurden. Als dann 1999 die amerikanische AS9100 veröffentlicht wurden war die Notwendigkeit einer gleichwertigen europäischen Norm unabdingbar. 2003 veröffentlichte dann das Europäische Komitee für Normung (CEN) die EN 9100 als zertifizierbare Norm der Luftfahrt, Raumfahrt und der Verteidigung für Konstruktion, Produktion, Montage und Wartung.

Zwei Jahre später kamen zur DIN EN 9100 noch die DIN EN 9110 für Wartungsbetriebe und die DIN EN 9120 für Händler und Lagerhalter dazu.

Die DIN EN 9100 unterliegt einem steten Wandel da sich sowohl die rechtlichen Anforderungen als auch die Anforderungen aus dem Qualitätsmanagement nach ISO 9000 weiter entwickeln.

1. Allgemeiner Überblick zur DIN EN 9100

2003 wurde die DIN EN 9100 veröffentlicht, 2005 kamen dann die DIN EN 9110 und 9120 dazu. Die EN 9100-Normenreihe deckt sich in großen Teilen mit den gesetzlichen Vorgaben der entsprechenden Luftfahrtbehörden, welche in ihren Regelwerken den Aufbau und Inhalt eines Qualitätsmanagementsystems in ausführlicher Art und Weise beschreiben (EASA Part 66, 21, 145, 147, M). Diese Regelwerke der Luftfahrtbehörden haben

rechtlichen Charakter und müssen umgesetzt werden. Sie sind Voraussetzung für die Durchführung von Arbeiten, an Luftfahrzeugen und ihren Komponenten.

Die Norm unterscheidet folgende Organisationformen der Luft-, Raumfahrt und Verteidigung:

DIN EN 9100 Konstruktion, Entwicklung, Produktion, Montage und Wartung

Luftfahrtrechtliche Voraussetzungen:

EASA Part 145	Maintenance Organisation (Wartung und Überholung)
EASA Part 21J	Design Organisation (Entwicklungsbetrieb)
EASA Part 21G	Production Organisation (Herstellungsbetrieb)
EASA Part 66	Certifying staff (Freigabeberechtigtes Personal)
EASA Part M	Airworthiness (Lufttüchtigkeit)

DIN EN 9110 Wartungsorganisation

Luftfahrtrechtliche Voraussetzungen:

EASA Part 145	Maintenance Organisation (Wartung und Überholung)
EASA Part 66	Certifying staff (Freigabeberechtigtes Personal)
EASA Part M	Airworthiness (Lufttüchtigkeit)

DIN EN 9120 Händler und Lagerhalter

Luftfahrtrechtliche Voraussetzungen:

Allgemeine Anforderungen aus den Regelwerken zu Lagerung von Material und Lenkung von Dokumenten

Mit dieser Struktur erinnert die DIN EN 9100 und ihre Derivate an die ursprüngliche ISO 9000ff Norm Reihe mit der:

DIN EN ISO 9001 Qualitätsmanagementsysteme, Modell zur Qualitätssicherung/QM-Darlegung in Design/Entwicklung, Produktion, Montage und Wartung.

DIN EN ISO 9002 Qualitätsmanagementsysteme, Modell zur Qualitätssicher- und/QM-Darlegung Produktion, Montage und Wartung.

DIN EN ISO 9003 Qualitätsmanagementsysteme, Modell zur Qualitätssicher- und/QM-Darlegung bei der Endprüfung

DIN EN ISO 9004-2 Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätssicherungssystems, Leitfaden für Dienstleistungen.

Trotz der unterschiedlichen aktuellen Strukturen zwischen ISO 9001 und der DIN EN 9100 ist die ISO 9001 komplett integriert, so dass eine Doppel-Zertifizierung nach ISO 9001 und DIN EN 9100 nicht nötig ist. Von den Luftfahrtbehörden wird ein Qualitätsmanagementsystem nach DIN EN 9100 anerkannt, was jedoch nicht den Wegfall der Begutachtung seitens der Behörden bedeutet. Hintergrund hierfür ist die unterschiedliche Ausrichtung, während die Luftfahrtbehörden hauptsächlich auf „Sicherheit“ setzen, ist die Ausrichtung der Norm „Kundenzufriedenheit und Prozess-orientierung“. Gängige Praxis ist die Zertifizierung durch ein unabhängiges akkreditiertes Unternehmen und die Bestätigung der jeweiligen Richtlinien durch die Luftfahrtbehörden.

Häufig wird ein Managementsystem aufgebaut und beschrieben welches als integriertes System alle Anforderungen aus Luftfahrt, Normung aber auch Umweltschutz und Arbeitssicherheit beinhaltet.

