



9. VDI-Fachtagung

Messunsicherheit 2019

Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen

4. VDI-Fachtagung

Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2019

Erfurt, 13. und 14. November 2019

Bildquelle: © Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH

VDI-BERICHTE
Herausgeber:
VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)

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

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

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 Manuscriptdruck.

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 978-3-18-092365-9

Inhalt

► Keynotes

Das neue internationale Einheitensystem – jetzt auch für Außerirdische 1
F. Härtig, K. Lehrmann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin

► Konformitätsbewertung und Messunsicherheit I

Entscheidungsregeln und Konformitätsbewertung – ein Überblick 15
M. Czaske, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig;
M. Kemper, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin

**Spezifikationen verstehen – Basis der Konformitätsbewertung und Messunsicherheits-
betrachtung** 23
A. C. Böck, esz AG calibration & metrology, Eichenau

**Entscheidungsregeln bei Konformitätsaussagen im Mess- und Kalibrierwesen –
Beispiele aus der Praxis** 35
E. Hage, K. Diedrich, Sartorius Lab Instruments, Göttingen

► Masse und Waagen

**The Planck-Balance (PB2) – Using a fixed value of the Planck constant to calibrate
EZ-weights.** 41
T. Fröhlich, N. Rogge, S. Vasilyan, F. Hilbrunner, Technische Universität Ilmenau;
C. Rothleitner, L. Günther, D. Knopf, S. Lin, F. Härtig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt
(PTB) Braunschweig

The Planck-Balance (PB2) – Tracing the mass via electrical quantities 53
S. Lin, C. Rothleitner, L. Günther, D. Knopf, F. Härtig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt
(PTB), Braunschweig;
N. Rogge, S. Vasilyan, F. Hilbrunner, T. Fröhlich, Technische Universität Ilmenau;

Störgrößenidentifikation in der dynamischen Wägetechnik 67
N. Rogge, Technische Universität, Ilmenau

► Elektrische Messgrößen I - II

Technologiegerechtes Kalibrierprogramm für moderne Messgeräte – Neue Möglichkeiten durch Kalibrierung tatsächlich nutzbar machen	75
C. Mester, Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Bern-Wabern, Schweiz	
Extrapolation der Werte von Hochpräzisionswiderständen – Wann und warum die Mathematik nach Lehrbuch nicht funktioniert	87
C. Rohrig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig; T. Baisch, S. Kuhls, N. Stadter, ehem. Studenten der Hochschule Darmstadt	
Calibration and application using inductive voltage dividers – Calibration of inductive voltage divider and generation of very small AC voltages for the calibration of lock-in amplifiers.	99
D. Corminboeuf, Federal Institute of Metrology METAS, Bern-Wabern, Switzerland	

► Neue Anwendungsbereiche und Herausforderungen der Messunsicherheitsanalyse

Generation of a static torque in the range of 1 mN·m to 1 N·m according to the Jokey-weight principle	111
T. Sasiuk, T. Fröhlich, R. Theska, M. Darnieder, Technische Universität Ilmenau	
Aufstellung einer Messunsicherheitsbilanz für ein primäres Messverfahren zur Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit	121
U. Breuel, B. Werner, N. Schiering, A. Zeißler, Zentrum für Messen und Kalibrieren & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen	

► Dimensionelle Messgrößen I – II

Neues Konzept für eine fünfachsige Nanomessmaschine	131
F. Fern, R. Schienbein, R. Füßl, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau	
Konformitätsbewertung bei geometrischen Messaufgaben in der Produktion: ISO 14253 und industrielle Praxis	139
D. Imkamp, Carl ZEISS Industrielle Messtechnik, Oberkochen; C. Sommerhuber, ehemals GPS Programm Manager, SKF Österreich AG, Steyr, Österreich	
Messunsicherheit bei der Best-Einpassung von Lochbildern – Methoden zur Best-Einpassung und zur Unsicherheitsermittlung	147
M. Hernla, Dortmund	
Oberflächenformmodelle mechanisch bearbeiteter Werkstücke für die Messunsicherheits- bestimmung mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät	159
T. Kistner, D. Imkamp, ZEISS IQS, Oberkochen	
Modellbildung in der Messtechnik – ein Überblick	171
N. Schiering, O. Schnelle-Werner, ZMK & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen; K.-D. Sommer, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau	
Verbesserung dimensioneller Messungen auf Grundlage der Einzelpunktgüte und -Messunsicherheit	179
A. M. Müller, T. Hausotte, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen	

► Neue Entwicklungen zur Prozess-Messunsicherheit

- Metrology in direct photon momentum measurement** 193
S. Vasilyan, N. Rogge, T. Fröhlich, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik,
Technische Universität Ilmenau

- Messunsicherheit bei vereinfachten Kalibrierabläufen der Messgrößen Kraft und
Drehmoment unter Anwendung statistischer Verfahren** 207
L. Stenner, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt

► Messunsicherheit und Digitalisierung

- Der digitale Zwilling für metrologische Anwendungen** 217
L. Günther, F. Härtig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

- A comparison of statistical testing and Monte Carlo methods for Conformity assessment** 227
J. van der Grinten, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

- Messunsicherheiten und Konformität mit Anforderungen** 241
R. Michel, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, Leibniz Universität, Hannover

4. VDI-Fachtagung

Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2019

► Prüfplanung/Prüfmittelüberwachung

Adaptive Prüfplanung – Die neue Richtlinie VDI/VDE 2600-3 als Leitfaden für die Industrie	257
T. Müller, J. Greipel, R. H. Schmitt, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Aachen	
Kalibrierscheine werden digital –	
Hoher Merhwert durch leichte Nachnutzung aller Kalibrierdaten	271
S. Hackel, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig	
Katalogdefinitionen als Grundlage der VDI 2623 zum Datenaustausch zwischen	
Prüfmittelmanagementsystemen	273
T. Ring, Böhme & Weihs Systemtechnik, Wuppertal	
Aktualisierte Entscheidungsregeln der Konformitätsbewertung aufgrund der neuen	
DIN EN ISO 17025:2018	293
A. König, Testo Industrial Services GmbH, Kirchzarten	
Kontinuierliche Eignungsnachweise für KMGs –	
Mittels einer Predictive Analytics Plattform	297
E. Dietrich, IconPro GmbH, Aachen	

► Eignungsnachweis/Prüfprozessüberwachung

Datenmanagement bei Messprozessen	307
M. Wagner, Q-DAS GmbH, Weinheim	
Qualifizierung und Optimierung von Bauteilprüfprozessen auf Werkzeugmaschinen –	
Eignungsnachweis und Reduktion der Messabweichung mittels Modellwissen und	
integrierter Sensorik	319
P. Dahlem, D. Emonts, M. Peterek, R. H. Schmitt, Werkzeugmaschinenlabor WZL der	
RWTH Aachen, Aachen;	
N. Lehmann, Siemens AG, Aachen	

► Prüfprozess-Management in der Praxis

Repräsentativer Eignungsnachweis für dimensionale Messungen an Medical-Devices mittels Computertomographie.	337
M. Kron, Sanofi-Aventis Deutschland GmbH, Frankfurt	
Messunsicherheit bei Härteprüfungen.	347
C. Weißmüller, C. Sieg, IfEP GmbH, Marl	

Das neue internationale Einheitensystem – jetzt auch für Außerirdische

The new international system of Units – now approachable for extraterrestrial also

Dr.-Ing. Prof. h. c. **Frank Härtig**, M.Sc. **Katharina Lehrmann**,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin

Kurzfassung

Der 20. Mai 2019 wird als revolutionärer Tag in die Geschichte des internationalen Einheitensystems eingehen. Seit diesem Datum stützen sich alle metrologischen Einheiten auf Fundamentalkonstanten ab. Die letzten Maßverkörperungen, wie der Internationale Kilogramm Prototyp, haben mit einem Schlag ihre herausragende Bedeutung verloren und werden nach einer gewissen Übergangszeit in den Ruhestand geschickt. Auf der Basis von Fundamentalkonstanten ist ein System in Kraft getreten, das eine deutlich höhere Stabilität aufweist und eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Realisierung der Einheiten zulässt. Darüber hinaus sind dem neuen Einheitensystem weder Schranken im Hinblick auf dessen Genauigkeit noch Grenzen im Hinblick auf dessen Realisierungsbereiche auferlegt. Ein System, das viele Vorteile bietet, jedoch schwerer zu verstehen ist, wie das Bisherige. Die sieben Basiseinheiten, die Sekunde, der Meter, das Kilogramm, das Ampere, das Kelvin, das Mol und die Candela, werden aus praktischen Gründen erhalten bleiben und weisen in ihrer Darstellung nur geringfügige Änderungen auf. So hat die Revolution des Einheitensystems für unser tägliches Leben keine bemerkbaren Auswirkungen. Damit geht die ca. 120 Jahre alte Vision von Max Planck in Erfüllung, ein Einheitensystem zu schaffen, das prinzipiell auch für außermenschliche und außerirdische Kulturen geeignet ist.

Abstract

May 20, 2019 will go down as a revolutionary day in the history of the international system of unity. Since that date, all metrological units have been based on fundamental constants. The last measuring artefact, such as the International Kilogram Prototype, have suddenly lost their outstanding significance and has be sent into retirement after a certain transitional period. On the basis of fundamental constants, a system has come into force that has a significantly higher stability and allows a multitude of possibilities for realizing the units. In addition, the new system

of units is not subject to any limits in terms of accuracy or scope of implementation. A system that offers many advantages, but is more difficult to understand than the previous one. The seven basic units, the second, the meter, the kilogram, the ampere, the kelvin, the mole and the candela, will be retained for practical reasons and will show only minor changes in their representation. Thus, the revolution of the system of units has no noticeable effect on our daily lives. With this, Max Planck's 120-year-old vision of creating a system of units that is in principle also suitable for extraterrestrial and extraterrestrial cultures has come true.

1. Einführung

Am 16. November 2018 hat die einflussreichste internationale Autorität im Bereich der Messtechnik, die Generalkonferenz für Maße und Gewichte (CGPM), auf ihrer 26. Sitzung [1] in Versailles beschlossen, die Definitionen vieler Basiseinheiten des Internationalen Einheitenystems (SI) grundlegend zu ändern. Seit dem 20. Mai 2019, dem jährlich wiederkehrenden World Metrology Day, beziehen sich nun alle Einheiten auf sogenannte Fundamentalkonstanten (engl. Defining Constants). Die Gründerväter des bis dahin gültigen SI waren seinerzeit schon bestrebt, ein einheitliches und unveränderliches System für die Menschheit zu schaffen. Ein bis heute gültiges Motto seiner Zeit war „À tous les temps, à tous les peuples, „für alle Zeiten und für alle Menschen“. Grundlage bildeten die scheinbar sehr stabile Erde sowie Stoffeigenschaften. So wurde der Meter als der 10 millionste Teil des Längengrades festgelegt, der vom Nordpol über Paris bis zum Äquator führt, die Zeit orientierte sich an der Rotationsgeschwindigkeit der Erde und die Masse war ein Zusammenspiel der Einheit Länge und der Stoffeigenschaft von Wasser bei einer Temperatur von 4 °C. In den darauffolgenden Jahren wurden einzelne Maßverkörperungen, wie das Mètre des Archives [2] für die Länge und das Kilogramm des Archives für die Masse gefertigt. Mitgliedsstaaten der Meterkonvention erhielten nationale Kopien.

Im Jahre 1889 wurde beispielsweise zur Darstellung der Masse der Internationale Kilogramm Prototyp (IPK) gefertigt (Abbildung 1). Eine zylindrische Legierung aus 90% Platin und 10% Iridium mit einem Durchmesser und einer Höhe von jeweils 39 mm. Gleichzeitig erhielten 29 Staaten im Losverfahren je eine von insgesamt 40 gefertigten Kopien.



Bild 1: Internationale Kilogramm Prototyp, umgangssprachlich auch Urkilogramm genannt

Hiervon ausgehend wurden alle weiteren Längen und Massen für größere oder kleinere Skalen abgeleitet. Damit aber nicht genug, auch die davon abhängigen Größen wie Kraft, Drehmoment, Durchfluss und viele weitere, waren hierdurch an nur zwei physikalisch existierende Normale gebunden, die im Internationalen Büro für Maße und Gewichte, in Sèvre, einem Vorort von Paris, sicher verschlossen aufbewahrt wurden und auch noch aufbewahrt werden. Im Abstand von mehreren Jahrzehnten wurden z. B. die Massennormale gegeneinander verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass die nationalen Kopien gegenüber dem IPK über einen Zeitraum von ca. 130 Jahren um etwa 50 µg voneinander abwichen.

Die Ursachen sind bis heute nicht geklärt. Auch kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob sich der IPK oder die nationalen Kopien geändert haben. Das waren natürlich erschreckende Beobachtungen, da technische Anwendungen heutzutage bei der Realisierung der Masse eine Messunsicherheit $U(k=1)$ von ca. 20 µg erfordern. Sowohl die Instabilität des Kilogramms sowie die Darstellung des Ampere, das sich aufgrund bestehender Realisierungsmöglichkeiten aus dem SI ausgegliedert hatte, waren die starken Treiber, um nun alle SI Basiseinheiten, inklusive der Einheiten Kelvin und Mol, über konstante Werte zu beschreiben.

Vorschläge, wie man diesem Dilemma entgeht und wie dabei ein noch stabileres SI geschaffen werden kann, gab es schon im 19. Jahrhundert. So war es zunächst Lord Kelvin, der um 1870 vorgeschlagen hatte, die Einheiten nicht auf die Erde, sondern auf atomare Eigenschaften zu beziehen.

“If, then, we wish to obtain standards of length, time, and mass which shall be absolutely permanent, we must seek them NOT in the dimensions, or the motion, or the mass of our planet, but in the wave-length, the period of vibration, and the absolute mass of these imperishable and unalterable and perfectly similar molecules.”

Zu dieser Zeit fehlte es allerdings an den technischen Umsetzungsmöglichkeiten. Darüber hinaus war man mit diesem Vorschlag aber auch wieder von den physikalischen Eigenschaften der Atome abhängig, auch wenn diese eine deutlich höhere Stabilität aufweisen als die existierenden Standards.

Der Durchbruch kam dann durch einen der namhaftesten Wissenschaftler, Max Planck. Seine revolutionäre Idee bestand darin, das bis dahin über die Jahrtausende etablierte System, basierend auf physikalischen Standards, über Bord zu werfen. Sein genialer Vorschlag aus dem Jahre 1901 [3] bestand darin, konstante Werte zu definieren – unveränderlich, in Stein gemeißelt, für die Ewigkeit.

„Dem gegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein zu bemerken, dass mit Zuhilfenahme der beiden [...] Constanten a und b die Möglichkeit gegeben ist, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche, unabhängig von speciellen Körpern und Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und aussermenschliche Culturen notwendig behalten und welche daher als ‚natürliche Maaßeinheiten‘ bezeichnet werden können.“

Ein System, auch geeignet für den intergalaktischen Raum. Mit Lichtgeschwindigkeit ließen sich die Rezepte zur Darstellung aller physikalischen Eigenschaften im Weltall verbreiten. Intelligente Wesen, die diese Botschaft empfangen und entschlüsseln könnten, wären damit in der Lage, unser SI zu verstehen und ungeachtet aller technischen Hürden, einen harmonisierten Handel zu betreiben.

Damit aber nicht genug. Als Gründervater der Quantentechnologie lieferte Max Planck auch gleich einen Vorschlag, wie ein System, basierend auf Konstanten, umzusetzen sei. Er definierte die als Planck-Einheiten bekannten Größen der Planck-Masse, der Planck-Länge, der Planck-Zeit und der Planck-Temperatur. Diese bezogen sich auf die Konstanten: Planck'sches Wirkungsquantum, die Lichtgeschwindigkeit, die Gravitationskonstante und die Boltzmannkonstante. Leider war auch diese Idee aufgrund der kleinen Zahlenwerte und der fehlenden technischen Umsetzungsmöglichkeiten seinerzeit nicht realisierbar. Übriggeblieben ist aber der revolutionäre Ansatz, ein Einheitensystem auf konstante Werte aufzubauen. 119 Jahre später sollte das Wirklichkeit werden.

2. Die Zeit ist reif für einen Wechsel

Das Metrische System wurde in Frankreich im Jahr 1793 zu Zeiten der Französischen Revolution eingeführt. Die ersten beiden Einheiten waren die Längeneinheit der Meter als der zehntausende Teil der Länge des Längengrades, der vom Nordpol über Paris zum Äquator führt,

die Gewichtseinheit Grave, die der Masse von Wasser in einem dm³ entspricht und das Dezimalsystem. Gerade letzteres ist wenig bekannt, aber von unschätzbarem Wert. Seinerzeit war es noch üblich, mit Römischen Zahlen zu rechnen, was nicht nur wegen der Skalierung und der Schreibweise sehr umständlich war. Die Römischen Zahlen kannten auch keine Null. Mit der Einführung des Dezimalsystems waren viele Barrieren beseitigt, da es für einen einfachen und übersichtlichen Umgang der SI Einheiten sorgte. Die spätere Einführung der Präfixe für Vielfache oder Teiler der Einheiten von yocto (10^{-24}) bis yotta (10^{24}) zählen ebenfalls zu den grundlegenden Vereinfachungen.

Das internationale Einheitensystem SI wurde von der Meterkonvention erst im Jahre 1948 eingeführt. Es beinhaltet heute neben den sieben Basiseinheiten auch die abgeleiteten Einheiten. Von Stillstand kann seither jedoch nicht gesprochen werden. So haben die technischen Weiterentwicklungen und nicht zuletzt die Quantentechnologie dazu beigetragen, die Einheiten immer genauer zu realisieren. Die Zeit ist hierfür exemplarisch zu nennen. Von der Erdumdrehung über genaue Uhren war die Zeit die erste Einheit, die sich ganz im Sinne von Lord Kelvin auf atomare Eigenschaften abstützte. Es war die Geburtsstunde der Atomuhren. Seit 1967 bezieht man die Zeiteinheit Sekunde auf die Hyperfeinstruktur-Übergangsfrequenz im Atom Caesium (¹³³Cs). Die hoch reproduzierbaren Frequenzen ermöglichen es, die „Weltzeit“ mit der offiziellen Bezeichnung Coordinated Universal Time (UTC) mit einer Standardabweichung von 10^{-15} s darzustellen. Dieser Trend hat sich weiterentwickelt. Mit Bezug auf quantenphänomenologischen Eigenschaften folgte im Jahre 1979 die Einheit Candela und im Jahre 1983 die Einheit Meter.

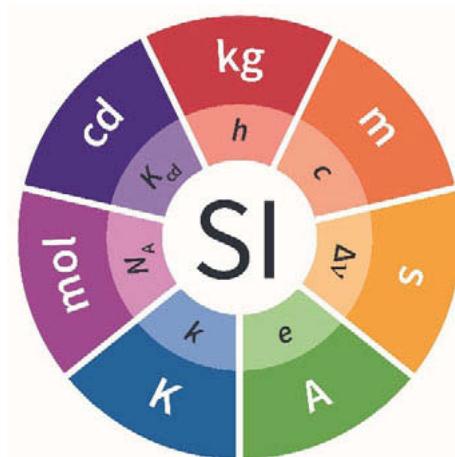
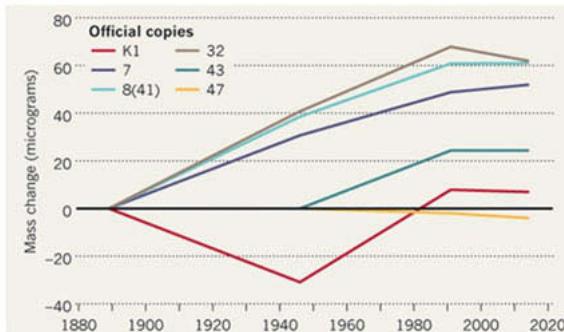


Bild 2: Zusammenhang zwischen neuem und altem SI. Das alte SI baut auf den Basiseinheiten Kilogramm, Meter, Sekunde, Ampere, Kelvin, Mol und Candela auf während das neue SI sich auf Fundamentalkonstante abstützt.

Zwei Einheiten, das Kilogramm und das Ampere waren schließlich für die CGPM ausschlaggebend auf ihrer vierundzwanzigsten Sitzung im Jahre 2011, eine mutige und revolutionäre Entscheidung zu treffen und eine neue Basis für das SI vorzuschlagen. Ganz im Geiste von Max Planck sollte sich keine der Einheiten künftig auf physikalische Normale und deren Instabilität beziehen, sondern über konstante Werte beschrieben werden. Was war geschehen? Am Beispiel des Kilogramm ist das vermutlich am einfachsten zu verstehen. Der IPK wurde im Jahre 1889 zusammen mit mehreren Kopien gefertigt [4, 5]. Viele der Kopien wurden in Mitgliedsländer verteilt und dort zu nationalen Massestandards. In groben Abständen von ca. 40 Jahren wurden diese immer wieder zusammengeführt, um ihre Massen gegeneinander zu vergleichen. Dabei hatte sich herausgestellt, dass sich 22 der 27 nationalen Kopien tendenziell um 50 μg gegenüber dem IPK entfernt hatten (Abbildung 3). Ob der IPK nun leichter oder die Kopien schwerer wurden, ist bis heute nicht geklärt. In jedem Fall war es ein Zustand, den man so nicht hinnehmen wollte.

Eine weitere Motivation lieferte das Ampere [6]. Seine bis dahin bestehende Definition hatte das Ampere an das Kilogramm gebunden. Unbefriedigender aber war, dass das Verfahren zur Realisierung der Stromstärke zu ungenau und zu schwer zu realisieren war. Vor diesem Hintergrund hatte man das Ampere auch schon seit Jahren über Quantennormale dargestellt, mit

der Konsequenz, dass es das SI damit verlassen hatte. Also Gründe genug, um das alte SI einmal grundlegend aufzuräumen



b)

Bild 3: Masseänderung zwischen dem Internationalen Kilogramm Prototypen und der nationalen Kopien

3. Fundamentalkonstante

Konstante Werte beschreiben den festen Bezug zwischen physikalischen Eigenschaften. So hat Planck beispielsweise den Bezug zwischen Energie E und Frequenz f (Gleichung 1) mit seinem Planck'schen Wirkungsquantum h beschrieben.

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

Wie kommt man aber zu den international gültigen Konstanten und wie genau sind diese? Im alten SI sind die Maßverkörperungen, wie beispielsweise der IPK das Maß aller Dinge. Er hat per Definition die Messunsicherheit von Null. Also unendlich genau. Im Fall einer Masseänderung ändert sich daher nicht der IPK, sondern alle davon abhängigen Größen bzw. deren Normale. Das betrifft auch die Konstanten, die mit entsprechenden Unsicherheiten versehen sind. Berechnet wurden und werden die Konstanten vom Committee on Data for Science and Technology (CODATA) [7, 8], einem internationalen Verbund aus Wissenschaftlern, die auf der

Basis rezensierter Veröffentlichungen aktuelle Zahlenwerte für relevante Konstanten vorschlägt. Diese werden dann der CGPM vorgelegt, die endgültig darüber entscheidet, ob die neuen Werte angenommen werden.

Bei der Festlegung der Fundamentalkonstanten war dieses Vorgehen ähnlich. Internationale Messungen, ausgehend von den existierenden Normalen, bildeten die Grundlage für die Berechnung neuer Konstanten. Dieses Mal bestand der Auftrag für CODATA jedoch darin, absolute Werte ohne die Angabe einer Messunsicherheit für die Fundamentalkonstanten zu errechnen und der CGPM vorzuschlagen. Diese Werte befinden sich in Tabelle 1 und wurden am 16. November 2018 auf der Generalkonferenz für Maße und Gewichte zur Verabschiedung des neuen SI festgelegt [9]. Seit dem 20. Mai 2019 sieht die SI-Welt neu aus. Zeigen dann neue Messungen, dass sich physikalische Zusammenhänge ändern, so bleiben die Fundamentalkonstanten unverändert, die Normale werden sich dagegen ändern. Um das nochmals am Beispiel des IPK zu verdeutlichen. Künftig hat der IPK nicht nur eine Messunsicherheit, seine Masse, die ursprünglich unverändert immer 1 kg betrug, kann sich dann aufgrund genauerer oder veränderter Messungen immer wieder einmal ändern.

Tabelle 1 Fundamentalkonstanten des Internationalen Einheitensystems (ab 20. Mai 2019).

Darin sind hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, mit den Symbolen Hz, J, C, lm, and W Einheiten, die sich auf die Einheiten second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, mit den Symbolen s, m, kg, A, K, mol, und cd, beziehen.

Die Frequenz $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (133 Cs) _{hfs} des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms ist genau the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ is exactly	9 192 631 770 Hz
Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c ist genau The speed of light in vacuum c is exactly	299 792 458 m/s
Die Planck-Konstante h ist genau The Planck constant h is exactly	6.626 070 15 $\times 10^{-34}$ J s
Die Elementarladung e ist genau The elementary charge e is exactly	1.602 176 634 $\times 10^{-19}$ C
Die Boltzmann-Konstante k ist genau The Boltzmann constant k is exactly	1.380 649 $\times 10^{-23}$ J/K
Die Avogadro-Konstante N_A ist genau The Avogadro constant N_A is exactly	6.022 140 76 $\times 10^{23}$ mol ⁻¹
Das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} einer monochromatischen Strahlung der Frequenz 540×10^{12} Hz ist genau The luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , is exactly	683 lm/W

Damit stellt sich natürlich die Frage, wozu man den ganzen Aufwand betrieben hat. Außerirdische, mit denen man auf der Basis eines neuen SI kommunizieren möchte, sind derzeit nicht in Sicht. Die Chance, die das neue SI bietet, liegt vielmehr in der gewonnenen Unabhängigkeit und Flexibilität, mit der sich die SI-Einheiten realisieren lassen. Künftig können beliebige Experimente zur Realisierung der Einheiten aufgebaut werden. Der Unterschied lässt sich wieder am Beispiel der Masse erklären. Alle Gewichte, Kräfte, Drehmomente und weitere Einheiten, ob größer oder kleiner, wurden bisher von einer einzigen Referenz, dem IPK abgeleitet. Die kleinsten Massenormale bewegen sich bis heute im Bereich von 1 mg, schlicht aus dem Grund, weil es keine kleinere handhabbare Gewichtsstücke gibt. Mit dem Ansatz der Fundamentalkonstanten kann es dagegen auf der Basis neuer Ansätze durchaus möglich sein, kleinere Massen bis hin zu atomaren Größen direkt zu realisieren.

Um die Festlegungen für das alte und neue SI unverfälscht wiederzugeben, sind die Definitionen für die Einheiten in Englisch wiedergegeben. In Tabelle 2 befinden sich die deutschen und englischen Bezeichnungen für die Einheiten.

Tabelle 2 Deutsche und englische Bezeichnung der verwendeten Einheiten.

die Sekunde	Second
der Meter	Metre
das Kilogramm	Kilogram
das Ampere	Ampere
das Kelvin	Kelvin
das Mol	Mole
die Candela	Candela

4. Die Definition der neuen Einheiten

Die bisherigen Definitionen der Basiseinheiten wurden im neuen SI alle ersetzt bzw. angepasst, da sich alle Einheiten auf die Fundamentalkonstanten beziehen [1]. Im folgenden werden die neuen Definitionen der Europäischen Union (EU) [10] in Deutsch und Englisch wiedergegeben. Formaljuristisch gelten die neuen Einheiten für Europa auch nicht seit dem 20. Mai 2019, also dem Tag, an dem die Staatenvertreter das Go für die Neudefinition gegeben haben, sondern der 23. Juli 2019, an dem das neue SI durch die EU veröffentlicht wurde. Betrachtet man es ganz genau, kann man sogar in der englischen Version Abweichungen zur BIPM-Broschüre [9] erkennen. Hier sind zwar keine weltbewegenden Unterschiede zu beobachten, aber leichte Modifikationen sind, warum auch immer, vorhanden. Beispielsweise wird bei der Schreibweise von Zahlenwerten statt einem Punkt „,“ immer noch am Komma „,“ festgehalten – und das im Zeitalter der Digitalisierung. Und nimmt man es ganz genau, so ist für Deutschland ausschließlich die deutsche Übersetzung bindend. In einigen Länder, wie Belgien sind es sogar mehrere Sprachen, was den Übersetzern eine hohe Sorgfalt und auch ein fundiertes Fachwissen abverlangt.

Die Sekunde, Maßeinheit der Zeit; the second, unit of time

Die Sekunde, Einheitenzeichen s, ist die SI-Einheit der Zeit. Sie ist definiert, indem für die Cäsiumfrequenz $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, der Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands

des Cäsiumatoms 133, der Zahlenwert 9 192 631 770 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit Hz, die gleich s^{-1} ist.

The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1} .

Der Meter, Maßeinheit der Länge; the meter, unit of length

Der Meter, Einheitenzeichen m, ist die SI-Einheit der Länge. Es ist definiert, indem für die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum c der Zahlenwert 299 792 458 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit m/s, wobei die Sekunde mittels $\Delta\nu_{Cs}$ definiert ist.

The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum c to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{Cs}$.

Das Kilogramm, Maßeinheit der Masse; the kilogram, unit of mass

Das Kilogramm, Einheitenzeichen kg, ist die SI-Einheit der Masse. Es ist definiert, indem für die Planck-Konstante h der Zahlenwert $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit J s, die gleich $kg\ m^2\ s^{-1}$ ist, wobei der Meter und die Sekunde mittels c und $\Delta\nu_{Cs}$ definiert sind.

The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant h to be $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit J s, which is equal to $kg\ m^2\ s^{-1}$, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{Cs}$.

Das Ampere, Maßeinheit der elektrischen Stromstärke; the ampere, unit of electric current

Das Ampere, Einheitenzeichen A, ist die SI-Einheit der elektrischen Stromstärke. Es ist definiert, indem für die Elementarladung e der Zahlenwert $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit C, die gleich A s ist, wobei die Sekunde mittels $\Delta\nu_{Cs}$ definiert ist

The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{Cs}$.

Die Temperatur, Maßeinheit der thermodynamischen Temperatur; the kelvin, unit of the thermodynamic temperature

Das Kelvin, Einheitenzeichen K, ist die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur. Es ist definiert, indem für die Boltzmann-Konstante k der Zahlenwert $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ festgelegt

wird, ausgedrückt in der Einheit $J\ K^{-1}$, die gleich $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$ ist, wobei das Kilogramm, der Meter und die Sekunde mittels h , c und $\Delta\nu_{Cs}$ definiert sind.

The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant k to be $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ when expressed in the unit $J\ K^{-1}$, which is equal to $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h , c and $\Delta\nu_{Cs}$.

Das Mol, Maßeinheit der Stoffmenge; the molde, unit of amount of substance

Das Mol, Einheitenzeichen mol, ist die SI-Einheit der Stoffmenge. Ein Mol enthält genau $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ Einzelteilchen. Diese Zahl entspricht dem für die Avogadro-Konstante N_A geltenden festen Zahlenwert, ausgedrückt in der Einheit mol^{-1} , und wird als Avogadro-Zahl bezeichnet. Die Stoffmenge, Zeichen n , eines Systems ist ein Maß für eine Zahl spezifizierter Einzelteilchen. Bei einem Einzelteilchen kann es sich um ein Atom, ein Molekül, ein Ion, ein Elektron, ein anderes Teilchen oder eine Gruppe solcher Teilchen mit genau angegebener Zusammensetzung handeln.

The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_A , when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number. The amount of substance, symbol n , of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

Die Candela, Maßeinheit der Lichtstärke; the candela, unit of luminous intensity

Die Candela, Einheitenzeichen cd, ist die SI-Einheit der Lichtstärke in einer bestimmten Richtung. Sie ist definiert, indem für das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} der monochromatischen Strahlung der Frequenz 540×10^{12} Hz der Zahlenwert 683 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit $lm\ W^{-1}$, die gleich $cd\ sr\ W^{-1}$ oder $cd\ sr\ kg^{-1}\ m^{-2}\ s^3$ ist, wobei das Kilogramm, der Meter und die Sekunde mittels h , c und $\Delta\nu_{Cs}$ definiert sind.

The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency

540×10^{12} Hz, K_{cd} , to be 683 when expressed in the unit $lm\ W^{-1}$, which is equal to $cd\ sr\ W^{-1}$, or

$cd\ sr\ kg^{-1}\ m^{-2}\ s^3$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h , c and $\Delta\nu_{Cs}$.

5. Zusammenfassung

Grundlage für das neue internationale Einheitensystem sind die sieben Fundamentalkonstanten: die Frequenz $\Delta\nu$ (133Cs)hfs des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms, die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, die Planck-Konstante, die Avogadro-Konstante, die Elementarladung, die Boltzmann-Konstante, und das photometrische Strahlungsäquivalent Kcd einer monochromatischen Strahlung der Frequenz 540×10^{12} Hz. Sie lösen ein System ab, das sich auf physikalische Normale, wie den Internationalen Kilogramm Prototypen, abgestützt hatte. Das neue System ist in seinem Ansatz stabiler, da sich konstante Werte im Gegensatz zu physikalischen Objekten, nicht verändern. Darüber hinaus ist das neue SI auch deutlich flexibler. Es ist nun möglich, einzelne Einheiten auf der Grundlage alternativer physikalischer Gesetzmäßigkeiten auf verschiedenen Wegen darzustellen. Der Bezug auf die neuen Fundamentalkonstanten hin zu handhabbaren Gebrauchsnormalen führt über Quantennormale, die in ihrer Genauigkeit bisher unübertroffen sind. Auswirkungen hat das neue SI zunächst in Metrologieinstituten und wissenschaftlichen Einrichtungen. Für den Verbraucher wird sich dagegen nichts ändern, da die Änderungen sehr klein sind und die Einheiten weiterhin über physikalische Normale weitergegeben werden.

Literatur

- [1] BIPM, Resolutions of the CGPM: 26th meeting (13-16 November 2018);
<https://www.bipm.org/en/CGPM/db/26/> (2019-03-03)
- [2] BIPM, The BIPM and the evolution of the definition of the metre;
<https://www.bipm.org/en/measurement-units/history-si/evolution-metre.html> (2019-03-03)
- [3] M. Planck, Ueber irreversible Strahlungsvorgänge Annalen der Physik Volume 311, Ausgabe 12, Annalen der Physik (1901) 818-831
- [4] R. Davis, The SI unit of mass, Metrologia 40 (2003) 299-305
- [5] G. Girard International report: the third periodic verification of national prototypes of the kilogram 1988–1992, Metrologia 31 (1994) 317–36
- [6] H. Scherer, U Siegner, Elektronen Zählen, um Strom zu messen, PTB-Mitteilungen 126 Heft 2 (2016) 53-61
- [7] D. B. Newell et al., The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI, Metrologia 55 (2017) L13-16
- [8] P. J. Mohr et al., Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment, Metrologia 55 (2018) 125-146
- [9] BIPM, Draft of the ninth SI Brochure, 6 February 2019;
<https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2019.pdf> (2019-03-03)
- [10] Commission Directive (EU) 2019/1258 of 23 July 2019 amending, for the purpose of its adaptation to technical progress, the Annex to Council Directive 80/181/EEC as regards the definitions of SI base units <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019L1258>

Entscheidungsregeln und Konformitätsbewertung – ein Überblick

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

Kurzfassung

Anders als in ihren früheren Fassungen wurde in die DIN EN ISO/IEC 17025: 2018 das Thema „Entscheidungsregeln“ aufgenommen. Wesentlich dabei sind die Berücksichtigung der Messunsicherheit und die Ermittlung der mit Entscheidungen verbundenen Risiken. Es folgt ein Überblick über unterschiedliche Konzepte von Entscheidungsregeln und Konformitätsaussagen, die sich auf messtechnische Spezifikationen beziehen.

Abstract

In contrast to its earlier versions, DIN EN ISO/IEC 17025: 2018 includes the topic “Decision rules”. In these, the consideration of measurement uncertainty and the determination of the risks associated with decisions are essential. The following text gives an overview of different concepts of decision rules and conformity statements relating to metrological specifications.

1. Einleitung

In der DIN EN ISO/IEC 17025: 2018 ist, anders als in ihren früheren Fassungen, der Begriff „Entscheidungsregel“ definiert: „Regel, die beschreibt, wie die Messunsicherheit berücksichtigt wird, wenn Aussagen zur Konformität mit einer festgelegten Anforderung getätigt werden“ (DIN EN ISO/IEC 17025: 2018, Abschnitt 3.7) [1]. Aus dem Abschnitt 7.8.6 der Norm ergibt sich, dass in Kalibrierscheinen und Prüfberichten Konformitätsaussagen bzgl. einer Spezifikation oder Norm zulässig sind. Dabei ist das mit der angewandten Entscheidungsregel verbundene Risiko zu berücksichtigen [1]. Im erwähnten Abschnitt ist angemerkt, dass eine weitere Berücksichtigung des Risikos nicht notwendig ist, wenn die Entscheidungsregel durch den Kunden, durch Vorschriften oder durch normative Dokumente vorgegeben ist. Dieser Spezialfall wird im Folgenden nicht weiter behandelt. Gleches gilt für Konformitätsaussagen bzgl. einer Norm.

Es geht hier um Konformitätsaussagen, die sich auf Spezifikationen beziehen und auf Messwerten beruhen. Jedem Messwert wird eine Messunsicherheit beigeordnet, die nach dem GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) ermittelt wird. In Tabelle 1 sind der GUM und ergänzende Dokumente aufgelistet. JCGM 106 gibt einen nahezu umfassenden Überblick über Entscheidungsregeln und Konformitätsaussagen [2]. Ein Überblick zum Thema in der Bioanalytik und chemischen Analytik ist z. B. in [15] zu finden.

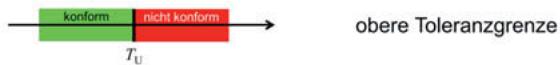
Tabelle 1: Normative Grundlagen zur Ermittlung der Messunsicherheit und zu Entscheidungsregeln

Leitfaden	Titel
JCGM 100:2008	Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)
JCGM 104:2009	Evaluation of measurement data - An introduction to the GUM and related documents
JCGM 101:2008	Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the GUM - Propagation of distributions using a Monte Carlo method
JCGM 102:2011	Evaluation of measurement data - Supplement 2 to the GUM - Extension to any number of output quantities
JCGM 106:2012	Evaluation of measurement data - The role of measurement uncertainty in conformity assessment
JCGM 200:2012	International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM 3 rd edition)
OIML R 19: 2017 (E)	The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology
ILAC-G8: 09/2019	Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity
DIN EN ISO 14253-1:2018	Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen (EN ISO 14253-1:2017)

2. Grundsätzliches

Die Spezifikationen werden durch Toleranzgrenzen (Fehlertoleranzen) dargestellt. Konformitätsaussagen können sich auf einseitige oder zweiseitige Toleranzgrenzen beziehen, s. Bild 1. Auch sind kompliziertere Fälle möglich, treten in der Praxis jedoch selten auf.

einseitige Toleranzintervalle



zweiseitige Toleranzintervalle



Bild 1: Toleranzgrenzen

Die möglichen Werte eines Messwertes, der mit den Toleranzen verglichen wird, werden durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit, in wie weit der Messwert der Spezifikation entspricht, kann anhand der Wahrscheinlichkeitsverteilung und der Toleranzgrenzen (Spezifikationsgrenzwerte, Fehlergrenzen) errechnet werden. Da das Wissen über die Übereinstimmung des Messwertes mit dem wahren Wert der Messgröße – der nie bekannt ist – unvollständig ist, besteht das Risiko einer falschen Entscheidung bezüglich der Erfüllung oder Nichterfüllung der Spezifikation. Solche falschen Entscheidungen treten in zwei Formen auf: Kunden- und Lieferantenrisiko (Herstellerrisiko). Sie sind voneinander abhängig: Wird das eine gesenkt, erhöht sich das andere.

Tabelle 2: Risiko falscher Entscheidungen

Lieferantenrisiko: Risiko / Wahrscheinlichkeit, dass ein Messgerät die Spezifikationen **erfüllt**, obwohl eine **Nichtübereinstimmung** bei der Konformitätsbewertung vorlag
(eine Art „falsch-negativ“, „falscher Alarm“, α -Fehler)
fail-error probability

Kundenrisiko: Risiko / Wahrscheinlichkeit, dass ein Messgerät die Spezifikationen **nicht erfüllt**, obwohl eine **Übereinstimmung** bei der Konformitätsbewertung vorlag
(eine Art „falsch-positiv“, „Fehlanzeige“, β -Fehler)
pass-error probability

Im Wesentlichen gibt es zwei Methoden, die Einhaltung oder Nichteinhaltung von Spezifikationsgrenzen zu ermitteln:

- Festlegung eines Akzeptanzbereichs von annehmbaren Messwerten, [2] bis [7] [9] bis [14]
- direkte Berechnung aus der Wahrscheinlichkeitsdichte der Messwerte, [2] [3] [11] [13] [17]

3. Akzeptanzbereich und Schutzabstand

Der Akzeptanzbereich ist der Satz von Werten einer Größe für einen bestimmten Messprozess und eine bestimmte Entscheidungsregel, die zur Produktakzeptanz führen, sofern das Messergebnis innerhalb dieses Bereichs liegt (*Acceptance zone*). Der Ablehnungsbereich beschreibt den Satz von Werten einer Größe für einen bestimmten Messprozess und eine bestimmte Entscheidungsregel, die zur Nichtübereinstimmung führen, sofern das Messergebnis innerhalb dieses Bereichs liegt (*Rejection zone*) [2] [3].

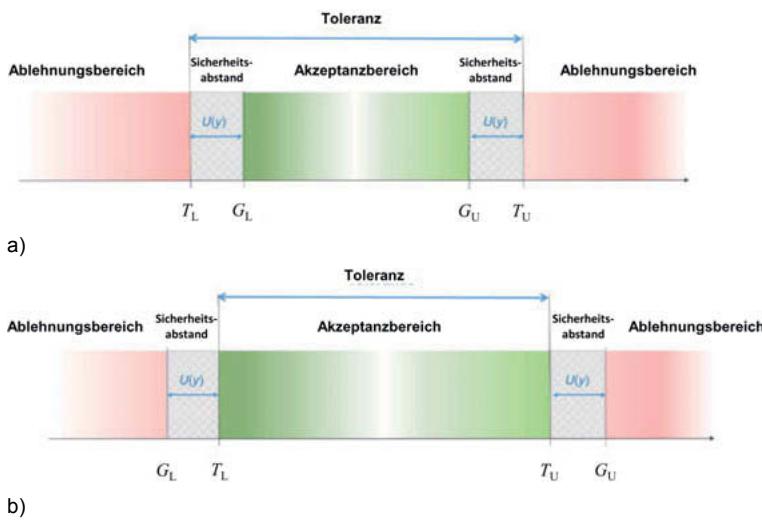


Bild 2: Akzeptanzbereich, Ablehnungsbereich und Schutzabstand (Sicherheitsabstand, guard band) [2] [3]. Im Fall a) ist das Kundenrisiko minimiert und im Fall b) das Lieferantenrisiko.