Die neue, jetzt 5.Ausgabe der DIN EN ISO 9001:2015-11 erfordert eine Anpassung der DIN EN 9100, zurzeit liegt ein Entwurf der neuen DIN EN 9100 mit Datum Februar 2017 vor.

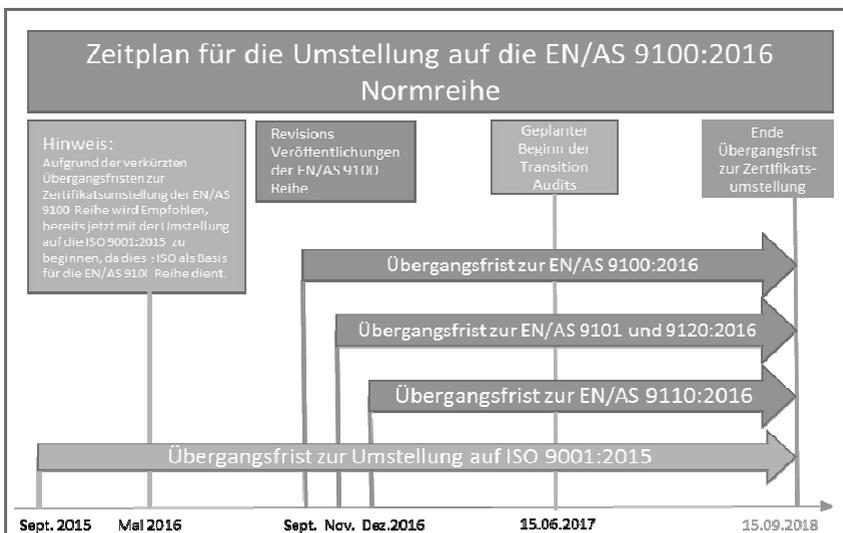


Bild 1: Zeitplan Einführung DIN EN 9100 Normreihe [1]

Ein enger Zeitplan sieht vor die Übergangsfristen parallel zu den Fristen der ISO9001:2015 laufen zu lassen. Dies würde bedeuten ab September 2018 verlieren Alt-Zertifikate nach 91xx Ihre Gültigkeit.

2. Unterschiede der DIN EN 9100 zur DIN EN ISO 9001

Die Din EN 9100 deckt alle Anforderungen an ein Qualitätsmanagement nach EN ISO 9001 ab und mit Umsetzung des vorliegenden Entwurfs der DIN EN 9100 von Februar 2017 wird auch das Erscheinungsbild der ISO 9001: 2015 übernommen.

Als Systemnorm wird die DIN EN 9100 die High Level Structure bekommen, so wie die ISO 9001, TS16949, ISO14001 und weitere, wird also in den Hauptkapiteln die erste und zweite Ebene der Gliederung weitestgehend identisch sein.

Einige Kapitel der DIN EN 9100 findet man nicht in der ISO 9001 oder es gibt Erweiterungen, zum Beispiel:

8.1 Betriebliche Planung und Steuerung

Die DIN EN 9100 führt hier den Begriff der „kritischen Einheit“ ein und fordert hierfür „gesonderte Steuerungs- und Überwachungsmaßnahmen, um Risiken während der Wertschöpfung oder im Gebrauch zu minimieren.“ [2] Dazu zählen:

Besondere Verfahren für das Testen und Prüfen dieser Einheiten

Sonderverfahren für die Freigabe

Erneute eigene Kontrolle bei Sub-Contracting solcher Einheiten

8.1.1 Betriebliches Risikomanagement

Das Risikomanagement hier bezieht sich auf Projekt- und Auftragsebene. Zielsetzung ist die Identifizierung, Bewertung und Analyse von Gefahren.

8.1.2 Konfigurationsmanagement

Die Norm fordert den Aufbau und Aufrechterhaltung eines strukturierten Prozesses für Produktdokumentation, Prüf- und Genehmigungsverfahren um jederzeit Auskunft über den Bauzustand eines Produktes geben zu können.

8.4.2 Art und Umfang der Steuerung

Hier ist als Schlagwort Lieferantenüberwachung zu nennen. Eingegangen wird noch einmal auf kritische Einheiten, Produkthaftung. Es ist sicherzustellen das ausgelagerte Prozesse konform zum QM-System durchgeführt werden

Exklusiv neu finden sich in der DIN EN 9100 jedoch zwei Themen, sie sind ebenfalls gegliedert im Kapitel 8: BETRIEB, unter 8.1: Betriebliche Planung und Steuerung.

Neu 8.1.3 Produktsicherheit:

„Die Organisation muss die Prozesse planen, umsetzen und lenken, die, angemessen für die Organisation und das Produkt, notwendig sind, um die Produktsicherheit während des gesamten Produktlebenszyklus sicherzustellen.

Anmerkung: Beispiele für diese Prozesse umfassen:

die Bewertung von Gefährdungen und die Steuerung der zugeordneten Risiken (siehe 8.1.1);

die Lenkung sicherheitskritischer Einheiten;

die Analyse und Berichterstattung von, die Sicherheit betreffenden, eingetretenen Ereignissen

Kommunikation dieser Ereignisse und Ausbildung von Personen“ [3]

Neu 8.1.4 Verhinderung gefälschter Teile:

„Die Organisation muss Prozesse, angemessen für die Organisation und das Produkt, planen, umsetzen und lenken, zur Verhinderung der Verwendung gefälschter oder vermutlich gefälschter Teile - und deren Integration in Produkte, die an Kunden ausgeliefert werden.

Anmerkung: Prozesse zur Verhinderung gefälschter Teile sollten folgende Aspekte berücksichtigen:

Schulung entsprechender Personen hinsichtlich der Wahrnehmung und Vermeidung von gefälschten Teilen;

Anwendung eines Überwachungsprogramms obsoleter Teile;

Lenkungsmaßnahmen hinsichtlich des Erwerbs extern bezogener Produkte von Original- oder autorisierten Herstellern, autorisierten Händlern oder anderen genehmigten Quellen; Anforderungen zur Sicherstellung der Rückverfolgbarkeit von Teilen und Komponenten zu deren Original- oder autorisierten Herstellern; Verifizierungs- und Prüfmethode zur Erkennung gefälschter Teile; Verfolgung von Berichten aus externen Quellen zu gefälschten Teilen; Sperrung (Quarantäne) und Berichterstattung bei mutmaßlichen oder erwiesenermaßen gefälschten Teilen.“ [3]

An diesen beiden Kapiteln zeigt sich sehr deutlich der zweite Einfluss auf die DIN EN 9100. Neben den Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem kommen hier die Sicherheitsaspekte aus den Regelwerken der Luftaufsichtsbehörden zum Einsatz. Sollte es zu einem Konflikt zwischen behördlichen Anforderungen und Anforderungen aus der Norm kommen so ist diese klar geregelt. „Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die in diesem Norm-Entwurf angegebenen Anforderungen eine Ergänzung (und keine Alternative) zu den vertraglichen und geltenden gesetzlichen und behördlichen Anforderungen sind. Sollte es einen Widerspruch zwischen den Anforderungen dieses Norm-Entwurfs und den geltenden gesetzlichen und behördlichen Anforderungen geben, müssen die letztgenannten Anforderungen Vorrang haben.“ [4]

3. Mögliches Umsetzen der Forderung aus der Norm

Ich möchte mich hier auf ein neues Kapitel im Normentwurf beziehen und eine mögliche Umsetzung beschreiben.

8.1.4 Verhinderung gefälschter Teile

Produkte im Luftfahrtumfeld unterliegen aufwendigen Genehmigungs- und Zulassungsprozessen. Ein Zulassungsverfahren ist langwierig und erfordert umfangreiche Ressourcen, dies schlägt sich direkt im Preis für diese Produkte nieder.

Die Identifizierung gefälschter Teile ist schwierig. Hinweise auf gefälschte Teile können sein.

- Niedrige, in der Regel nicht marktübliche Preise
- Verfügbarkeit in großer Stückzahl
- Kurze Lieferfristen
- Nicht übliche Zahlungsmodalitäten

Aber auch produktspezifische Eigenschaften, dieses setzt jedoch sehr gute Produktkenntnisse voraus.

Folgende Ursachen für die Rückweisung/Sperrung von Teilen und Material werden identifiziert.

- Mängel in der Herstellung
- Unzureichende Instandhaltung
- Unzureichender Berechtigungsumfang
- Fehlende behördliche Genehmigung
- Dokumentationsmängel

Um das Risiko „Verwenden gefälschter Teile“ zu minimieren sind Maßnahmen in mehreren Bereichen zu etablieren.

Qualifizierte Vergabe von Aufträgen unter Berücksichtigung der Individuellen Vorgaben.

Die Lieferantenauswahl und –überwachung ist zu beschreiben, inklusive eines Verfahrens zur Sperrung von auffälligen Lieferanten.

Definieren des Wareneingangsprozesses, mit besonderem Aufwand bei der Schulung der Mitarbeiter.