Im Bild 2 ist der Schutzabstand g gleich der erweiterten Messunsicherheit $U(y)$, welche dem Messergebnis y zugeordnet ist. Allgemein ist $g = h \cdot U$, wobei h der Schutzabstandsfaktor (guard band factor) ist. Sein Wert hängt davon ab, welche Wahrscheinlichkeit P_c für die Übereinstimmung mit der Spezifikation gewählt wird. Im Fall einer Normalverteilung ist $h = \frac{1}{2} \Phi^{-1}(P_c)$ mit $\Phi^{-1}(p) \equiv \sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(2p - 1)$, $0 < p < 1$ [13].

4. Berechnung mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichte

Die Einhaltung oder Nichteinhaltung einer Toleranzgrenze kann auch mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichte berechnet werden [2] [3] [11] [13] [17], s. Bild 3. Im Fall einer Normalverteilung geht dies analytisch, ansonsten meist nur numerisch, z. B. mit der Monte-Carlo-Methode.

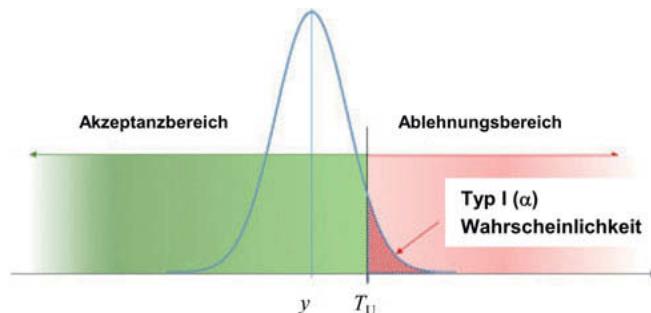


Bild 3: Wahrscheinlichkeit (schräffierte Fläche rechts von T_U) der Nichtübereinstimmung des Messergebnisses mit der Spezifikation [2] [3].

Einen Spezialfall stellt das Berechnungsverfahren in UKAS M3003 Anhang M dar [8]. Dabei wird eine Normalverteilung vorausgesetzt, und es ist zu beachten, dass dieses Verfahren nur dann gültig ist, wenn die Unsicherheit eine der Spezifikationsgrenzen überschreitet (s. die Fläche rechts von „Upper specification limit“ im Bild 4). Aus diesem Grund sollte die Unsicherheit so gering sein, dass sich nur ein unbedeutender Teil der Verteilung der anderen Grenze nähert (M2.18 in [8]). Dabei wird aus der inversen Standardnormalteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung der Ausdruck $\left| \frac{L_S - y}{u_c(y)} \right|$ berechnet. L_S ist die betrachtete Toleranzgrenze, y das Messergebnis und $u_c(y)$ die ihm beigeordnete kombinierte Messunsicherheit.

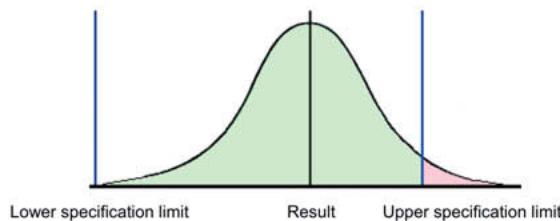


Bild 4: Beispiel für die Voraussetzung des Berechnungsverfahrens in UKAS M3003 [8] mit unterer Toleranzgrenze (Lower specification limit), Messergebnis (Result) und oberer Toleranzgrenze (Upper specification limit).

Die Entscheidungsrisiken verringern sich, wenn man Vorwissen über das Messgerät in die Entscheidung einbezieht [2] [6] [13] [16], z. B. Kenntnisse über dessen Produktion oder aus Messungen vieler Exemplare des Messgerätes. Es liegt dann z. B. eine Situation vor wie im Bild 5 dargestellt. Die entsprechende Berechnungsmethode und Beispiele dazu sind z. B. in JCGM 106 ab Kapitel 9 dargestellt [2]. Weitere Methoden, bei denen vor allem die Risikoreduzierung im Vordergrund steht, sind in [6] und [7] beschrieben.

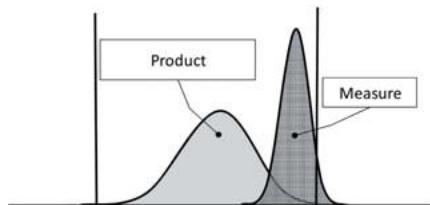


Bild 5: Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Verbindung mit dem Produktionsprozess und dem Messprozess [16]

5. Literatur

- [1] DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien
- [2] JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data - The role of measurement uncertainty in conformity assessment (<https://www.bipm.org/en/publications/guides/>); auch erschienen als ISO/IEC Guide 98-4:2012 Uncertainty of measurement - Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment
- [3] EUROLAB Technical Report No. 1/2017, Decision rules applied to conformity assessment (<http://www.eurolab.org/>)
- [4] EUROLAB-Deutschland "Kochbuch" Dokument Nr. 08 Rev. 2018, Feststellung der Einhaltung von Spezifikationen unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten – Mögliche Strategien
- [5] EURACHEM / CITAC Guide:2007, Use of uncertainty information in compliance assessment, First Edition 2007 (<https://eurachem.org/>, <http://www.citac.cc/guides.html>)
- [6] Michael Dobbert, A Guard-Band Strategy for Managing False-Accept Risk – Keysight White Paper, May 13, 2015
- [7] Scott M. Mimbs (NASA), Conformance Testing: Measurement Decision Rules. 2010 NCSL International Workshop and Symposium
- [8] UKAS M3003, The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, Edition 3, November 2012 (<https://www.ukas.com/>)
- [9] SAS 216dw, 2019-01, Rev. 02, Entscheidungsregeln bei Konformitätsaussagen in Kalibrierzertifikaten (<https://www.sas.admin.ch/>)
- [10] ILAC-G8: 09/2019, Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity (<https://ilac.org/>)
- [11] OIML G 19: 2017 (E), The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology (<https://www.oiml.org/en>)
- [12] DIN EN ISO 14253-1:2018, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen (EN ISO 14253-1:2017)
- [13] Martin Czaske, Usage of the uncertainty of measurement by accredited calibration laboratories when stating compliance, Accred Qual Assur (2008) 13: 645-651, DOI 10.1007/s00769-008-0460-0

- [14] Jonathan Harben, Paul Reese (2012); Risk Mitigation Strategies for Compliance Testing, NCSLI Measure, 7:1, 38-49, DOI: 10.1080/19315775.2012.11721585
- [15] Elio Desimoni, Barbara Brunetti; Uncertainty of measurement and conformity assessment: a review, Anal Bioanal Chem (2011) 400:1729-1741, DOI 10.1007/s00216-011-4776-y
- [16] J.-M. Pou and L. Leblond, Control of customer and supplier risks by the guardband method, Int. J. Metrol. Qual. Eng. 6, 205 (2015), DOI 10.1051/ijmpe/2015012
- [17] Methodik zur Berücksichtigung von Messunsicherheiten bei messtechnischen Prüfungen im Geltungsbereich der Röntgenverordnung und der Strahlenschutzverordnung – Empfehlung der Strahlenschutzkommission, 15.-16.09.2016 (<http://www.ssk.de>)

Spezifikationen verstehen – Basis der Konformitätsbewertung und Messunsicherheitsbetrachtung

Understanding specification – basis for conformity statement and measurement uncertainty analysis

Dipl.-Phys. (Univ.) **Andreas Charles Böck**,
esz AG calibration & metrology, Eichenau

Kurzfassung

In der täglichen Arbeit eines Kalibrierlabors spielt die Konformitätsbewertung eine ganz wesentliche Rolle, insbesondere in der Erwartung der Kunden des Kalibrierlabors. Sehr häufig wird dabei die Herstellerspezifikation für Konformitätsaussagen herangezogen. Dabei stellen sich die Interpretation der Herstellerdokumente und deren Spezifikationsangaben als besondere Herausforderung dar, die neben der Fachkenntnis auch Erfahrung und Geduld erfordert.

Das Verständnis der Herstellerspezifikationen kann im Weiteren auch dazu dienen, die richtige Wahl der Einflussgrößen für die Messunsicherheitsbilanz zu treffen.

Abstract

On a day to day basis the conformity statement plays a leading role in a calibration laboratory, especially in the expectations of the calibration laboratory's customers. Very often the manufacturer's specifications are used for statements of conformity. The interpretation of the manufacturer's documents and its specification statements appear as a particular challenge, which requires expertise and also experience and patience.

Understanding the manufacturer's specifications may be additionally useful in the choice of influence quantities for the measurement uncertainty budget.

1. Was sind Spezifikationen? Wie lese ich Spezifikationen?

Die Konformitätsbewertung spielt in der täglichen Arbeit eines Kalibrierlabors eine ganz zentrale Rolle. Die Erwartung seiner Kunden an die Dienstleistung reduziert sich teilweise ausschließlich auf diese Konformitätsaussage. Der Konformitätsbereich, der Spezifikationsbereich beziehungsweise das Spezifikationsintervall kann dabei unterschiedliche Quellen haben und es gilt, dieses im Vorfeld zu definieren.



Bild 1: Das Spezifikationsintervall als Basis der Konformitätsbewertung

Mögliche Quellen können dabei normative Vorgaben, Kundenanforderungen oder eben Angaben des Herstellers sein. Im letzteren Fall ist die Art der Darstellung maßgeblich für das Verständnis oder eben auch Missverständnis. Im Folgenden soll klar werden, welche Art der Darstellungen am häufigsten auftreten und anhand von zwei konkreten Beispielen soll ersichtlich werden, welche Interpretationsmöglichkeiten und Lesarten zum Ziel führen. Auch soll gezeigt werden, dass das Lesen von Herstellerspezifikationen gerne auch wie in einer „Schnitzeljagd“ der Jagd nach Hinweisen (und Fußnoten) gleicht.

Grundsätzlich lassen sich Spezifikationsangaben in zwei Gruppen einteilen: absolute Angaben und relative Angaben.

Die absoluten Spezifikationsangaben sind entweder in der Einheit der physikalischen Messgröße oder als Vielfaches der Anzeigeauflösung des entsprechenden Messgerätes, den sogenannten Ziffernschritten (im Englischen als *digits* oder abgekürzt *D* bezeichnet), angegeben.

Bei relativen Angaben können diese Angaben z.B. in Prozent (%, 10^{-2}), Promille (‰, 10^{-3}), parts per million (ppm, 10^{-6}), parts per billion (ppb, 10^{-9}), etc. oder logarithmisch (dB) sein. Von zentraler Wichtigkeit ist bei relativen Spezifikationen die Angabe des Bezugs. Hier kann es z.B. sein, dass der Bezug der Anzeigewert des Messgerätes (im Englischen als *reading* oder abgekürzt *rdg* bezeichnet) oder der Messbereich des Messgerätes (im Englischen als *full scale* oder abgekürzt *FS* bezeichnet) ist. Bei Letzterem ist darauf zu achten, ob der angegebene Messbereich nur eine (symbolische) Bezeichnung darstellt, dann auch als Nennbereich bezeichnet, und der Messbereich mit einem sogenannten Überlauf (im Englischen *Overrange*) tatsächlich größer ist und ob der Bezug nun auf den Nennbereich oder Überlauf verweist. Die Interpretation des Messbereichs kann sich aber auch auf die sogenannte Spanne beziehen, falls es sich um einen Bereich mit positivem und negativem Vorzeichen handelt (z.B. ± 1 V, also von -1 V über 0 V bis +1 V, die Spanne wäre hier 2 V). Hier besteht dann besondere Verwechslungsgefahr in englischen Datenblättern, die den *full span* genauso wie den *full scale* mit *FS* abkürzen. Wie dieses Detail schon erahnen lässt, birgt die Angabe von Spezifikationen eine Fülle von Möglichkeiten der Darstellung.

Tabelle 1: Auswahl an Darstellungen der Spezifikation und sich damit ergebende Minima und Maxima des resultierenden Spezifikationsintervalls.

Bereich	Anzeigewert	Spezifikation	Minimum/Maximum
2 V	1,000 V	$\pm 0,025$ V	0,975 V/1,025 V
2 V	1,000 V	± 25 D	0,975 V/1,025 V
2 V	1,000 V	$\pm 2,5 \%$ _{rdg}	0,975 V/1,025 V
2 V	1,000 V	$\pm 25 \%$ _{rdg}	0,975 V/1,025 V
2 V	1,000 V	± 25000 ppm _{rdg}	0,975 V/1,025 V
2 V	1,000 V	± 2500000 ppb _{rdg}	0,975 V/1,025 V
2 V	1,000 V	$\pm 1,25 \%$ _{FS}	0,975 V/1,025 V
2 V	1,000 V	$\pm 12,5 \%$ _{FS}	0,975 V/1,025 V
2 V	1,000 V	± 12500 ppm _{FS}	0,975 V/1,025 V

Tabelle 1 gibt eine Auswahl an möglichen Darstellungsweisen am Beispiel einer Spannungsanzeige. Der angezeigte Wert (1,000 V) und auch der Bereich (2 V) sind dabei stets gleich. Viel verblüffender mag jedoch erscheinen, dass das Spezifikationsintervall trotz der unterschiedlichen Spezifikationsangaben ebenfalls gleich bleibt. Üblicherweise werden jedoch in Herstellerdokumenten Kombinationen aus den obengenannten Darstellungsweisen verwendet. Hier wird klar, welcher Herausforderung sich täglich ein Kalibrierlabor bei der Auseinandersetzung und Interpretation von (Hersteller-) Spezifikationen stellt.

Die folgenden zwei Beispiele sollen vor Augen führen, welche Feinheiten auch bei vermeintlich einfachen Geräten in den Herstellerspezifikationen zu beachten sind, damit am Ende das richtige Konformitätskriterium gewählt wird. Zudem zeigen die Beispiele, welche Einflussfaktoren relevant bei der Erstellung einer Messunsicherheitsbilanz für die spätere Verwendung des entsprechenden Messgeräts sein können.

An dieser Stelle sei eindringlich erwähnt, dass die folgenden Beispiele auf keinen Fall eine Wertung über die genannten Hersteller, Produkte oder deren Dokumentation beabsichtigen. Weiter stellen sie auch keine Werbung für die genannten Hersteller oder Produkte dar.

2. Beispiel 1: Digitalmultimeter

Das erste Beispiel kommt aus dem Bereich der Gleichstrom- und Niederfrequenztechnik und behandelt die Herstellerspezifikation der Wechselspannungsanzeige eines Handmultimeters der Firma GMC-I Gossen Metrawatt GmbH. Folgend die relevanten Eckpunkte zur weiteren Bestimmung des Konformitätsintervalls gemäß der Herstellerspezifikation [1]:

- Hersteller: GMC-I Gossen Metrawatt GmbH
- Modell: MetraHit ONE Plus
- Messgröße: Wechselspannung
- Messwert: 10 V/100 Hz
- Umgebungsbedingungen: 23 °C, 50 % r.F.
- Stromversorgung: neue 9 V-Flachzellenbatterie (E-Block)

Technische Kennwerte									
Messfunktion	Messbereich	Auflösung	Eingangsimpedanz		Eigenabweichung der höchsten Auflösung bei Referenzbedingungen		Überlastbarkeit ¹⁾		Messfunktion
			3000	~	±(... % v. MW + ... D)	±(... % v. MW + ... D)	Wert	Zeit	
V	30 mV	10 µV	>10 GΩ // <40 pF	10 MΩ // <40 pF	0,5 + 3	—	600 V DC AC eff Sinus	dauernd	V
	300 mV	100 µV	>10 GΩ // <40 pF	10 MΩ // <40 pF	0,5 + 3	—			
	3 V	1 mV	11 MΩ // <40 pF	11 MΩ // <40 pF	0,5 + 3	—			
	30 V	10 mV	10 MΩ // <40 pF	10 MΩ // <40 pF	0,5 + 3	—			
	300 V	100 mV	10 MΩ // <40 pF	10 MΩ // <40 pF	0,5 + 3	1 + 3			
	600 V	1 V	10 MΩ // <40 pF	10 MΩ // <40 pF	0,5 + 3	—			

Bild 2: Ausschnitt aus dem Datenblatt des Handmultimeters MetraHit ONE Plus des Herstellers GMC-I Gossen Metrawatt GmbH [1].

Der erste Blick in das Datenblatt des Herstellers (Bild 2) gibt wieder, in welchem Intervall die Anzeigewerte unter Referenzbedingungen zu erwarten sind. In unserem konkreten Fall von 10 V/100 Hz im 30 V-Bereich des Messgerätes ein Intervall von [9,87 V; 10,13 V].

Diese $\pm 0,13$ V für die Spezifikation unter Referenzbedingungen S_{Ref} ergeben sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \pm S_{\text{Ref}} &= \pm 1\% \cdot \text{Messwert} \pm 3 \cdot D \\
 &= \pm 1\% \cdot \text{Messwert} \pm 3 \cdot \text{Auflösung} \\
 &= \pm 1\% \cdot 10 \text{ V} \pm 3 \cdot 0,01 \text{ V} \\
 &= \pm 0,10 \text{ V} \pm 0,03 \text{ V} \\
 &= \pm 0,13 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Tabelle 2: Herstellerspezifikation laut Datenblatt des Handmultimeters MetraHit ONE Plus des Herstellers GMC-I Gossen Metrawatt GmbH [1] ohne Berücksichtigung der Referenzbedingungen.

Bereich	Mess-/Kalibrierwert	Spezifikation	Minimum/Maximum
30 V	10,00 V/100 Hz	$\pm 1\% \pm 3\text{ D}$, $\pm ?$	9,87 V/10,13 V

Aber was sind nun diese Referenzbedingungen und erfüllen alle Parameter eben diese? Ein weiterer Blick in das Datenblatt des Herstellers (Bild 3) verrät, dass letzteres nicht der Fall ist. Zwei unserer Parameter weichen von den Referenzbedingungen ab: die Frequenz der Messgröße (100 Hz) und die Betriebsspannung (typischerweise deutlich über 9 V bei neuen Batterien dieses Typs).

Referenzbedingungen		Stromversorgung
Umgebungstemperatur	$+23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ K}$	
Relative Feuchte	40 % ... 60 %	
Frequenz der Messgröße	45 Hz ... 65 Hz	
Kurvenform der Messgröße	Sinus	9 V-Flachzellenbatterie; Zink-Kohle-Batterie nach IEC6F22; Alkali-Mangan-Zelle nach IEC6LR61 oder entsprechender NiCd-Akku
Batteriespannung	$8\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$	

Bild 3: Ausschnitte zu den Referenzbedingungen und der Stromversorgung aus dem Datenblatt des Handmultimeters MetraHit ONE Plus des Herstellers GMC-I Gossen Metrawatt GmbH [1].

Der Hersteller gibt also vor, unter welchen Bedingungen seine Spezifikationen Gültigkeit haben. Ohne weitere Angaben des Herstellers ist eine Konformitätsbewertung nach Herstellerspezifikationen nicht möglich und kann nur nach anderen Kriterien erfolgen (z.B. normativen Vorgaben, Kundenanforderungen vgl. 1.).

Tabelle 3: Herstellerspezifikation laut Datenblatt des Handmultimeters MetraHit ONE Plus des Herstellers GMC-I Gossen Metrawatt GmbH [1] mit Festlegung der offenen Referenzbedingungen.

Bereich	Mess-/Kalibrierwert	Spezifikation	Minimum/Maximum
30 V	10,00 V/100 Hz	$\pm 1\% \pm 3\text{ D}$, $\pm \text{Freq.}$, $\pm \text{Batt.}$	9,87 V/10,13 V ? V/? V

Aber der Hersteller hat in diesem Fall eine Auswahl an Einflussgrößen und deren Einfluss auf die Spezifikation quantifiziert (Bild 4) und macht damit eine Konformitätsaussage in Bezug auf eben diese möglich.

Einflussgrößen und Einflusseffekte			
Einflussgröße	Einflussbereich	Messgröße/ Messbereich	Einflusseffekt \pm % v. MW ... Digit
Temperatur	0 °C ... +21 °C und +25 °C ... +40 °C	30.000 mV \pm	1,0 + 3
		3 ... 300 V \pm	0,15 + 1
		600 V \pm	0,2 + 1
		V \sim	0,4 + 2
		300 μ A \pm	0,5 + 1
		300 mA \pm	0,5 + 1
		3 A/10 A \pm	0,5 + 1
		A \sim	0,75 + 1
		30 Ω \pm	0,15 + 2
		300 Ω	0,25 + 2
Frequenz der Messgröße	> 65 Hz ... 400 Hz	3 k Ω ... 3 M Ω	0,15 + 1
		30 M Ω	1,0 + 1
		-200 ... +200 °C	0,5 % + 2
		+200 ... +850 °C	0,5 % + 2
Frequenz der Messgröße	> 400 Hz ... 1 kHz	3 ... 600 V \sim	2,0 + 3
		> 65 Hz ... 1 kHz	A \sim
Einflussgrößen und Einflusseffekte			
Einflussgröße	Einflussbereich	Messgröße/ Messbereich	Einflusseffekt
Batteriespannung	< 7,9 V < 8,1 V ... 10,0 V	V \pm	± 2 Digit
		V \sim	± 4 Digit
		A \pm	± 4 Digit
		A \sim	± 6 Digit
		30 Ω / 300 Ω / °C	± 4 Digit
		3 M Ω ... 30 M Ω	± 3 Digit
Relative Luftfeuchte	75% 3 Tage Gerät aus	V \pm	1x Eigenabweichung
		A \pm	
		Ω \pm	
		°C \pm	
DATA	—	—	± 1 Digit
		MN / MAX	± 2 Digit
1) Bei Temperatur: Fehlerangaben gelten pro 10 K Temperaturänderung. Bei Frequenz: Fehlerangaben gelten ab einer Anzeige von 300 Digit. ← 2) Mit Nullpunktfehlstellung 3) Ab der Anzeige des Symbols „ ← “.			

Bild 4: Ausschnitte zu den Einflussgrößen und Einflusseffekten aus dem Datenblatt des Handmultimeters MetraHit ONE Plus des Herstellers GMC-I Gossen Metrawatt GmbH [1].

Für unser Beispiel von 10 V/100 Hz entnehmen wir für die Einflussgröße der Frequenz eine zusätzliche Spezifikation von $\pm 2\%$ des Messwertes und 3 Ziffernschritten.

Hier sei erwähnt, dass die weitere Bedingung in Fußnote 1 („Bei Frequenz: Fehlerangaben gelten ab einer Anzeige von 300 Digit“) durch die Wahl des entsprechenden Bereichs abgedeckt wurde, da 10 V im 30 V-Bereich mit einer Auflösung von 10 mV 1000 Ziffernschritte entsprechen und somit größer ist als 300 Ziffernschritte.

Bei der Batteriespannung als Einflussgröße entnehmen wir 4 Ziffernschritte als Einfluss bei Messungen einer Wechselspannung.

Die Gesamtspezifikation S_{gesamt} erhalten wir nun durch Summieren aller Spezifikationsanteile wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \pm S_{\text{gesamt}} &= \pm 1\% \cdot \text{Messwert} \pm 3 D \pm 2\% \cdot \text{Messwert} \pm 3 D \pm 4 D \\
 &= \pm 3\% \cdot \text{Messwert} \pm 10 \cdot \text{Auflösung} \\
 &= \pm 3\% \cdot 10 V \pm 10 \cdot 0,01 V \\
 &= \pm 0,30 V \pm 0,10 V \\
 &= \pm 0,40 V
 \end{aligned}$$

Tabelle 4: Herstellerspezifikation laut Datenblatt des Handmultimeters MetraHit ONE Plus des Herstellers GMC-I Gossen Metrawatt GmbH [1] mit Berücksichtigung der Referenzbedingungen und der vom Hersteller quantifizierten Einflussgrößen.

Bereich	Mess-/Kalibrierwert	Spezifikation	Minimum/Maximum
30 V	10,00 V/100 Hz	$\pm 1\% \pm 3\text{ D}$, $\pm 2\% \pm 3\text{ D}$, $\pm 4\text{ D}$	9,87 V/10,13 V - 9,60 V/10,40 V

Das Ergebnis unserer „Schnitzeljagd“ hat also ergeben, dass unser Konformitätsintervall laut Herstellerspezifikation $\pm 0,40\text{ V}$ entspricht.

3. Beispiel 2: Kraftaufnehmer

Das zweite Beispiel kommt aus dem Bereich der Kraftmessung und behandelt die Herstellerspezifikation einer Messkette bestehend aus dem Kraftaufnehmer und des dazugehörigen Anzeigegeräts des Herstellers AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik.

Folgend die relevanten Eckpunkte zur weiteren Bestimmung des Konformitätsintervalls gemäß der Herstellerspezifikation [2], [3]:

- Kraftaufnehmer:
 - Hersteller: AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik
 - Modell: KAP-S / 50kN, Klasse 0,1
- Anzeigegerät:
 - Hersteller: AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik
 - Modell: AE 703
- Messgröße: Kraft
- Messwert: 10 kN
- Umgebungsbedingungen: 23 °C

Grundsätzlich lässt sich zu einer solchen Art von Messkette sagen, dass sich die Spezifikation aus zwei Anteilen zusammensetzt:

- Spezifikation des Kraftaufnehmers
- Spezifikation des Anzeigegerätes

Die Spezifikation des Kraftaufnehmers lässt sich wiederum unterteilen und alle Einflussparameter, wie Linearität, Hysterese, Kriechen und Reproduktion sind zu berücksichtigen, da die Klassenangaben des Herstellers in der Regel lediglich über den größten Anteil aller anzuwendenden Spezifikationsanteile Auskunft gibt. Bei der Interpretation der Klassenangabe als größten Anteil handelt es sich um eine branchenübliche Herangehensweise.

Zum besseren Verständnis im weiteren Verlauf seien hier die typischen Einflussparameter bei der Kraftmessung mit einem Kraftaufnehmer aufgeführt und erläutert.

- **Linearität** (Bild 5, a)): Größte Anzeigeabweichung von der Ideallinie (Linearisierung). In der Regel während einer Kalibrierung festgestellt.
- **Hysteresis** (Bild 5, b)): Unterschied in der Abweichung zwischen Messreihen in aufsteigender und absteigender Belastungsrichtung. In der Regel während einer Kalibrierung festgestellt.
- **Kriechen** (Bild 5, c)): Zeitliche Veränderung der Anzeige, die sich nach Einstellen der Kraftstufe über einen bestimmten Zeitraum beobachten lässt. Dieses sogenannte Kriechen tritt sowohl in Belastungsrichtung (Belastungskriechen) als auch Entlastungsrichtung (Entlastungskriechen) auf.
- **Reproduktion** (Bild 5, d)): Statistische Schwankung des Anzeigewertes, die sich bei der Wiederholung der Kraftstufe unter denselben (Wiederholpräzision) oder annähernd denselben Bedingungen (Vergleichspräzision) ergibt.

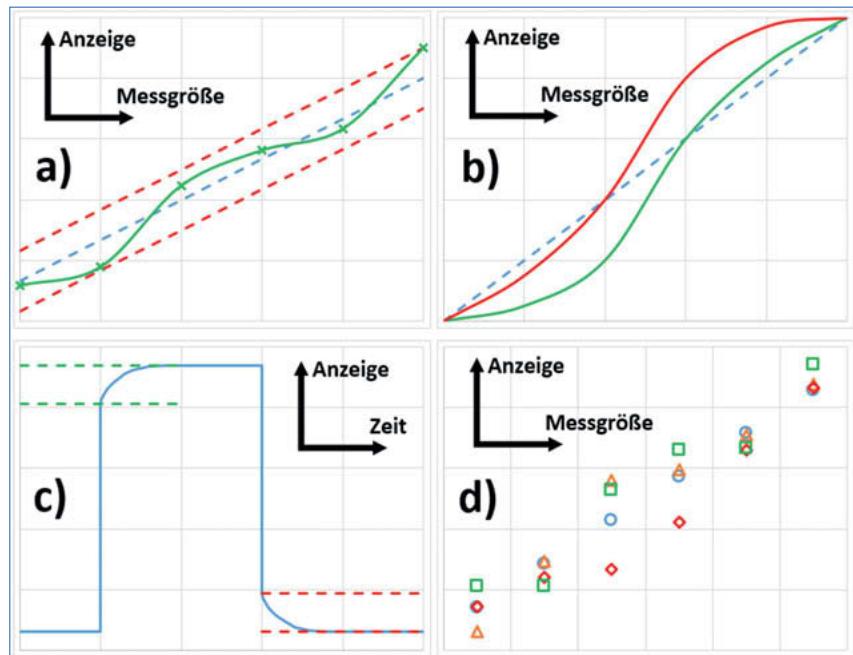


Bild 5: Einflussgrößen bei einer Kraftmessung a) Linearität, b) Hysterese, c) Kriechen, d) Reproduktion.

3.1. Herstellerspezifikation des Kraftaufnehmers

Bild 6 zeigt den relevanten Ausschnitt aus dem Datenblatt des Herstellers zur Quantifizierung der Einflussgrößen des Kraftaufnehmers.

Technische Daten					
Genauigkeitsklasse	% F _{nom}	0,2	0,1	0,05 ¹⁾	0,2 ²⁾ KAP-E
Nennkraft (F _{nom})	N	5/ 10/ 20	5/ 10/ 20/ 50	50/ 100/ 200	10/ 20/ 50/ 100/ 200/ 500
Nennkraft (F _{nom})	kN		0,1/ 0,2/ 0,5/ 1	0,5/ 1/ 2/ 3/ 5	1/ 2
Nennkraft (F _{nom})	kN		2/ 3/ 5/ 10/ 20/ 50	10/ 20/ 50	
Maximale Gebrauchskraft (F _a) bis 50N	% F _{nom}		120 (Überlastschutz)		120 (Überlastschutz)
Maximale Gebrauchskraft (F _a) ab 100N	% F _{nom}		150		150
Bruchkraft (F _b) bis 50N (Überlastschutz)	% F _{nom}		> 500		> 500
Bruchkraft (F _b) ab 100N	% F _{nom}		> 300		> 300
Grenzquerkraft (F _q)	% F _{nom}		10		10
Nennkenntwert (C _{nom})	mV/V	2,000 ± 0,002; für 10/ 20/ 50N: 2,000 ± 0,005			
Relative Abweichung des Nullsignals	%	≤1; für 10/ 20/ 50N: ≤10			
Referenzspeisespannung (U _m)	VDC	5			
Gebrauchsbereich der Speisespannung	VDC	5 ... 10			
Eingangswiderstand (R _e)	Ω	380 ± 30			
Ausgangswiderstand (R _a)	Ω	353 ± 3			
Isolationswiderstand (R _{is})	Ω	> 5 x 10 ⁹			
Relative Linearitätsabweichung (d _{lin})	%	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,05	0,1 ³⁾
Relative Umkehrspanne (v)	%	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,05	
Temperatureinfluss auf das Nullsignal (TK ₀)	%/10K	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,05	0,2
Temperatureinfluss auf den Kennwert (TK _c)	%/10K	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,05	
TK des Ausgangssignals unter Belastung	%/10K				0,1 ³⁾
Relatives Kriechen über 30 Minuten (d _{ct,F+0})	%	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,05	0,2
Toleranz des Ausgangssignals	%				0,1 ³⁾
Toleranz des Nullsignals	%				≤ 1
Referenztemperatur (T _{ref})	°C	+23			+23
Nenntemperaturbereich (B _{T,nom})	°C	-20 ... +60			-20 ... +60
Gebrauchstemperaturbereich (B _{T,G})	°C	-30 ... +70			-30 ... +70
Lagerungstemperaturbereich (B _{T,L})	°C	-30 ... +70			-40 ... +70
Schutztart (EN 60529)		IP 42			IP 42
Speisespannung	VDC				19 ... 28
Stromaufnahme	mA				35 (bei 24V) 20 (bei 12V)
Ausgangsignal für Druckkraft (0...F _h)	V				
Wahlweise:					
- Spannungsausgang (max. 5mA belastbar)					0 ... 10
- Stromausgang	mA				4 ... 20 (max. Bürde 300 Ω)
Ausgangsignal für Zug- o. Druckkraft (-F _u ... +F _h)	V				0 ... 5
- Spannungsausgang					4 ... 20 (max. Bürde 100 Ω)
					-10 ... +10
					-5 ... +5

Alle Daten nach VDI/VDE/DKD 2638

1) bei 0,004 F_{nom} beträgt der typische Linearitätsfehler <1%

2) Genauigkeitsklasse 0,1 auf Anfrage

3) 0,2 bei 4 ... 20mA

Bild 6: Ausschnitt aus dem Datenblatt der Kraftaufnehmer-Serie KAP-S, KAP-E des Herstellers AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik [2].

Die folgenden Angaben lassen sich direkt aus den Herstellerspezifikationen entnehmen:

- $\leq 0,1\%$ für die relative Linearitätsabweichung
- $\leq 0,1\%$ für die relative Umkehrspanne (Hysterese)
- $\leq 0,1\%$ für das relative Kriechen über 30 Minuten

Weiter ist noch zu entnehmen, dass bei 23°C die Referenzbedingungen herrschen und somit keine weiteren Anteile in Form von Temperatureinflüssen zu berücksichtigen sind.

Angaben zur Wiederholbarkeit (Reproduktion) sind dem Datenblatt, auch außerhalb des Ausschnitts in Bild 6, nicht zu entnehmen und so muss angenommen werden, dass dieser Anteil bereits in den aufgeführten Spezifikationsanteilen enthalten ist.

Wie sind nun die Angaben für die Linearität, die Hysterese und das Kriechen zu interpretieren und welchen Anteil haben sie an der Gesamtherstellerspezifikation?

3.1.1. Linearität

Bei der Angabe der Linearitätsabweichung im Datenblatt des Herstellers von $\leq 0,1\%$ fehlt die Angabe eines Bezugs, also z.B. vom Messwert, Messbereich oder Nennwert des Kraftaufnehmers. Da sich diese Kenngröße jedoch auf den kompletten Messbereich bezieht, ist davon auszugehen, dass sich diese Angabe auf den Messbereich bzw. Nennwert des Kraftaufnehmers bezieht. In unserem Fall also die 50 kN.

Diese Annahme deckt sich auch mit dem branchenüblichen Verständnis für diese Kenngröße, die auch im Dialog mit anderen Herstellern Übereinstimmung findet.

Der Komparator Kleiner-Gleich („ \leq “) kann dem allgemeinen Verständnis nach mit dem Plus-Minus („ \pm “) gleich gesetzt werden.

Unser erster Anteil an der Herstellerspezifikation ist also $\pm 0,1\%_{\text{FS}}$.

3.1.2. Hysterese

Bei der Angabe der Hysterese, oder Umkehrspanne wie es im Datenblatt des Herstellers heißt, von $\leq 0,1\%$ fehlt ebenfalls die Angabe eines Bezugs. Da sich auch diese Kenngröße auf den kompletten Messbereich des Kraftaufnehmers bezieht, und dies dem allgemeinen, bzw. branchenüblichen Verständnis entspricht, schlägt diese Kenngröße ebenfalls mit $\pm 0,1\%_{\text{FS}}$ zur Gesamtspezifikation zu Buche.

Damit haben wir nun also in Summe bereits $\pm 0,2\%_{\text{FS}}$.

3.1.3. Kriechen

Im Gegensatz zu den zuvor genannten Kenngrößen handelt es sich beim Kriechen dem branchenüblichen Verständnis nach um eine Kenngröße, die sich auf den aktuell angezeigten Kraftwert bezieht. Dies bedeutet also, dass die im Datenblatt des Herstellers angegebenen $\leq 0,1\%$ als $\pm 0,1\%_{\text{rdg}}$ zu lesen sind.

In Zusammenfassung der bisherigen Kenngrößen nun also $\pm 0,2\%_{\text{FS}}$, $\pm 0,1\%_{\text{rdg}}$.

3.2 Herstellerspezifikation des Anzeigegeräts

Für den Anteil des Anzeigegeräts muss man wissen, dass es sich üblicherweise um den kleinsten Anteil in der Messkette handelt, der sich in den meisten Fällen auf die Auflösung der Anzeige reduziert. So auch in unserem Beispiel. Im Datenblatt des Herstellers AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik für die Kraftmessgeräte-Serie EasyForcePro [3] (Bild 7) wird für unsere Messkette¹ aus Kraftaufnehmer und Anzeigegerät eine Auflösung von $\pm 0,01 \text{ kN}$ angegeben.

Typenschlüssel		
Typschlüssel	Bezeichnung	Anzeigeteilung
Easy Force 1kN	Kraftmessgerät EasyForcePro 1kN	$\pm 0,1\text{N}$
Easy Force 2kN	Kraftmessgerät EasyForcePro 2kN	$\pm 0,1\text{N}$
Easy Force 5kN	Kraftmessgerät EasyForcePro 5kN	$\pm 1\text{N}$
Easy Force 10kN	Kraftmessgerät EasyForcePro 10kN	$\pm 0,001\text{kN}$
Easy Force 20kN	Kraftmessgerät EasyForcePro 20kN	$\pm 0,001\text{kN}$
Easy Force 50kN	Kraftmessgerät EasyForcePro 50kN	$\pm 0,01\text{kN}$

Bild 7: Ausschnitt aus dem Datenblatt der Kraftmessgeräte-Serie EasyForcePro des Herstellers AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik [3].

3.3. Gesamtherstellerspezifikation

Die Gesamtspezifikation S_{gesamt} erhalten wir nun durch Summieren aller Spezifikationsanteile wie folgt:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{gesamt}} &= \pm 0,2\% \cdot \text{Messbereich} \pm 0,1\% \cdot \text{Messwert} \pm 0,01 \text{ kN} \\
 &= \pm 0,2\% \cdot 50 \text{ kN} \pm 0,1\% \cdot 10 \text{ kN} \pm 0,01 \text{ kN} \\
 &= \pm 0,10 \text{ kN} \pm 0,01 \text{ kN} \pm 0,01 \text{ kN} \\
 &= \pm 0,12 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tabelle 5 zeigt nun die Gesamtherstellerspezifikation von $\pm 0,12 \text{ kN}$ und die daraus resultierenden Grenzen des Konformitätsintervalls.

¹ Die Messkette EasyForcePro 50kN setzt sich aus dem Kraftaufnehmer KAP-S / 50kN, Klasse 0,1 und dem Anzeigegerät AE 703 zusammen

Tabelle 5: Gesamtherstellerspezifikation laut den Datenblättern des Herstellers AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik für Kraftaufnehmer und Anzeigegerät [2], [3].

Bereich	Mess-/Kalibrierwert	Spezifikation	Minimum/Maximum
50 kN	10,00 kN	$\pm 0,2 \%$ _{FS} , $\pm 0,1 \%$ _{rdg} , $\pm 0,01 \text{ kN}$	9,88 kN/10,12 kN

4. Bewertung und Fazit

Die beiden Beispiele zeigen, dass die erste Beurteilung der Herstellerspezifikation deutlich von dem schlussendlich resultierenden Konformitätsintervall abweichen kann. In unseren Beispielen liegen hier Faktoren von 3,1 (Beispiel 1) beziehungsweise 2,4 (Beispiel 2) dazwischen.

In Beispiel 1 werden durch die Berücksichtigung von zusätzlichen Einflussgrößen (Frequenz und Betriebsspannung) aus den ursprünglichen $\pm 130 \text{ mV}$ insgesamt $\pm 400 \text{ mV}$. Die weitere Betrachtung der Herstellerspezifikation lässt es auch zu, eine Quantifizierung von weiteren Einflussgrößen wie zum Beispiel der Temperatur bei der Anwendung oder der Erstellung einer Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Für Beispiel 2 gibt die branchenübliche Angabe der Klasse 0,1 nur einen Bruchteil, nämlich $\pm 50 \text{ N}$ ($\pm 0,1 \%$ von 50 kN), des tatsächlichen Konformitätsintervalls von $\pm 120 \text{ N}$ wieder. Es wird klar, dass die Interpretation der Klassenangabe nur mit Branchenkenntnis möglich ist. Dies gilt ebenso für die bezugslose relative Angabe der Einflussgrößen im Herstellerdatenblatt, die Abhängig von der Einflussgröße ihren Bezug wechseln kann.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass das Lesen und die Interpretation von Herstellerspezifikationen neben Erfahrung und Übung auch Geduld, Beharrlichkeit und Gelassenheit erfordern. Auch gilt es bei dieser Interpretation nie zu vergessen, welche Erwartungshaltung damit verbunden sein kann und ein Dialog mit dem Anwender oder Hersteller gegebenenfalls unausweichlich ist.

5. Literaturangaben

- [1] MetraHit One Plus Analog-Digital-Multimeter, Technisches Datenblatt, GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH, Nürnberg 2006
- [2] KAP-S, KAP-E Kraftaufnehmer, Technisches Datenblatt, AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik, Dresden 2018
- [3] Mobiles Kraftmessgerät easyforce pro, Technisches Datenblatt, AST Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik, Dresden 2017

Entscheidungsregeln bei Konformitätsaussagen im Mess- und Kalibrierwesen

Beispiele aus der Praxis

Dr. **Ellen Hage, Karin Diedrich**, Sartorius Lab Instruments, Göttingen

Kurzfassung

Dieser Beitrag berichtet über die unterschiedlichen Vorgehensweisen verschiedener akkreditierter Labore der Firma Sartorius Lab Instruments mit Konformitätsaussagen. Dabei handelt es sich sowohl um Konformitätsaussagen, die im gesetzlich geregelten Bereich getroffen werden als auch um solche, die im (akkreditierten) Kalibrierwesen gemacht werden.

Die einzelnen Labore und deren Vorgehensweise werden beispielhaft vorgestellt.

Auf einen theoretischen (mathematisch-technischen) und normativen Hintergrund wird hier verzichtet.

1. Begriffe und Definitionen

Dieses Kapitel erklärt stichpunktartig die wichtigsten Begriffe und die Bedeutung, wie sie in diesem Manuskript benutzt werden.

- Konformitätsaussage ist das Ergebnis einer Messung nach Anwendung einer Entscheidungsregel
- Konformitätsbewertung meint hier ausschließlich die gesetzlich vorgeschriebene Messung und anschließende Beurteilung von Messgeräten im Zuge der Inverkehrbringung (früher auch „Ersteichung“)
- Messwesen meint hier ausschließlich das gesetzlich geregelte Messwesen (Eichwesen)
- Kalibrierwesen: im Unterschied zu „Messwesen“ ist das gesetzlich nicht geregelte, freie oder auch wissenschaftliche Messwesen gemeint, welches (akkreditierte) Kalibrierungen regelt
- Akkreditierung wird hier zur besseren Lesbarkeit stellvertretend auch für Ermächtigung, Anerkennung, Zertifizierung etc. genutzt
- Inspektion wird hier zur besseren Lesbarkeit stellvertretend auch für Nacheichung, Instandsetzung etc. genutzt; also für die Kontrolltätigkeit, die bei gesetzlich (national) geregelten Messgeräten nach der Inverkehrbringung erfolgt

- Waagen: wird hier ausschließlich für nicht-selbsttätige Waagen benutzt, also solche, bei denen ein manueller Eingriff des Benutzers erforderlich ist, um z.B. Messwerte zu erhalten oder abzulesen

2. Unsere Labore

Die Abteilung Metrology der Firma Sartorius Lab Instruments hat die fachliche Leitung mehrerer Labore, die in diesem Kapitel kurz vorgestellt werden.