Beschreibung von Prüfprozessen zum Testen und Verifizieren von Produktparametern, Dokumentationen und Genehmigungen.

Betreiben eines Dokumentationssystems für den gesamten Produktlebenslauf.

Präventive Maßnahmen, z. B. Nutzen von Informationsquelle zu gefälschten Teilen (Herstellerseiten, Behördenkontakte etc.)

Sensibilisierung der Belegschaft zu diesem Thema (Human Faktor) und Schulung.

Implementierung eines Verschrottungsprozess, sicherstellen das endgültig beanstandete Teile nicht wieder in den Warenverkehr kommen.

4. Auswirkung auf die Prüfprozesse in einem luftfahrttechnischen Unternehmen

Die DIN 1319 definiert „PRÜFEN“ als das Feststellen ob ein Prüfobjekt eine Forderung erfüllt. In einem luftfahrttechnischen Unternehmen werden Prüfobjekte mit ganz verschiedenen Forderungen bearbeitet. Es geht hier nicht nur um die Feststellung eines Messergebnisses und die Aussage „hält die Spezifikation ein“. Vielmehr geht es in der DIN EN 9100 darum sicherzustellen das alle Forderungen an ein Produkt erfüllt und dokumentiert werden. Gutes Beispiel hierfür ist das Kapitel 8.1.1 Betriebliches Risikomanagement und ff. Zielsetzung ist die Erhöhung der Kundenzufriedenheit.

Diese Forderungen können variieren je nach Kunde/Auftraggeber, normativer Anforderungen, Behördenvorgaben, nationalen und internationalen Gesetzgebungen und Bestimmungen.

Unter Verwendungszweck in der DIN EN 9100 heißt es:

„Die vorliegende Norm ist zur Anwendung durch Organisationen vorgesehen, die Produkte und Dienstleistungen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung konstruieren, entwickeln und/oder anbieten, sowie zur Anwendung durch Organisationen, die Tätigkeiten nach der Lieferung, einschließlich der Bereitstellung von Instandhaltung, Ersatzteilen oder Materialien ihre eigenen Produkte und Dienstleistungen bereitstellen.“ [3]

Hiermit wird beschrieben was im Fokus der Norm liegt. Deutlich wird im Weiteren benannt was ein Unternehmen sicherstellen muss um zertifiziert werden zu können. Zum Beispiel Kapitel 8.2.2 Bestimmungen von Anforderungen an Produkten und Dienstleistungen, also ermitteln aller relevanten Forderungen. Und konsequenterweise Kapitel 8.2.3 Überprüfung von Anforderungen an Produkte und Dienstleistungen.

Die Norm überlässt es jedoch der Organisation wie Arbeitsschritt, Umsetzungsmethoden oder Prozesse gestaltet werden.

Auf allgemeine betriebliche Abläufe möchte ich hier nicht eingehen, hier greift die ISO 9001, die in der DIN EN 9100 inkludiert ist.

Interessanten sind die Prozesse am luftfahrttechnischen Produkt.

Beginnend mit dem zusammentragen aller Anforderungen zu einem Produkt.

Dabei variieren diese Anforderungen nicht nur von Produkt zu Produkt.

Selbst gleiche Produkte können hier unterschiedliche Anforderungen haben, z.B. unterschiedliche luftfahrttechnische Genehmigungen begründet aus dem Einsatzort des Produktes.

Auch der Kunde kann großen Einfluss auf die Varianz der Anforderungen zu einem Produkt haben. Durch seine Vorgaben wird aus einem allgemeinen Produkt sein individuelles Produkt, welches er dann verwenden kann.

Das Produkt selber kann auch verschiedene Anforderungen mit sich bringen, so erfordert Alter und Abnutzungsgrad individuelle Verfahren. Mit zunehmender Anzahl von Produkten und Kunden können die Kombinationen der Anforderungen fast beliebig komplex werden. Um hier für ein individuelles Produkt den passenden Prüfprozess zu finden bildet die Norm die Grundlage. Sie hilft die Fähigkeit aufzubauen, beständig Produkte und Dienstleistungen zu liefern, die die Kundenanforderungen und zutreffende gesetzliche und behördliche Anforderungen erfüllen.

Literaturhinweis

- [1] <https://www.tuv.com/germany/de/zertifizierung-gem%C3%A4%C3%9F-normenreihe-en-as-9100-f%C3%BCr-die-luft-und-raumfahrtindustrie.html>
- [2] Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie 2. Auflage
- [3] DIN EN 9100 Entwurf Februar 2017
- [4] <https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-en-9100-entwurf/267316153>