- Das durch die DAkkS akkreditierte Kalibrierlabor für die Messgrößen Masse, Waagen und Volumen. Die Akkreditierung basiert auf der Norm ISO 17025 [1], damit sind die ausgeführten Kalibrierungen als Rückführ-Nachweis auf nationale Normale anzuerkennen. Es werden sowohl eigene als auch teilweise externe Mitarbeiter beschäftigt. Das Labor bietet seine Dienstleistungen sowohl für interne Abteilungen (z.B. Produktion oder Service) als auch für externe Kunden an.

Für die Messgröße Masse gibt es ein permanentes Labor in Göttingen. Waagenkalibrierungen werden nur am Aufstellort des Gerätes selber durchgeführt. Für die Messgröße Volumen werden Kalibrierungen je nach Wunsch im permanenten Labor in Göttingen oder auch beim Kunden Vor-Ort angeboten.

- Die Inspektionsstelle übernimmt Inspektionen an bereits im Markt befindlichen, konformitätsbewerteten Waagen in verschiedenen Ländern. Weil diese Tätigkeit nationalem Recht unterliegt, müssen für die verschiedenen Länder unterschiedliche Regelungen eingehalten werden, so dass hier verschiedene Akkreditierungen nötig sind (nach ISO 17020 [2] oder ISO 17025 [1]).
- Um als Hersteller von Waagen auch konformitätsbewertete Geräte in Verkehr bringen zu können, arbeitet unser NAWI-Lab unter Aufsicht der zuständigen Behörde (MEN bzw. PTB). Für die Entwicklung, Zulassung, Produktion und Konformitätsbewertung wird die europäische Richtlinie 2014/31/EU [3] befolgt.
- Das von der OIML gelistete OIML-Testing-Laboratory ist berechtigt, als Hersteller-Test-Labor international anerkannte Zulassungsmessungen durchzuführen. Das Labor arbeitet nach ISO 17025 [1] und OIML R 76 [4].

3. Entscheidungsregeln

Bevor es zu einer Konformitätsaussage aufgrund der Messergebnisse kommt, müssen die Entscheidungsgrundlagen geklärt werden. In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Möglichkeiten vorgestellt, die für die oben vorgestellten Labore von Relevanz sind.

- Zum einen gibt es Hersteller, die eigene Spezifikationen für ihre Messmittel angeben. Gegen solche Toleranzen kann nur dann geprüft werden, wenn sowohl die Prüfbedingungen (z.B. Umgebungsbedingungen) als der Prüfablauf selber klar definiert sind. Weil das Prüfverfahren eines Labores aber grundlegender Bestandteil der Akkreditierung ist, können Prüfungen gegen Herstellertoleranzen nicht immer durchgeführt werden. In der Regel werden Messunsicherheiten nicht betrachtet.
- Zum anderen gibt es Kundenspezifikationen, die z.B. aus Arbeitsanweisungen hervorgehen. Diese können mit der gleichen Argumentation wie oben nicht immer als Entscheidungsregel genutzt werden.
- Bei Zulassungen von konformitätsbewerteten Waagen gibt es die europäische Norm EN 45501 [5], die sowohl die Voraussetzungen, als auch die Prüfungen und die maximal erlaubten Fehler vorgibt. Die Betrachtung von Messunsicherheiten wird nicht gefordert.
- Auch die Konformitätsbewertung bei Waagen ist europäisch durch die EN 45501 [5] geregelt (siehe oben, Zulassungen).
- Anders als die beiden vorhergehenden Prozesse sind Inspektionen an Waagen national geregelt. In der Regel orientieren sich die nationalen Vorschriften an der EN 45501 [5], es gibt aber Abweichungen im Prüfumfang oder bei den maximal erlaubten Fehlern.
- Für den Fall von Masse-Kalibrierungen gibt es die international anerkannte Empfehlung OIML R 111 [6]. Diese erlaubt eine Einteilung in verschiedene Genauigkeitsklassen und gibt auch Regeln zur Bestimmung der Messunsicherheit an.
- Für Waagen gibt es die anerkannte (europäische) Kalibrier-Richtlinie cg-18 [7] der EU-RAMET. Diese Empfehlung regelt zwar die Kalibrierung und beschreibt auch die Berechnung der Unsicherheiten, gibt aber keine Klassen oder Toleranzen vor. In weiten Teilen (Süd-) Europas ist es allerdings gebräuchlich, auch im Kalibrierwesen die Waagen gegen die OIML-Empfehlung R 76 [4] zu testen. Weiter bieten sowohl die cg-18 [7] als auch die USP [8] eine Berechnung der Mindesteinwaage an, gegen die Kundenanforderungen getestet werden können.
- Für die Kalibrierungen von Volumenmessgeräten gibt es die internationale Norm ISO 8655 [9], die zwar in ihren einzelnen Teilen Toleranzen für die entsprechenden Geräte angibt, viele Fragen aber offenlässt. Die DKD-Richtlinien 8-1 [10], 8-2 [11] und 8-3 [12] hingegen regeln sowohl die Prüfung als auch die Berechnung der Messunsicherheit sehr viel genauer und praxisorientierter.

4. An- und Herausforderungen

Wenn es um die Anforderungen an Konformitätsaussagen geht, muss ganz klar zwischen Mess- und Kalibrierwesen unterschieden werden. Für gesetzlich geregelte Bereiche sind die normativen Vorgaben eindeutig vorhanden und von allen einzuhalten. Solche Gesetze stellen den Verbraucherschutz sicher und sorgen für nationale Gleichheit. Für den Endverbraucher wird Verlässlichkeit und Vergleichbarkeit garantiert. Zu diesem Zweck müssen auch die Konformitätsaussagen eindeutig sein, ein binäres System (Prüfung bestanden: „*darf benutzt werden*“ oder durchgefallen: „*muss aus dem Verkehr gezogen werden*“) wird benutzt.

Im Kalibrierwesen dagegen entscheidet der Kunde selber, welchen Standard er benötigt. Binäre Konformitätsaussagen sind zwar leichter lesbar, enthalten aber weniger Information und das Risiko für Falschaussagen ist vorhanden. Sogenannte Ampel-Aussagen (Prüfung bestanden: „*gut*“; Prüfung vielleicht bestanden: „*?*“; Prüfung durchgefallen: „*schlecht*“) sind zwar detaillierter, benötigen aber auch eine Interpretation, was ein gewisses Maß an Verständnis der Prozesse beim Kunden voraussetzt. Im Kalibrierwesen ist den Laboren keine einheitliche Vorgehensweise vorgegeben. Zudem fehlen in vielen Bereichen auch (international) anerkannte Richtlinien, die Entscheidungsregeln vorgeben.

5. Anwendung in den Laboren

Dieser Abschnitt beschreibt beispielhaft die Umgangsweise der einzelnen, weiter oben vorgestellten Labore mit den entsprechenden Entscheidungsregeln und die daraus resultierenden Konformitätsaussagen.

Bei den Zulassungsprüfungen von Waagen wird im OIML-Labor ausschließlich ein einzelnes Muster gemessen und bewertet. Messunsicherheiten werden nicht betrachtet, die Konformitätsaussage ist binär. Die Prüfung gilt als bestanden, sobald alle erforderlichen Prüfungen bestanden sind, d.h. die maximal erlaubten Abweichungen der Norm EN 45501 [5] (für EU) nicht überschritten werden.

Im NAWI-Labor wird jedes einzelne, produzierte Gerät entsprechend der Norm geprüft. Um als Hersteller sicherzugehen, dass keine Geräte ausgeliefert werden, die fälschlicherweise eine positive Konformitätsbewertung bekommen haben, werden die maximal erlaubten Abweichungen für die einzelnen Prüfungen mit einem pauschalen Sicherheitsfaktor (Guardband) belegt. Dadurch verringert sich das Risiko einer Falschaussage und nur wirklich konforme Geräte werden in Verkehr gebracht.

Wenn die Inspektionsstelle bei konformitätsbewerteten Waagen Inspektionen durchführt, dann wird auch hier jedes einzelne Gerät geprüft. In der Regel (Ausnahme z.B. Österreich) wird die der Prüfung zugeordnete Messunsicherheit nicht ermittelt. Die Inspektion gilt als bestanden, sobald die erlaubten Fehler nicht überschritten werden.

Bei (akkreditierten) Kalibrierungen von Waagen wird die EURAMET cg-18 [7] befolgt. Für jedes getestete Gerät werden die Messergebnisse und die dazugehörige Unsicherheit angegeben. Eine Konformitätsaussage wird nicht gemacht. Der Kunde muss anhand der Ergebnisse selber beurteilen, wie das getestete Gerät einzustufen ist. Das Labor bietet aber weitere Serviceleistungen an, z.B. Aussagen zur Mindesteinwaage, Messungen gegen Herstellertoleranzen etc., für die Konformitätsaussagen gemacht werden. Bei diesen Aussagen werden die Unsicherheiten nicht betrachtet, das Ergebnis ist binär.

Wenn allerdings im DAkkS-akkreditierten Masselabor Gewichte kalibriert werden, dann handelt es sich um Messungen, die der OIML R 111 [6] folgen. Die Gewichte werden entsprechend ihrer Güte den Genauigkeitsklassen zugeordnet, wobei die der Messung beigeordnete erweiterte Messunsicherheit als Guardband die erlaubten Klassentoleranzen einschränkt. Damit verkleinert sich der Akzeptanzbereich der jeweiligen Klasse und das Risiko für eine Falscheinordnung (Zuordnung in eine zu hohe Klasse) wird auf 5 % minimiert.

Bei Kalibrierungen von Volumenmessgeräten entscheidet der Kunde, welche Art von Kalibrierschein er benötigt. Bei einer DAkkS-akkreditierten Kalibrierung wird nach den DKD-Richtlinien [10, 11] gemessen und entsprechend die Messunsicherheit berechnet und angegeben. Eine Konformitätsaussage wird nicht getroffen.

Bei Messungen, die der ISO 8655 [9] folgen, wird auf dem Schein eine Konformitätsaussage gemacht, die sich auf die erlaubten Toleranzen der ISO 8655 [9], auf Herstellertoleranzen oder aber auf kundeneigene Spezifikationen beziehen. Die Messunsicherheit wird dabei nicht betrachtet.

6. Fazit

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass sämtliche hier vorgestellte Labore auf die binäre Form der Konformitätsaussage zurückgreifen.

Im gesetzlichen Messwesen ist dies ganz einfach normativ begründet. Die für nicht-selbsttätige Waagen geltenden Regularien folgen dem seit Jahrhunderten geltenden Gedanken des

Verbraucherschutzes. Der Endverbraucher kann auch ohne Hintergrundinformationen eindeutig und schnell zwischen „*konform*“ und „*nicht konform*“ unterscheiden. Um das System möglichst einfach und einheitlich zu halten, wird auf eine Betrachtung der Messunsicherheit verzichtet.

Auch sämtliche Konformitätsaussagen, die von den hier vorgestellten, im Kalibrierwesen arbeitenden Laboren getroffen werden, sind binär. Der Einfluss der Messunsicherheit wird unterschiedlich gehandhabt und resultiert unter anderem aus der für die entsprechende Messgröße gängigen Praxis.

Literaturhinweise

- [1] EN ISO/IEC 17025:2017 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien
- [2] EN ISO/IEC 17020:2012 Konformitätsbewertung – Anforderungen an den Betrieb verschiedener Typen von Stellen, die Inspektionen durchführen
- [3] NAWID: Richtlinie 2014/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend die Bereitstellung nichtselbsttätiger Waagen auf dem Markt
- [4] OIML R 76-1:2006* Non-automatic weighing instruments :Metrological and technical requirements – Tests
- [5] EN 45501:2015 Metrologische Aspekte der nichtselbsttätigen Waagen
- [6] OIML R 111-1:2004 Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 Metrological and technical requirements
- [7] EURAMET cg-18:2015 Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments
- [8] USP: United States Pharmacopeia:2019, chapter 41 Balances
- [9] EN ISO 8655:2002* Volumenmessgeräte mit Hubkolben
- [10] DKD-R 8-1:2011 Kalibrierung von Kolbenhubpipetten mit Luftpulster
- [11] DKD-R 8-2:2018 Kalibrierung von Mehrfachdispensern
- [12] DKD-R 8-3:20xx Kalibrierung von Einzelhubdispensern und Kolbenbüretten (zum Zeitpunkt der Manuscript-Abgabe noch nicht veröffentlicht)

* in Revision

The Planck-Balance (PB2) – Using a fixed value of the Planck constant to calibrate E2-weights

T. Fröhlich, N. Rogge, S. Vasilyan, F. Hilbrunner,

Technische Universität Ilmenau;

C. Rothleitner, L. Günther, D. Knopf, S. Lin, F. Härtig,

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig

1. Abstract.

A balance is proposed, which allows the calibration of weights in a continuous range from 1 mg to 100 g using a fixed value of the Planck constant, h . This so-called Planck-Balance (PB2) uses the physical and metrological approach of Kibble balances that allow the Planck constant to be derived from the mass. Using the Planck-Balance no calibrated mass standards are required during weighing processes any longer, because all measurements are traceable via the electrical quantities to the Planck constant, and to the meter and the second. This allows a new approach of balance types after the redefinition of the SI-units by 20th May 2019. In contrast to many scientific oriented developments, the Planck-Balance is focused on robust and daily use and allow relative measurement uncertainties comparable to the accuracies of class E2 weights as specified in OIML R 111-1. The balance is developed in a cooperation of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) and the Technische Universität Ilmenau in a project funded by the German Federal Ministry of Education and Research.

2. Introduction

The ‘International Prototype of the Kilogram (IPK)’, a small cylinder with height and diameter of about 39 mm, made of a platinum-iridium alloy defined the primary standard of mass for a long period of time. All calibrations of balances, all weighing, all force, all torque and power measurements were traceable through a hierarchy of mass standards all traceable to this artefact. Each comparison goes along with a measurement uncertainty, so that the measurement uncertainty of a mass under test is increasing with decreasing hierarchical order. As the IPK defined exactly 1 kg, with zero measurement uncertainty, the smallest relative measurement uncertainty was reached for a one kilogram mass value. For lower or higher mass values the relative measurement uncertainty increased due to further comparison steps necessary to derive these mass values. The German National Prototype of the Kilogram (NPK), which is made of the same Pt-Ir alloy as the IPK, for example, had an estimated

relative measurement uncertainty of 2.3×10^{-9} , or 6×10^{-9} [1] when considering the drift rate. Kilogram Prototypes made of stainless steel, on the other side, already have a relative measurement uncertainty that is by a factor 6.5 higher than that of the NPK, mainly due to air buoyancy effects [8, 9, 10, 11, 15].

In November of 2018 the General Conference on Weights and Measures (CGPM) has, on its 26th conference, decided the new SI, including the redefinition of the kilogram. The kilogram is defined by fixing the numerical value of the Planck constant h , with zero uncertainty [2]:

“The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant h to be $6.626\,070\,150 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit J s, which is equal to $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.”

The value of the Planck constant that is given in the quotation is the truncated and rounded CODATA 2017 value [3]. This value was determined to lowest measurement uncertainty via two experiments, the X-Ray Crystal Density (XRCD) method [4, 5] and the Kibble balance [6, 12, 13, 14]. The Kibble balance – formerly called Watt balance – compares virtual mechanical power with electrical power. While until now this experiment used a well calibrated (traceable to the IPK) mass artefact to determine h , after the redefinition the same experiment can be used to determine the mass value of an artefact from the Planck constant. The Kibble balance describes a primary method of realizing the new kilogram [7]. The redefinition offers a new way to calibrate mass standards, as, by means of a Kibble balance, masses of any value are traceable to the Planck constant. Strictly thinking, there is no need to establish a mass scale beginning from a nominal value of 1 kg.

In this article the basic concept of a weighing instrument will be presented, which follows the principle of a Kibble balance. The instrument is named *Planck-Balance* (PB), as it uses the new definition of the kilogram via the Planck constant.

3. The Kibble balance, an experiment to determine the Planck constant h

The principle of the Kibble balance, as it is used today, was first proposed by Bryan Kibble in 1976 [12]. Comparing mechanical force with electromagnetic force is possible by using a load cell with electromagnetic force compensation (EMFC). This was first described by

Theodor Gast already in the 1940s [22, 23]. Today, an EMFC load cell is the state-of-the-art in high-precision weighing technology used in precision scales and electronic mass comparators. Here, the weight of a mass that is placed on the weighing pan (1) will be compensated by an electromagnetic force. This electromagnetic force is produced by an internal coil-magnet system (8). For the PB2 set-up an additional external coil-magnet system (11) is used (see fig.1).

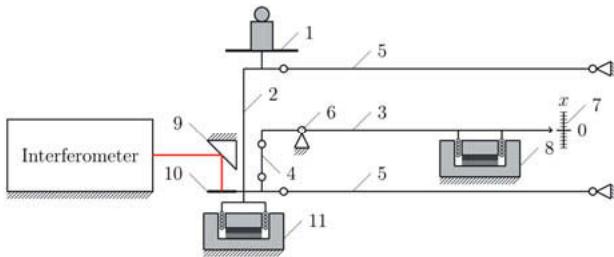


Fig. 1: Principle of PB2, 1-weighing pan, 2-moving part of EMFC load cell, 3-lever, 4-coupling, 5-parallel guide, 6-lever bearing, 7-position indicator, 8-coil and magnet system, parts 1-8 belong to EMFC load cell, 9-fixed mirror 10-moving mirror, 11-external coil and magnet system [20].

The measurement equation for this set-up (neglecting air buoyancy effects) is

$$mg = I \cdot (Bl), \quad (1)$$

where m denotes the mass of the weight, g the local acceleration due to gravity, B the magnetic flux density, l the length of the coil, and I the electrical current. The calibration of the instrument was done by loading the weighing pan with calibrated mass standards that had to be traceable to the IPK. This describes the current I as a function of the load, where the current is measured as a voltage drop at a resistor. By interpolation mass values different from those that had been used for calibration could be measured, i.e. the balance is able to measure the weight in a continuous mass range.

The step towards the Kibble balance is the introduction of a second mode in the weighing process, in order to eliminate the calibration step with weights. Kibble proposed to determine the so-called 'geometrical factor' Bl by moving the coil in the magnetic field of the permanent magnet with a velocity v . This induces a voltage V in the coil that can be

measured to high accuracy. By the law of induction, the induced voltage V is a function of the velocity v and the geometrical factor Bl as

$$V = v \cdot (Bl). \quad (2)$$

By combining eqs. (1) and (2) the Bl drops out, which finally leads to

$$mgv = VI. \quad (3)$$

Eq. (3) shows a virtual equality of mechanical and electrical power – the reason why the Kibble balance formerly was called 'Watt balance'. All remaining parameters can be measured to high accuracy. The mass m by mass comparison with a calibrated standard, the local acceleration due to gravity g by means of a free-fall absolute gravimeter, the velocity v by means of a length measurement via a laser interferometer, and time measurement via a frequency standard. The voltage can be accurately measured by means of the Josephson Effect. Finally, the current I can be measured to high accuracy via Ohm's law, $I = V/R$, using high-precision resistors traceable to a quantum Hall resistor. The measurement of the electrical quantities voltage and resistance establish the link between the mass and the Planck constant.

The Kibble balance principle is one of two suggestions in the 'Mise en Pratique' [7] for a future realization of the kilogram (the second one is via the XRCD). As a consequence, each experiment that follows this principle of comparing virtual mechanical and electrical power is a primary method for realizing the unit kilogram. Moreover, the link between the mass and the Planck constant is valid for any mass value, not only for 1 kg. EMFC load cells usually cover several decades of mass values. By calibrating Bl as proposed by Kibble the EMFC can be used as a primary realisation of the kilogram for any mass value within its mass range.

4. Concept of the Planck-Balance

Within the PB-project run time two balances will be developed and validated. A first balance will be called PB2 and a second one PB1. The reason for the numbering results from the aimed accuracies of the balances, as will be explained later in this text. Both balances will follow the principle of the Kibble balance. In this section the general concept and parameters for PB2 will be presented.

The balance is designed for industrial use or for NMIs, applications where mass standards of highest accuracies are required. Mass standards follow an international recommended classification scheme. The highest accuracies class is denoted by E1, which is followed by

E2, F1, F2, and following lower accuracy classes. A detailed description can be found in the document OIML R 111-1 [16] by the International Organization of Legal Metrology (OIML). It is noteworthy that E1 mass standards are used for the calibration of E2 mass standards, whereas E2 mass standards are used for the calibration of F1 mass standards or for the calibration of weighing instruments. This fact is the reason for the aimed accuracies of the PB. The PB should be capable of calibrating E1 or E2 mass standards, or reach an accuracy that is comparable as if the balance was calibrated with an E1 (or E2) mass standard. As a result, the aimed accuracy makes it possible to weigh masses without calibrating the balance by means of calibrated mass standards. This has the significant advantage that no handling of reference masses is necessary, because especially for mass values of 1 mg and below the handling becomes difficult or impossible. The mass under test could remain on the weighing pan during the calibration (velocity) mode. Fig. 2 depicts the relative measurement uncertainties that correspond to classes E1 and E2 weights. It can be noted that below 100 g the relative measurement uncertainty is increasing. One reason for this increase lies in the propagation of uncertainty when the mass scale is established. The second reason is that for lower mass values the weighing systems that are used for establishing the corresponding mass decades do not increase in their resolutions any more. Here is, where the PB can bear advantages. No mass scale is necessary and, if a balance for lower mass values is designed it can be optimized for the corresponding mass range.

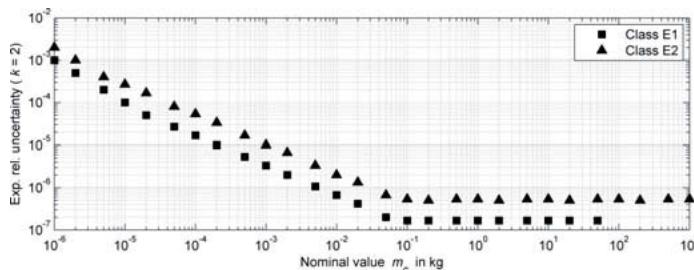


Fig. 2: Relative measurement uncertainty $u_{\text{rel}}(k = 2)$ as a function of the nominal mass of the conventional mass m_c .

Table 1 summarizes the main aimed parameters of the Planck-Balance PB2. **Table 1.** Aimed parameters for the Planck-Balance (PB2). The aimed relative measurement

uncertainty u_{rel} results from the accuracy class E2 as recommended in [18]. MPE is the maximum permissible error of a weight.

PB2	
Mass range	1 mg ... 100 g
MPE/m(max)	16×10^{-7} (E2)
$u_{\text{rel}} = u_{m(\text{max})}/m(\text{max})(k = 1)$	2.7×10^{-7} (E2)
Environment	Air (atmospheric pressure)
Time / Weighing	10–120 s

The PB2 is not aimed for measuring h to high accuracy, but describes a weighing instrument for the dissemination of the unit kilogram in a range of nominal values. The requirements are a bit more relaxed than in conventional Kibble balances, as it is aimed to measure 'only' at the accuracy level of E2 weights that are lower than for Kibble balance experiments at NMIs. Therefore, the PB concept differs in some ways.



Fig. 3: Left: Photograph of the PB2 setup, open housing (width = 475 mm, depth = 200 mm) showing EMFC balance at left and interferometer at right, right: closed housing with load alternator on top.

As an example, it is aimed to use as many standard components as possible, like the commercial high-end EMFC load cell. Such a load cell is used for analytical balances in

E1/E2 mass laboratories, as well as in industry. Besides the use of commercially available standard components the balances will have a modular design. For commodity and better repeatability the balances will be equipped with an automatic mass exchanger. This will automate the measurement procedure based on an ABBA-like weighing cycle. The calibration cycle here is the velocity mode VM (A) of the Kibble balance principle, whereas the force mode FM (B) corresponds to the conventional weighing mode. During the weighing phase, the weight will be raised several times by means of the automatic mass exchanger, meaning that several weighings will take place with and without the weight. As the balance is aimed for routine calibration, the weighing should be much faster than high precision determinations of h by means of Kibble balances.

Another important aim is to have a compact and user-friendly weighing instrument (see Fig. 3). In principle, the final balance could have approximately the same dimensions as a commercial analytical balance, as an identical load cell is used. Large components will only be the high precision measurement devices, such as the Josephson standard, the voltmeters, and the laser interferometer. In order to avoid a large magnet, it is intended to use 3 magnet-coil systems in a row, as depicted in Fig. 4. The size will thus increase in height, but not in width. Fig. 3 shows a technical drawing of the PB2 design.

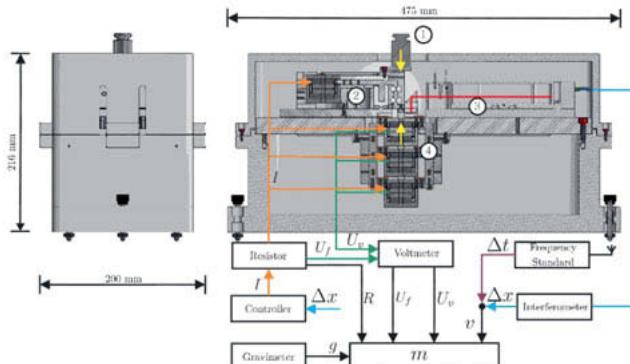


Fig. 4: Overview of the components and the measurement scheme of the PB2 with a weight to be calibrated (1), EMFC balance (2), Interferometer (3) and combined magnet system from three single magnet systems (4). The width of the housing is 200 mm [24].

5. Performance of the system

The PB allows a primary realization of the unit kilogram. To this end, the electrical quantities (i.e., voltage and resistance) must be traceable to their quantum standards. In addition, the velocity measurement of the coil within the magnetic field must be traceable to length and time standards. Finally, there is the local gravity that must be accurately known at the site and time of measurement. Fig. 5 shows how the traceability of these quantities will be realized. For the voltage, a digital voltmeter of the type HP3458A will be used that is calibrated to a Josephson standard. The electrical current will be measured via the voltage drop at a temperature controlled precision resistor. Thus, the resistor must be calibrated to a quantum hall resistance (QHE). The velocity is measured with a laser interferometer and a frequency standard, both of which are traceable to primary standards.

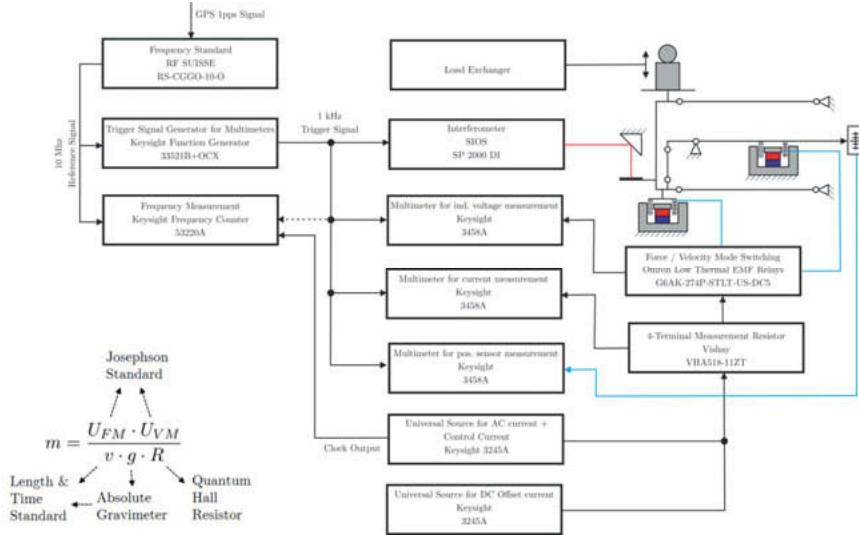


Fig. 5: Schematic of the used commercial components and metrological traceability. The different quantities of the measurement equation must finally be traced to primary standards. (The subscripts FM and VM denote the force mode and the velocity mode of the experiment, respectively.)

The coil is moved sinusoidally within the field of a permanent magnet. This excitation will have a frequency of about 4 Hz. Commercial voice coils are often wound around a metal

carrier (hollow cylinder). When moving the coil in the magnetic field, eddy currents will damp the system, which signifies a loss of power [19]. For PB2 the coils will not be on a carrier but will be baked together in order to avoid damping by eddy currents in the coil carrier.

Fig. 6 shows simulation and measurement results of the Bl as a function of the axial coil position for a coil motion range of ± 3 mm. Actually, the load cell that will be used in the PB2 has a motion range of only $\pm 40 \mu\text{m}$ around the zero position, which will be defined by the alignment of the coil to the magnet.

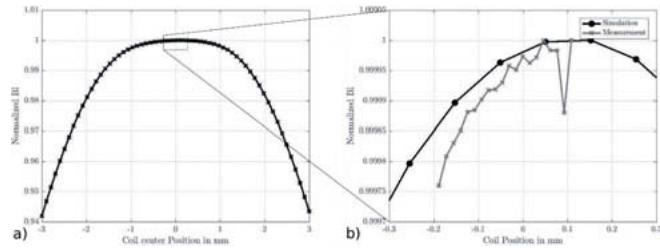


Fig. 6: a) Simulation of the normalized geometrical factor Bl as a function of the axial coil position. b) Close-up for the range from $-300 \mu\text{m}$ to $+300 \mu\text{m}$ [24].

To check the experimental setup of the PB2 the geometrical factor for both operating modes was determined and compared. As shown in Fig. 7, the results are consistent over several hours within their respective standard deviation. The relative standard deviation for the force mode was determined with a calibrated mass of 10 g and is about 8 ppm. The measurements were corrected for the air buoyancy and the coil current effect. The latter is achieved by means of a constant current through the internal actuator of the load cell which acts like a constant load in that way that the necessary compensation current of the loaded and unloaded balance have the same magnitude but different sign. In the velocity mode a relative standard deviation of 10 ppm was reached.

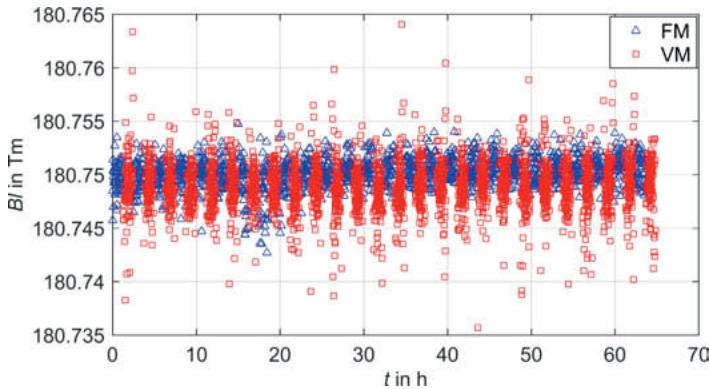


Fig. 7: Experimental results of current PB2 set-up, geometrical factor B/I determined in force mode using 10 g reference mass (FM, blue triangles) and B/I determined in velocity mode (VM, red squares).

6. Summary and outlook

A new weighing instrument, the Planck-Balance PB2, has been presented that will be able to calibrate mass standards without comparison to other mass standards of higher accuracy classes. This is possible due to the new definition of the kilogram which will relate the mass to the Planck constant. Additionally, the Planck-Balance can be used as weighing instrument with traceability to the new definition of the kg. It is based on the Kibble balance principle and is thus a primary method of realizing the unit kilogram, as described in the *Mise en Pratique*.

The new instrument will be able to cover a measurement range from 1 mg up to 100 g and to calibrate E2 standard masses. This will likely become an attractive alternative for NMs, for industry or legal metrology where high accuracy is required. A convincing benefit of the Planck-Balance is that artefacts of small sizes can easily be calibrated. With the conventional calibration method, where the mass under test is compared to a calibrated weight, the handling sometimes is very difficult or even impossible. The Planck-Balance will be able to measure over a continuous range and will not be limited to discrete mass values.

7. Acknowledgments

The research of this project is funded via *Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials – VIP+*, a program of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), and is managed by VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

8. References

- [1] M. Gläser, et.al.: Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination. *Metrologia*, 47(4):419, 2010.
- [2] BIPM Cons. Com. Units. Draft of the 9th SI Brochure, 10 November 2016. Online: accessed 30-January-2018.
- [3] P.J. Mohr, et.al.: Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment. *Metrologia*, 55(1):125, 2018.
- [4] Y. Azuma, et.al.: Improved measurement results for the avogadro constant using a 28 Si-enriched crystal. *Metrologia*, 52(2):360, 2015.
- [5] G. Bartl, et.al.: A new 28 Si single crystal: counting the atoms for the new kilogram definition. *Metrologia*, 54(5):693, 2017.
- [6] I.A. Robinson and S. Schlamminger: The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass. *Metrologia*, 53(5): A46, 2016.
- [7] BIPM: *Mise en pratique of the definition of the kilogram*, 2014. Online; accessed 21-November- 2017.
- [8] P. Richard, H. Fang, and R. Davis: Foundation for the redefinition of the kilogram. *Metrologia*, 53(5):A6, 2016.
- [9] R.S. Davis, P. Barat, and M. Stock: A brief history of the unit of mass: continuity of successive definitions of the kilogram. *Metrologia*, 53(5): A12, 2016.
- [10] M. Stock, et.al.: Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram, part I: comparison of the international prototype with its official copies. *Metrologia*, 52(2):310, 2015.
- [11] CCM: 2013 Recommendation of the CCM submitted to the CIPM, Recommendation G1, on a new definition of the kilogram (Sevres, 21-22 February 2013), 2013. Online: accessed 21- November-2017.

- [12] B.P. Kibble: A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method. In J.H. Sanders and A.H. Wapstra, editors, *Atomic Masses and Fundamental Constants 5*, pages 545–551, Boston, MA, 1976. Springer US. [13] B.M. Wood, C.A. Sanchez, R.G. Green, and J.O. Liard: A summary of the Planck constant determinations using the NRC Kibble balance. *Metrologia*, 54(3):399, 2017.
- [14] D. Haddad, et.al.: Measurement of the Planck constant at the National Institute of Standards and Technology from 2015 to 2017. *Metrologia*, 54(5):633, 2017.
- [15] CCM: CCM recommendation (G1) 2017 – BIPM, 18-19 May 2017.
<https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccm/publications-cc.html>, Online: accessed 21-March-2018.
- [16] OIML: OIML R 111-1, 2004(E).
- [17] F. Hilbrunner, I. Rahneberg, and T. Fröhlich: Wattwaage mit Hebelübersetzung auf Basis eines kommerziellen EMK-Wägesystems. tm-Technisches Messen, 2017.
- [18] S. Schlamming: Design of the permanent-magnet system for NIST-4. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(6):1524–1530, 2013.
- [19] F. Bielsa, et.al.: Alignment of the magnetic circuit of the BIPM watt balance. *Metrologia*, 52(6):775, 2015.
- [20] L. Günther, C. Rothleitner, J. Schleichert, and F. Härtig: The virtual weight. In *Engineering for a Changing World: Proceedings; 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 11-15, 2017*, volume 59, 2017.
- [21] M. Franke, T. Kistner, T. Hausotte, D. Heißelmann, C. Schwehn, and K. Wendt: Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme. tm-Technisches Messen, 84(5):325, 2017.
- [22] T. Gast: Eine registrierende Torsionswaage mit elektrischer Kompensation, 1943. DE000000914445B.
- [23] T. Gast: Elektronische Waage, 1955. DE000001035371B.
- [24] C. Rothleitner, et.al.: The Planck-Balance—using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights, 2018, *Meas. Sci. Technol.*, 29 074003

The Planck-Balance (PB2) – Tracing the mass via electrical quantities

Die Planck-Waage (PB2) – Eine Rückführung der Masse über elektrische Größen

S. Lin, C. Rothleitner, L. Günther, D. Knopf, F. Härtig,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig;
N. Rogge, S. Vasilyan, F. Hilbrunner, T. Fröhlich,
Technische Universität Ilmenau

Abstract

At the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) and the Technische Universität Ilmenau (TUIL) a table-top version of a Kibble balance called the Planck-Balance is under development. This kind of balance allows for a link between the mass value and the Planck constant, and thus describes a way to realize the unit kilogram. The Planck-Balance PB2 employs a modified commercial load cell and is aimed at realizations from 1 mg to 100 g. In this article all significant sources of error will be evaluated and a preliminary combined standard uncertainty for a 20 g mass measurement will be given.

1. Introduction

Originally, Kibble balances were developed for the measurement of the Planck constant. To this end a well calibrated (traceable to the international prototype kilogram – IPK) weight has been employed. Since the new SI came into force on May 20, 2019, the same technology can be used to realize the unit kilogram or calibrate a weight, as with the redefinition of the SI units the value of the Planck constant has been defined to $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}\ \text{J}\ \text{Hz}^{-1}$. The Planck-Balance (PB) is a table-top sized Kibble balance and is currently under development in a cooperation of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) and the Technische Universität Ilmenau (TUIL) [1]. A version of this balance, called PB2, is aimed to cover a continuous weighing range from 1 mg to 100 g. The accuracy of the balance shall equal the accuracy class E2 (the reason for the numbering in PB2), as recommended by OIML R111-1 [3]. Its application will lay in industry or calibration laboratories.

2. Principle of Planck-Balance

The Kibble balance compares mechanical force with electro-magnetic force, which establishes a link between the Planck constant (from electrical force) and the kilogram (from mechanical force). To do this with lowest uncertainties it operates in two measuring modes: the force mode and the velocity mode. In the force mode, the gravitational force on a mass m is balanced by an electromagnetic force that is generated by a voice coil as

$$m \cdot g = I \cdot Bl_F, \quad (1)$$

where g is the local gravitational acceleration acting on the center of mass of the weight, I the electrical current, B the magnetic flux density and l the length of the coil-wire in the B -field. The product Bl_F is commonly called the force factor (or geometrical factor). In order to determine the value of the quantity mass, g , I , and Bl_F must be known. The local gravitational acceleration g is measured by means of a free-fall absolute gravimeter. The current I can be measured to high accuracy via Ohm's law, $I = U_F/R$, using a high-precision resistor with resistance R traceable to a quantum Hall resistor. The voltage drop U_F at the resistor is measured by using a digital voltmeter, traceable to a Josephson standard. The critical point is the determination of Bl_F . This quantity must be measured in the second mode, the velocity mode. Here, the Bl_V is determined by moving the (same as in the force mode) coil in the (same as in the force mode) magnetic field of the permanent magnet with a velocity v . The movement of the coil induces a voltage U_{ind} across the coil ends. By the law of induction, the induced voltage U_{ind} is a function of the velocity v and the Bl_V as

$$U_{\text{ind}} = v \cdot Bl_V. \quad (2)$$

In order to determine the mass in eq. (1) it is assumed that $Bl_V = Bl_F$ (from eq. (2)). For the sake of checking whether there is a systematic error in the measurement setup, a calibrated weight can be used and Bl_F and Bl_V can be compared, i.e. the Bl in the force mode is measured. Thus, with the calibrated mass m , the gravity g , the resistance R and the voltage U_F the Bl_F can be obtained as

$$Bl_F = \frac{R}{m \cdot g \cdot U_F}. \quad (3)$$

In the PB, the coil is moved sinusoidally in the velocity mode – in contrast to most Kibble balance experiments, where the velocity is kept as constant as possible – through the B -field. If the coil motion is assumed to be perfectly sinusoidal, the velocity is simply the time derivative of the coil motion with amplitude S . Thus, the velocity can be measured by measuring the motion of the coil with a laser interferometer, and the time with a frequency standard. The induced voltage U_{ind} is digitized by means of a high-precision digital multimeter. Then, the Bl_V can be calculated as

$$Bl_V = \frac{U_{\text{ind}}}{2\pi f_{\text{sig}} S}, \quad (4)$$

where U_{ind} denotes the amplitude of the induced voltage, S the amplitude of the displacement, and f_{sig} the signal (or motion) frequency.

3. Measurement results

A measurement was performed in March 2019. The measurement took about 65 hours and consisted of a calibration phase (velocity mode) and a weighing phase (force mode). 26 calibration and weighing cycles were performed during this time. Each calibration cycle consisted of 120 sets of harmonic oscillations, each of which had a duration of 90 seconds. For each cycle, there were 20 oscillation frequencies selected between 0.5 Hz and 10 Hz. The different frequencies were taken to investigate possible systematic dependencies on the signal frequency. During the weighing phase, the calibrated 20 g weight was raised 50 times in each cycle by means of an automatic mass exchanger, meaning that 50 weighings took place with and 50 without the weight.

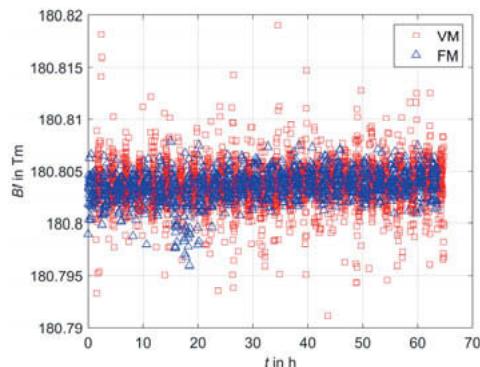


Fig. 1: Experimental results of PB2. The force factor Bl_F is determined in the force mode using a calibrated 20 g weight (FM, blue triangles) and the Bl_V is determined in the velocity mode (VM, red squares).

Fig. 1 shows the experimental results of the force factor for the force mode and velocity mode: $Bl_F = 180.803709 \text{ Tm}$ with a relative standard deviation of 7×10^{-6} , and $Bl_V = 180.803798 \text{ Tm}$ with a relative standard deviation of 10×10^{-6} . The relative offset between both force factors is 4.93×10^{-7} . During the whole measurement, 1300 measurements were done for the force mode and 3120 measurements for the velocity mode.

Therefore, the relative standard uncertainties of Bl_F and Bl_V are 2.0×10^{-7} and 1.9×10^{-7} , respectively.

4. Uncertainty evaluation for the force mode

In the force mode of the PB2, the Bl_F is determined by eq. (3). According to the guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) [9], the relative standard uncertainty of Bl_F can be estimated as

$$\frac{u(Bl_F)}{Bl_F} = \left(\left(\frac{u(m)}{m} \right)^2 + \left(\frac{u(g)}{g} \right)^2 + \left(\frac{u(R)}{R} \right)^2 + \left(\frac{u(U_F)}{U_F} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

where $u(Bl_F)$ denotes the standard uncertainty of Bl_F , $u(m)$ of the mass, $u(g)$ of the gravitational acceleration, $u(R)$ of the resistor, and $u(U_F)$ of the voltage.

According to eq. (5), the relative uncertainty of Bl_F depends on the relative standard uncertainties of the mass m , gravity g , resistance R and voltage U_F . Therefore, the relative uncertainty of each component must be estimated. In this section, major contributions (e.g. air buoyancy, voltage measurement) are analyzed and the corresponding relative uncertainties are estimated. Finally, the combined uncertainty of Bl_F is estimated.

4.1. Air buoyancy

In the force mode, the gravitational force of a calibrated weight of 20 g is compared with an electromagnetic force. When the measurement environment is in air, the gravitational force is partially compensated by the air buoyancy, and the mass m_{cal} must be corrected by

$$m = m_{\text{cal}} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right), \quad (6)$$

where ρ_a is the air density, and ρ the mass density. m_{cal} is the calibration value of the mass.

The density ρ and the volume V of the mass depend on the temperature T , and thus eq. (6) can be written as

$$m = m_{\text{cal}} - \rho_a \cdot V(T). \quad (7)$$

The air buoyancy correction is one of the major contributions to the uncertainty budget of the mass. According to eq. (7), the standard uncertainty associated with the corrected mass m is estimated as

$$u(m) = \left(\left(\frac{\partial m}{\partial m_{\text{cal}}} \right)^2 u^2(m_{\text{cal}}) + \left(\frac{\partial m}{\partial \rho_a} \right)^2 u^2(\rho_a) + \left(\frac{\partial m}{\partial V} \right)^2 u^2(V) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

where $u(m_{\text{cal}})$ is the mass calibration uncertainty, $u(\rho_a)$ the standard deviation of the air density, and $u(V)$ the standard deviation of the mass volume. The mass was calibrated at PTB, and the calibration value is given as $m_{\text{cal}} = 20 \text{ g} + 0.012 \text{ mg}$ with a measurement uncertainty of $u(m_{\text{cal}}) = 0.0025 \text{ mg}$ ($k = 1$).

The density of moist air ρ_a is evaluated by using the CIPM formula [4] as

$$\rho_a = \frac{p M_a}{Z R_g T} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right], \quad (9)$$

where p is the air pressure in Pa, T the temperature in K, x_v the mole fraction of water vapor, M_a the molar mass of dry air in g mol^{-1} , M_v the molar mass of water in g mol^{-1} , Z the compressibility factor, and R_g the molar gas constant in $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$. The molar gas constant R_g , the molar mass of dry air M_a and the molar mass of water M_v are constant values with a fixed uncertainty. Z and x_v are functions of the ambient conditions pressure, temperature and relative humidity. M_a can be improved by using the mole fraction of atmospheric oxygen x_{CO_2} . Therefore, the standard uncertainty of the air density $u(\rho_a)$ is determined by the measurement uncertainty of the ambient sensors and the constants (e.g. R_g , M_v , x_v).

The ambient conditions in the measurement room are not constant with time. The nominal values of ambient condition are determined by using the average values from the measurement sensors during the whole measurement time. These nominal values and the associated measurement uncertainties are listed in Table 1. The air density ρ_a of 1.12 kg m^{-3} is calculated under these nominal values of temperature, pressure, humidity and CO_2 . The corresponding contributions of the measurement sensors are also estimated in Table 1. Since the relative standard uncertainty of the air density formula itself is given by 2.2×10^{-5} [4], its standard uncertainty is $2.47 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$. Finally, the combined standard uncertainty of the air density $u(\rho_a)$ is $7.22 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-3}$.

Table 1: Standard uncertainty of the air density.

	Mean value	Uncertainty of sensor	Standard uncertainty of air density
Temperature	22.39 °C	0.05 °C	2.03×10^{-4}
Air pressure	95437.48 Pa	50 Pa	5.90×10^{-4}
Relative humidity	36.08 %	3%	3.61×10^{-4}
CO ₂	450×10^{-6} (nominal)	100×10^{-6}	4.62×10^{-5}
Formula			2.47×10^{-5}
Combined			7.22×10^{-4}

The temperature variations with time have an influence on the volume of the weight. The volume $V(T_{\text{ref}})$ of a weight can be obtained at a reference temperature T_{ref} . The actual volume must be corrected for the measured temperature T from the sensor as

$$V(T) = V(T_{\text{ref}}) \cdot [1 + \alpha_V \cdot (T - T_{\text{ref}})], \quad (10)$$

where α_V is the volume expansion coefficient, and $T_{\text{ref}} = 20$ °C.

The standard uncertainty of the volume $u(V)$ is determined by the calibration uncertainty of the mass volume $V(20$ °C) and the measurement uncertainty of the temperature sensor. From the mass calibration certificate, the volume $V(20$ °C) is (2.4961 ± 0.0006) cm³ ($k = 2$). The measurement uncertainty of the temperature sensor is 0.05 K. According to the GUM, the combined uncertainty of the volume $u(V)$ is 3×10^{-10} m³.

According to eq. (8), the combined standard uncertainty of the mass $u(m)$ is 3.1×10^{-3} mg, and the relative uncertainty of the mass is 1.6×10^{-7} .

4.2. Voltage

During the measurement, the so-called ABAB cycles are performed consecutively to determine the Bl_F . The voltages of the unloaded (U_A) and loaded (U_B) balance are measured with the same magnitude but different sign, i.e. $U_A = -U_B$. The voltage U_F for the Bl_F determination is calculated by the difference between U_A and U_B as

$$U_F = |U_A - U_B|. \quad (11)$$

Both, the voltage measurements of the unloaded and loaded balance were conducted by means of a digital voltmeter HP3458A that was regularly calibrated against a Fluke Calibrator 5720A. This instrument was also calibrated against a programmable Josephson voltage standard (PJVS) at PTB and TUIL. The measured amplitudes of U_A and U_B were about +271 mV and -271 mV, respectively, with standard deviations of about 417 µV. Since the

measurement uncertainties of U_A and U_B were the same, i.e. $u(U_A) = u(U_B)$, the relative standard uncertainty of the voltage U_F can be estimated as

$$\frac{u(U_F)}{U_F} = \frac{(u^2(U_A) + u^2(U_B))^{\frac{1}{2}}}{|U_A - U_B|} = \frac{u(U_A)}{\sqrt{2}|U_A|}, \quad (12)$$

which is derived from eq. (11). The estimation of $u(U_A)$ is enough to evaluate the relative uncertainty of U_F according to eq. (12). Putting the numbers for U_A and the standard deviation from the measurement, as given above, into eq. (12) would give only a Type A uncertainty contribution, which however, is already included in the Type A uncertainty of the whole measurement. In order to estimate the Type B contribution to the voltage measurement, a more detailed analysis of the digital voltmeter is necessary. The measurement of U_A is in the measurement range of 1 V, and the temperature deviation between ambient temperature (average temperature 22.39 °C) and calibration temperature (23 °C) is within 1 K. In such a case, the calibration error is given as 0.5 µV V⁻¹ [5]. Other major contributions to the uncertainty budget for the voltage measurement are given in the PTB report [5] and the data sheet of the voltmeter [6]. The preliminary uncertainty budget for the unloaded (or loaded) voltage measurement is evaluated in Table 2. Taking the combined standard uncertainty from Table 2 as $u(U_A)$ and $U_A = 271 \text{ mV}$, then, according to eq. (12), the relative uncertainty of the voltage U_F becomes 1.3×10^{-6} . This uncertainty could be reduced by increasing the voltage drop, i.e. by using a higher resistance. If the full-scale value (1 V) were used, the relative standard uncertainty would decrease to 3.4×10^{-7} .

Table 2: Preliminary uncertainty budget for the unloaded (or loaded) voltage with $k = 1$.

Component	Estimate/ µV V ⁻¹	Distribution	Uncertainty/ µV V ⁻¹
Calibration	0.5	Rectangular	0.29
Gain	0.03	Gaussian	0.03
Linearity	0.1	Rectangular	0.06
Time drift	0.2	Rectangular	0.12
Quantization	0.58	Rectangular	0.33
Johnson noise	0.08	Gaussian	0.08
Sampling noise	0.1	Gaussian	0.10
Combined			0.48

4.3. Combined uncertainty of BI_F

In the force mode, if the balance is tilted, the effective gravitational force due to the mass will be reduced, which arises from a cosine error. The order of magnitude corresponds to the cosine error in the alignment of the laser beam to the direction of the coil movement. The error can be approximated as

$$\frac{u(m)}{m} = \cos \alpha \approx \frac{\alpha^2}{2}, \quad (13)$$

where α is the tilt angle. This angle is kept below $\alpha = 450 \mu\text{rad}$, so that the relative uncertainty contribution is 1×10^{-7} . Combined with the contribution of the air density and the mass calibration, the relative uncertainty of the mass amounts to 1.9×10^{-7} .

The local gravitational acceleration g in the laboratory was determined by the federal agency for cartography and geodesy (BKG) using a free-fall absolute gravimeter and a relative gravimeter. The value of g with the associated measurement uncertainty is $(9.81017160 \pm 0.17) \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$, and thus the relative standard uncertainty is 1.73×10^{-8} . Due to some disturbances of the earth tides, polar motion, and air pressure, the value of g has a temporal variation of $\pm 1.5 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$, and the relative uncertainty is about 2×10^{-7} [10]. If these disturbances are corrected, the relative measurement uncertainty can be reduced to below 2×10^{-8} [10].

The 500Ω resistor was calibrated at PTB against a quantum hall resistance with a relative measurement uncertainty of 2×10^{-9} ($k = 1$) under a calibration temperature of 23°C . The resistance R is influenced by the temperature, and the typical temperature coefficient of the resistance is $\pm 0.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, which is given in the data sheet. The value of the resistance must be corrected with respect to the real working temperature. The working temperature is measured by a temperature sensor with a measurement uncertainty of 0.05 K . As the temperature is not directly measured at the resistor, it is assumed that the measurement uncertainty of temperature is 0.1 K . Therefore, the relative measurement uncertainty for the resistor due to temperature change can be estimated as 2×10^{-8} . In such a case, the combined relative measurement uncertainty can be estimated to 2.01×10^{-8} .

The Type A uncertainty of 2.0×10^{-7} is estimated by using the measurement data. The relative uncertainty of the voltage measurement of 4×10^{-7} is estimated in section 4.2. A preliminary combined uncertainty budget for B_F is listed in Table 3 and amounts to 1.3×10^{-6} .

Table 3: Preliminary uncertainty budget for the Bl_F in the force mode.

Component	Relative uncertainty $/ 1 \times 10^{-8}$
Type A	20
Mass	18
Gravity	20
Resistor	2
Voltage	125
Combined	130

5. Uncertainty evaluation for the velocity mode

In the velocity mode, the Bl_V is determined by the signal (or motion) frequency f_{sig} , and by the amplitudes of the induced voltage U_{ind} and displacement S . The relative uncertainty of Bl_V can be estimated by

$$\frac{u(Bl_V)}{Bl_V} = \left(\left(\frac{u(U_{\text{ind}})}{U_{\text{ind}}} \right)^2 + \left(\frac{u(S)}{S} \right)^2 + \left(\frac{u(f_{\text{sig}})}{f_{\text{sig}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

which is derived from eq. (4). Here $u(Bl_V)$ is the standard deviation of Bl_V , $u(U_{\text{ind}})$ of the induced voltage, $u(S)$ of the displacement, and $u(f_{\text{sig}})$ of the signal frequency.

The amplitudes of the induced voltage and the displacement are estimated by applying a linear sine fitting algorithm. The fit is linear, because the signal frequency is known very accurately from the frequency generator. The estimated amplitudes must be corrected for the effects of aperture time, air refractive index, temperature, and gain factor of the voltmeter. Considering these effects, the contributions to the uncertainty for Bl_V is estimated.

5.1. Voltage measurement

Similar to the voltage measurement in the force mode, the uncertainty can be estimated for the velocity mode. Table 4 lists up all contributions and gives its combined standard uncertainty. The increased sampling noise and Johnson noise, when compared to the force mode, arises from the lower voltage amplitude. Here, as a conservative estimate the lowest voltage level has been chosen, which is induced for the lowest signal frequency of 0.5 Hz. If in a future measurement only a higher frequency, e.g. 4 Hz, is chosen, the combined uncertainty could be reduced to about 0.5×10^{-6} .

Table 4: Preliminary uncertainty budget for the voltage measurement with $k = 1$.

Component	Estimate/ $\mu\text{V V}^{-1}$	Distribution	Uncertainty/ $\mu\text{V V}^{-1}$
Calibration	0.5	Rectangular	0.29
Gain	0.03	Gaussian	0.03
Time drift	0.2	Rectangular	0.12
Linearity	0.1	Rectangular	0.06
Quantization	0.07	Rectangular	0.04
Johnson noise	0.37	Gaussian	0.37
Sampling noise	0.46	Gaussian	0.46
Combined			0.72

5.2. Aperture time

When sampling an ac signal with a digitizer, the acquisition time is much less than the period of the measured signal. The effective data acquisition time is even shorter than the sampling time and is called aperture time t_{Aper} which acts like a filter. Compared to the original signal, both, initial phase and amplitude of the sampled ac signal, hence are biased. In the velocity mode, the initial phase is not of interest, and thus only the estimated amplitude must be corrected as (see [2])

$$\hat{x} = \hat{x}_{\text{meas}} \frac{2\pi f t_{\text{Aper}}}{2 \sin(2\pi f t_{\text{Aper}}/2)}, \quad (15)$$

where \hat{x} and \hat{x}_{meas} are amplitudes of original signal and sampled signal, respectively.

A laser interferometer is used to measure the coil motion. The sampling frequency is so high, relative to the signal frequency, that the relative bias of the displacement amplitude is about 2.8×10^{-13} [2], which is negligible. The induced voltage is digitized by the multimeter with the sampling frequency $f_s = 1 \text{ kHz}$, and the aperture time is 0.7 ms. When the signal frequency f_{sig} is between 0.5 Hz and 10 Hz, the relative bias of U_{ind} lies between 2×10^{-7} and 8×10^{-5} . The amplitude of the induced voltage must be corrected after the sine fitting. The time jitter of the aperture time is 5 ns [5], and the relative uncertainty of amplitude is smaller than 1×10^{-9} . The contribution of time jitter to the uncertainty is negligible.

5.3. Air refractive index

When the coil motion is measured in air, the vacuum wavelength λ_{Vac} from the laser interferometer is changed due to the air refractive index n . The wavelength λ_{Air} in air can be calculated according to Snell's law of refraction as

$$\lambda_{\text{Air}} = \frac{\lambda_{\text{Vac}}}{n}. \quad (16)$$

As the displacement is measured with the interferometer, the amplitude \hat{S}_{meas} estimated using the samples of displacement must be corrected for the air refractive index n , which leads to an increase in Bl_v . Thus, the corrected amplitude \hat{S}_{corr} becomes

$$\hat{S}_{\text{corr}} = \frac{\hat{S}_{\text{meas}}}{n}. \quad (17)$$

The air refractive index n is calculated by using the Ciddor formula [8], which depends on the vacuum wavelength λ_{Vac} , the air temperature T , the atmospheric pressure p , the relative humidity h_r and the carbon dioxide content [7]. The measurement uncertainties of the environmental sensors are listed in Table 5, and the corresponding contributions to the uncertainty of the air refractive index n are estimated therein. The combined relative uncertainty amounts to 1.44×10^{-7} .

Table 5: Uncertainty budget of air refractive index with $k = 1$.

	Nominal or mean value	Uncertainty of sensor	Relative uncertainty
Wavelength	632.9912334 nm	1×10^{-8}	7.35×10^{-8}
Temperature	22.39 °C	0.05 °C	4.41×10^{-8}
Pressure	95437.48 Pa	50 Pa	1.33×10^{-7}
Relative humidity	36.08 %	3 %	2.94×10^{-8}
CO ₂	450×10^{-6}	100×10^{-6}	1.34×10^{-8}
Formula			1.20×10^{-8}
Combined			1.44×10^{-7}

5.4. Combined standard uncertainty

The laser is calibrated with a measurement uncertainty of 2×10^{-8} ($k = 2$). The cosine error is also a contribution to the uncertainty of the length measurement, and the relative error can be estimated as $\alpha^2/2$, which is similar to the alignment of the balance itself. Here, a relative uncertainty of 1×10^{-7} is estimated. Combining the contributions of the air refractive index and the interferometer, the relative uncertainty of the velocity measurement using a laser interferometer becomes 1.8×10^{-7} .

The type A uncertainty of 1.9×10^{-7} is estimated by using the measurement data. A preliminary combined uncertainty budget for Bl_v is listed in Table 6.

Table 6: Preliminary uncertainty budget for the Bl_V in the velocity mode with $k = 1$.

Component	Relative uncertainty $/ 1 \times 10^{-8}$
Type A	19
Interferometer	18
Voltage	72
Combined	77

6. Conclusion and outlook

The Planck-Balance is a Kibble balance for industrial applications. A first version, called PB2, is aimed at covering a continuous weighing range from 1 mg to 100 g, while keeping the total size of the balance close to the size of a state-of-the-art analytical balance. In this article a preliminary combined standard uncertainty for a weighing of 20 g has been presented. It has been shown that the relative standard uncertainty amounts to 1.3×10^{-6} in the force mode, and 7.7×10^{-7} in the velocity mode. The measured systematic error, which was determined by a comparison with the calibration certificate of the weight, amounts to less than 1×10^{-6} . Thus, the true mass lies within the evaluated error bars of the PB2. This is a promising result towards a real table-top Kibble balance. However, it should be noted that this result is preliminary, and further investigations have to be conducted, in order to validate the result. So, for example, in a next step it will be investigated whether the PB2 can give similar results for the whole mass range, i.e. from 1 mg to 100 g.

7. Acknowledgments

The research of this project is funded via the program “Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials – VIP+”, a program of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and is managed by VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

8. References

- [1] C. Rothleitner, et.al.: The Planck-Balance—using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights. *Measurement Science and Technology* 29 (2018) 7 074003
- [2] F. Hilbrunner, et.al.: Wattwaage mit Hebelübersetzung auf Basis eines kommerziellen EMK-Wägesystems. *tm – Technisches Messen*, 85 (2018) 11
- [3] OIML R 111-1, 2004(E): Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃, Part 1: Metrological and technical requirements.
- [4] A. Picard, et.al.: Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia*, 45 (2008) 2 149-155
- [5] W.G. Kürten Ihlenfeld: Maintenance and traceability of AC voltages by synchronous digital synthesis and sampling. *PTB-Bericht*, PTB-E-75, 2001.
- [6] Keysight 3458A Multimeter User's Guide, Agilent Technologies, 2017.
- [7] J. A. Stone, et.al.: Index of refraction of air. *Engineering Metrology Toolbox*, National Institute of Science and Technology, <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp>
- [8] P. E. Coddor: Refractive index of air: new equation for the visible and near infrared. *Applied Optics*, 35 (1996) 9 1566-1573
- [9] JCGM 100: 2008: Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [10] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2017, Absolute Schweremessungen an der TU Ilmenau, *Technischer Bericht G4-2017-3*

Störgrößenidentifikation in der dynamischen Wägetechnik

M.Sc. Norbert Rogge, Technische Universität, Ilmenau

Kurzfassung

Messunsicherheit und Messzeit werden bei Wägeborgängen sowohl durch die Eigenschaften der Waage selbst, als auch von äußereren und inneren Störungen beeinflusst. Um Messzeit und Messunsicherheit gleichermaßen zu reduzieren, ist es notwendig die Ursachen dieser Störungen zu identifizieren und mögliche Gegenmaßnahmen abzuleiten. Dieser Beitrag demonstriert anhand von Beispielen die Identifikation sowohl mechanischer als auch elektrischer Störphänomene.

Abstract

The measurement uncertainty and the duration of a weighing process are affected by the characteristics of the utilized weighing cell as well as by internal and external disturbances. In order to reduce uncertainty and measurement time alike, it is necessary to identify the causes of the disturbance phenomena to reduce their impact on the measurement process. This contribution demonstrates the identification of examples of electrical and mechanical disturbances.

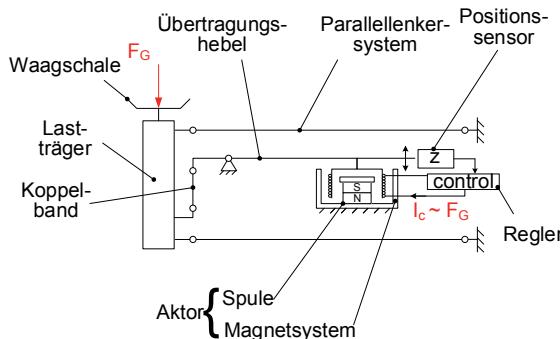


Bild 1: Schematische Darstellung einer EMK-Waage.

1. Einleitung

Eine Waage nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompenstation (EMK) besteht aus einem Übertragungshebel, welcher mit einem Positionssensor und einem Aktor versehen ist (Bild 1). Diese werden genutzt, um die Gewichtskraft des Wägegutes, welche am anderen Ende des Hebels eingeleitet wird, derart zu kompensieren, dass der Positionssensor in seine

Nulllage gebracht wird. Der dazu genutzte Regler hat in Kombination mit den elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Wägezelle großen Einfluss auf die Geschwindigkeit, mit der die Masse des Wägegutes bestimmt werden kann [1].

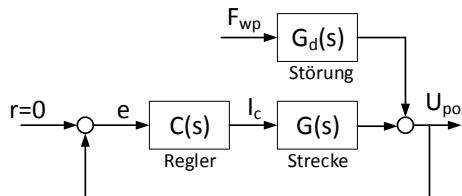


Bild 2: Übertragungsfunktion bezüglich Messdynamik.

Der Regler wird üblicherweise anhand der Übertragungsfunktion zwischen der Anregung des Hebels durch den Aktor und der Hebelposition dimensioniert. Im späteren Messprozess wird dagegen die sich ändernde Kraft auf der Waagschale eingeleitet und mittels Lastträger und Koppelband an den Hebel übertragen. Aus Sicht des Positionsreglers stellt diese Art der Anregung eine Störung am Systemausgang dar (Bild 2). Die Übertragungsfunktion von zu bestimmender Gewichtskraft F_{wp} zu gemessenem Kompensationsstrom I_c ergibt sich aus der Störübertragungsfunktion G_d , der Streckenübertragungsfunktion G und der Reglerübertragungsfunktion C zu:

$$\frac{I_c(s)}{F_{wp}(s)} = \frac{-C(s)G_d(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (1)$$

Eine Optimierung der Einschwingzeit des Messprozesses ist somit auch von der Störübertragungsfunktion abhängig.

2. Messaufbau

Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Messungen wurde eine handelsübliche EMK-Wägezelle mit Hilfe eines modularen digitalen Signalverarbeitungssystems (DSP) betrieben [2]. Da die Digital-Analog-Wandler (DAC) den notwendigen Kompensationsstrom nicht direkt zur Verfügung stellen können, wird eine Verstärkerschaltung (U/I-Wandler) eingesetzt, welche einen vorgegebenen Spulenstrom proportional zur Eingangsspannung der Schaltung liefert. Diese Art des Betriebs der Aktorspule bietet den Vorteil, dass vorgegebene Stromamplituden unabhängig von der frequenzabhängigen induktiven Last der Spule eingestellt werden können. Der

U/I-Wandler verfügt außerdem über einen Shuntwiderstand mit welchem der tatsächlich durch die Aktorspule fließende Strom gemessen werden kann.

Der Positionssensor der Waage liefert zwei Photoströme, welche durch einen Transimpedanzwandler in Spannungssignale gewandelt werden. Die Differenz dieser Spannungspotentiale wird mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers (ADC) erfasst und dient als Eingangssignal des Reglers (siehe Bild 3).

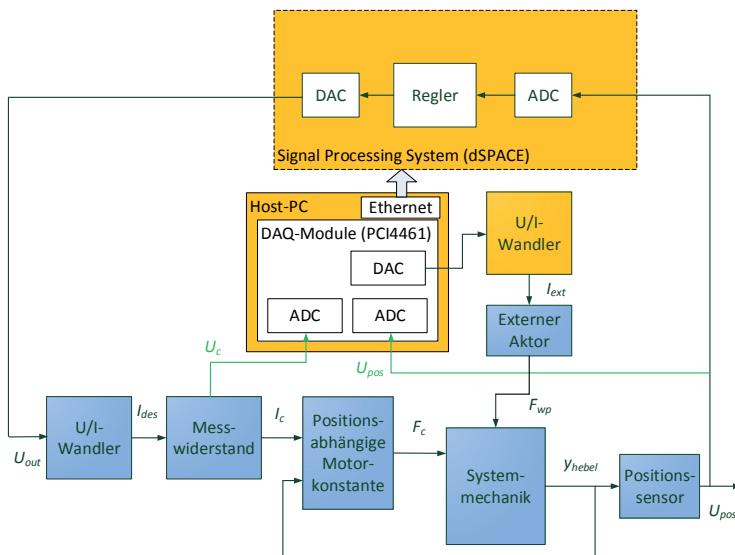


Bild 3: Signalflussplan der Messanordnung.

Die Regelung der EMK-Wägezelle wird auf einem DSP-System der Firma dSPACE implementiert, welches über ADC und DAC mit jeweils 16 bit Auflösung verfügt. Um die Positionsspannung U_{pos} und den Spannungsabfall U_c , welcher durch den Kompensationsstrom verursacht wird, besser auflösen zu können, verfügt der Host-PC zudem über eine Spannungsmess- und Ausgabemodul vom Typ PCI-4461 der Firma National Instruments. Deren ADC und DAC verfügen über eine Auflösung von 24 bit bei einer Samplingrate von bis zu 200 kHz. Da die Daten jedoch nur paketweise eingelesen und ausgegeben werden können, wird dieses Modul nicht zur Regelung genutzt.

Zur Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften einer Wägevorrichtung ist es notwendig das System anzuregen. Dies kann mit Hilfe des Aktors der EMK-Waage geschehen indem

ausgehend von der eingeregelten Nulllage verschiedene Signale auf den Aktorstrom moduliert werden. Eine geeignete Signalform zur schnellen Identifikation der dominanten Polstellen und Resonanzfrequenzen sind Pseudozufallssequenzen deren Verlauf darauf optimiert ist, dass das Amplitudenspektrum möglichst dem eines weißen Rauschens ähnelt. Dadurch ist es möglich das System in einem breiten Frequenzbereich anzuregen und die Systemantwort zu identifizieren.

Zur Identifikation der Störübertragungsfunktion G_d kann die gleiche Methode angewendet werden, wenn ein weiterer Tauchspulenaktor auf der Waagschale angebracht wird [3]. Auch dieser Aktor wird mit Hilfe eines U/I-Wandlers und eines passenden DAC angesteuert. In den hier dargestellten Untersuchungen wird dazu einer der DAC der PCI-4461 verwendet (siehe Bild 3).

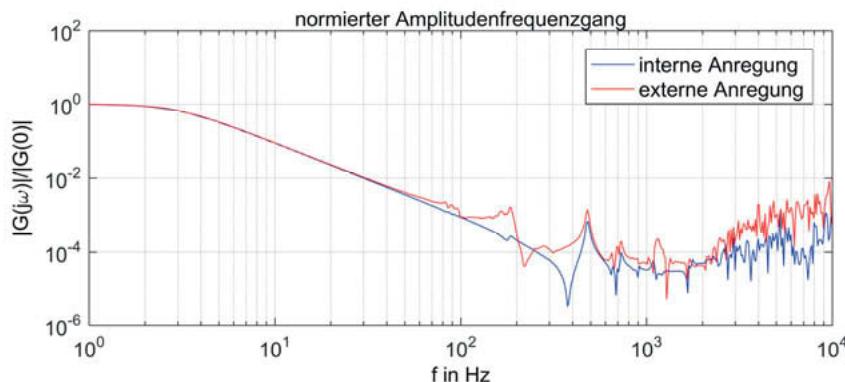


Bild 4: Amplitudenzgänge bei externer und interner Anregung einer Wägezelle.

Wie in Bild 4 zu erkennen ist, weicht der normierte Amplitudenzgang bei externer Anregung des Systems auf der Waagschale qualitativ von dem bei interner Anregung ermittelten ab. Während sich die niederfrequenten Eckfrequenzen und die Resonanz bei etwa 480 Hz in beiden Fällen stark ähneln, tritt im Bereich von etwa 180 Hz eine deutlich größere Resonanzüberhöhung bei externer Anregung auf. Nach Gleichung (1) hat dieser Effekt Einfluss auf die Messdynamik und muss bei deren Optimierung berücksichtigt werden.

Eine weitere Methode zur Identifikation von störenden Resonanzen ist eine Impulsanregung auf der Waagschale. Diese kann mit minimalem technischen Aufwand durchgeführt werden, indem eine elastische Kugel manuell auf die Waagschale fallen gelassen wird. Hierdurch entfällt nicht nur der zusätzliche Tauchspulenaktor selbst, sondern auch das Gestell zu dessen

Befestigung und die elektrische Ansteuerung. Dagegen ist die Phasenzuordnung und die Erzeugung vordefinierter Amplituden schwieriger als bei der Anregung mit Tauchspule. Das Verfahren ist dennoch eine kostengünstige Alternative, wenn nur die Frequenzen der Resonanzen von Interesse sind.

3. Mechanische Störungen

Da im Wägeprozess üblicherweise niederfrequente Signale mit niedriger Messunsicherheit erfasst werden sollen, ist es sinnvoll die auftretenden störenden Resonanzen nach Möglichkeit so zu beeinflussen, dass die auftretenden Amplituden niedrig und die Frequenzen hoch sind. Letzteres ist dadurch vorteilhaft, dass diese Störungen mit kürzeren Filterlängen bedämpft werden können und somit das niederfrequente Nutzsignal weniger beeinflussen.

Bei der Ursache mechanischer Resonanzen, welche insbesondere bei externer Anregung auftreten, können drei Fälle unterschieden werden:

- Schwingungsfähige Systeme auf der Waagschale, welche sich nicht im Kraftfluss befinden
- Schwingungsfähige Systeme im Kraftfluss der Übertragung der Gewichtskraft über Waagschale/Wägeband, Koppelband und Übertragungshebel
- Schwingungsfähige Befestigung der gesamten Wägezelle auf ihrem Untergrund. Durch die hohe Trägheit der Kupferspule im Kompensationsaktor werden diese Beschleunigungen des Gehäuses vom Messsystem registriert.

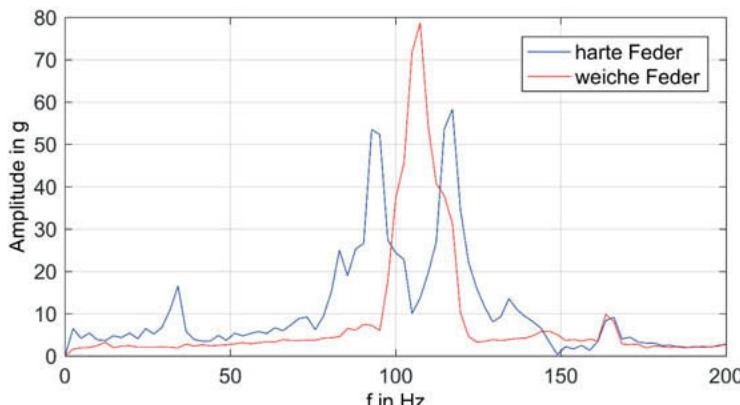


Bild 5: Fouriertransformierte Impulsantwort einer Wägezelle mit Schwingern auf der Waagschale.

Schwinger außerhalb des Kraftflusses:

Zur Untersuchung der Empfindlichkeit einer Wägezelle gegenüber auf der Waagschale aufgebrachten schwingungsfähigen Systemen, wird eine mit einem Gewicht versehene Blattfeder auf die Waagschale geklemmt. Mit Hilfe der Zusatzmasse am Blattfederende, der freien Federlänge und der Dicke der Feder kann die Frequenz des Schwingers eingestellt werden. Bei dem hier betrachteten Versuch werden zwei Federn auf eine Frequenz von 34 Hz eingestellt, wobei eine Feder dünner ist und eine geringere Zusatzmasse benötigt wird als bei der steiferen Feder. Die Frequenz wird durch Verschieben der Blattfeder in der Klemmung feinjustiert und die tatsächlich eingestellte Frequenz durch Anregen des Schwingers und Auslesen des Wägesignals überprüft. In Bild 5 sind die Amplituden der Impulsantwort für beide Federn dargestellt. Die Wägezelle wurde durch einen Impuls auf der Waagschale neben dem Swinger angeregt und das resultierende Wägesignal fouriertransformiert. Bei dieser Anregung kann die eingestellte Schwingerfrequenz nur bei der steiferen Blattfeder mit größerer Zusatzmasse identifiziert werden, während der Swinger mit kleiner Zusatzmasse keinen negativen Effekt auf das Wägesystem hat. Außerdem kann festgestellt werden, dass der steifere Swinger auch die Resonanz beeinflusst, welche das Wägesystem auch ohne Zusatzschwinger aufweist und welche eine deutlich größere Amplitude besitzt. Dies zeigt, dass Aufbauten auf der Waagschale oder dem Krafteinleitungssystem vor Allem dann problematisch sind, wenn sie über eine große Masse verfügen.

Schwinger innerhalb des Kraftflusses:

Mit Hilfe der Anregung kann nur schwer zwischen einer Anregung von Resonanzen des Gehäuses bzw. des Gestells der Waagenmechanik und der Waagenmechanik selbst unterschieden werden. Die Aufstellbedingungen selbst können aber leicht verändert werden indem die Waage mit unterschiedlich weichen Stellfüßen verwendet oder fest auf einem Gestell verschraubt wird.

In Bild 6 sind die Amplitudenspektren für drei Fälle dargestellt. Im ersten Fall werden Stahlfüße mit kugelförmiger Unterseite in die Grundplatte der Wägezelle geschraubt und die Wägezelle auf einem Steintisch platziert. Im zweiten Fall werden die Stahlfüße durch Kugeln aus weichem Gummi ersetzt und im dritten wird die Waage auf Gewindestangen platziert, welche auf einem geschweißten Stahlgestell verschraubt sind und die Grundplatte mit Muttern fixiert. Es ist zu erkennen, dass die Art der Aufstellung der Wägezelle erheblichen Einfluss auf die auftretenden Resonanzen hat und somit im Einsatzfall auch stark die erreichbare Dynamik beeinflusst.

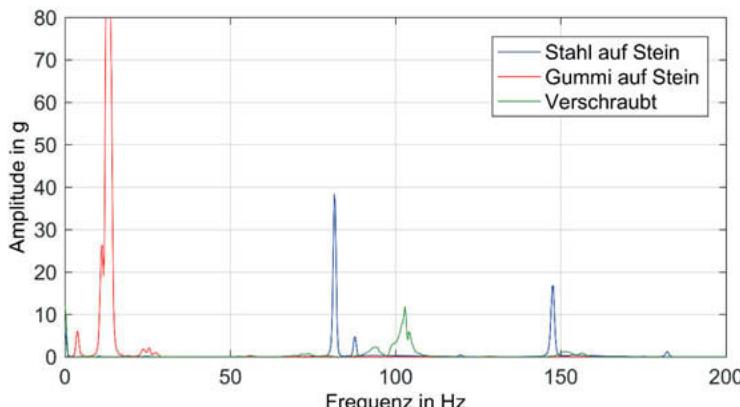


Bild 6: Amplitudenspektren der Impulsantwort bei verschiedenen Aufstellbedingungen

4. Elektrische Störungen

Bei Betrachtung des höheren Frequenzbereiches der Systemübertragungsfunktion einer EMK-Wägezelle tritt in dem in dieser Arbeit betrachteten Aufbau ein Anstieg der Amplitude auf, welcher sich kaum durch mechanische Phänomene erklären lässt, da in dem betrachteten System eine relativ hohe Dämpfung vorhanden ist. Eine mögliche Ursache dieses Effektes ist eine direkte Erzeugung von Strömen durch die Photodioden des Positionssensors durch die von der Aktorspule erzeugten Wechselfelder. Dies ist möglich, da sich der Positionssensor und dessen Anschlussleitungen innerhalb des Aktorsystems befinden. Zur Überprüfung dieser Vermutung wird eine Ersatzschaltung aus zwei Diode, welche elektrisch der Differenzphotodiode des Positionssensors entspricht, in einer Spule platziert und der Amplitudenfrequenzgang zwischen Spulenstrom und Differenz der Diodenströme analog zur Systemübertragungsfunktion ermittelt.

Wie in Bild 7 zu erkennen ist, wird in diesem Versuchsaufbau bei höheren Anregungsfrequenz ein qualitativ ähnlicher Verlauf erzielt, wie er bei der Wägezelle zu beobachten ist. Der Abfall der Amplitude oberhalb von 10 kHz ist durch den verwendeten Antialiasingfilter zu erklären. Bei entsprechend hoher Verstärkung des Reglers in diesem Frequenzbereich kann dieser Effekt zu einer starken Erhöhung der Rauschamplituden führen. Daher ist es ratsam dies beim Entwurf des Reglers zu berücksichtigen oder die Bandbreite des U/I-Wandlers so zu dimensionieren, dass diese Frequenzen nicht angeregt werden können.

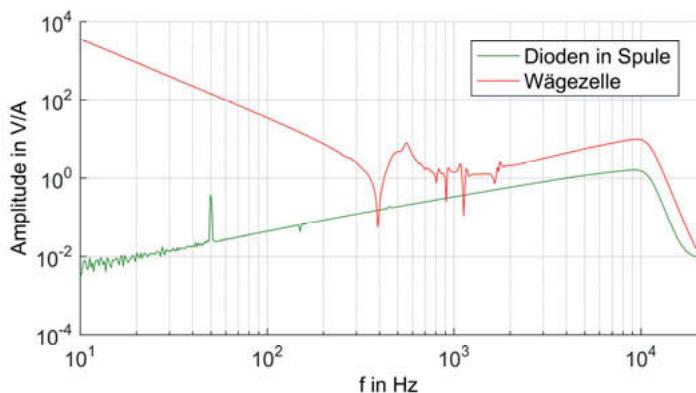


Bild 7: Amplitudenfrequenzgänge von Wägesystem und Ersatzdioden.

5. Zusammenfassung

Die Kenntnis der dynamischen Eigenschaften einer EMK-Wägezelle ist nicht nur beim Entwurf des Reglers hilfreich, sondern kann auch genutzt werden, um den gesamten Messprozess zu optimieren. Dabei ist es notwendig die Mechanik der Wägezelle nicht nur isoliert zu betrachten, da diese auch in Wechselwirkung mit der Regelelektronik und dem Regelalgorithmus sowie der Umgebung steht. Insbesondere die mechanische Anbindung einer Wägezelle an eine Anlage hat großen Einfluss auf die erreichbaren Einschwingzeiten des Wägeborgangs bei gegebener Einschwingtoleranz, da zusätzliche Resonanzen eine Anpassung der Filterlängen erfordern. Dies ist vor Allem dann der Fall, wenn diese Resonanzen niedrige Frequenzen nahe der gewünschten Nutzfrequenz aufweisen.

- [1] Weis, H.; Gushchina, I.; Amthor, A.; Hilbrunner, F.; Fröhlich, T.: Investigation of digital control concepts for dynamic applications of electromagnetic force compensated balances. In: 2013 NCSLI International Workshop and Symposium, 2013
- [2] Amthor, A.; Kaiser, I.; Rogge, N.; Weiß, H.: Analyse, physikbasierte Modellierung und Systemidentifikation von Waagen nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompenstation (EMK). Ilmenau Scientific Colloquium, 58, 2014, S. 393-401 Technische Universität Ilmenau
- [3] Hilbrunner, F.; Weis, H., Fröhlich, T.; Jäger, G.: Comparison of different load changers for EMFCbalances, IMEKO TC3 & TC5 & TC22 International Conference (2010), pp. 65-68

Technologiegerechtes Kalibrierprogramm für moderne Messgeräte

Neue Möglichkeiten durch Kalibrierung tatsächlich nutzbar machen

Calibration programmes for modern instruments

Using new technologies to the full extent thanks to traceable calibration

Dr. Christian Mester, Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Bern-Wabern, Schweiz

Kurzfassung

Zur Kalibrierung beispielsweise von elektrischen Messwandlern wurden über Jahrzehnte klassische Messbrücken verwendet. Brücken nutzen ein Messverfahren mit Nullabgleich. Heute werden vielseitigere Instrumente eingesetzt, die zwar aus Gewohnheit oft Brücken genannt werden, aber keine sind, da sie ein indirektes Messverfahren verwenden.

Der Vortrag führt aus, welche Auswirkungen dieser Technologiewandel auf das Kalibrierprogramm haben sollte, damit dieses aussagekräftig ist und der Vielseitigkeit der Messgeräte gerecht wird.

Die Kalibrierung von Wandermessgeräten dient hier als Beispiel; das Prinzip lässt sich auch auf andere Anwendungsfälle übertragen.

Abstract

Traditionally, instrument transformers were calibrated using bridges. Bridges use a null method of measurement. Nowadays, much more versatile instruments are available. Even though they are often wrongly called bridges, they use an indirect method of measurement. This difference should be accounted for in the calibration programme. Otherwise, the versatility of the modern instruments cannot be fully exploited.

The calibration of comparators for instrument transformers is just one example. The principle can also be applied to other domains.

1. Einführung

Traditionell werden bei der Kalibrierung von Messwandlern Messbrücken verwendet. Brücken verwenden ein Messverfahren mit Nullabgleich [1], bei dem die komplexe Differenz der Ausgangssignale von Normal und Prüfling direkt bestimmt und auf das Referenzsignal bezogen wird. Leicht von diesem Prinzip abweichend gibt es auch Messgeräte, die ähnlich aufgebaut sind, aber die Differenz direkt messen, ohne einen Nullabgleich durchzuführen. In beiden Fällen ist es üblich und aussagekräftig, bei der Kalibrierung die Linearität der Differenzbestimmung und den Nullpunkt in Abhängigkeit des Normalsignals zu charakterisieren. Die Darstellung des Nullpunkts ist trivial; es reicht aus, dasselbe Signal sowohl an den Normal- als auch an den Prüflingskanal anzulegen. Für alle anderen Kalibrierpunkt muss ein Wandler mit einem einstellbaren Fehler emuliert werden. Hierfür werden Fehlervorgabegeräte verwendet [2]. Angenehm ist, dass die vom Prüfling angezeigten Messgrößen, die am Fehlervorgabegerät eingestellten Größen und die den Prüfling beschreibenden Größen – beispielsweise nach IEC 61869 [3] – dieselben sind, nämlich Aussteuerung, Übersetzungsfehler und Fehlwinkel. Nachteilig ist, dass Brücken bei unterschiedlichen Ausgangsgrößen von Prüfling und Normal, wenn überhaupt, nur mit Anpassschaltungen einsetzbar sind. Gänzlich ungeeignet sind sie, wenn der Prüfling ein Wandler mit digitalem Ausgang – beispielsweise nach IEC 61850-9-2 [4] – ist. Für die Kalibrierung von hochwertigen Normalwandlern in metrologischen Staatsinstituten bleiben Brücken weiterhin das Mittel der Wahl. Brücken können speziell für den Vergleich von Wandlern mit Abweichungen von weniger als 50×10^{-6} ausgelegt werden und dann Unsicherheiten von weniger als 0.01×10^{-6} erreichen. So haben beispielsweise die meisten Teilnehmer des letzten europäischen Stromwandlervergleichs [5] Brücken verwendet.

Heutzutage sind Wandlermessgeräte häufig keine Brücken mehr. Die IEC hat daher die allgemeine Bezeichnung *Komparator* eingeführt [6]. Sie verwenden ein indirektes Messverfahren [1], also eines, bei dem der Wert der Messgröße gestützt auf andere, direkt gemessene Größen und Berechnungen bestimmt wird. Diese Geräte tasten in der Regel die analogen Eingangssignale ab. Dies erfolgt grundsätzlich für jeden der beiden Kanäle unabhängig, wobei zwingend eine Synchronisierung beider Kanäle notwendig ist. Somit ist es auch möglich, die Eingangsstufe und den Analog-digital-Umsetzer vom Wandlermessgerät in den Prüfling zu verschieben – der Prüfling liefert dann digitale Abtastwerte mit Zeitstempeln. Solche Messgeräte sind also geeignet, Wandler mit digitalem Ausgang zu kalibrieren. Auch können beliebige Phasenverschiebungen gemessen werden, da es kein Differenzsignal gibt, dessen Amplitude begrenzt werden müsste.

Prinzipiell können indirekt messende Wandlermessgeräte auch zur Kalibrierung von Wandlern für Power Quality [7 und 8] verwendet werden, auch wenn kommerziell erhältliche Messgeräte diese Funktionalität heute in der Regel noch nicht anbieten. Das eidgenössische Institut für Metrologie METAS hat bereits ein solches Messgerät nebst zugehöriger Kalibrierseinrichtung aufgebaut.

Zwar ist es möglich und leider auch üblich, dasselbe Kalibrierprogramm wie für Brücken zu verwenden. Dies ist jedoch problematisch, weil sich Kalibrierwerte bei einer Aussteuerung nicht wie bei Brücken auf andere Aussteuerungen übertragen lassen. Zudem können diese Messgeräte auch ohne Anpassschaltungen mit unterschiedlichen Eingangsgrößen betrieben werden. Dies wird jedoch durch die traditionellen Kalibrierprogramme nicht rückgeführt. Im Folgenden wird gezeigt, dass solche Messgeräte durch eine Kalibrierung von Linearität und Synchronisierung der einzelnen Kanäle unabhängig voneinander den gesamten Funktionsumfang abdecken kann. Aus diesen Kalibrierwerten können die für die gewohnten Kenngrößen Aussteuerung, Messabweichung und Fehlwinkel berechnet werden.

2. Traditionelle Wandlermessbrücken

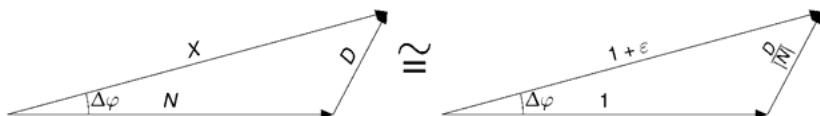


Bild 1: Zeigerdiagramm

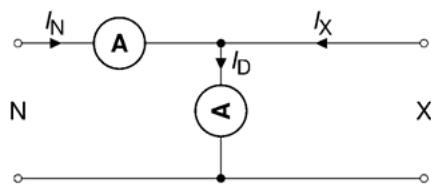


Bild 2: Prinzip einer Wandlermessbrücke für Stromwandler

Die Signale in Wandlermessgeräten können übersichtlich durch ein Zeigerdiagramm dargestellt werden (Bild 1). Das Eingangssignal im Normalkanal wird mit N bezeichnet, das im Prüflingskanal mit X . Die Winkeldifferenz von X gegenüber N wird mit $\Delta\varphi$ bezeichnet, wobei $\Delta\varphi$ positiv ist, wenn X gegenüber N voreilt. In Wandlermessbrücken wird durch geeignete

Schaltung die Differenz $D := X - N$ gebildet. Diese drei Vektoren bilden ein Dreieck. Durch Normieren entsteht ein kongruentes Dreieck, aus dem der Übersetzungsfehler ε abgelesen werden kann. Für die folgende Betrachtung ist die Unterscheidung zwischen Messgeräten mit Nullabgleich und solchen mit Differenzmessung belanglos; sie wird daher übersichtlichkeitshalber unterschlagen. In der Zeigerdarstellung wird deutlich, dass Brücken nur dann geeignet sind, wenn ε und $\Delta\varphi$ klein genug sind, um das Messwerk für D nicht zu übersteuern. Im Extremfall kann der Betrag von D doppelt so groß sein wie der Betrag von N , und zwar dann, wenn N und X betragsgleich und gegenphasig sind. Hierfür sind Brücken nicht ausgelegt, wenn sie auch meist über eine Schutzschaltung verfügen, die Beschädigungen bei Fehlbedienung verhindern. Üblicherweise sind in kommerziell erhältlichen Brücke auch Anpasswandler vorhanden, die es erlauben, Prüflinge mit Übersetzungsverhältnissen, die um ein vorab geplantes Verhältnis vom Übersetzungsverhältnis des Normalwandlers abweichen, zu kalibrieren. Bei Spannungswandlern ist häufig ein Verhältnis $1 : 1/\sqrt{3}$ vorgesehen, bei Stromwandlern hingegen $5 : 1$.

Tabelle 1: Typische Spezifikationen für kommerziell erhältliche Wandermessbrücken

Eingangsspannung	3 V bis 400 V
Eingangsimpedanz	<1 VA bei 100 V, entspricht >10 kΩ
Übersetzungsfehler ε : Messbereiche	-19.99 % bis 19.99 % -1.999 % bis 1.999 % -0.1999 % bis 0.1999 %
Fehlwinkel $\Delta\varphi$: Messbereiche	-19.99 crad bis 19.99 crad (-687' bis 687') -1.999 crad bis 1.999 crad (-68.7' bis 68.7') -0.1999 crad bis 0.1999 crad (-6.87' bis 6.87')
Toleranz	50×10^{-6} , 50 µrad (0.17')

Eine Stromwandermessbrücke (Bild 2) beispielsweise verfügt intern über zwei Messgeräte, eines für den Strom I_N im Normalkanal und eines für den Strom I_D im Differenzweig. Außerdem gibt es ein Rechenwerk zur Bestimmung des Übersetzungsfehlers ε und des Fehlwinkels $\Delta\varphi$. Da das Differenzsignal D sowohl von ε als auch von $\Delta\varphi$ abhängt, sind die gemessenen Werte von ε und $\Delta\varphi$ nicht unabhängig voneinander. In älteren Brücken werden zudem häufig Näherungsformeln verwendet. Anlässlich der Kalibrierung sind also die beiden Messgeräte und das Rechenwerk zu erfassen. In der Regel wird hierfür zunächst ε bei $\Delta\varphi = 0$ und dann $\Delta\varphi$ bei $\varepsilon = 0$ im Rahmen des laut Spezifikationen (Tabelle 1) zulässigen Bereichs variiert (Bild 3). Allfällige Anpasswandler sind ebenfalls zu kalibrieren. Zudem wird

bei $\varepsilon = 0$ und $\Delta\varphi = 0$ für alle zulässigen Aussteuerungen der Nullpunkt kalibriert. Letztere Kalibrierung kann leicht ohne spezielle Ausrüstung wiederholt werden, auch vom Verwender. Hierfür reicht es aus, einen nur ungefähr bekannten Strom an beide Kanäle anzulegen. So mit kann der Verwender in beschränktem Umfang kontrollieren, ob sich die Brücke seit der letzten Kalibrierung verändert hat. Da allerdings nicht alle metrologisch relevanten Teile von dieser Kontrolle erfasst werden, darf auf eine regelmäßige Kalibrierung dennoch nicht verzichtet werden.

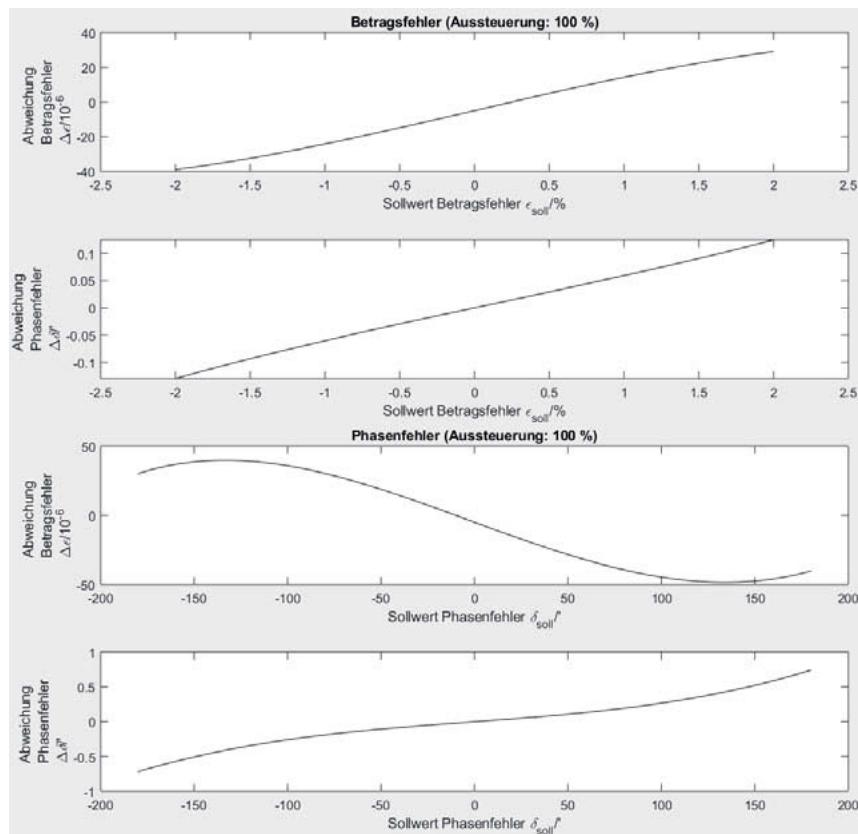


Bild 3: Kalibrierung einer Wandlermessbrücke. Dargestellt sind Simulationsergebnisse. Bei Messungen sind erweiterte Unsicherheiten ($k = 2$) von 25×10^{-6} und $0.08''$ üblich.

3. Indirekt messende Wandlermessgeräte

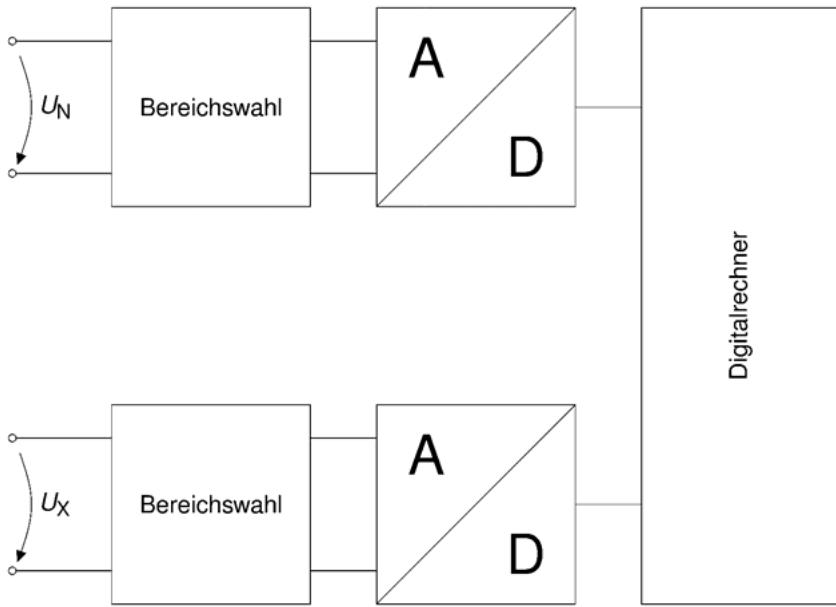


Bild 4: Prinzip eines indirekt messenden Wandlermessgeräts für Spannungswandler

Prinzip

Indirekt messende Wandlermessgeräte können zwar auch wie Brücken verwendet werden, sind aber wesentlich vielseitiger, wie das Prinzipschaltbild (Bild 4) und typische Spezifikationen (Tabelle 2) zeigen. Dank moderner Elektronik erreichen sie Unsicherheiten, die die Anforderungen für kommerzielle Anwendung weit übertreffen und mit denen kommerziell erhältlicher Brücken vergleichbar sind. Zwar ist es grundsätzlich möglich, das Kalibrierprogramm, das sich über die Jahrzehnte für die Kalibrierung von Brücken bewährt hat, auch für diese Wandlermessgeräte zu verwenden, denn die dabei verwendeten Signale sind laut Spezifikation zulässige Eingangssignale. Sinnvoll ist das allerdings in der Regel nicht, weil einige Kalibrierpunkte überflüssig wären, während das Fehlen anderer dazu führte, dass die Vielseitigkeit des Messgeräts nicht genutzt werden kann.

Tabelle 2: Typische Spezifikationen für kommerziell erhältliche indirekt messende Wandtermessgeräte

Normalkanal	Messbereiche	500 V, 250 V, 125 V, 60 V, 30 V, 15 V, 7.5 V, 3.75 V
	Eingangsimpedanz	380 kΩ, 500 pF
Prüflingskanal 1	Messbereiche	500 V, 250 V, 125 V, 60 V, 30 V, 15 V, 7.5 V, 3.75 V
	Eingangsimpedanz	380 kΩ, 500 pF
Prüflingskanal 2	Messbereiche	15 V, 10 V, 5 V, 2.5 V, 1 V, 500 mV, 250 mV, 100 mV, 50 mV, 25 mV
	Eingangsimpedanz	> 1 GΩ, 70 pF
Digitaler Prüfling		nach IEC 61850-9-2
Toleranz ε , $\Delta\varphi$	Prüfling: Kanal 1	50×10^{-6} , 50 µrad (0.17') bei $0.9 \leq U_N/U_x \leq 1.1$ 100×10^{-6} , 100 µrad (0.34') bei $0.5 \leq U_N/U_x \leq 2$ 200×10^{-6} , 200 µrad (0.69') bei $0.5 > U_N/U_x$ oder $U_N/U_x > 2$
	Prüfling: Kanal 2	400×10^{-6} , 200 µrad (0.69')
	Digitaler Prüfling	100×10^{-6} , 300 µrad (1.1')

Kalibrierung des Übersetzungsfehlers ε

Kalibrierprogramme für Brücken enthalten üblicherweise zahlreiche Punkte, bei denen verschiedene Übersetzungsfehler ε bei festem N aufgeschaltet werden. Durch die Spezifikationen der Brücken ist vorgegeben, dass ε sehr klein ist, so dass $X \approx N$. Für indirekt arbeitende Messgeräte bedeutet das, dass durch Veränderung von ε bei festem N die Linearität des X -Kanals bei Kleinsignalaussteuerung um einen festen Arbeitspunkt betrachtet wird. Bei geeigneter Auslegung der Eingangsstufen und Verwendung geeigneter Analog-digital-Umsetzer wird hier regelmäßig beobachtet, dass für alle vorgegebenen ε die Abweichung des Prüflings im Rahmen der Messunsicherheit konstant ist (Bild 5). Das Kalibrierprogramm ließe sich also in diesem Punkt ohne Qualitätseinbußen reduzieren. Sinnvoll wäre jedoch, die Linearität der Eingangsstufen über einen größeren Bereich zu untersuchen. Dies ist ein alltagsrelevanter Punkt, wenn Normalwandler und Prüfling nicht dasselbe Übersetzungsverhältnis haben. Besonders gefährlich ist der Trugschluss, aus der oben ausgeführten Kalibrierung für $X \approx N$ und dem Fehlen von zu kalibrierenden Anpasswandlern dürfte geschlossen werden, dass das Verhalten des Messgeräts im gesamten Arbeitsbereich gleich wäre. Hierbei wird insbesondere vernachlässigt, dass diese Messgeräte in der Regel über verschiedene Messbereiche verfügen. Innerhalb der Bereiche ist die Linearität in der Regel ausgezeichnet, zwischen ihnen treten jedoch Sprünge auf (Bild 6). Folglich ist das Kalibrierprogramm so zu erweitern,

dass Bereichsumschaltungen erfasst werden. Da Bestimmung des Übersetzungsfehlers ε in Abhängigkeit der gemessenen N und X erfolgt, können anstelle des vorgegebenen ε die Amplituden der aufgeschalteten Signale N und X im Kalibrierzertifikat angegeben werden. Dies ist besonders bei dieser Linearitätsanalyse über verschiedene Bereiche hinweg leichter zu interpretieren.

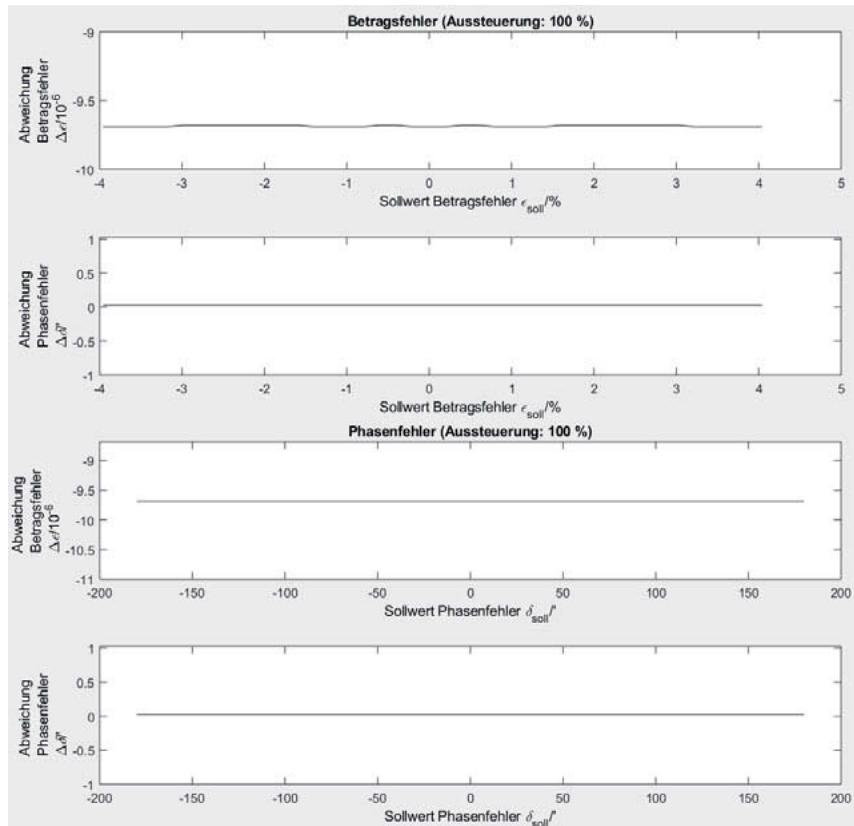


Bild 5: Kalibrierung eines indirekt messenden Wandermessgeräts bei Kleinsignalaussteuerung um einen Arbeitspunkt. Dargestellt sind Simulationsergebnisse. Bei Messungen sind erweiterte Unsicherheiten ($k = 2$) von 25×10^{-6} und $0.08'$ üblich.

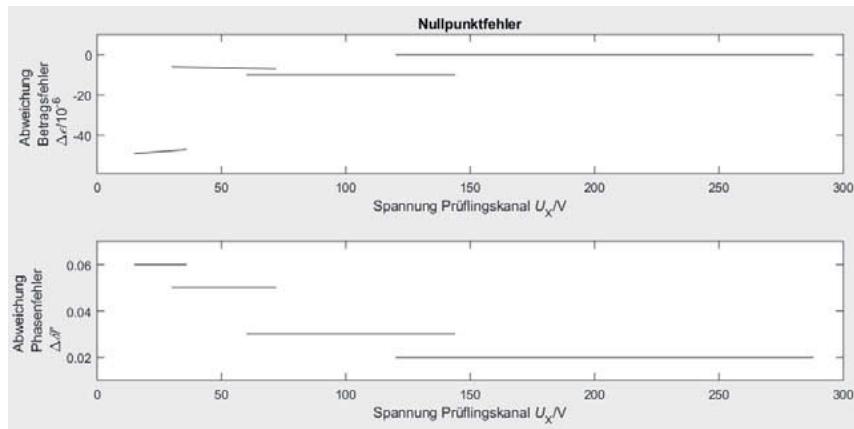


Bild 6: Kalibrierung eines indirekt messenden Wandlermessgeräts bei unterschiedlichen Spannungen im Prüflingskanal. Im Normalkanal sind immer 100 V angelegt. Beide Spannungen sind phasengleich. Deutlich zu erkennen sind die Sprünge bei Messbereichswechseln. Dargestellt sind Simulationsergebnisse. Bei Messungen sind erweiterte Unsicherheiten ($k = 2$) von 25×10^{-6} und 0.08' üblich.

Kalibrierung der Winkeldifferenz $\Delta\varphi$

Brücken sind nur für kleine Winkeldifferenzen $\Delta\varphi$ geeignet. Daraus folgt, dass die Bemessungs-Phasenverschiebung von Normalwandler und Prüfling gleich sein müssen. Dies ist in der Regel trivial, denn Brücken werden meist nur für induktive Wandler ausgelegt und verwendet. Deren Bemessungs-Phasenverschiebung ist per Definition [3] Null. Daher bezeichnet die IEC 61869-1:2007 den Fehlwinkel mit $\Delta\varphi$. Andere als induktive Wandler hingegen können eine beliebige Bemessungs-Phasenverschiebung aufweisen. Bei Rogowskispuhlen [9] ist sie beispielsweise 90°. Daher hat die IEC 61869-6 [10] nun $\Delta\varphi$ zur Bezeichnung der Winkeldifferenz verwendet und für den Fehlwinkel das Symbol φ_e eingeführt. Der gegenwärtige Entwurf einer revidierten IEC 61869-1 [11] übernimmt diese Konvention für alle Arten von Wandlern. Bis zum Inkrafttreten der Revision bleibt die Inkonsistenz der Bezeichnungen erhalten. Da indirekt messende Wandlermessgeräte auch für andere als induktive Wandler geeignet sind, wird im Folgenden die Winkeldifferenz mit $\Delta\varphi$ bezeichnet. Die Bestimmung des Fehlwinkels φ_e bei bekannter Winkeldifferenz $\Delta\varphi$ erfolgt rein rechnerisch und ist daher unproblematisch; sie ist nicht Gegenstand dieser Veröffentlichung.

Zur Bestimmung der Effektivwerte der Eingangssignale ist es formal nicht erforderlich, dass die Frequenz beider Signale dieselbe ist. Zwar ist dies in der praktischen Anwendung immer der Fall, denn die Primärsignale von Normalwandler und Prüflingswandler sind identisch. Auch ließen sich Normal und Prüfling bei unterschiedlichen Frequenzen nicht sinnvoll vergleichen. Allerdings können durch Abweichungen der internen Taktfrequenz der Kanäle und – häufiger – durch ungünstige Wahl interner Algorithmen [12] scheinbare Unterschiede entstehen. Dies hat Auswirkungen auf die Messung der Winkeldifferenz $\Delta\varphi$, nicht aber auf des Übersetzungsfehlers ε . Je grösser die Winkeldifferenz ist, desto stärker wirkt sich dieser Effekt aus. Es ist daher sinnvoll, bei der Kalibrierung durch große Winkeldifferenzen $\Delta\varphi$ derartige Unzulänglichkeiten auszuschließen. Bei kleinen Winkeldifferenzen $\Delta\varphi$ sind die Auswirkungen in der Regel deutlich kleiner als die Messunsicherheit.

Weitere Effekte, die sich auf die Winkeldifferenz $\Delta\varphi$ auswirken, sind die Phasenverschiebung der analogen Eingangsstufe und unterschiedliche Verzögerungen in den Pfaden der digitalen Trigger-Signale der Analog-digital-Umsetzer. Durch sorgfältige Wahl der Komponenten kann erreicht werden, dass erstere zwar von dem gewählten Bereich, innerhalb eines Bereichs aber nicht von der Amplitude der Signale abhängt. Letztere ist konstant, solange die Analog-digital-Umsetzer nicht gewechselt werden. Beide Effekte sind unabhängig von dem Übersetzungsfehler ε und der Winkeldifferenz $\Delta\varphi$. Auf eine fein gestufte Kalibrierung bei kleinen Winkeldifferenzen $\Delta\varphi$ darf bei indirekt messenden Wandermessgeräten daher verzichtet werden.

Die Messung der Winkeldifferenz $\Delta\varphi$ ist auch von der Linearität des Messgeräts abhängig. Hintergrund ist, dass die Messung der Phase eines Signals beispielsweise aus dem Zeitpunkt des ersten Abtastwertes nach dem Vorzeichenwechsel der Sinusschwingung eine sehr hohe Abtastrate erfordert. Eine wesentlich einfachere Lösung dieses Problems ist die Zerlegung von $n(t) = \sqrt{2} \times N \times \sin(2\pi f_0 t + \varphi) = N_1 \times \sin(2\pi f_0 t) + N_2 \times \cos(2\pi f_0 t)$. Die Phase des Signals kann aus dem Verhältnis N_2 / N_1 unter Verwendung des Arkustangens bestimmt werden. Die Auswirkung der Linearität des Messgeräts auf die Winkeldifferenz $\Delta\varphi$ kann sehr leicht erfasst werden, indem bei der Linearitätsanalyse des Übersetzungsfehlers ε gleichzeitig auch die Winkeldifferenz $\Delta\varphi$ abgelesen wird; zusätzliche Kalibrierpunkte sind nicht erforderlich.

Bei indirekt messenden Wandermessgeräten mit analogen Eingängen reicht es aus, die Winkeldifferenz zwischen den beiden analogen Eingangssignalen zu kennen. Ist nur ein Sig-

nal, beispielsweise das des Normalwandlers, analog, das andere aber bereits digitalisiert [13 und 14], so muss die Phasenmessung des Wandlermessgeräts auf dieselbe Referenz wie die des Prüflings bezogen werden. In der Regel ist dies ein von einem Satellitennavigationssystem abgeleitetes Taktsignal. Dies ist eine besondere Herausforderung, weil nicht nur das analoge Eingangssignal eine Verzögerung im Messgerät erfährt, sondern auch das externe Taktsignal [15 bis 19].

4. Zusammenfassung

Am Beispiel von Wandlermessgeräten wurde gezeigt, dass etablierte Kalibrierprogramme, die sich in den vergangenen Jahrzehnten bewährt haben, zu hinterfragen sind, wenn sich die dem Prüfling zugrundeliegende Technologie ändert. So können einerseits nicht mehr benötigte Kalibrierpunkte erkannt und entfernt werden, während andererseits durch zusätzliche Kalibrierpunkte neue Funktionen rückführbar und damit nutzbar gemacht werden können.

5. Danksagung

Diese Veröffentlichung wurde im Rahmen des EMPIR-Projekts Metrology for smart energy management in electric railway systems (MyRailS) [20] erarbeitet. Dieses Projekt hat Fördermittel des EMPIR-Programms, welches gemeinsam von den Teilnehmerstaaten und Horizont 2020, dem EU-Förderprogramm für Forschung und Innovation, finanziert wird, erhalten.



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

6. Literatur

- [1] International Electrotechnical Vocabulary, Subject area 311 "Electrical and electronic measurements – General terms relating to measurements", abgerufen 2019-08-21
- [2] Siegenthaler, S. und Mester, C.: A Computer-Controlled Calibrator for Instrument Transformer Test Sets. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 6, Juni 2017, S. 1184-1190
- [3] IEC 61869-1:2007: Instrument transformers – Part 1: General requirements
- [4] IEC 61850-9-2:2011: Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3
- [5] Draxler, K. et al.: Results of an International Comparison of Instrument Current Transformers up to 10 kA and 50 Hz Frequency. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM*, Juli 2018

- [6] IEC/IEEE TS CD 61869-105:2018 (38/567/CD): Instrument transformers – Part 105: Uncertainty evaluation in the calibration of instrument transformers
- [7] Mester, C., Braun, J.-P. und Ané, C.: Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Power Quality Analysern – Kalibrierung, Prüfung und Zertifizierung von Messgeräten für die Versorgungsqualität. Tagungsband 8. VDI-Fachtagung Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, VDI-Berichte Nr. 2319, 2017, S. 39-49
- [8] Mester, C., Braun, J.-P. und Ané, C.: Einführung in die rückführbare Messung von Power Quality. tm – Technisches Messen, Band 85, Heft 12, 2018, S. 738-745
- [9] Chattock, A. P.: On a magnetic potentiometer. Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. XXIV, no. 5, 1887, S. 94-96
- [10] IEC 61869-6:2016: Instrument transformers – Part 6: Additional general requirements for low-power instrument transformers
- [11] IEC CD 61869-1:2019 (38/606/CD): Instrument transformers – Part 1: General requirements
- [12] Hentgen, L. und Mester, C.: Sampling AC signals: Comparison of fitting algorithms and FFT. Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM, Juli 2018
- [13] IEC 61869-9:2016: Instrument transformers – Part 9: Digital interface for instrument transformers
- [14] IEC CDV 61869-13:2018 (38/599/CDV): Instrument Transformers – Part 13: Standalone Merging Unit
- [15] Mester, C.: Timestamping type 3458A multimeter samples. Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM, Juli 2018
- [16] Feng, J. et al.: Time Latency of DC Input Path for 3458A Sampling Multimeter. Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM, Juli 2018
- [17] Crotti, G. et al.: Measurement of the Absolute Phase Error of Digitizers. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 6, Juni 2019, S. 1724-1731
- [18] Crotti, G. et al.: A Method for the Measurement of Digitizers' Absolute Phase Error. Journal of Physics: Conference Series, vol. 1065, 2018
- [19] Braun, J. P.: Measure of the Absolute Phase Angle of a Power Frequency Sinewave with Respect to UTC. Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM, Juli 2018
- [20] Giordano, D. et al.: Accurate Measurement of Energy, Efficiency and Power Quality in the Electric Railway System. Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM, Juli 2018

Extrapolation der Werte von Hochpräzisionswiderständen

Wann und warum die Mathematik nach Lehrbuch nicht funktioniert

M.Sc. **C. Rohrig**,

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig;

M.Sc. **T. Baisch**, M.Sc. **S. Kuhls**, M.Sc. **N. Stadter**,

ehem. Studenten der Hochschule Darmstadt

Kurzfassung

Zur Festlegung von Rekalibrierfristen ist eine Extrapolation der Messwerte ein unerlässliches Werkzeug. Stimmen die Messwerte mit den berechneten Werten im Rahmen der angestrebten Messmöglichkeiten überein, können die Fristen verlängert werden und so unnötige Kosten vermieden, sowie Vertrauen in Normale und Messaufbauten geschaffen werden.

Basis der Extrapolation ist die Regressionsanalyse. Die darin verwendete Methode der kleinsten Fehlerquadrate geht (u.a.) auf Carl Friedrich Gauß zurück und wird seit über 200 Jahren angewandt. Eine wichtige Änderung hat sich jedoch ergeben, denn mithilfe moderner Techniken werden die Messwerte nicht mehr durchnummieriert, sondern mit Datum und Uhrzeit versehen. Die Zeitabstände zwischen den Werten sind beliebig, und wir stoßen an Grenzen, die Gauß et al. nicht vorhersehen konnten.

Im Folgenden wird gezeigt, dass die Verwendung von Datum und Uhrzeit die Regressionsanalyse erschwert und die beigeordneten Unsicherheiten verfälscht.

Zusätzlich ist es notwendig, den unterschiedlichen Qualitäten der Messpunkte, ausgedrückt durch unterschiedlich große Unsicherheiten, Rechnung zu tragen. Hierfür ist eine Gewichtung der Werte entsprechend Ihrer Unsicherheiten durchzuführen. Ob ein auffälliger Wert vernachlässigt werden darf, kann mit Hilfe des Chauvenetschen Kriterium bestimmt werden. Doch auch hierbei treten Fehler auf, wenn der Mathematik blind gefolgt wird.

Als Beispiel sollen Hochpräzisionswiderstände dienen, auch wenn die Problemstellung beliebig transferierbar ist.

Achten Sie in Zukunft einmal darauf, in Vorträgen und Veröffentlichungen wird Ihnen nur in den seltensten Fällen ein „Fitting“ mit logarithmischem oder exponentiellem Ansatz begegnen.

1. Einflussfaktoren auf Hochpräzisionswiderstände

Die Einflüsse, die auf Widerstände einwirken, sind weitgehend bekannt und werden von Seiten der Hersteller so gut wie möglich kompensiert. Trotz aller Maßnahmen ist neben Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Temperatur vor allem die Zeit ein wesentlicher Faktor, die Änderungen im Widerstandswert hervorruft, wie es in Bild 1 dargestellt ist. [1]

Um diese Werte vorherzusagen, ist es notwendig, eine mathematische Funktion zu ermitteln, die die Messwerte so exakt wie möglich nachbildet. Die Residuen, die Abweichungen zwischen Messwert und mathematischer Funktion, sollen durch die Regressionsanalyse minimal werden. Das hierbei etablierte Standardverfahren ist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

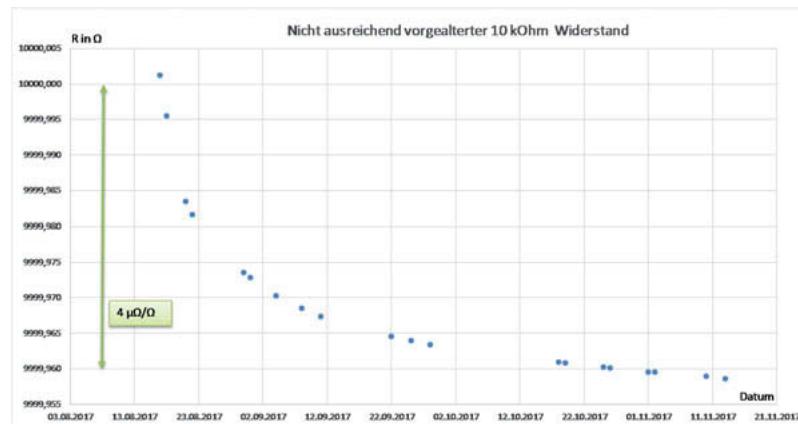


Bild 1: Alterungsprozess eines neuen Widerstandes über 3 Monate mit unzureichender Vor-
alterung.

2. Mathematische Ansätze der Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Übliche Ansätze für die Regressionsanalyse für den Schätzwert \hat{R} sind nach [2]:

Linear	$\hat{R} = A + B \cdot t$
Polynom	$\hat{R} = A + B \cdot t + C \cdot t^2 \dots$
Logarithmisch	$\hat{R} = A + B \cdot \ln(t)$
Exponentiell	$\hat{R} = \alpha + \exp(\beta \cdot t)$

Durch die Überlegung, dass die Summe der Quadrate der Residuen minimal werden sollen, ergibt sich beispielsweise bei linearem Ansatz für die Berechnung der Residuen:

$$\sum_{i=0}^k (R_i - \bar{R})^2 = \sum_{i=0}^k (R_i - (A + B \cdot t))^2 = V$$

Und zur Minimierung dieser:

$$\frac{\partial V}{\partial A} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial V}{\partial B} = 0.$$

Die resultierenden Gleichungssysteme werden nach A bzw. B aufgelöst, so dass wir die gewünschte Regressionsfunktion erhalten.

Eine besonders interessante Sicht ergibt sich jedoch, wenn man noch eine Vereinfachung nach [3] durchführt, durch die man folgendes erhält:

$$B = \frac{\sigma(t, R)}{\sigma(t)}$$

$$A = \bar{R} - B \cdot t$$

Mit der Kovarianz $\sigma(t, R) = \frac{1}{n-1} \sum [(t - \bar{t}) \cdot (R - \bar{R})]$, der Varianz $\sigma(t) = \frac{1}{n-1} \sum (t - \bar{t})^2$ und dem Mittelwert der Messwerte \bar{R} ist deutlich zu erkennen, dass die Basis unserer gesamten Berechnungen immer auf die Mittelwerte der Parameter zurückzuführen ist. Die Tragweite dieser Erkenntnis wird bei Betrachtung der Unsicherheiten deutlich.

3. Unsicherheitsberechnung für extrapolierte Werte

Für das Beispiel der linearen Regression ist der Ausgangspunkt der Unsicherheitsberechnung die Varianz der Residuen:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{n-2} \sum (R_i - A - B \cdot t_i)^2$$

Die Unsicherheiten der Parameter A und B erhält man aus der Hauptdiagonalen der inversen Koeffizientenmatrix, multipliziert mit σ_R^2 . [4]

$$\sigma_A^2 = \frac{\sigma_y^2 \sum t_i^2}{\Delta_{li}}$$

$$\sigma_B^2 = \frac{\sigma_y^2 N}{\Delta_{li}}$$

mit

$$\Delta_{li} = N \left(\sum t_i^2 \right) - \left(\sum t_i \right)^2$$

Zusammengefasst ergeben sie die Standardunsicherheit des jeweils berechneten Wertes

$$u(\bar{R}) = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_A^2 + \sigma_B^2}$$

Einen qualitativen Eindruck der mit der Berechnung beabsichtigten Unsicherheit zeigt Abbildung 2.

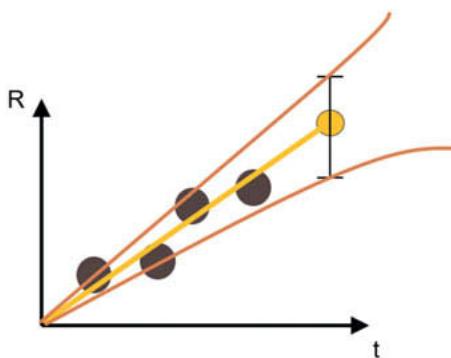


Bild 2: Gewünschter, qualitativer Verlauf der Unsicherheiten für berechnete Werte lt. Literatur (z.B. [2]).

Diese Berechnung basiert jedoch auf der Annahme, dass unser Erkenntnisgewinn mit dem Beginn der Aufzeichnung übereinstimmt. In der modernen Messwerterfassung werden jedoch die Werte nicht durchnummieriert und sind selten äquidistant. Sie werden mit Datum und Uhrzeit erfasst und dann in etablierten Algorithmen verwendet, denen hier zu Unrecht vertraut wird. Um mit einem Datumswert rechnen zu können, muss dieser in eine Zahl umgewandelt werden. Je nach Berechnungsmethode werden Zahlen in der Größenordnung von 10^4 bis 10^{18} verwendet, deren Ursprung beliebig ist. Folglich erhalten wir, streng nach Literatur, im Ursprung unserer Berechnungen die geringste Unsicherheit.

Dass diese Annahme nicht korrekt sein kann, gebietet die Logik, denn zum Zeitpunkt des Urknalls kann der extrapolierte Widerstandswert nicht die geringste Unsicherheit aufweisen. Wie die Vereinfachung von [3] zeigt, ist die Bildung von Mittelwerten essentieller Bestandteil der Berechnung. Daher sollte auch die Unsicherheit der Werte im zeitlichen Mittel ihr Minimum annehmen.

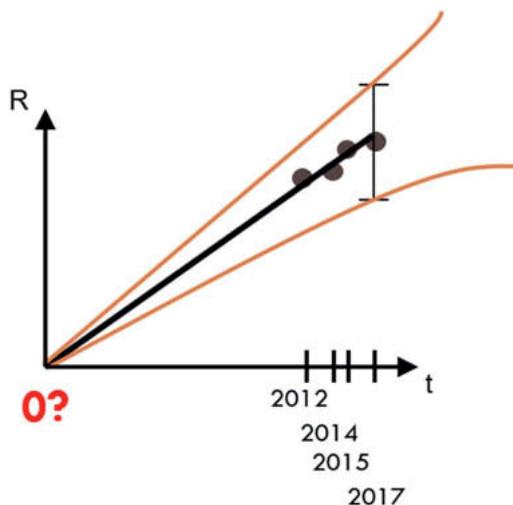


Bild 3: Qualitativer Verlauf der Unsicherheiten bei Verwendung von Datum und Uhrzeit.

Folglich bildet der Mittelwert der Zeitwerte einen imaginären Ursprung als Basis der Unsicherheitsberechnung, und es muss t_i durch $t_i - \bar{t}$ ersetzt werden.

$$\begin{aligned}\sigma_R^2 &= \frac{1}{n-2} \sum (R_i - A - B \cdot (t_i - \bar{t}))^2 \\ \sigma_A^2 &= \frac{\sigma_y^2 \sum (t_i - \bar{t})^2}{\Delta_{li}} \\ \sigma_B^2 &= \frac{\sigma_y^2 N}{\Delta_{li}}\end{aligned}$$

und natürlich

$$\Delta_{li} = N \left(\sum (t_i - \bar{t})^2 \right) - \left(\sum t_i - \bar{t} \right)^2$$

Abbildung 4 verdeutlicht, dass nun der durch Messwerte bekannte Bereich und der Bereich der minimalen Unsicherheit übereinstimmen.

4. Gewichtung nach Unsicherheit der Messwerte

Werden Messwerte verschiedener Herkunft für die Berechnung verwendet, weisen diese unter Umständen unterschiedliche Qualität auf. Diese Qualität spiegelt sich in der Messunsicherheit wider, die den einzelnen Messwerten zugeordnet ist, wie Abbildung 5 darstellt.

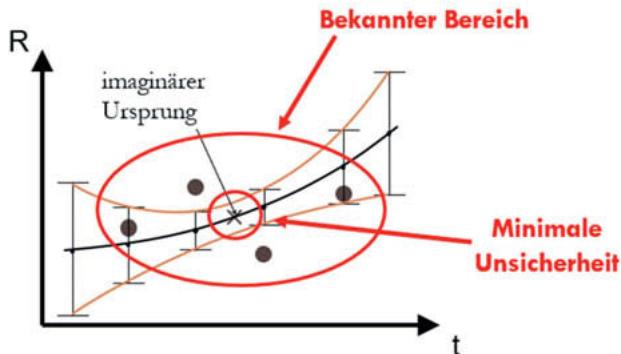


Bild 4: Verwendung von Mittelwerten für Unsicherheitsberechnung.

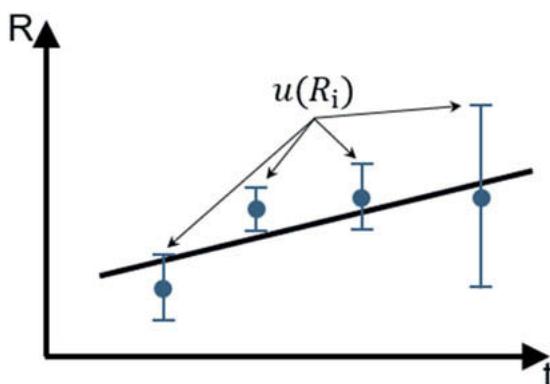


Bild 5: Messwerte mit unterschiedlichen Unsicherheiten, mit linearer Regression, ohne Gewichtung nach Messunsicherheiten.

Wie sich erkennen lässt, ist dem letzten Messwert die größte Unsicherheit zugeordnet. Der zweite Wert besitzt die kleinste Unsicherheit. Jedoch wird das Unsicherheitsband des zweiten Wertes von der Regressionsgeraden nicht mehr erreicht. Verursacht wird dies durch den letzten Wert, der die Steigung der Regressionsgeraden stark verringert. Ein Ausschluss des Wertes aus der Berechnung ist grundsätzlich möglich, jedoch der falsche Ansatz. Denn wir vernachlässigen vorhandene Informationen.

Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten der Messwerte muss die Regressionsberechnung um einen Gewichtungsfaktor erweitert werden [2]:

$$w_i = \frac{1}{u(R_i)^2}$$

Wird die Berechnung der Parameter A und B um den Gewichtungsfaktor erweitert, verändern sich die Berechnungen zu

$$A = \frac{(\sum w_i t_i^2) (\sum w_i R_i) - (\sum w_i t_i) (\sum w_i t_i R_i)}{(\sum w_i) (\sum w_i t_i^2) (\sum w_i t_i)^2}$$

$$B = \frac{(\sum w_i) (\sum w_i t_i R_i) - (\sum w_i t_i) (\sum w_i R_i)}{(\sum w_i) (\sum w_i t_i^2) (\sum w_i t_i)^2}$$

Eine erneute Berechnung, nun unter Berücksichtigung der Gewichtung, zeigt den in Abbildung 6 dargestellten Verlauf. Dort erreicht die Regressionsgerade den von der Unsicherheit des zweiten Wertes abgedeckten Bereich.

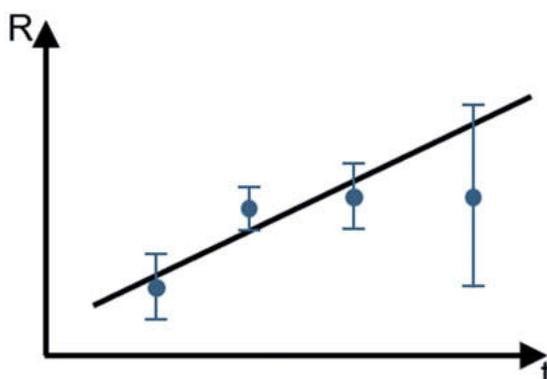


Bild 6: Messwerte mit unterschiedlichen Unsicherheiten, mit linearer Regression und Gewichtung nach Messunsicherheiten.

5. Probleme bei logarithmischem und exponentiellem Ansatz

Um die Probleme bei diesen Mathematischen Ansätzen nachvollziehen zu können, ist es nötig, sich den Verlauf einer logarithmischen Funktion anzusehen.

Abbildung 7 teilt den Verlauf in drei Hauptbereiche ein, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen:

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. Hohe Steigung | geringe Krümmung |
| 2. Mittlere Steigung | starke Krümmung |
| 3. Geringe Steigung | geringe Krümmung |

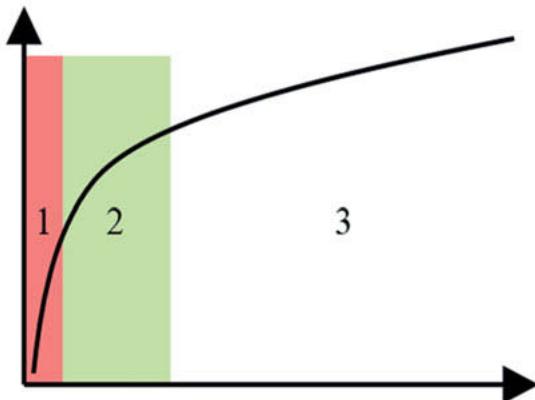


Bild 7: Qualitativer Verlauf der logarithmischen Funktion.

Mathematisch ist der Logarithmus nahe des Koordinatenursprungs fixiert, denn es gilt

$$\ln(1) = 0.$$

Die essentiellen Bereiche, durch die sich der Logarithmus sich auszeichnet, sind die Bereiche 1 und 2. Berücksichtigt man jedoch die zuvor erwähnte Größenordnung bei der Umwandlung von Datumswerten in Zahlen der Größenordnung von 10^4 bis 10^{18} , wird klar, dass jede berechnete Funktion die Messwerte im Bereich 3 abbilden muss. Infolgedessen sind die Unterschiede zwischen linearer und logarithmischer Regression gering.

Eine korrekte Regression lässt sich berechnen, wenn der Ursprung verschoben wird. Eine Darstellung der Varianzen der Residuen, bezogen auf die jeweilige Verschiebung des Ursprungs, wird in Abbildung 8 dargestellt.

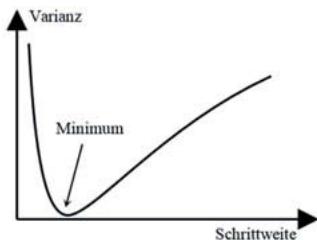


Bild 8: Varianz der Residuen bezogen auf den verschobenen Ursprung der Regressionsberechnung.

Vertauscht man die Achse, die logarithmiert wird, erhält man die analoge Problemstellung für Regressionsberechnungen nach exponentiellem Ansatz. Abbildung 9 verdeutlicht die Zusammenhänge anhand des Resultats aus Regressionsalgorithmen gängiger Programme.

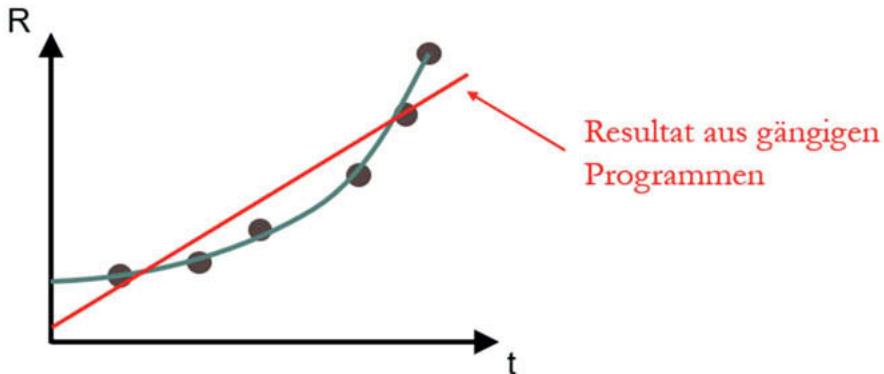


Bild 9: Qualitativer Verlauf von Regressionsberechnung mit einem exponentiellen Ansatz aus gängigen Algorithmen bzw. Programmen (rot) und *myRegressionLab* (grün).

6. Ermitteln von Ausreißern nach dem Chauvenetschen Kriterium

Ein schwieriges Thema ist die Frage, ob man auffällige Messwerte verwerfen darf. Einerseits könnten sie zu falschen Ergebnissen führen, andererseits verliert man eventuell einen wichtigen, bisher unbekannten Effekt. Generell sollte das Verwerfen von Messwerten so restriktiv wie möglich gehandhabt werden.

Die sinnvollste Methode in einem solchen Fall ist sicherlich, die Messung sehr viele Male zu wiederholen, so dass sich ein Ausreißer nicht sonderlich stark auswirkt. Wenn das nicht möglich ist, hilft einem das Chauvenetsche Kriterium, eine nachvollziehbare Entscheidung bezüglich der Verwendung eines Messwertes zu treffen.

Es besagt: Ein verdächtiger Messwert in einem Datensatz $\{R_1, \dots, R_n\}$ ist dann zu verwerfen, wenn die Wahrscheinlichkeit von Messwerten, die mindestens so schlecht sind wie der verdächtige Wert, kleiner als 0,5 ist. [5]

Man berechnet also zunächst, um wie viele Standardabweichungen der verdächtige Messwert $R_{\text{verdächtig}}$ vom Mittelwert entfernt liegt:

$$x_{\text{verdächtig}} = \frac{|R_{\text{verdächtig}} - \bar{R}|}{\sigma_x}$$

Die Wahrscheinlichkeit für eine solche Abweichung wird aus der Gaußschen Fehlerfunktion berechnet

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Um die Werte innerhalb der Kurve zu bekommen, stellen wir die Gleichung nach

$$P(\text{außerhalb}) = 1 - P(\text{innerhalb} \cdot x_{\text{verdächtig}} \cdot \sigma_x)$$

um. Multipliziert mit der Anzahl der Messwerte erhält man das Kriterium, ob der Wert verworfen werden darf:

$$n_{\text{schlechter als } x_{\text{verdächtig}}} = N \cdot P(\text{ausserhalb} \cdot t_{\text{verdächtig}} \cdot \sigma_x) < 0,5$$

Nach dem Verwerfen von Werten berechnet man den Mittelwert und die Standardabweichung aus den verbleibenden Daten erneut. Der sich hierbei ergebende Wert von σ wird kleiner sein als der ursprüngliche und es ist möglich, dass nun weitere Messwerte nicht mehr dem Chauvenetsche Kriterium genügen. Die meisten Autoren (z.B. [2] und [5]) stimmen jedoch darin überein, dass das Chauvenetsche Kriterium nicht mit den neu berechneten Werten von \bar{R} und σ ein zweites Mal angewendet werden sollte.

Um einen Ausreißer zu ermitteln, basieren die gesamten Berechnungen auf der Standardabweichung und dem Mittelwert der Messreihe. Verläuft diese aber, wie in Abbildung 10 gezeigt, nicht linear, können hierbei falsche Werte als Ausreißer identifiziert und unzulässigerweise verworfen werden.

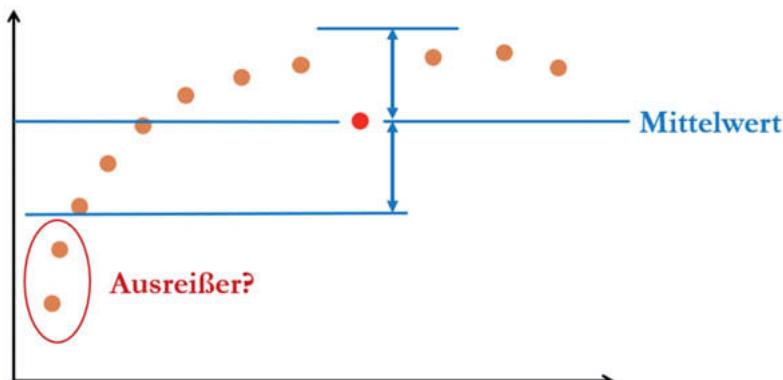


Bild 10: Ermittlung von Ausreißern auf Basis des Mittelwertes bei nichtlinearem Werteverlauf.

In diesem übertriebenen Beispiel würden Werte verworfen, die eindeutig keine Ausreißer sind. Daher ist gerade bei nichtlinearem Verlauf die Regressionskurve und deren Residuen als Basis der Berechnung vorzuziehen. Wie Abbildung 11 zeigt, können so Ausreißer korrekt erkannt und verworfen werden.

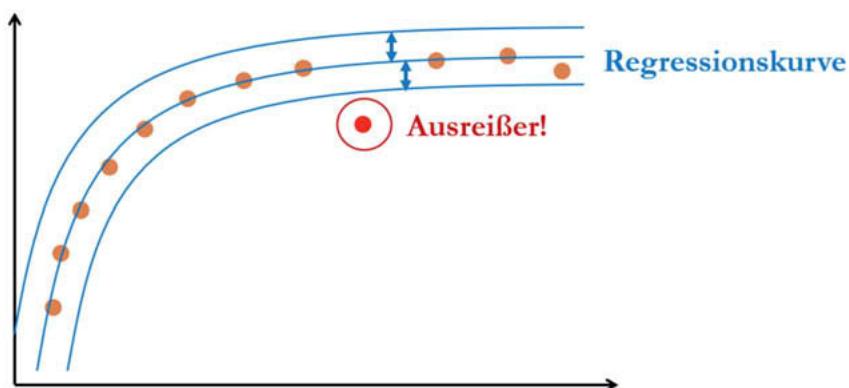


Bild 11: Ermittlung von Ausreißern auf Basis der Regressionskurve bei nichtlinearem Werteverlauf.

7. Schlusswort

Sobald sich äußere Umstände ändern, werden Messung hinterfragt. Dasselbe muss auch für die angewendeten Mechanismen gelten, wie z.B. die etablierten mathematischen Methoden. Ein gutes Werkzeug, um die Regression mit den Kalibrierwerten zu vergleichen stellt die Bestimmung des E_N -Wertes dar [6]

$$E_N = \frac{R_{\text{Kalibrierung}} - R_{\text{Regression}}}{\sqrt{U(R_{\text{Kalibrierung}})^2 + U(R_{\text{Regression}})^2}}$$

Ist der E_N -Wert ≤ 1 , ist eine Überdeckung im Rahmen der Unsicherheiten erreicht. Eine gute Regression erzielt E_N -Werte von unter 0,1. Um dies zu überprüfen, ist neben dem direkten Vergleich mit einer Kalibrierung, das Vorenthalten des letzten Messdatensatzes eine Möglichkeit.

Die Grundlagen für diese Ausarbeitung sind im Rahmen einer studentischen Projektarbeit an der Hochschule Darmstadt entstanden.

Quellen

- [1] Schumacher/Leontiew, Weitergabe der Widerstandseinheit mit verringrigerter Unsicherheit durch Einbeziehung der Umgebungsbedingungen, 206. PTB-Seminar, 2005.
- [2] Taylor, Fehleranalyse: Eine Einführung in die Untersuchung von Unsicherheiten in physikalischen Messungen, Wiley-VCH, 1988.
- [3] Blaha, Statistik, <http://www.mathe-online.at/nml/materialien/SkriptumBlaha/KAP-11.pdf>, Stand 08.2019.
- [4] Humboldt-Universität zu Berlin, Physikalisches Grundpraktikum, 2007.
- [5] Blüm, Einführung zur Fehlerrechnung im Praktikum, 2002.
- [6] VDI Wissensforum GmbH, VDE Mess- und Automatisierungstechnik - Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, 2011.

Calibration and application using inductive voltage dividers

Calibration of inductive voltage divider and generation of very small AC voltages for the calibration of lock-in amplifiers

David Corminboeuf, Federal Institute of Metrology METAS,
Bern-Wabern, Switzerland

Abstract

An automatic system for the calibration of inductive voltage dividers (IVDs) is presented. The bootstrap method used for this calibration is explained in order to extract the model equation. Based on this model equation the influence factors are described to establish the uncertainty budget. The validation of the calibration system concludes the first part. In the second part, an application using IVDs to generate very small voltages is presented. This system developed to calibrate lock-in amplifiers in their μ V ranges is based on cascaded IVDs. The cascaded topology is explained to understand how it is possible to reduce the uncertainty for very large voltage ratios. The uncertainty components of each element of the system are detailed and the uncertainty budget is established for an output voltage of 10 μ V. Finally, the validation of the system based on a consistency check is demonstrated.

1. Introduction

IVDs are used to produce voltage ratios with a very high accuracy and the measurement of voltage ratios is the basis for many areas such as: AC bridges, temperature bridges, strain gage bridges, lock-in amplifiers, high voltage measurements, etc... Therefore, the calibration of the IVDs is important because it contributes to the traceability of these measurements. The primary method described in the following section uses a homemade step transformer and allows to reach measurement uncertainties of a few 10^{-8} . This system is automated, making calibration easier, faster and more reproducible than with a manual system [1].

As mentioned above, IVDs can be used for the calibration of lock-in amplifiers [2]. Lock-in amplifiers are very sensitive and low noise instruments which are well known in metrology. In particular, they are often used as null detectors. When the amplitude of the signal is close to zero the non-linearity of the instrument can be neglected. However, in most real cases, the detector always measures a residual voltage which is used to calculate a correction. Therefore knowing the non-linearity of the detector reduces the uncertainty on this correction.

On the other hand, lock-in amplifiers can also be used as measuring instruments, for example as sensors interfaces, where low AC voltages are measured via resistance ratios. In this case, the linearity calibration of the lock-in is extremely important.

2. Measurement principles for the calibration of IVDs

Comparison method

The comparison method is based on the measurement of the difference of the output voltage of two IVDs. If the output voltage of one IVD (IVD REF) is known, the output voltage of the second IVD (IVD UUT) can then be determined. As shown in Figure 1, the two IVDs are powered by the same voltage source via an isolation transformer to avoid ground loops and to protect the IVDs against residual DC voltages. Between the two IVD outputs a current comparator containing two 100 to 1 transformers is connected. One transformer is used for the current detection and the other for the voltage injection required to balance the bridge. The injection circuitry consists of two sources, one in phase and one in quadrature (90 degrees phase shift) with respect to the input source. When the bridge is balanced, the injection voltage is 100 times the difference of the output voltage of the two IVDs under no load condition. To avoid any capacitive leakage current through the shield of the triaxial cable, the most inner shield is maintained at the same potential as the center conductor by the guard IVD.

When the detector voltage is null, then:

$$U_R \cdot \left(\frac{n}{N} + \delta_n^R \right) = U_U \cdot \left(\frac{n}{N} + \delta_n^U \right) + U_n^{INJ1} \quad (1)$$

With:

U_R : input voltage of IVD REF

U_U : input voltage of IVD UUT

n : ratio number

N : division ratio

δ_n^R : n ratio error of IVD REF

δ_n^U : n ratio error of IVD UUT

U_n^{INJ1} : injection voltage

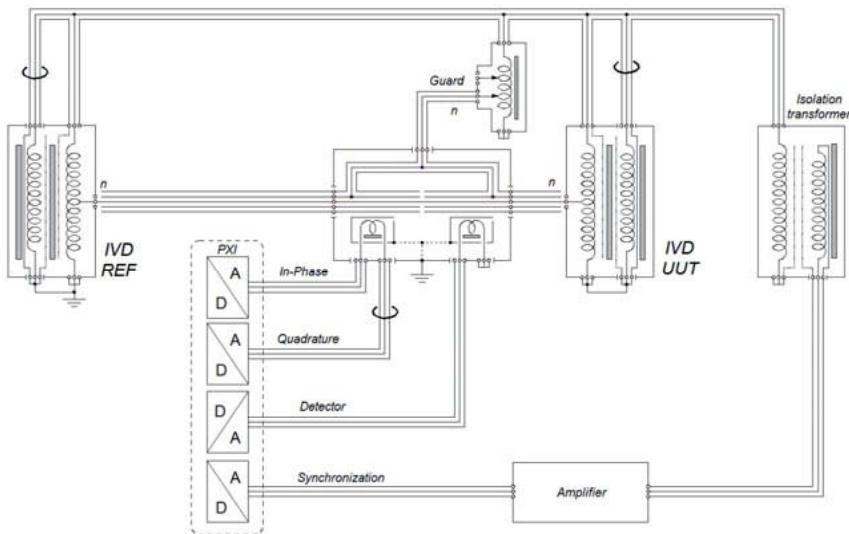


Fig. 1: Schematic of the bridge used for the comparison method

Bootstrap method

The bootstrap method consists of two sets of measurements. The first one was presented above in 2.1. The second, described in Figure 2, requires the addition of a step transformer to compare the ratio n of one IVD with the ratio $n+1$ of the second IVD. The step transformer produces a voltage equal to one step of the IVD.

According to the diagram in Figure 2, when the detector voltage is null, then:

$$U_R \cdot \left(\frac{n+1}{N} + \delta_{n+1}^R \right) - U_T \cdot (1 + \delta^T) = U_U \cdot \left(\frac{n}{N} + \delta_n^U \right) + U_{n+1}^{INJ2} \quad (2)$$

With:

U_T : output voltage of the step transformer

δ^T : ratio error of the step transformer

U_{n+1}^{INJ2} : injection voltage

Eliminating $U_U \cdot \left(\frac{n}{N} + \delta_n^U \right)$ from (1) and (2):

$$U_R \cdot \left(\frac{n+1}{N} + \delta_{n+1}^R \right) = U_R \cdot \left(\frac{n}{N} + \delta_n^R \right) - U_n^{INJ1} + U_{n+1}^{INJ2} + U_T \cdot (1 + \delta^T) \quad (3)$$

Dividing by U_R , we have :

$$\frac{n+1}{N} + \delta_{n+1}^R = \left(\frac{n}{N} + \delta_n^R \right) - \frac{U_n^{INJ1}}{U_R} + \frac{U_{n+1}^{INJ2}}{U_R} + \frac{U_T}{U_R} \cdot (1 + \delta^T) \quad (4)$$

When we add the equations for all values of n , we obtain:

$$\delta^T = \delta_{10}^R - \delta_0^R + \sum_{n=0}^9 \left(\frac{U_n^{INJ1}}{U_R} - \frac{U_{n+1}^{INJ2}}{U_R} \right) \quad (5)$$

Using equation (5) we can calculate the error of the step transformer. After that we can calculate the error of each step of the IVD with the equation (4).

The two values δ_{10}^R and δ_0^R are just the errors of the ratios 1 and 0 respectively and can be easily obtained connecting the current comparator between the output and the high potential of the input for the ratio 1 and between the output and the low potential of the input for the ratio 0.

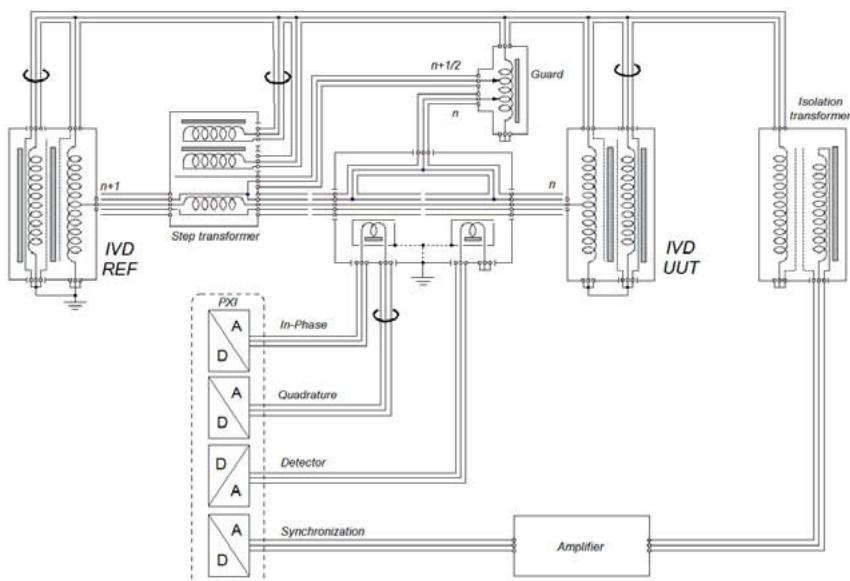


Fig. 2: Schematic of the bridge used for the Bootstrap method

3. Uncertainty budget and its components for the calibration of IVDs

According to the model equation (4) and by adding the error of the current comparator ε_{CC} , the relative uncertainty on the ratio error of the IVD is given by:

$$u(\delta_n^R) = \sqrt{\left[\frac{u_T}{U_R} \cdot u(\delta^T) \right]^2 + \left[\frac{u(U_n^{INJ})}{U_R} \right]^2 + u(\varepsilon_{CC})^2} \quad (6)$$

The step transformer contribution:

The step transformer is the main device of the bootstrap method. It gives the reference voltage step between the ratio n of first IVD and the ratio $n+1$ of the second IVD. It has to be stable during the time of the measurement and, most importantly, it should not be sensitive to common mode voltage. This sensitivity to the common mode voltage is evaluated in the measurement results and is affected to this uncertainty component.

The injection contribution:

The injection consists of two AC voltage sources (DAC boards), one in phase and the other in quadrature, used to balance the bridge. They can be characterized by an uncertainty due to the noise and an uncertainty due to the linearity. The uncertainties due to the noise and the linearity can be evaluated separately by measurement. The values chosen for these uncertainties are wide enough to cover the entire range used. The uncertainty calculation is simplified because the uncertainty is the same for all the values of n .

The current comparator contribution:

The main purpose of the current comparator is to detect and balance the small voltage difference between the output of the UUT and the output of the reference IVD (with or without the step transformer). This current comparator was characterized by applying a small voltage on the injection coil and measure the output voltage from the detector coil. This small error is frequency dependent and is used as an uncertainty component.

Table 1: Uncertainties obtained for the calibration of our reference IVD at frequencies between 20 Hz and 10 kHz.

Uncertainty components in 10^{-9}	Frequency (Hz)								
	20	40	100	200	500	1000	2000	5000	10000
Step transformer	4	1	1	1	1	1	4	19	83
Injection noise	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Injection linearity	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Current comparator	1	1	1	1	1	1	4	23	94
Repeatability	30	20	5	2	2	2	5	10	25
U (k = 2)	66	48	28	26	26	26	30	68	256

The leakage current in the cables between the outputs of the two IVDs do not contribute to the uncertainty because these triaxial cables have an active guard which avoid these leakage currents.

Detector gain and linearity have no influence on the results, because the detector is used as null detector and no residual voltage is used.

4. Validation for the calibration of IVDs

In 2000, our reference IVD was measured with the bridge used for the Key Comparison CCEM-K7 at the two frequencies of 55 Hz and 1000 Hz. This same reference IVD was measured with our new automated bridge by using the bootstrap method described in Section 2 and at the same frequencies to compare the results.

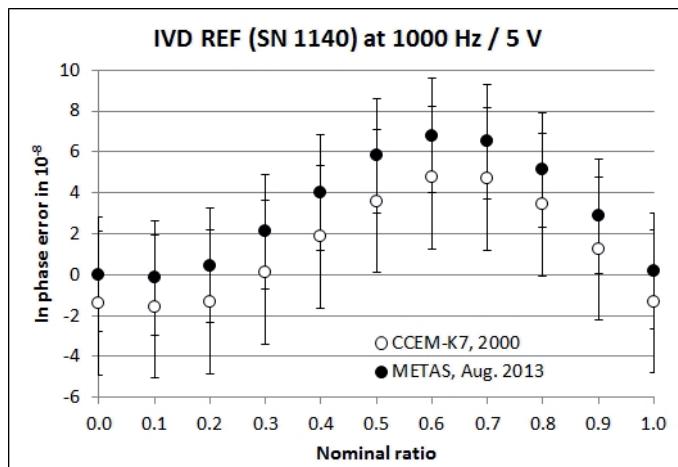


Fig. 3: In phase ratio error of the reference IVD at 1000 Hz / 5 V. Comparison between the calibration results from the old and the new system.

5. System Description for the calibration of lock-in amplifiers

The purpose of this measurement setup (Figure 4) is to calibrate lock-in amplifiers over a voltage range from 100 nV to 10 mV with a relative uncertainty of less than 100 ppm at 10 μ V. This corresponds to the resolution of the best instruments on the market. The calibration method is based on inductive voltage dividers (IVD). Although a single IVD can produce an output voltage down to 1 μ V or less, the uncertainty on the output voltage will be too high for high precision calibration. For example, in case an IVD ratio of 1/100'000 is used with a

ratio uncertainty of 1×10^{-7} , the relative uncertainty on the output voltage is 1%. Furthermore, the IVD is loaded by the input impedance of the lock-in amplifier introducing an additional error in the calibration. To solve these two problems, several IVDs are connected in cascade. Using a 4-dividers cascade, it is possible to reach a division ratio of 1/100'000 with an uncertainty of 10 ppm on the output voltage. This means that an input voltage of 100 mV produces an output voltage of 1 μ V with an uncertainty of 10 ppm. This cascaded topology can only work properly if the input impedance of each IVD is sufficiently large to prevent any loading on the output of the previous stage. To meet these loading conditions, a buffer amplifier has been added to the primary stage of each divider, reducing the loading error below the uncertainty of 10 ppm.

In the experimental setup, the input voltage of the first divider is generated by a digital-to-analog (DAC) board inserted in a PXI rack which is controlled by a PC via a NI optical fiber interface. This board also generates the reference signal of the lock-in amplifier. In the same rack, a digital board gives the sample clock to the multimeter (type HP 3458A). All signals are then perfectly synchronous. The multimeter is used in “Digitizing” mode to measure the amplitude of an input voltage of 50 mV(RMS) with an uncertainty of 30 ppm.

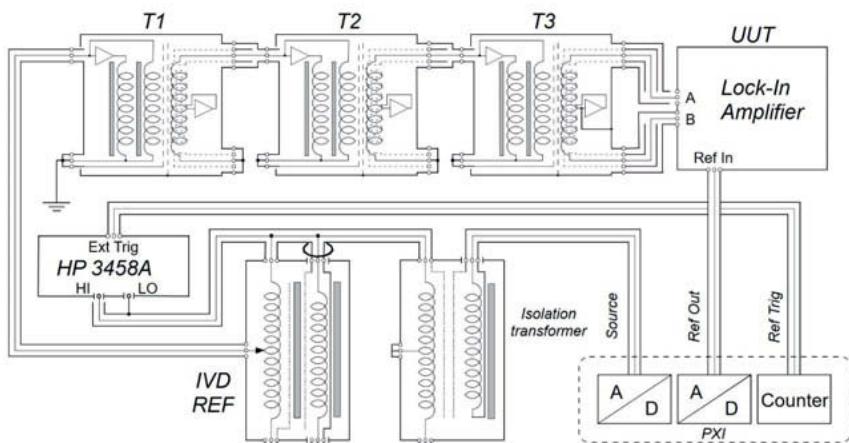


Fig. 4: Schematic of the calibration setup with, the PXI chassis and its 3 output signals "Source", "Ref Out" and "Ref Trig", the 4 cascaded dividers IVDref, T1, T2 and T3, the multimeter 3458A used in digitizing mode and the lock-in amplifier as Unit Under Test.

This new system is able to generate an AC voltage from 10 mV down to 100 nV, for frequencies ranging between 20 Hz and 1 kHz with uncertainties from 100 ppm to 15000 ppm. In this way, the linearity of various lock-in amplifiers can be calibrated within their specifications for these amplitudes and frequencies.

6. Uncertainty budget and its components for the calibration of lock-in amplifiers

The principle of this measurement system is based on AC voltage ratios realized with inductive voltage dividers. The relationship between the output and the input voltages is given by the following equation:

$$\frac{U_a}{U_e} = D + K_W + j \cdot K_B \quad (7)$$

Where :

- U_a is the complex output voltage
- U_e is the complex input voltage
- D is the nominal value of the divider ratio
- K_W is the In-Phase error of the divider ratio
- K_B is the Quadrature error of the divider ratio

Because only the module of the output voltage is used and the quadrature error has no significative impact on the module, equation (7) can be simplified as follows:

$$\frac{U_a}{U_e} = D + K_M \quad (8)$$

Where : K_M is the module error of the divider ratio.

The equation of the reference IVD with the three cascaded active transformers is :

$$\frac{U_a}{U_e} = (D_{IVD} + K_{IVD}) \cdot (D_{AT} + K_{AT}) \quad (9)$$

According to (9) the uncertainty is:

$$\left(\frac{u(U_a)}{U_a} \right)^2 = \left(\frac{u(U_e)}{U_e} \right)^2 \cdot \left(\frac{u(D_{IVD} + K_{IVD})}{D_{IVD} + K_{IVD}} \right)^2 \cdot \left(\frac{u(D_{AT} + K_{AT})}{D_{AT} + K_{AT}} \right)^2 \quad (10)$$

Reference IVD

From equation (10) the uncertainty component of the reference IVD is:

$$\left(\frac{u(D_{IVD} + K_{IVD})}{D_{IVD} + K_{IVD}} \right)^2 \quad (11)$$

- D_{IVD} : is the nominal value of the reference IVD ratio.

- K_{IVD} : is the module error of the reference IVD ratio. These are the calibration values of the IVD. The influence of the loading of the IVD is was characterized and is included in this error.

•

Active transformers

From equation (10) the uncertainty component of the active transformers is:

$$\left(\frac{u(D_{AT}+K_{AT})}{D_{AT}+K_{AT}} \right)^2 \quad (12)$$

- D_{AT} : is the nominal value of the active transformers ratio.

- K_{AT} : is the module error of the active transformers ratio. These are the calibration values of the active transformers. The influence of the loading of the active transformers was characterized and is included in this error.

When only one active transformer is used, the ratio is $\frac{1}{10}$ and the uncertainty is:

$$\left(\frac{u(D_{AT}+K_{AT})}{D_{AT}+K_{AT}} \right)^2 = \left(\frac{u(\frac{1}{10}+K_{AT1})}{\frac{1}{10}+K_{AT1}} \right)^2 \quad (13)$$

When two active transformers are used, the ratio is $\frac{1}{100}$ and the uncertainty is:

$$\left(\frac{u(D_{AT}+K_{AT})}{D_{AT}+K_{AT}} \right)^2 = \left(\frac{u(\frac{1}{10}+K_{AT1})}{\frac{1}{10}+K_{AT1}} \right)^2 \cdot \left(\frac{u(\frac{1}{10}+K_{AT2})}{\frac{1}{10}+K_{AT2}} \right)^2 \quad (14)$$

When three active transformers are used, the ratio is $\frac{1}{1000}$ and the uncertainty is:

$$\left(\frac{u(D_{AT}+K_{AT})}{D_{AT}+K_{AT}} \right)^2 = \left(\frac{u(\frac{1}{10}+K_{AT1})}{\frac{1}{10}+K_{AT1}} \right)^2 \cdot \left(\frac{u(\frac{1}{10}+K_{AT2})}{\frac{1}{10}+K_{AT2}} \right)^2 \cdot \left(\frac{u(\frac{1}{10}+K_{AT3})}{\frac{1}{10}+K_{AT3}} \right)^2 \quad (15)$$

- K_{AT1} , K_{AT2} and K_{AT3} : are the module errors of the active transformers ratio. These are the calibration values of the active transformers. The influence of the loading of the active transformers is eliminated by measurements.

•

Digital voltmeter (DVM)

From equation (10) the uncertainty component of the voltage measurement is:

$$\left(\frac{u(U_e)}{U_e} \right)^2 = \left(\frac{u(U_{DVM})}{U_{DVM}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta_{filter})}{\delta_{filter}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta_{FFT})}{\delta_{FFT}} \right)^2 \quad (16)$$

- U_e : is the complex input voltage.

- U_{DVM} : is the voltage measured with a DVM type 3458A in digitizing mode. In this mode the uncertainty on the voltage measurement is the same as DCV and can be found in the specification.
- δ_{filter} : is the deviation due to the input low-pass filter of the DVM, a frequency correction is applied to the measured value. The verification of this correction factor was carried out by measuring a sine wave voltage generated with a calibrated calibrator.
- δ_{FFT} : is the deviation due to the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm. To verify the accuracy of this function and its implementation, a second algorithm was used. A sinus fit function was applied to the same data set and the results were compared. The uncertainty is the maximal deviation between these two results.

Voltage source stability

This component is not in the equation (10) but must be added to the uncertainty budget because it is not possible to control timing acquisition of the lock-in amplifier to be sure that the measurements are performed simultaneously between the DVM and the lock-in amplifier. This uncertainty was evaluated by measurement.

Table 2: Uncertainty budget of the measurement system for a voltage amplitude of 10 μ V at 100 Hz with the following components:

Uncertainty components	Types	Relative uncertainty in 10^{-6}
IVDref	B	0.3
Active Transformers	B	0.9
Voltage source stability	B	15
DVM	B	10
Lock-in amplifier	A	26
Combined uncertainty $U (k = 2)$		70

IVDref: relative uncertainty to the output with a ratio of 0.2

Active dividers: relative uncertainty to the output with a ratio of 0.001

Voltage source stability: short-term stability of the NI PXI 4461 output

DVM: HP 3458A used in digitizing mode in the 100 mV range

Lock-in amplifier: standard deviation of the 300 measurements

7. Validation for the calibration of lock-in amplifiers

To validate this system, a bilateral comparison was not possible because no institute has CMCs for these small ranges of AC voltage. But because of the good short-term stability of the lock-in amplifier SR850, the measurement results of various combinations of the active transformers and voltages can be compared to check the consistency. Table 3 summarizes all results for configurations that generate a signal amplitude of 100 μ V.

Input voltage (V)	Active Transformers ratio	configuration	IVDref ratio	Deviation (μ V/V)
0.1	0.001	T1+T2+T3	1.00	2421
0.1	0.010	T1+T2	0.10	2398
0.1	0.010	T2+T3	0.10	2425
0.1	0.100	T3	0.01	2434
0.1	0.100	T1	0.01	2404
0.1	0.100	T2	0.01	2421
0.1	0.001	T1+T2+T3	1.00	2420
0.2	0.001	T1+T2+T3	0.50	2421
0.5	0.001	T1+T2+T3	0.20	2418
1.0	0.001	T1+T2+T3	0.10	2410
2.0	0.001	T1+T2+T3	0.05	2402
5.0	0.001	T1+T2+T3	0.02	2384
0.1	0.001	T1+T2+T3	1.00	2399
			Average	2412
			Stdev	14

Table 3: In-phase deviation for 100 μ V output voltage at 103 Hz in several different configurations. The configuration column indicates which of the three (T1, T2, T3) Active Transformers is used.

The average of deviations of all configurations is 2412 parts in 10^6 and the standard deviation is 14 parts in 10^6 . This standard deviation is smaller than the standard deviation of a single measurement which is around 20 parts in 10^6 .

Bibliography

- [1] D. Corminboeuf and F. Overney, "Inductive voltage divider calibration with sampling method", EPJ Web of Conferences 77, 00014 (2014), available at <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20147700014>
- [2] D. Corminboeuf "Calibration of the absolute linearity of lock-in amplifiers", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 6, pp. 2060–2065, June 2019.

Erzeugung eines statischen Drehmoments im Bereich von 1 mN·m bis 1 N·m nach dem Laufgewichtsprinzip

Generation of a static torque in the range of 1 mN·m to 1 N·m according to the Jokey-weight principle

M.Sc. Taras Sasiuk, Prof. Dr.-Ing. habil. T. Fröhlich,
Prof. Dr.-Ing. René Theska, M.Sc. Maximilian Darnieder,
Technische Universität Ilmenau

1. Abstract

Torque sensors with a small measurement range up to 1 N·m are part of the different precision devices, for example robot or tools for medical operations and also in nanofabrication. The torque transducers frequently need a calibration for which traceability need to be proven. According to legal mandate, the national metrological institutes has the task to realize the torque units and to enable the required traceability. This article shows how to generate static torque in the range from 1 mN·m to 1 N·m according to the new principle. In the future, the main goal is to implement this new idea of torque generation to create a new, more precise torque standard machine (TSM). The new method of static torque generation was also compared with the generation of torque to the state of the art of technology (PTB torque standard machine, The National Metrology Institute of Germany).

2. Introduction

The main goals of industry 4.0 are to increase accuracy, minimize and miniaturize, energy efficiency and automation. Automation is the creation of robots for the fast and accurate performance of tasks in industry, science, and medicine. Bringing robots to surgery in medicine reduces the risk of unsuccessful operations because of the human factor and allows for extremely sophisticated operations with maximum accuracy. For example, building together small bones or parts of bones with screws, the perforation of vertebrae for insertion of peduncular screws [1] and nanofabrication. Force and torque sensors are responsible for maximum accuracy in such work. These sensors must be regularly inspected and calibrated by appropriate certified laboratories. In order to enable traceable measurements, the measured torques of the devices must be compared with torque standards of the metrological institutes. Consequently, high and increasing demands are placed on the measurement uncertainty of

the torque standard machines. For the realization of these comparative measurements have been developed a large number of torque standard machine (TSM). The measuring range TSM from 1 mN·m up to 1 MN·m is possible (PTB, Germany). Most quantity of the torque standard machines are based on the *dead-weight* principle. In this principle: the force is generated by the weight force of mass pieces, which is applied to a lever in a as precisely as possible to the pivot point.

In many cases are used hydrostatic air bearings to reduce the friction in the central bearing of the beam. The beam is usually made of invar, as symmetrical as possible to eliminate temperature and other influences. Best TSM in range 1 mN·m to 1 N·m have expended uncertainty 10^{-4} ($k = 2$, $p = 95\%$) [2]. In this article the new basic concept of a TSM will be presented. The **main point** is a new way of generating torque. The aim of the concept is to reduce the expanded uncertainty by one order of magnitude to 10^{-5} ($k = 2$, $p = 95.45\%$)

3. Difference between dead – weight and jockey – weight principle

Difference between dead-weight and *jockey – weight* principle by the method of adjusting different torques. As we know, in *dead – weight* principle the force is generated by the weight force of mass pieces, which is applied to a beam in a as precisely as possible to the pivot point (fixed distance). Changing of mass pieces give us the changing of torque. In *jockey – weight* principle we have only one pieces of mass (constant mass) and the lever arm is variable.

The basic idea is that a high precision mass is moved along the beam. The mass is represented by silicon spheres with a mass of 1 kg. This silicon spheres is “*natSi_{sc}*“ secondary standards of mass with relative standard uncertainties of mass not larger than 5 parts in 10^{-8} [3]. By precisely rolling the Si-sphere on the lever, we change the distance of the center of gravity Si-sphere from the axis of rotation of the lever. Consequently, a continuously adjustable torque is generated around the axis of rotation of the lever. The very precisely measurable relative displacement of the center of mass of the sphere enables the highly accurate calibration of torque sensors.

4. Description of the setup

The implementation of the jockey-weight principle we can see in Fig. 1. The structure of the mechanical system consists of a Si-sphere that can roll on an articulated lever. Depending on the position of the Si-sphere r_s creates a torque around the axis of rotation of the lever, which

is passed through the device to be calibrated and finally by a self-locking gear of the counter torque device (CTD), see Fig. 2.

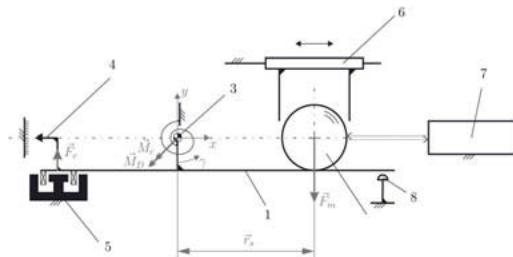


Fig. 1: Overview of the measuring concept, side view: 1 - lever; 2 - Si-sphere; 3 - pivot bearing; 4 - position sensor; 5 - linear voice coil actuator (LVCA); 6 - positioning device for Si-sphere; 7 - laser interferometer; 8 - mechanical protection.

Until the CTD has reached the position where the lever is in a horizontal position in balance, the horizontal position of the beam due to elasticities in the system is maintained by an additional force to avoid parasitic relative movement of the Si-sphere. The force is generated on the left side of the beam by a voice coil actuator (5). The force (or the coil current), is regulated on the basis of an optical position detector (4). The aim of the control is to reach the state where the beam is horizontal.

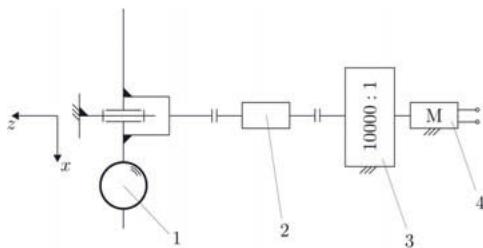


Fig. 2: Elements in the torque transmission of M_D from lever construction to CTD, top view:

- 1 - lever construction + rolling Si - sphere (torque generation); 2 - torque sensor (device under test); 3 - gear with the large ratio (10000:1); 4 - servomotor.

Number 3 and 4 in Fig. 2 are together is counter torque device.

5. Torque generation

We can divide new design into three functional units: 1) torque generation 2) torque initiation 3) counter torque realization.

In static case the measurement equation for new TSM set - up is:

$$M_C + M_S + M_D = 0 \quad (1)$$

Where is:

M_C - torque generated by the LVCA;

M_S - torque generated by the Si - sphere;

M_D - torque generated by counter torque devices but transmitted through torque sensor.

In torque generation modes measurement equation is:

$$M_D + M_S = 0 \quad (2)$$

The torque generated by the LVCA (M_C) is required to hold the lever horizontally until the CTD reached the equal torque generated by the Si - sphere ($M_S = M_D$).

5.1. Practical implementation of the torque generation functional unit

To generate different nominal values of torque, it is necessary to move the Si-sphere from one position to another with a minimum shift of the lever from the horizontal position. The force applied to the ball lever by the mass of the sphere shall be compensated by the force applied by the voice coil actuator. This equilibrium provides with: proportional–integral–derivative (PID) control software (see fig 4.), hardware devices for PID control realisation (dSpace system, PC, voltage to current converter). The angular position of the lever is determined at the left side by a differential photodiode (position sensor), see Fig. 3.

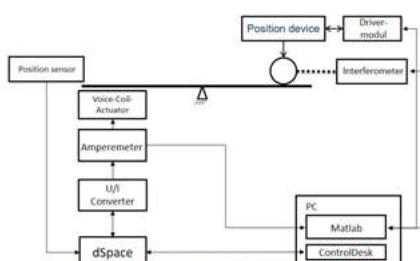


Fig. 3: Schematic diagram of the torque generation unit

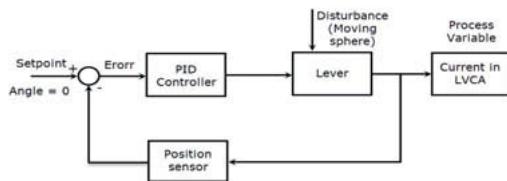


Fig. 4: Schematic diagram of PID controller

For the first prototype of the torque generation unit was used voice coil actuator with force factor 9.79 N/A, position device with accuracy of positioning 0.001 mm, plane mirror homodyne interferometer with resolution 5 pm, 1 kg Si – sphere (E1 class), flexure pivot with rotation stiffness 95.8 mN·m/rad. The practical implementation of the torque generation unit can be seen in Fig. 5.

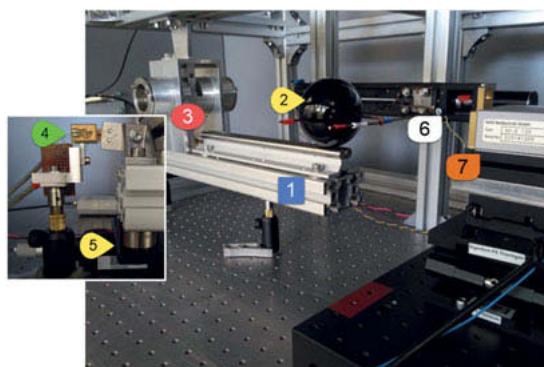


Fig. 5: First prototype of the torque generation unit: 1- lever; 2 - Si-sphere; 3 – flexure pivot; 4 - position sensor; 5 - linear voice coil actuator; 6 - spindle drive; 7 - laser interferometer;

The main advantage of the new method of torque generation is the freedom to choose the value and sequence of torque. In order to be able to freely choose the torque value, it is necessary to make an experiment to determine the dependence of the change of current to the change of position of the centre of the Si – sphere. The measurement was performed in 5 cycles (5 forward and 5 backward movements), 1 cycle is 20 steps, 1 step is 6 mm, see Fig. 6.

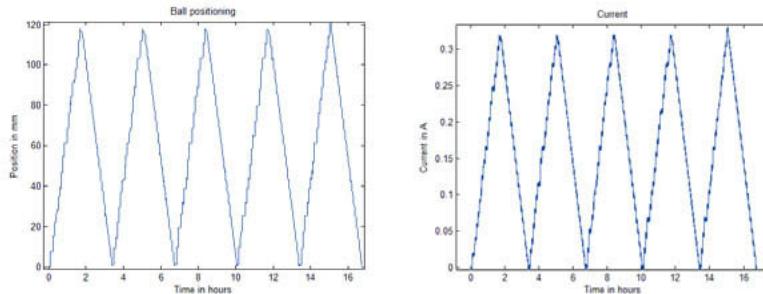


Fig. 6: Measurement results of the determination of the dependence between the position of the Si-ball and the current of the coil actuator.

We can clearly see the distance between the stages is not the same. The justification is the free distance between the Si-ball and the position unit. But the measurement is good because we do not need accurate positioning in this investigation, but an exact measurement. The calculated calibration factor is:

- moving forward – 2.7222 A/m;
- moving back – 2.7210 A/m.

6. Preliminary uncertainty budget of the new torque standard machine

For the calculation of the scalar value of the torque, (3) is used:

$$M = m \cdot g \cdot l \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_m}\right) \cdot \cos \alpha - M_{res} \quad (3)$$

where:

m - mass of Si-sphere

g - local gravitational acceleration at the place of operation of the machine

l - distance between two position of Si - sphere

ρ_m - Si-sphere density

ρ_l - air density

α - inclination of the lever against the horizontal

M_{res} - restoring moment of the flexural pivot

Starting from the mathematical model (3), the following quantities were regarded as decisive for the measurement uncertainty of the TSM:

- the masses of the sphere, the density of the material of this sphere and of the air,
- the local gravitational acceleration,
- the distance between two position of the sphere,
- the inclination of the lever against the horizontal,
- the restoring moment of the flexural pivot

Further secondary influencing quantities on this time was not investigated.

6.1. Mass of Si-sphere

1 kg silicon spheres will be used in the same way as other mass standards at the highest level (E1 according to OIML R111 [4]). The absolute uncertainty of the mass is $0,5 \cdot 10^{-6}$ kg for (E1 class) or more better if we use “^{nat}Si_{sc}” secondary standards of mass with relative standard uncertainties of mass $5 \cdot 10^{-8}$. But it limited by air buoyancy correction. Center of gravity is known down to 80 nm from each side of the mass. Determining parameters of a Si-sphere as: volume, density also possible after Avogadro project and the determination of the Planck-Constant.

6.2. Local gravitational acceleration

The local gravitational acceleration at the place of installation of the machine can be determined with high accuracy absolute gravimeters. We need measuring local gravitational acceleration only once, because change over the time is less than $10 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

6.3. Distance between two position of the sphere

Distance between two positions of the sphere is determined with a plane mirror homodyne laser interferometer. Absolute uncertainty of length is limited only by absolute uncertainty of the laser interferometer. With the correct setting and correction of the influences in the measurement, the absolute uncertainty does not exceed 10 nm.

6.4. Horizontal positioning of the lever

We have combination of high precision position sensor with an absolute uncertainty 10 nrad and counter torque device with resolution 9.6 nrad. With which can be controlled stable horizontal position of the lever with uncertainty contribution of about $1.9 \cdot 10^{-9}$ N·m.

6.5. Restoring moment of the flexural pivot

The flexural bearing stays in the initial position if we control the beam in a horizontal position with nrad deviation. The manufacturer claimed that rotation stiffness of the flexural pivot is 95.8 mN·m/rad. It is meaning nominal influence is about 1.92 nN·m if the inclination of the lever 20 nrad. The following tables show the new uncertainty balance for 1 N·m and 1 mN·m respectively. When comparing tables 1 and 2, we can see that for torque 1 N·m we have a improvement in absolute uncertainty of two magnitudes. It should be noted that the uncertainty budget was carried out for the PTB TSM on the real measurements, taking into account all influential factors. A reserve of accuracy of one magnitude gives all chances to achieve the set goal.

Table 1: Uncertainty budget for 1 N·m TSM

Quantity	Value	Stand. uncert.	Distr.	DoF	Sensit. coeff.	Uncert. contribution	Rel. contribution
m	1.000000000 kg	0.5×10^{-6} kg	Normal	∞	0.999 kg^{-1}	0.0300×10^{-6}	0.37 %
g	$9.810161000 \text{ m/s}^2$	$0.170 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$	Normal	∞	$0.102 \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	0.0173×10^{-6}	0.12 %
I	0.1019000000 m	$0.0200 \times 10^{-6} \text{ m}$	Normal	∞	9.80 m^{-1}	0.196×10^{-6}	15.75 %
ρ_L	$1,13360800 \text{ kg/m}^3$	$0.00000850 \text{ kg/m}^3$	Normal	∞	$0.000446 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	3.79×10^{-9}	0.01 %
ρ_m	2239.00 kg/m^3	2.00 kg/m^3	Rectang.	1	$0.226 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0.452×10^{-6}	83.76 %
α	0.0 rad		Normal	∞	0.0957 rad^{-1}	1.91×10^{-9}	0.00 %
C_{ip}	0.0958085 Nm/rad	constant					
	Value	Comb. stand. uncertainty	Comb. relat. uncertainty	Effective degrees of freedom			
M	0.999149279	0.494×10^{-6}	0.494×10^{-6}	1			
	Value	Expanded uncertainty	Coverage factor	Coverage probability %	Distribution		
Result	0.99914928	$\pm 0.99 \times 10^{-6}$	2.00 (95.45 %)	95.45 %	Normal		

Changing the position of the Si-sphere by a distance of about 102 mm gives us a relative torque $1.000000(1.0 \pm 1.0 \times 10^{-6}) \text{ N} \cdot \text{m}$, $k = 2$, $p = 95.45\%$

Table 2: Uncertainty budget for 1 N·m TSM from PTB, Germany [2]

Quantity X_i	Estimate x_i	Standard uncertainty $w(x_i)$	Distribution function	Sensitivity coefficient c_i	Contribution to relative measurement uncertainty $w_i(y)$
m	0.40770584 kg	0.27 mg	normal	2.45 N m kg ⁻¹	0.007×10^{-4}
g	9.812524 m s ⁻²	5 μ m s ⁻²	normal	0.102 N s ²	0.51×10^{-6}
l	0.2500 m	5 μ m	normal	4 N	0.20×10^{-4}
ρ_L	1.20 kg m ⁻³	0.0462 kg m ⁻³	rectangular	-1.3×10^{-4} N m ⁴ kg ⁻¹	-5.80×10^{-6}
ρ_m	7975 kg m ⁻³	6.09 kg m ⁻³	rectangular	1.9×10^{-8} N m ⁴ kg ⁻¹	0.11×10^{-6}
α	0 rad	0.714 mrad	normal	-7.1×10^{-4} N m rad ⁻¹	-0.51×10^{-6}
δM_R	0 N m	0.000 29 mN m	rectangular	1	0.29×10^{-6}
δM_D	0 N m	0.000 29 mN m	rectangular	1	0.29×10^{-6}
δM_F	0 N m	0.000 29 mN m	rectangular	1	0.29×10^{-6}
M	1.0000 (1 \pm 0.42 \times 10 ⁻⁴) N m (k = 2)				

Table 3: Uncertainty budget for 1 mN·m TSM

Quantity	Value	Stand. uncert.	Distribution	DoF	Sensit. coeff.	Uncert. contribution	Rel. contribution
m	1,0000000000 kg	0.5×10^{-6} kg	Normal	∞	0.000981 kg^3	0.0294×10^{-9}	0,00 %
g	9.810161000 m/s ²	0.170×10^{-6} m/s ²	Normal	∞	$0.000100 \text{ s}^2 \cdot \text{m}^3$	0.0170×10^{-9}	0.75×10^{-6} %
l	0.0001050000 m	0.0200×10^{-6} m	Normal	∞	9.80 m^1	0.196×10^{-6}	99,99 %
ρ_L	1,13360800 kg/m ³	$0.00000850 \text{ kg/m}^3$	Normal	∞	0.438×10^{-6} $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	3.72×10^{-12}	0.04×10^{-6} %
ρ_m	2239,00 kg/m ³	2,00 kg/m ³	Rectangular	1	0.222×10^{-9} $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	0.444×10^{-9}	0,00 %
α	0,0 rad	0.0200×10^{-6} rad	Normal	∞	0.0958 rad^{-1}	1.92×10^{-9}	0,01 %
C_{ip}	0.0958085 Nm/rad	constant					
	Value	Comb. stand. uncertainty	Comb. relat. uncertainty	Effective degrees of freedom			
M	0.000980519	0.196×10^{-8}	0.000200	∞			
	Value	Expanded uncertainty	Coverage factor	Coverage probability %	Distribution		
Result	1029.55 $\times 10^{-3}$	$\pm 0.39 \times 10^{-6}$	2.00 (95.45 %)	95.45 %	Normal		

Table 4: Uncertainty budget for 1 mN·m TSM from PTB, Germany [2]

Quantity X_i	Estimate x_i	Standard uncertainty $w(x_i)$	Distribution function	Sensitivity coefficient c_i	Contribution to relative measurement uncertainty $w_i(y)$
m	0.000 407 7359 kg	0.01 mg	normal	2.45 N m kg ⁻¹	0.25×10^{-4}
g	9.812524 m s ⁻²	5 μ m s ⁻²	normal	$0.000 102 \text{ N s}^2$	0.51×10^{-6}
l	0.2500 m	5 μ m	normal	0.004 N	0.20×10^{-4}
ρ_L	1.20 kg m ⁻³	0.0462 kg m ⁻³	rectangular	-1.3×10^{-7} N m ⁴ kg ⁻¹	-5.80×10^{-6}
ρ_m	7975 kg m ⁻³	6.09 kg m ⁻³	rectangular	1.9×10^{-11} N m ⁴ kg ⁻¹	0.11×10^{-6}
α	0 rad	0.714 mrad	normal	-7.1×10^{-7} N m rad ⁻¹	-0.51×10^{-6}
δM_R	0 N m	0.000 29 mN m	rectangular	1	2.90×10^{-4}
δM_D	0 N m	0.000 29 mN m	rectangular	1	2.90×10^{-4}
δM_F	0 N m	0.000 29 mN m	rectangular	1	2.90×10^{-4}
M	0.001 000 (1 \pm 0.10 \times 10 ⁻²) N m (k = 2)				

Changing the position of the Si - sphere by a distance of about 0.105 mm gives us a relative torque (1029.55 \pm 0.39) mN·m, k = 2, p = 95.45%. Also when comparing tables 3 and 4 we can see that for nominal torque 1 mN·m we have an improvement in absolute uncertainty of

four magnitudes. Such a large gap in uncertainty is explained by the fact that torque $1 \text{ mN}\cdot\text{m}$ requires the use of a small mass that is vulnerable to influential values (air flows, electrostatic forces, etc.). It also must be noted that the uncertainty balance was carried out for the PTB TSM on the real measurements, taking into account all influential factors.

7. Summary

In this paper was explained new idea of the generation of a static torque in the range of $1 \text{ mN}\cdot\text{m}$ to $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ according to the *jokey – weight* principle. New torque generation principle compared to the most applicable *dead – weight* principle. Also was explained how to integrate this idea, to creating a more precise torque standard machine. Preliminary uncertainty budget of the new torque standard machine has been considered, and compared it to the uncertainty budget of the best torque standard machine (PTB, Germany). First prototype of the torque generation unit was built.

8. Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) in the framework of Research Training Group Tip- and laser-based 3D-Nanofabrication in extended macroscopic working areas (GRK 2182) at the Technische Universität Ilmenau, Germany.

9. References

- [1] A., Boschetti G., Gasparetto A., Giovagnoni M., Zanotto V. (2005) A Force-Torque Sensor for the Applications in Medical Robotics. In: Kuljanic E. (eds) AMST'05 Advanced Manufacturing Systems and Technology. CISM International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), vol 486. Springer, Vienna
- [2] D. Röske 2014 Metrologia 51 87
- [3] Knopf, Dorothea / Wiedenhöfer, Thomas / Bauer, Katharina / et al: Dissemination of the « Planck-Kilogram ». Ilmenau 2017
- [4] OIML: OIML R 111-1, 2004(E).

Aufstellung einer Messunsicherheitsbilanz für ein primäres Messverfahren zur Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit

Dr. rer. nat. **U. Breuel**, Dr. rer. nat. **B. Werner**,
Dipl.-Math. **N. Schiering**, Dr.-Ing. **A. Zeißler**,
Zentrum für Messen und Kalibrieren & ANALYTIK GmbH,
Bitterfeld-Wolfen

Kurzfassung

Die elektrolytische Leitfähigkeit ist eine wichtige Messgröße zur Kontrolle von Prozessen in wässrigen Medien, die in unterschiedlichen Bereichen der Industrie von Bedeutung ist. In der metrologischen Hierarchie stehen primäre Messverfahren an der Spitze. Ihnen nachgeordnet sind sekundäre Messverfahren (z.B. mit Standardmesszellen) sowie Messungen mit kommerziellen Leitfähigkeitsmessgeräten mit 2- und 4-Polmesszellen.

Die ZMK & ANALYTIK GmbH entwickelte eine Primärmesseinrichtung für die elektrolytische Leitfähigkeit, die erstmalig eine Temperierung in einem Flüssigkeitsbad besitzt.

Der folgende Beitrag stellt die Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz für das primäre Messverfahren dar. Als wichtige Hauptbeiträge gehen u.a. die Widerstandsmessung, die Messung die Temperaturkontrolle und -messung sowie die Verschiebung der Messelektroden um einen definierten Verschiebeweg in die Messunsicherheit ein, die sich wiederum aus Einzelbeiträgen zusammensetzen. Die einzelnen Messunsicherheitsbeiträge der elektrischen Messungen (Widerstände), der Messungen der Temperatur, den längentechnischen Messungen sowie weitere Beiträge werden detailliert dargestellt. Die Korrelation einzelner Beiträge untereinander wird beachtet.

1. Einleitung

Die Elektrolytische Leitfähigkeit ist eine physikalisch-chemische Messgröße, über die eine Vielzahl von Prozessen in der Industrie / Laboratorien wie Chemie, Pharmazie, Biochemie, Medizin und Biotechnologie beobachtet und kontrolliert werden.

Je nach Einsatzgebiet sind für die Anwender dabei unterschiedliche Messbereiche von Bedeutung. In der pharmazeutischen Industrie werden sehr oft Reinstwässer im Bereich von < 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ benötigt. Auch in der Halbleiterindustrie werden sehr Reinstwässer mit sehr geringen

elektrolytischen Leitfähigkeiten verwendet. Hersteller von Dialysegeräten benötigen Referenzlösungen mit vergleichsweise höheren elektrolytischen Leitfähigkeiten zur Kontrolle ihrer Prozesse.

Für die Kalibrierlaboratorien, die eine Akkreditierung nach ISO/IEC 17025 für die Messgröße Elektrolytische Leitfähigkeit besitzen, besteht damit die Aufgabe, Kalibrierdienstleistungen über einen weiten Bereich der Elektrolytischen Leitfähigkeit zu erbringen und ihren Kunden anzubieten.

Die bis jetzt akkreditierten Verfahren, z.B. in Deutschland durch die DAkkS, stützen sich hauptsächlich auf den Einsatz kommerzieller Leitfähigkeitsmessgeräte mit 2- und 4-Pol-Zellen.

Die ZMK & ANALYTIK GmbH entwickelte in einem im Jahr 2007 abgeschlossenen Entwicklungsprojekt ein sekundäres Kalibrierverfahren, das auf der Anwendung von Standardmesszellen [1-3] beruht und brachte es zur Akkreditierung. Standardmesszellen sind Sekundärzellen vom Jones-Typ.

Zur metrologischen Rückführung der Standardmesszellen werden aber, ebenso wie für kommerzielle Leitfähigkeitsmessgeräte, Referenzlösungen benötigt, die mit Primärzellen der Nationalen Metrologischen Institute kalibriert worden sind. Deren Messunsicherheit geht in die Kalibrierung ein. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass die Messunsicherheit, die mit Standardmesszellen erreicht wird, durch die Messunsicherheit des Primärverfahrens begrenzt ist.

Als neue Aufgabe stellte sich die ZMK & ANALYTIK GmbH ab 2015 der Herausforderung, eine eigene Primärmesseinrichtung zu entwickeln. Bereits in der Entwicklungsphase wurden mögliche Einflüsse auf die Messunsicherheit untersucht und die notwendigen Daten dafür gesammelt. Dieser Beitrag stellt die Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz für diese Primärmesseinrichtung dar.

2. Aufbau und Hauptkomponenten der Primärmesseinrichtung

Die primäre Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit basiert auf der Messung von Impedanzen in zwei unterschiedlichen Positionen der Messelektroden zueinander. Dies kann z.B. durch die Verwendung von zwei Halbzellen erfolgen, zwischen die Mittelstücke definierter Länge eingesetzt werden. Dieses Prinzip wird z.B. in den Primärmesseinrichtungen des NIST und des DFM umgesetzt [4-6].

Die Primärmesseinrichtung der PTB verwendet eine präzise Lineareinheit (Wegaufnehmer), mit der die Position der beiden Messelektroden zueinander um eine definierte Länge verschoben wird. Die Primärmesseinrichtung der PTB befindet sich in einem Luftthermostat [7].

Die neu entwickelte Primärmesseinrichtung der ZMK & ANALYTIK GmbH orientierte sich an dem Prinzip, das von der PTB realisiert wurde. Ein entscheidendes Kriterium für die Konzeption der neuen Normalmesseinrichtung war das Erreichen einer guten Temperaturstabilität. Es bestand deshalb von Anfang an das Ziel, die Temperierung der neuen Primärzelle mit einem Flüssigkeitsthermostaten zu realisieren.

Die Primärmesseinrichtung besteht aus der eigentlichen Primärzelle, einem Präzisionsthermostatbad, der Temperatormesseinrichtung, der Messeinrichtung für Widerstände (LCR-Meter), dem Wegaufnehmer sowie den mechanischen Komponenten.

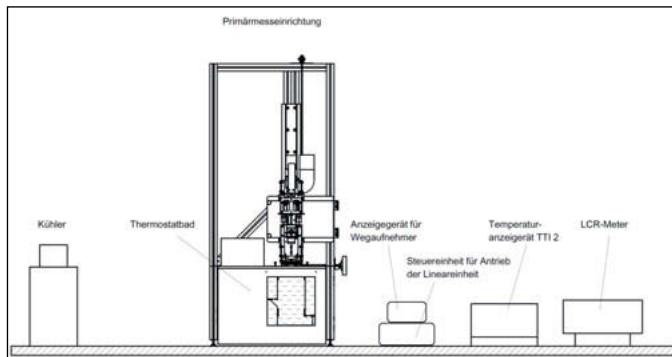


Bild 1: Prinzipieller Aufbau der Primärmesseinrichtung für die Elektrolytische Leitfähigkeit

3. Messprinzip

Zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen zur Messunsicherheit soll das Messprinzip an dieser Stelle kurz erläutert werden.

Während der Messungen ist die Primärzelle mit der Lösung gefüllt, deren elektrolytische Leitfähigkeit bestimmt werden soll. Nach Erreichen der Temperaturstabilität werden Impedanzmessungen bei festgelegten Frequenzen durchgeführt. Die obere und die untere Messelektrode befinden sich dabei in einem bestimmten Abstand zueinander.

Für die Auswertung wird der Ohmsche Widerstand R als Realteil der Impedanz benötigt. Die Ohmschen Widerstände werden danach in Abhängigkeit vom Reziproken der Frequenz in einem Diagramm aufgetragen. Es ist wichtig, dass die Frequenzen in Voruntersuchungen so ausgewählt wurden, dass sich ein nahezu linearer Verlauf ergibt. Anschließend erfolgt eine Extrapolation auf eine unendliche Frequenz ($1/f = 0$). Als Ergebnis wird der Ohmsche Widerstand in der oberen Position der oberen Messelektrode bei unendlicher Frequenz R_0 erhalten.

Anschließend wird die obere Messelektrode mittels Wegaufnehmer um einen definierten Verschiebweg Δl in Richtung der unteren Messelektrode hinbewegt. In dieser Position erfolgen wiederum Impedanzmessungen bei festgelegten Frequenzen. Dabei wird der der Ohmsche Widerstand in der unteren Position der oberen Messelektrode R_U bei unendlicher Frequenz ermittelt.

4. Modellgleichung mit Erläuterungen (mit prozesskonkretem verbalen Fehlerbaum)

Die Berechnung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Leitfähigkeitsreferenzlösungen mit der Primärmesseinrichtung erfolgt in zwei Teilschritten.

Im ersten Teilschritt wird der Widerstand der Lösung bei verschiedenen Frequenzen an der oberen und unteren Position der Primärzelle mit dem LCR-Meter gemessen. Die Temperierung erfolgt dabei in einem thermostatisierten Bad unter Nutzung eines Kontrollthermometers mit MKT 50.

In der Messunsicherheitsbilanz wird aufgrund des Messprinzips von Kolbenmesszellen die Korrelation der beiden Widerstandsmessungen berücksichtigt. Dies ist der entscheidende Vorteil von Kolbenmesszellen, da fast zur gleichen Zeit dieselbe Lösung mit demselben Messaufbau gemessen wird.

Im zweiten Teilschritt erfolgt anschließend die Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit der zu kalibrierenden Lösung aus dem mit der Lineareinheit gemessenen Verschiebweg zwischen oberer und unterer Position der Primärzelle und dem Durchmesser der Elektrode bzw. Innendurchmesser des Glasrohres. Der Widerstand bei $1/f = 0$ wird mittels Extrapolation bestimmt und geht in die Berechnung der Elektrolytischen Leitfähigkeit ein.

Die folgenden Gleichungen geben das Modell für die Messung der Widerstände unter Berücksichtigung deren Korrelation wieder.

$$R = (R_O - R_U)(1 + TK \cdot (T - 25^\circ C)) \quad (1a)$$

$$u^2(R) = \left(\frac{\partial R}{\partial R_O}\right)^2 \cdot u^2(R_O) + \left(\frac{\partial R}{\partial R_U}\right)^2 \cdot u^2(R_U) + 2 \cdot u(R_O) \cdot u(R_U) \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial R_O}\right) \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial R_U}\right) + \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)^2 \cdot u^2(T) + \left(\frac{\partial R}{\partial TK}\right)^2 \cdot u^2(TK) \quad (1b)$$

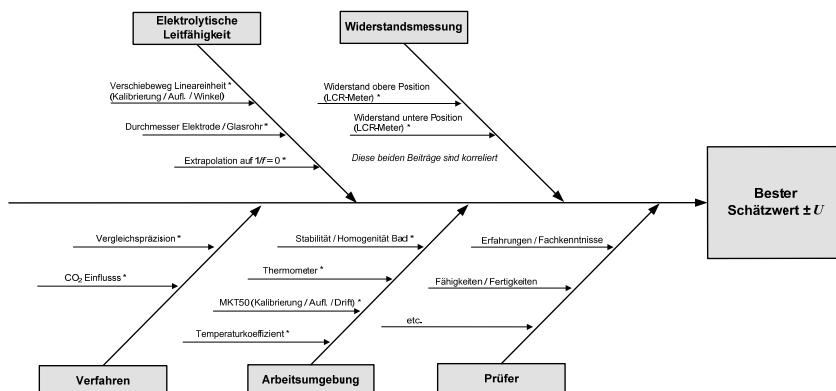
Das Modell für die Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit der zu bestimmenden Lösung ist im Folgenden angegeben.

$$\kappa = \frac{4 \cdot \Delta I}{\pi \cdot d^2 \cdot (R + \delta_{\text{Extrapol.}})} + \delta_{CO_2\text{-Gleichgewicht}} + \delta_{\text{Vergleichspräz.}} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} u^2(\kappa) = & \left(\frac{\partial \kappa}{\partial \Delta I} \right)^2 \cdot u^2(\Delta I) + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial d} \right)^2 \cdot u^2(d) + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial R} \right)^2 \cdot u^2(R) \\ & + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial \delta_{\text{Extrapol.}}} \right)^2 \cdot u^2(\delta_{\text{Extrapol.}}) + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial \delta_{CO_2\text{-Gleichgewicht}}} \right)^2 \cdot u^2(\delta_{CO_2\text{-Gleichgewicht}}) \\ & + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial \delta_{\text{Vergleichspräz.}}} \right)^2 \cdot u^2(\delta_{\text{Vergleichspräz.}}) \end{aligned} \quad (2b)$$

Die Homogenität und die Stabilität der Referenzlösungen für die elektrolytische Leitfähigkeit werden geprüft. Dabei wurden Eingriffskriterien festgelegt, bei deren Einhaltung die Homogenität und Stabilität der Leitfähigkeitsreferenzlösung angenommen werden kann. Aus diesem Grund werden diese Messunsicherheitsbeiträge in der Messunsicherheitsbilanz nicht berücksichtigt.

Bild stellt den prozesskonkreten verbalen Fehlerbaum für das Primärverfahren dar. Diejenigen Beiträge, die in der Messunsicherheitsbilanz verwendet werden, wurden gekennzeichnet.



* in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt

Bild 2: Illustration der zu berücksichtigenden Einflüsse bei der Schätzung von Erwartungswert und Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Referenzlösungen für Elektrolytische Leitfähigkeit mit einer Primärmesseinrichtung

5. Ermittlung der Empfindlichkeitskoeffizienten

Die Empfindlichkeitskoeffizienten c_i werden durch Berechnung der partiellen Ableitungen von Gleichung (1a) und (2a) ermittelt.

Bei der Ermittlung der Empfindlichkeitskoeffizienten für die Messung der Widerstände wurde deren Korrelation beachtet.

Die Empfindlichkeitskoeffizienten für den CO_2 –Einfluss und für die Vergleichspräzision / Wiederholbarkeit betragen jeweils 1.

6. Abschätzung der Messunsicherheitsbeiträge

Im Folgenden wird darstellt, welche Messunsicherheitsbeiträge zur Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz herangezogen wurden.

Das Modell für die Messung der Widerstände beinhaltet Beiträge, bei denen deren Korrelation berücksichtigt werden muss.

Für die Widerstandsmessung an der oberen Position wird die erweiterte Unsicherheit des LCR-Meters aus dem Kalibrierschein entnommen.

Für die Widerstandsmessung an der unteren Position wird die erweiterte Unsicherheit des LCR-Meters aus dem Kalibrierschein entnommen.

Die Unsicherheit der Temperaturabweichung während der Kalibrierung ist eine kombinierte Standardmessunsicherheit. Sie setzt sich aus folgenden Beiträgen zusammen:

- Standardunsicherheit des verwendeten Thermometers
- Standardunsicherheit des verwendeten MKT50
- Auflösung des MKT50
- Drift des MKT50
- Standardunsicherheit bzgl. der Stabilität des Bades
- Standardunsicherheit bzgl. der Homogenität des Bades

Der Temperaturkoeffizient wird dem Kalibrierschein bzw. dem Etikett der Flaschen der Referenzlösungen entnommen.

Die folgenden Beiträge beinhaltet das Modell für die Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit der zu kalibrierenden Lösung.

Die erweiterte Unsicherheit des Wegaufnehmers wird dem Kalibrierschein entnommen. Weiterhin wird die Auflösung des Wegaufnehmers unter Annahme der Rechteckverteilung berücksichtigt.

Die maximale Winkeldifferenz zwischen der Achse des Wegaufnehmers und der Achse des Zylinders der Primärzelle wird mit 1° abgeschätzt (Rechteckverteilung).

Der Unsicherheitsbeitrag für den Innendurchmesser des Glasrohres wird bestimmt durch die Messunsicherheit aus der Kalibrierung des Durchmessers sowie der Streuung der Messwerte des Durchmessers. Der Innendurchmesser des Glasrohres wurde mit einem Koordinatenmessgerät mit einem relativ langen Taster gemessen. Für die Messunsicherheitsbilanz wurde die Streuung des Innendurchmessers herangezogen.

Die kombinierte Messunsicherheit für das LCR-Meter wird der ersten Teilbilanz entnommen.

Der Unsicherheitsbeitrag für die Extrapolation zu $1/f = 0$ wird sowohl für die Widerstandsmessung an der oberen als auch an der unteren Position berücksichtigt.

Bei der Handhabung der Primärzelle und der Referenzlösung für die elektrolytische Leitfähigkeit kommt es zum CO₂-Austausch mit der Umgebungsluft. Bei dem hier angewendeten Kalibrierverfahren kann angenommen werden, dass sich die elektrolytische Leitfähigkeit aufgrund des CO₂ nicht mehr als $\pm 0,02 \mu\text{S}/\text{cm}$ in Bezug auf den Anfangswert vor dem Öffnen der Flasche ändert [8]. In der Messunsicherheitsbilanz für wässrige Lösungen wird eine allgemeine Standardmessunsicherheit von $0,12 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Rechteckverteilung) angesetzt.

Für die Vergleichspräzision bzw. Wiederholbarkeit die Standardabweichung aus Mehrfachmessungen herangezogen.

In Tabelle 1 ist die Messunsicherheitsbilanz für eine Referenzlösung mit dem Nennwert von $84 \mu\text{S}/\text{cm}$ dargestellt.

Tabelle 1: Messunsicherheitsbilanz für eine Referenzlösung mit dem Nennwert von 84 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Messunsicherheitsbilanz für elektrolytische Leitfähigkeit			$\kappa =$ (Nennwert)	82,83 $\mu\text{S}/\text{cm}$
alpha	1,95 % 1/K			
Parameter	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Empfindlichkeits-koeffizient	Unsicherheits-beitrag
Temperaturmessung				
Widerstandsthermometer	25 °C	0,0055 K	91,01 Ω/K	0,501 Ω
Unsicherheit MKT50	0 K	0,00065 K	91,01 Ω/K	0,059 Ω
Auflösung MKT50	0 K	0,00029 K	91,01 Ω/K	0,026 Ω
Drift MKT50	0 K	0,00058 K	91,01 Ω/K	0,053 Ω
Stabilität Temperierung	0 K	0,0006 K	91,01 Ω/K	0,053 Ω
Homogenität Temperierung	0 K	0,0023 K	91,01 Ω/K	0,210 Ω
Widerstandsmessung*				
Widerstandsmessung obere Pos.	8000,3 Ω	0,25 Ω	1,00000	0,250 Ω
Widerstandsmessung untere Pos.	3333,1 Ω	0,25 Ω	-1,00000	-0,250 Ω

* Korrelation zwischen Widerstandsmessung an oberer und unterer Position wurde berücksichtigt.

$$u= 0,552 \Omega$$

$$U= 1,10 \Omega$$

Parameter	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Empfindlichkeits-koeffizient	Unsicherheits-beitrag
Widerstandsmessung				
Widerstandsmessung R_25	4667,2 Ω	0,55 Ω	-1,782E-06 $\text{S}/(\Omega \cdot \text{m})$	-0,010 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Extrapolation obere Pos.	0 Ω	0,76 Ω	-1,782E-06 $\text{S}/(\Omega \cdot \text{m})$	-0,014 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Extrapolation untere Pos.	0 Ω	0,76 Ω	-1,782E-06 $\text{S}/(\Omega \cdot \text{m})$	-0,014 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Verschiebeweg				
Unsicherheit Lineareinheit	19,999 mm	0,000020 mm	0,41590 S/m^2	0,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Auflösung Lineareinheit	0 mm	0,000289 mm	0,41590 S/m^2	0,001 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Winkelfehler	0 mm	0,00102 mm	0,41590 S/m^2	0,004 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Durchmesser				
Unsicherheit der Elektrode / Glasrohr	25,6112 mm	0,0058 mm	-0,64953 S/m^2	-0,038 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Verfahren				
CO2 Einfluss	0 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0,12 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1	0,120 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Wiederholbarkeit	0 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0,01 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1	0,010 $\mu\text{S}/\text{cm}$
elektrolyt. Leitfähigkeit $\kappa_{25^\circ\text{C}}$	83,177 $\mu\text{S}/\text{cm}$			
			$u=$	0,128 $\mu\text{S}/\text{cm}$
			$U=$	0,26 $\mu\text{S}/\text{cm}$
			$U=$	0,30 %

Die ZMK & ANALYTIK GmbH hat das Primärmessverfahren erfolgreich zur Akkreditierung gebracht. Der Messbereich umfasst Lösungen von 84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bis 12,88 mS/cm.

Die akkreditierten Messunsicherheiten für drei Teilmessbereiche sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Akkreditierte Messunsicherheiten für das primäre Messverfahren

Elektrolytische Leitfähigkeit	rel. erweiterte Messunsicherheit mit $k = 2$ in %
84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0,30
100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – < 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0,30
1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 12,88 mS/cm	0,10

Literatur

- [1] Breuel, U., Werner, B., Spitzer, P., Jensen, H.D.; Experiences with Novel Secondary Conductivity Sensors within the German Calibration Service (DKD); NCSL international MEASURE, The Journal of Measurement Science (2008), 32-36
- [2] Breuel, U., Werner, B., Jehnert, D.; Metrology in Chemistry for pH and Electrolytic Conductivity Traceability Dissemination; CHIMIA 63 (2009), 643-646
- [3] Seitz, S., Spitzer, P.; Messergebnisse Zellkonstante der sekundären Messzelle GD12-B007 von ZMK für die Messung der Elektrolytischen Leitfähigkeit; Ergebnisbericht PTB, 30.06.2011
- [4] Pratt, K.W., Koch, W.F., Wu, Y.C., Berezansky, P.A.;Molality-based primary standards of electrolytic conductivity, Pure App. Chem. 73, No. 11 (2001) 1783-1793
- [5] Jensen, H.D., Sørensen, J.; Electrolytic conductivity at DFM – results and experiences; PTB-Bericht PTB-ThEx-15, Braunschweig, 2000, 3-8
- [6] Jensen, H.D., Dam, N.-E.; DFM measurement capability: Electrolytic conductivity – January 2005; DFM-Bericht DFM-04-R81, Lyngby, 2005, 1-7
- [7] Spitzer, P., Sudmeier, U.; Electrolytic conductivity – a new subject field at PTB; PTB-Bericht PTB-ThEx-15, Braunschweig, 2000, 37-47
- [8] Seitz, S.; Sander, B.; Final Report CCQM – K36.2016 Electrolytic Conductivity at 0.5 S m^{-1} and 5 mS m^{-1} , 2017

Neues Konzept für eine fünfachsige Nanomessmaschine

Florian Fern, Ralf Schienbein, apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Füßl,
Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität
Ilmenau

Kurzfassung

Dieser Beitrag zeigt ein Konzept für eine fünfachsige Nano-Koordinatenmessmaschine zur Messung auf stark gekrümmten asphärischen und frei geformten optischen Oberflächen in einem Messvolumen von $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ mit einer maximal möglichen Änderung des Neigungswinkels von bis zu 60° zur Hochachse. Dabei wird die Probe translatorisch bewegt und der Sensor in seiner Orientierung verändert. Unter Einhaltung des Abbe-Komparatorprinzips für alle Messachsen wird die Bewegungsabweichung des Sensors bei der Rotation durch ein in-situ-Referenzmesssystem erfasst. Dieses besteht aus drei kartesisch angeordneten Fabry-Pérot-Interferometern, die den Abstand zu einer hemisphärischen Referenzfläche messen.

Abstract (optional)

This paper shows a concept for a five axes nano coordinate measuring machine for strongly curved aspheric and freeform surfaces with a measuring volume of $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ and maximum elevation of 60° . The sample is moved translational and the sensor changes its rotational orientation. By following the abbe comparator principle for all measurement axes the motion error of the sensor during the rotation is measured by an in-situ-measurement system. It consists of three Cartesian arranged Fabry-Pérot-interferometers which measure the distance to a hemispherical reference surface.

1. Einleitung

Durch die vermehrte Nutzung von stark gekrümmten Asphären oder frei geformten optischen Oberflächen konnten beeindruckende Leistungen mit optischen Elementen erreicht werden. Die erreichbare Fertigungsqualität kann nur mit der entsprechenden Messtechnik erreicht werden. Dabei ist die Messung an solchen Flächen immer noch eine Herausforderung. Vergleichsmessungen an verschiedenen Asphären zwischen einer Vielzahl an Verfahren und Geräten (optische Koordinatenmesstechnik, taktile Koordinatenmesstechnik, Computergenerierte Hologramme (CGH), Tilted-Wave-Interferometer [1] oder Sub-Apertur-Stitching Interferometrie),

zeigen bei zunehmender Steigung der Asphären eine stark verringerte Übereinstimmung [2]. Die verwendeten Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung sind auf Grund einer fehlenden translatorischen Freiheit ihrer Kinematik in der Möglichkeit zur Messung von Freiformen beschränkt [3, 4].

Für die Nanomessmaschine-1 (*NMM-1*) wird eine Erweiterung der Bewegungsmöglichkeiten um zwei zusätzliche Rotationsachsen entwickelt. So ist eine Ausrichtung des Sensors orthogonal zur lokalen Probenoberfläche möglich. Durch die orthogonale Ausrichtung kann die zu erwartende Unsicherheit des Antastsystems deutlich reduziert werden, gleichzeitig werden die Messmöglichkeiten für stark gekrümmte Oberflächen deutlich erweitert.

2.1 NMM-1

Die *NMM-1* ist ein 3D-Abbe-Komparator. Die Probe wird relativ zu einem ortsfesten, punktförmig antastenden optischen Sensor bewegt. In einem Bewegungsbereich von $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ wird die Position der Probe durch je ein Michelson-Interferometer in x-, y-, und z-Richtung erfasst. Dazu befindet sich die Probe auf einer sogenannten Raumspieglecke deren Außenseiten verspiegelt sind und als Reflektor für die Interferometer dienen. Die Messachsen der Interferometer schneiden sich im Antastpunkt des Sensors und das Abbe-Komparator Prinzip ist in allen Messrichtungen eingehalten [5].

2.1 Kinematisches Konzept der Erweiterung

Das Rotationssystem besteht aus zwei unabhängigen, motorisierten Rotationspositionierern deren Drehachsen sich ebenfalls im Abbe-Punkt schneiden. Diese beiden Rotationspositionierer sind seriell angeordnet und an dem Letzten ist der Sensor befestigt (siehe Bild 1). Bei

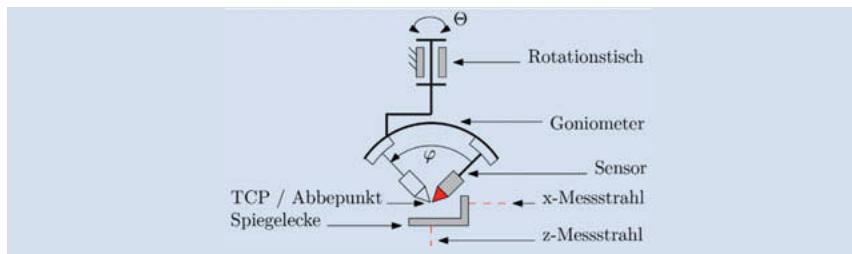


Bild 1: Kinematisches Prinzip der Rotationseinheit zur Erweiterung der *NMM-1* um zwei rotatorische Freiheitsgrade

dem ersten Rotationspositionierer handelt es sich um einen wälzgelagerten Drehtisch mit Schrittmotor und Rotationsencoder. Die zweite Positionierer ist ein wälzgelagertes Goniometer mit Schrittmotor und Rotationsencoder. Ein Goniometer hat keine geschlossene Führungsbahn und erlaubt daher nur eine diskontinuierliche Bewegung in einem Bereich von -45° bis $+45^\circ$. Der Sensor wird so an dem Goniometer befestigt, dass der Antastpunkt des Sensors im Schnittpunkt der beiden Rotationsachsen liegt. So wird das Abbe-Prinzip weiterhin strikt eingehalten. Der Antastpunkt erfährt ausschließlich einer Änderung seiner Ausrichtung, jedoch keine Verschiebung. Somit wird das Messvolumen der *NMM-1* nicht eingeschränkt. Die Ausrichtung des Sensors wird in Kugelkoordinaten mit dem Azimutwinkel (φ) und dem Polarwinkel (θ) beschrieben. Da die beiden Drehachsen immer senkrecht aufeinander stehen, können sowohl der Polarwinkel als auch der Azimutwinkel unabhängig voneinander vorgegeben werden.

Grundsätzlich kann mit diesem kinematischen Aufbau eine Ausrichtung von $\varphi = 0^\circ - 90^\circ$ für den Azimutwinkel und $\theta = 0^\circ - 360^\circ$ für den Polarwinkel erreicht werden. Auf Grund von Begrenzungen im Bauraum der bestehenden *NMM-1* wird der Bewegungsbereich auf $\varphi = 0^\circ - 60^\circ$ eingeschränkt [6].

3. In-situ-Messsystem

Auf Grund der unvermeidbar auftretenden Führungsabweichungen und der nicht perfekten Justierung in den verwendeten Positionierern erfährt der Antastpunkt des Sensors eine systematische und eine zufällige Verlagerung [7]. Die systematische Verlagerung entsteht durch systematische Bahnabweichungen im Rahmen der Wiederholbarkeit der Dreieinheiten, sowie eine unzulängliche Ausrichtung zwischen den beiden Rotationsachsen und dem Antastpunkt des Sensors. Zufällige Abweichungen entstehen zum einen im Wälzlagern selber, aber auch durch eine Variation verschiedener Störgrößen, wie der Temperatur, die nicht in einem Modell abgebildet werden können. Diese unbekannte Verlagerung des Antastpunktes geht direkt in die erreichbare Messunsicherheit des Einzelpunktes ein. Messungen haben gezeigt, dass diese Abweichung in der Größenordnung einiger $10\mu\text{m}$ liegen können [7]. Grundsätzlich kann diese Abweichung im Messprozess durch ein zusammensetzen benachbarter Segmente der Messung durch Stitching vermindert werden. Die Resultate dieser Techniken sind jedoch stark von der zu untersuchenden Oberfläche, wie auch von der Geometrie und der Messaufgabe abhängig. Nicht kontinuierliche Flächen, die keine kontinuierliche Messung erlauben, können nicht durch Stitching gemessen werden.

3.1 Messverfahren

Zur Bestimmung des Antastpunktes wird ein in-situ-Messsystem verwendet, dass die Bestimmung des Antastpunktes über den vollständigen Bewegungsbereich ermöglicht. Das Messsystem besteht im Wesentlichen aus drei Abstandssensoren, die fest mit dem Antastsensor verbunden sind und den Abstand zu einer ortsfesten Referenzfläche messen. Die drei Sensoren spannen dabei ein kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung im Antastpunkt des Sensors auf. Als Referenzfläche wird eine oben geöffnete Hemisphäre mit einem Durchmesser von 400mm aus Quarzglas verwendet. Erfährt der Sensor eine Verlagerung in Folge von zufälligen oder systematischen Effekten, wird diese durch die drei Abstandssensoren erfasst (siehe Bild 2).

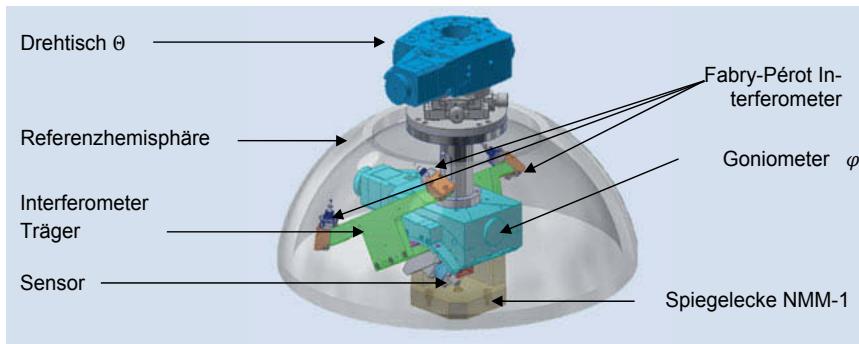


Bild 2: 3D-CAD Modell des in-situ-Referenzmesssystems für die NMM-1. Die drei Fabry-Pérot-Interferometer messen den Abstand zur Referenzhemisphäre während der Rotation des Sensors.

Als Abstandssensoren kommen fasergekoppelte Fabry-Pérot-Interferometer zum Einsatz. Diese zeichnen sich durch eine sehr kompakte Bauform und geringes Gewicht aus. Die Interferometer werden auf die Referenzfläche mit einer Brennweite von $f=40\text{mm}$ fokussiert. Da in einem Fabry-Pérot-Interferometer nur die Reflektion am Faseraustritt für die Interferenz zur Verfügung steht, kann die Referenzfläche ohne eine zusätzliche, reflektierende Beschichtung verwendet werden. Dies erhöht den Interferenzkontrast und reduziert die zu erwartende Messunsicherheit.

3.2 Lage des Koordinatensystems

Um die wirtschaftlichen und technologischen Herausforderungen an die Referenzhemisphäre minimal zu halten, kann die Ausrichtung des Koordinatensystems so gewählt werden, dass der benötigte Ausschnitt der Referenzsphäre für den Bewegungsbereich von $\varphi = 0^\circ - 60^\circ$ optimiert wird.

Das Koordinatensystem der in-situ-Referenzmesssystems (F_1, F_2, F_3) ist im Vergleich zum Maschinenkoordinaten-system (x, y, z) um 45° um die z-Achse und 55° um die x-Achse verkippt. In dieser Anordnung wird die vollständige Oberfläche der Referenzhemisphäre von den Interferometern, die entlang der F_1 und der F_2 Achse messen, überstrichen (siehe Bild 3).

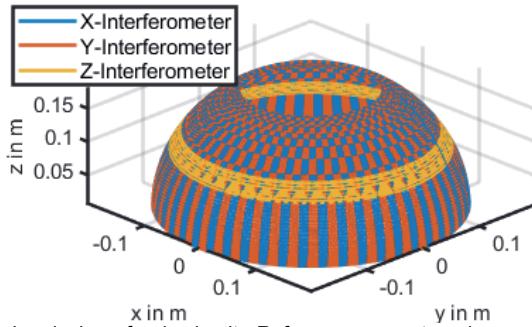


Bild 3: Referenzhemisphäre für das in-situ-Referenzmesssystem der erweiterten NMM-1.

Dargestellt sind die von den Fabry-Pérot-Interferometern überstrichenen Bereich der Referenzhemisphäre.

Die Verschiebung wird im lokalen Koordinatensystem des in-situ-Referenzmesssystems gemessen. Dieses Koordinatensystem verändert sich je nach Rotationswinkel des Antastsensors. Durch eine Koordinatentransformation um die Drehwinkel des Rotationssystems wird die Verschiebung in Maschinenkoordinatensystem transformiert und kann zur Korrektur der Messwerte oder zur Kompensation während der Messung genutzt werden.

4 Maschinenstruktur

Das beschriebene System zur rotatorischen Ausrichtung des Sensors mit dem zugehörigen in-situ-Referenzmesssystem wird als Erweiterung der bisherigen NMM-1 verwendet. Dazu bleibt die NMM-1 bis auf den Antastsensor vollständig bestehen.

4.1 3D-Modell

Die Referenzhemisphäre wird statisch mit dem bisherigen metrologischen Rahmen der NMM-1 verbunden und wird so justiert, dass sich ihr Mittelpunkt im ABBE-Punkt der NMM-1 befindet. Ein äußerer Rahmen trägt die beiden Rotationseinheiten und fixiert diese unter der Referenzhemisphäre. Durch eine Justage-Baugruppe können sowohl die Rotationsachsen selbst zum Schnitt gebracht werden, also auch gemeinsam in den ABBE-Punkt verschoben werden (siehe Bild 4).

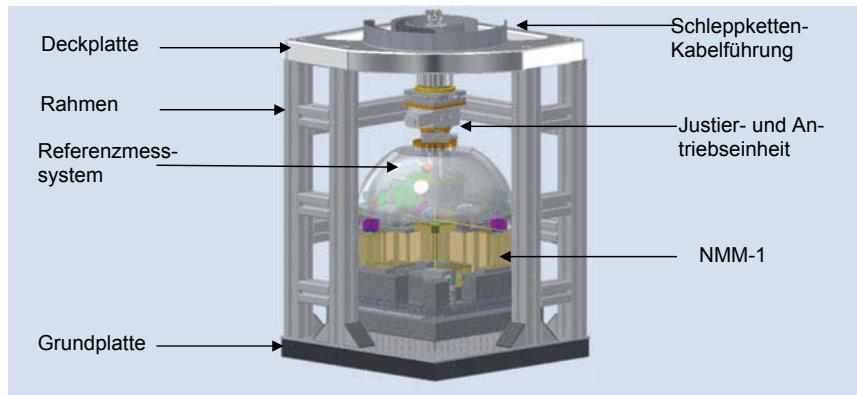


Bild 4: 3D-CAD Modell des Gesamtaufbaus für die erweiterte NMM-1.

4.2. Metrologischer Rahmen und Werkstoffe

Mit der Erweiterung der NMM-1 wird die strikte Trennung der Antriebssysteme vom metrologischen Rahmen aufrechterhalten. Dabei bildet die bisherige NMM-1 zusammen mit der Referenzhemisphäre den statischen Teil des metrologischen Rahmens und der Interferometer-Träger (siehe Bild 2) bildet zusammen mit den Interferometern und der Sensoraufnahme den bewegten Teil des metrologischen Rahmens. Um den hohen Anforderungen an die Temperaturstabilität gerecht zu werden, werden alle Elemente des metrologischen Kreises aus Invar hergestellt. Durch diese Trennung zwischen metrologischem Rahmen und der restlichen Maschine, sinken die Anforderungen an die Konstruktionswerkstoffe, die Langzeitstabilität der Justage-Stellen und die Führungsabweichungen der verwendeten Rotationseinheiten. Die dort auftretenden Abweichungen werden vollständig durch das in-situ-Referenzmesssystem erfasst.

5. Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Konzept für eine fünfachsige Nanomessmaschine ermöglicht die kontinuierliche Ausrichtung des Sensors orthogonal zur lokalen Probenoberfläche in einem Winkelbereich von $\varphi = 0^\circ - 60^\circ$ und $\theta = 0^\circ - 360^\circ$. Die Erweiterung umfasst zwei Rotationseinheiten und ein in-situ-Referenzmesssystem, dass die Position des Antastpunktes interferometrisch relativ zu einer hemisphärischen Referenzfläche ermittelt. Dabei wird das Abbe-Komparatorprinzip für alle Messachsen eingehalten.

6. Ausblick

Das vorgestellte Konzept für eine fünfachsige Nanomessmaschine befindet sich momentan im Aufbau. Anhand dieses Versuchsaufbaus werden verschiedene Messstrategien und Sensor-typen untersucht. Der bisherige Aufbau erlaubt auch die Integration von kompakten Fotolithographischen Bearbeitungssystemen [8, 9]. Diese profitieren von den erweiterten Bewegungsmöglichkeiten. Basierend auf diesen Ergebnissen kann ein Konzept für eine eigenständige, fünfachsige Nanomess- und Nanobearbeitungsmaschine mit fünf Freiheiten entwickelt werden.

Danksagung:

Die vorgestellten Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Graduiertenkollegs „Spitzen- und laserbasierte 3D Nanofabrikation in ausgedehnten, makroskopischen Arbeitsbereichen“ (GRK 2182) an der Technischen Universität Ilmenau gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] OSTEN, W. ; DÖRBAND, B. ; GARBUSI, E. ; PRUSS, Ch. ; SEIFERT, L.: *Testing aspheric lenses: New approaches*. In: *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 46 (2010), Nr. 4, S. 329–339
- [2] SCHACHTSCHNEIDER, R. ; FORTMEIER, I. ; STAVRIDIS, M. ; ASFOUR, J. ; BERGER, G. ; BERGMANN, R. B. ; BEUTLER, A. ; BLÜMEL, T. ; KLAWITTER, H. ; KUBO, K. ; LIEBL, J. ; LÖFFLER, F. ; MEEß, R. ; PRUSS, C. ; RAMM, D. ; SANDNER, M. ; SCHNEIDER, G. ; WENDEL, M. ; WIDDERSHOVEN, I. ; SCHULZ, M. ; ELSTER, C.: *Interlaboratory comparison measurements of aspheres*. In: *Measurement Science and Technology* 29 (2018), Nr. 5, S. 55010
- [3] BERGER, Gernot ; WENDEL, Marc: *Optical Metrology of Freeforms and Complex Lenses*. In: *Optik & Photonik* 13 (2018), Nr. 1, S. 40–43
- [4] HENSELMANS, R. ; CACACE, L. A. ; KRAMER, G.F.Y. ; ROSIELLE, P.C.J.N. ; STEINBUCH, M.: *The NANOMEFOS non-contact measurement machine for freeform optics*. In: *Precision Engineering* 35 (2011), Nr. 4, S. 607–624
- [5] JÄGER, Gerd ; MANSKE, Eberhard ; HAUSOTTE, Tino ; BÜCHNER, H.-J.: *The Metrological Basis and Operation of Nanopositioning and Nanomeasuring Machine NMM-1*. In: *tm - Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 5, S. 524
- [6] SCHIENBEIN, Ralf ; FERN, Florian ; WEIGERT, Florian ; THESKA, René ; FÜBL, Roland: The implementation of ultra precision rotations to multiaxial nanofabrication machines: challenges and solution concepts. In: BILLINGTON, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology : June 4th-8th June 2018, Venice, IT*. Bedford, UK : euspen, 2018, S. 65–66
- [7] FERN, Florian ; SCHIENBEIN, Ralf ; FÜBL, Roland ; THESKA, René: *Ultra precise motion error measurement of rotation kinematics for the integration in nanomeasuring and nanofabrication machines*. In: *Proceeding 33rd ASPE Annual Meeting* (2018)
- [8] WEIDENFELLER, Laura ; SCHIENBEIN, Ralf ; REINHARDT, Carsten ; KIRCHNER, Johannes ; MANSKE, Eberhard: Development of laser positioning system of high accuracy in the nanometer range. In: *Proc. SPIE 10544, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics XI*, 2018
- [9] KUEHNEL, M. ; FRÖHLICH, Thomas ; FÜBL, Roland ; HOFFMANN, Martin ; MANSKE, Eberhard ; RANGELOW, Ivo W. ; REGER, Johann ; SCHÄFFEL, Christoph ; SINZINGER, Stefan ; ZÖLLNER, Jens-Peter: *Towards alternative 3D nanofabrication in macroscopic working volumes*. In: *Measurement Science and Technology* (2018)

Konformitätsbewertung bei geometrischen Messaufgaben in der Produktion: ISO 14253 und industrielle Praxis

Conformity Assessment for Geometrical Measuring tasks in Production: ISO 14253-1 and Industrial Practice

Dr.-Ing. Dietrich Imkamp,
Carl ZEISS Industrielle Messtechnik, Oberkochen;
Dipl.-Ing. Christian Sommerhuber,
ehemals GPS Programm Manager,
SKF Österreich AG, Steyr, Österreich

1. Kurzfassung

Messunsicherheitsangaben werden in der Produktion vorwiegend bei Konformitätsentscheidungen gemäß ISO 14253-1 verwendet [0]. Je nach Verhältnis zwischen Messunsicherheit und Toleranz kann gerade bei kleinen Toleranzen die Messunsicherheit einen wesentlichen Einfluss auf die Entscheidung haben. Der Beitrag stellt die Grundlagen der so genannten „Entscheidungsregeln“ vor und erläutert die Neuerung der Ausgabe von 2018.

2. Abstract

Measurement uncertainty statements are used in production mainly for conformity decisions according to ISO 14253-1 [0]. Depending on the relationship between measurement uncertainty and tolerance, the measurement uncertainty can have a significant influence on the decision, especially with small tolerances. The article presents the basics of the so-called "decision rules" and explains the main changes of the 2018 edition.

3. Einleitung: Messergebnis, Produktionsergebnis und Messunsicherheit

Die Funktionalität eines Produktes wird durch die Einhaltung der Toleranzgrenzen seiner Produktmerkmale sichergestellt. Man spricht daher auch von den Funktionsgrenzen [1]. Bei einer Überschreitung dieser Grenzen ist die Funktionalität des Produktes nicht mehr gesichert. Die Überschreitung muss daher in jedem Fall verhindert werden. Bei der Konformitätsprüfung wird ermittelt, ob die Merkmalsausprägungen innerhalb der Toleranzgrenzen liegen. Wenn die Merkmalsausprägungen durch Messungen ermittelt werden, muss dabei die Messunsicherheit

berücksichtigt werden, da das Messergebnis nicht nur durch die Abweichungen der Produktion, sondern auch durch die Abweichungen bei der Messung bestimmt wird. Das Messergebnis entspricht daher nicht dem „Produktionsergebnis“ (Bild 1).

Die Messunsicherheit schätzt die möglichen Abweichungen unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen bei der Messung nach oben ab. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheit legt der „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“, der entsprechend der Anfangsbuchstaben seines englischen Titels „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ auch kurz „GUM“ genannt wird, fest [2].

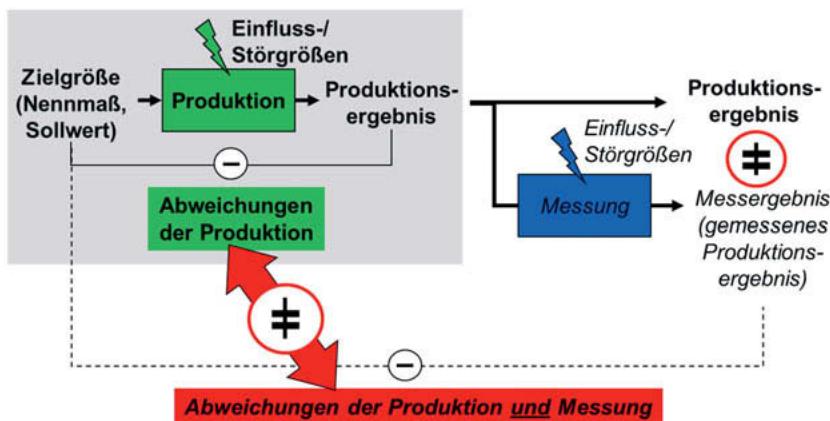


Bild 1: Messergebnis und Produktionsergebnis

4. Toleranzverständnis und Entscheidungsregeln

Um den Einfluss der Messunsicherheit auf das Messergebnis zu begrenzen sollte die Messunsicherheit wesentlich kleiner als die Toleranz sein. Gebräuchliche Größenordnungen für das Verhältnis von Messunsicherheit zu Toleranz von 1:10 bis 1:5 sind unter dem Begriff der „goldenene Regel“ [3] oder „Gage maker's rule“ [4] bekannt. Sofern die durch diese Regeln gegebenen Grenzen für die Messunsicherheit eingehalten werden, wird auf eine Berücksichtigung der Messunsicherheit bei der Konformitätsprüfung verzichtet. Dieses Toleranzverständnis führt zum Zulassen einer Toleranzüberschreitung um die Messunsicherheit. Es kommt in der Praxis auch zur Anwendung, wenn nach der Qualifikation eines Messsystems durch eine Mess-

systemanalyse beispielsweise nach [5] auf die Berücksichtigung der Messunsicherheit bei Bewertung der Toleranzhaltigkeit verzichtet. Je nach Standard kommen dabei auch andere Verhältnisse zwischen den verwendeten Kenngrößen für die Messunsicherheit und der Toleranz zur Anwendung [6].

In der Normenreihe ISO 14253 wird der Verzicht auf die Berücksichtigung der Messunsicherheit im Teil 6 mit „simple acceptance“ beziehungsweise „simple rejection“ bezeichnet [7]. Die Anwendung dieser Regel erfordert eine entsprechende Vereinbarung zwischen Kunden und Lieferanten. Es sollte sonst die Standardregel nach ISO 14253-1 zur Anwendung kommen.

Bei den Entscheidungsregeln nach ISO 14253-1 [8] wird die Toleranz als ein Bereich zwischen Grenzwerten angesehen, der von Merkmalswerten nicht überschritten werden darf. Dieses ist nur möglich, wenn die Toleranz bei der Fertigung um die Messunsicherheit verringert wird. Eine Überschreitung der Toleranz infolge der Messunsicherheit des verwendeten Messsystems wird somit ausgeschlossen. Im Fall einer Annahmeprüfung durch den Abnehmer muss dementsprechend die Toleranz um die Messunsicherheit erweitert werden, um eindeutig zurückweisen zu können (Bild 2).

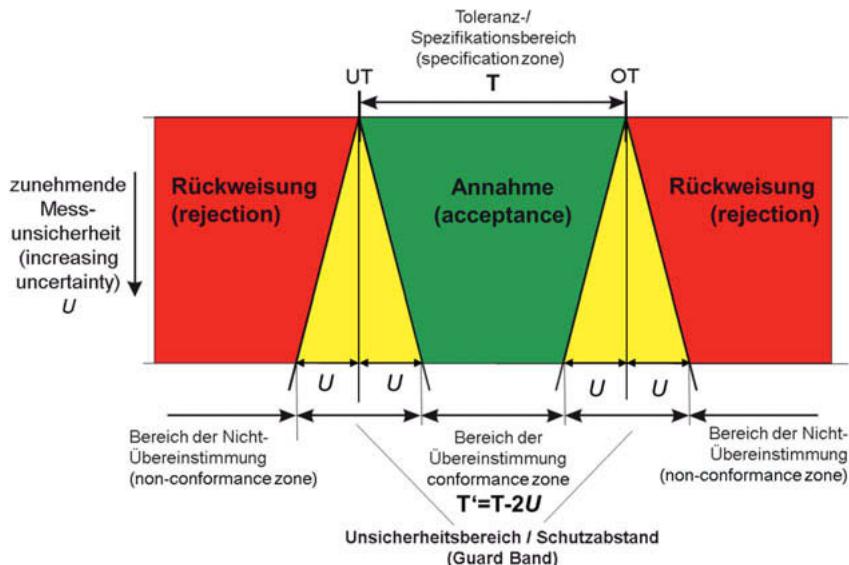


Bild 2: Entscheidungsregeln

5. Überdeckungswahrscheinlichkeit und Konformitätswahrscheinlichkeit

Die Berücksichtigung der Messunsicherheit in der ISO 14253-1, Ausgabe 2013 folgt dem Prinzip der Überdeckungswahrscheinlichkeit (Coverage Probability) des Messergebnisses. Dieses Prinzip betont die Lage des Messergebnisses innerhalb des symmetrischen Unsicherheitsbereichs. Damit ergibt sich die Notwendigkeit der konstanten Einengung des Spezifikationsbereichs unabhängig vom Verhältnis zwischen Messunsicherheit und Toleranz beziehungsweise Spezifikation.

Die eigentliche Zielsetzung der Entscheidungsregeln besteht aber darin sicherzustellen, dass mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit („Default“: 95%) die Konformität bestätigt werden kann [9]. In der Ausgabe der ISO 14253-1 von 2018 wird daher durch den Übergang vom Prinzip der Überdeckungswahrscheinlichkeit (Coverage Probability) zu diesem Prinzip der Konformitätswahrscheinlichkeit (Conformance Probability) die erforderliche Verringerung der Toleranz (Schutzabstand) von 2*Standardunsicherheit auf bis herunter zu 1,65*Standardunsicherheit reduziert, wenn der Toleranzbereich deutlich größer ist als der Messunsicherheitsbereich (Bild 3).

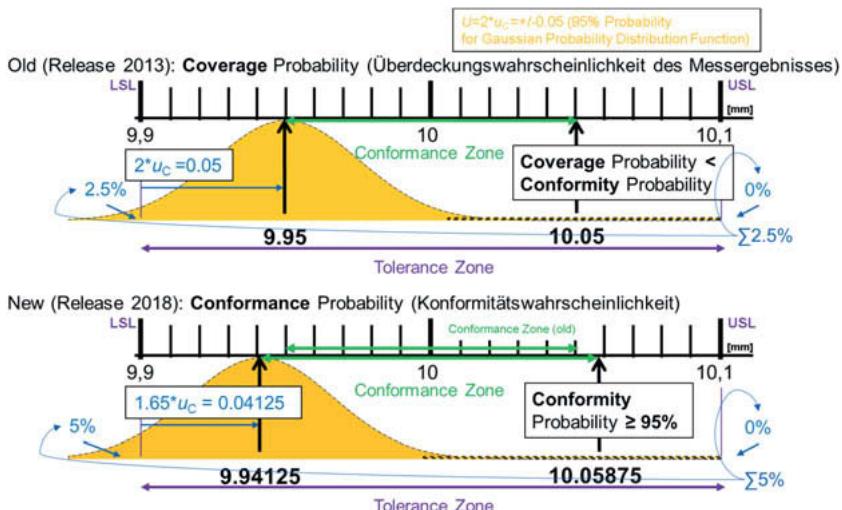


Bild 3: Entscheidungsregeln nach ISO 14253-1 2013 (Überdeckungswahrscheinlichkeit $>95\%$) und 2018 (Konformitätswahrscheinlichkeit $>95\%$) für ein Verhältnis von Toleranz $T=0.2$ zu Standardmessunsicherheit $u=0.025$: 8:1 (L / USL=Lower / Upper Specification Limit)

Im Anhang A der Norm von 2018 findet sich eine Darstellung der Abhängigkeit zwischen Schutzabstandsfaktor und dem Verhältnis von Toleranz zu Standardunsicherheit. Ab einem Verhältnis Toleranzfeldbreite zu Standardmessunsicherheit >5 kann der Faktor 1,65 verwendet werden [8, 10].

6. Zusammenfassung und Bedeutung für die Praxis

Die Bedeutung der Messunsicherheitsbestimmung hat seit dem Erscheinen der Standards zur Unsicherheit [2] und den Entscheidungsregeln [8, 9] kontinuierlich zugenommen. Durch den Übergang von der Überdeckungswahrscheinlichkeit des Messergebnisses zur Konformitätswahrscheinlichkeit in der ISO 14253-1 kann bei einem Verhältnis von $T/u > 5$ der Schutzabstand beziehungsweise der Unsicherheitsbereich verringert werden, so dass die zur Verfügung stehende Fertigungstoleranz größer wird und damit die Produktionskosten gesenkt wer-

den können. Bei den besonders herausfordernden Fertigungsprozessen mit kleinen Toleranzen, bei denen die Messunsicherheit in der Größenordnung der Toleranz liegt, nützt das allerdings nichts.

- [0] Weckenmann, A., Lorz, J.: Bedeutung der Messunsicherheit in der Fertigungsmess-technik, in: tm – Technisches Messen, Oldenbourg Industrieverlag, 68 (2001) 1 S. 33-39.
- [1] DIN ISO 8015 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln (English: Geometrical product specifications (GPS) - Fundamentals - Concepts, principles and rules) ISO 8015:2011; Deutsche Fassung EN ISO 8015:2011.
- [2] JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) 2008 (Internet 05.08.2019: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>)
- [3] Dutschke, W.: Zulässige Meßunsicherheit, wt-Z. ind. Fertigung, Jahrg. 59 (1969) 12, S. 630-632.
- [4] Phillips, S. D., Krystek, M.: (2014). Assessment of conformity, decision rules and risk analysis (Konformitätsbewertung, Entscheidungsregeln und Risikoanalyse), in: tm - Technisches Messen, 81(5), pp. 237-245. Retrieved 4 Apr. 2019, from doi:10.1515/teme-2014-1007.
- [5] A.I.A.G. (Automotive Industry Action Group) – Chrysler Corp., Ford Motor Co., General Motors Corp.: Measurement System Analysis (MSA), Reference Manual, 4. Auflage/Revision, Michigan, USA 2010.
- [6] Dietrich, E., Schulze, A.: Eignungsnachweis von Prüfprozessen, Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld, Carl Hanser Verlag, München 2017.
- [7] ISO/TR 14253-6 (ISO/TR 14253-6: 2012) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 6: Allgemeine Grundsätze für die Annahme und Zurückweisung von Messgeräten und Werkstücken (English: Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 6: Generalized decision rules for the acceptance and rejection of instruments and workpieces) 2012.

- [8] DIN EN ISO 14253-1 (ISO 14253-1: 2013 / 2018) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen (English: Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications) 2013 (Neue Ausgabe 2018).
- [9] JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment, JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) 2012 (Internet 05.03.2019: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>).
- [10] Sommerhuber, C.: Die Rolle der Messunsicherheit bei der Konformitätsbewertung, in: GPS-TAGUNG 2016, Effizienz- und Qualitätssteigerung mit den neuen ISO-GPS-Normen, 21. und 22. April 2016, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Messunsicherheit bei der Best-Einpassung von Lochbildern

Methoden zur Best-Einpassung und zur Unsicherheitsermittlung

Dr.-Ing. Michael Hernla, Dortmund

Kurzfassung

Zur Best-Einpassung der Position von Bohrungen in Lochbildern stehen drei Methoden zur Verfügung: Gauß, Minimax-Bedingung (Tschebyschew) und L1-Norm. Zur Ermittlung der Messunsicherheit gibt es bisher keine systematische Untersuchung. Hier werden ein analytischer Ansatz, die Differenzenmethode und die numerische Simulation (Monte Carlo) gegenübergestellt. Am Ende werden Empfehlungen für die Auswahl der geeigneten Methode abgeleitet.

Abstract

For the best-fit of hole positions in patterns three methods are available: Gauss, Minimax-Requirement (Chebycheff) and L1-Norm. The determination of the measurement uncertainty until today is not yet systematically surveyed. In this manuscript, an analytical approach, the differences method and the numerical simulation with Monte-Carlo-Methods are compared. At the end, recommendations for the selection of the methods are given.

1. Einleitung

Die Bestimmung der Position von Bohrungen in Lochbildern ist eine der häufigsten Messaufgaben in der industriellen mechanischen Fertigung – unabhängig vom Herstellverfahren. Ziel ist dabei die Erfüllung der Funktion, d.h. die Paarungs- oder Passfähigkeit mit einem oder mehreren Gegenstücken. Die geometrische Produktspezifikation wird auf der technischen Zeichnung vorgegeben. Grundsätzlich gibt es dafür zwei Möglichkeiten:

- Positionstoleranz nach ISO 1101 [1] mit einem Bezugssystem nach ISO 5459 [2]
- Kombinierte Toleranz ISO 5458 [3] ohne oder mit unvollständigem Bezugssystem

Die Positionstoleranz im Bezugssystem hat den Vorteil, immer eindeutige Messergebnisse zu liefern. Die Messunsicherheit kann nach den bekannten Methoden [4] [5] [6] [7] bestimmt werden. Die Funktionsanforderungen lassen sich aber in vielen Fällen besser durch die kombinierte Toleranz für ein Lochmuster beschreiben.

Die Ist-Positionen können mit verschiedenen Methoden zur Nennlage eingepasst werden:

- Kleinste Summe der Abweichungsquadrate, Best-Einpassung nach Gauß
- Kleinste maximale Abweichung, Minimum- oder Minimax-Bedingung nach Tschebyschew
- Kleinste Summe der Abweichungsbeträge, L1-Norm oder minimales Volumen

Alle drei Methoden liefern unterschiedliche Messergebnisse, die mehr oder weniger gut die Funktionseigenschaften beschreiben. Für jedes Messergebnis nach einer dieser Methoden muss aber auch eine Messunsicherheit angegeben werden. Hier sollen drei Möglichkeiten zur Unsicherheitsermittlung untersucht werden:

- Analytischer Ansatz analog zu [6] [7]
- Differenzenmethode nach DIN 1319 Teil 4 [8]
- Numerische Simulation nach GUM Supplement 1 (Monte-Carlo-Methode) [9]

Zudem wird die Anwendung der Methoden zur Best-Einpassung von Lochbildern diskutiert.

2. Positionstoleranzen mit Bezugssystem

Das Bild 1 a) zeigt ein einfaches Beispiel für die Tolerierung eines Lochmusters mit einer Positionstoleranz nach ISO 1101 [1] mit einem Bezugssystem nach ISO 5459 [2]. Die Ebene A sowie die beiden Bohrungen B und C bilden ein vollständiges Bezugssystem. Dabei bestimmt die Bohrung B den Ursprung des Bezugssystems in den beiden Koordinaten und C die Ausrichtung, d.h. die Drehung in der Ebene. Der Abstand der beiden Bohrungen ist variabel und deshalb mit Position in Richtung der direkten Verbindungsgeraden toleriert.

Die Wirkung der beiden Bezüge B und C ist im Bild 1 b) dargestellt. Der Abstand von C zu B ist variabel, aber nur in Richtung der direkten Verbindungsgeraden. Die anderen drei Bohrungen können dagegen in jeder beliebigen Richtung von Ihrer Nennlage abweichen. Deshalb ist hier die Position mit einer kreis- bzw. zylinderförmigen Toleranzzone toleriert (Bild 1 a).

Die Toleranzeingriffsetzung setzt voraus, dass das Gegenstück spielfrei in den beiden Bezügen aufgenommen wird. Ein Beispiel zeigt das Bild 1 c). Bei Kunststoff-Formteilen lässt sich das Prinzip leicht umsetzen, indem das Gegenstück z.B. scharfkantig und mit leichtem Übermaß ausgeführt wird und so in das Werkstück einscheidet. Die Praxis ist aber meist eine andere.

Der häufigste Funktionsfall ist, dass die beiden Bezüge zum Gegenstück Spiel haben und sich damit beide Teile auch in den Bezügen gegeneinander verschieben und verdrehen können. Das Spiel im Bezug B lässt sowohl eine horizontale Verschiebung der beiden Teile zueinander zu (Bild 2 a) als auch eine Drehung um den Bezug C (Bild 2 b). Zusätzlich erlaubt das Spiel im Bezug C eine Drehung um den Bezug B (Bild 2 c). Alle drei Wirkungen überlagern sich zu den resultierenden Toleranzzonen im Bild 2 d). Die Toleranzzone wird um so größer, je weiter die Nennlage von der Verbindungsgeraden B-C entfernt liegt.

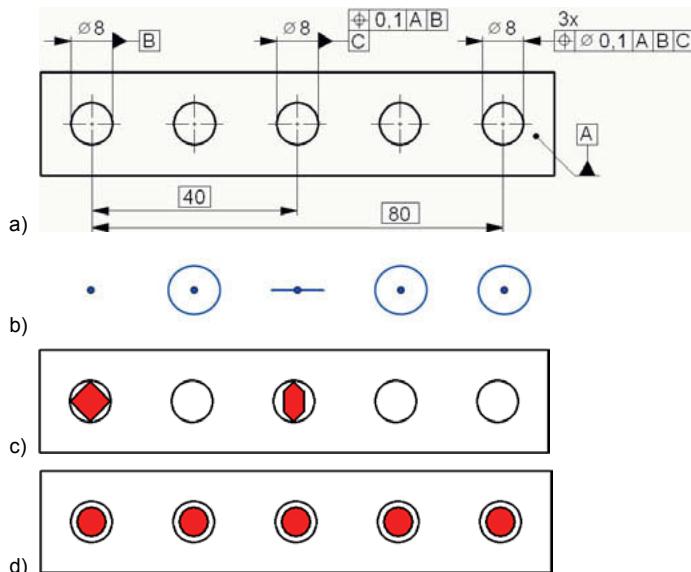


Bild 1: Positionstoleranz mit Bezugssystem; a) Zeichnungseintragung, b) Toleranzzonen, c) Gestaltung des Gegenstücks für die spielfreie Aufnahme, d) Paarung mit dem Gegenstück bei gleichem Spiel in allen Bohrungen

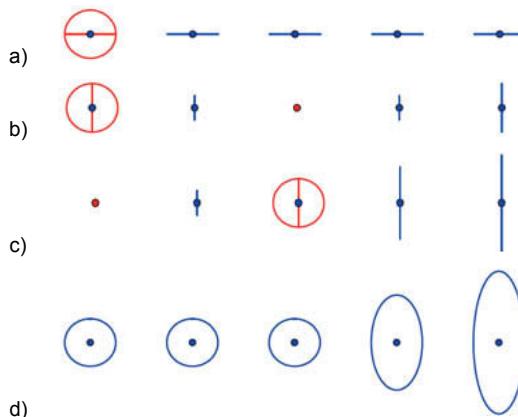


Bild 2: Wirkung der Spiels in den Bezügen; a) Horizontale Verschiebung mit Spiel im Bezug B, b) Drehung mit Spiel im Bezug B um Bezug C, c) Drehung mit Spiel im Bezug C um Bezug B, d) Resultierende Toleranzzonen

3. Positionstoleranzen ohne Bezugssystem

Das reicht allerdings nicht aus, um die Funktionsanforderungen zu beschreiben. Entsprechend der Gestaltung des Gegenstücks im Bild 1 d) müssten nämlich alle Abweichungen etwa auf derselben Seite der Toleranzzonen liegen wie im Bild 3 a). Dann lässt sich eine Position des Gegenstücks finden, in der alle Löcher passen. Liegt aber z.B. eine auf der anderen Seite (hier Bohrung 4), passt das Gegenstück nicht, obwohl alle Löcher in den resultierenden Toleranzzonen liegen, siehe Bild 3 b). Um die Pass- bzw. Paarungsfähigkeit der beiden Teile sicherzustellen, muss deshalb eine kombinierte Positionstoleranz mit dem Symbol "CZ" ohne Bezugssystem in die Zeichnung eingetragen werden, siehe Bild 3 c).

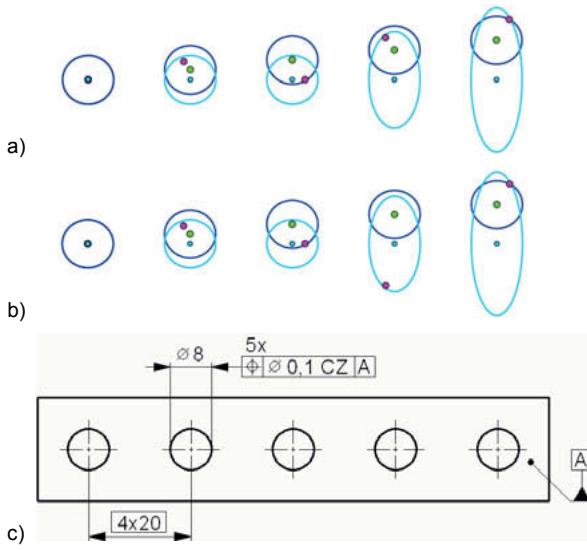


Bild 3: Resultierende Toleranzzone und Gegenstück; a) mit Abweichungen auf derselben Seite, b) mit einer Abweichung auf der anderen Seite, c) Kombinierte Toleranz

4. Best-Einpassung von Lochbildern

Die Ist-Positionen können nach verschiedenen mathematischen Methoden zur Nennlage eingepasst werden: Kleinste Summe der Abweichungsquadrate (Gauß), kleinste maximale Abweichung (Minimax, Tschebyschew) oder kleinste Summe der Abweichungsbeträge (L1-Norm). Alle drei Methoden führen zu unterschiedlichen Ergebnissen, siehe Bild 4. Welche Methode standardmäßig anzuwenden ist, legen weder ISO 5459 noch ISO 1101 fest. In der

letzteren Norm heißt es in 8.2.2.3.1 lediglich, dass die Minimax-Bedingung nicht nur für Form, sondern auch für andere geometrische Eigenschaften verwendet werden kann. Das bezieht sich jedoch nur auf einzelne geometrische Elemente, nicht auf Elementgruppen wie Lochbilder. Damit ist schon die Norm und in der Folge auch die Zeichnung nicht eindeutig.

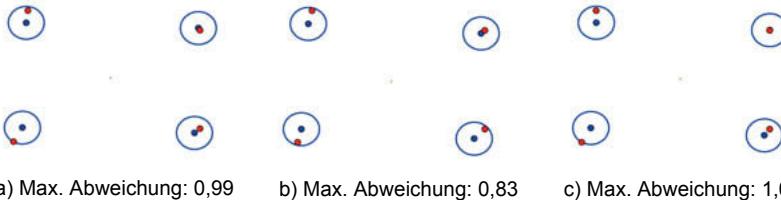


Bild 4: Best-Einpassung eines Lochbildes mit Toleranzzonen; a) Kleinste Summe der Abweichungsquadrate (Gauß), b) Kleinste maximale Abweichung (Minimax, Tscheby- schew), c) Kleinste Summe der Abweichungsbeträge (L1-Norm)

Die Minimax-Bedingung liefert die kleinste Abweichung, d.h. sie ist am besten geeignet, die Paarungsfähigkeit des Werkstücks zu bewerten. In der Praxis wird meist nach Gauß eingepasst, weil die Methode mathematisch am einfachsten handhabbar ist und erfahrungsgemäß zu den kleinsten Messunsicherheiten führt. Die L1-Norm liefert die größten Abweichungen und ist damit am wenigsten geeignet, die Funktion anzubilden.

5. Best-Einpassung nach Gauß

Das Prinzip ist denkbar einfach: Es wird die Verschiebung des Schwerpunktes der Ist-Positionen (P) zu den Nennlagen (N) aller i Bohrungsmittelpunkte (Anzahl n) in den zwei Koordinaten ermittelt, und zusätzlich die Drehung des Lochmusters um diesen Schwerpunkt. Für die beiden Koordinatendifferenzen ΔX und ΔY sowie die Winkeldifferenz ΔW gilt:

$$\Delta X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{Pi} - x_{Ni} \quad \Delta Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{Pi} - y_{Ni} \quad \Delta W = \frac{\sum_{i=1}^n (w_{Pi} - w_{Ni}) * r_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (1)$$

Dabei sind r_i die radialen Abstände der einzelnen Bohrungsmitten von ihrem Schwerpunkt. Sind die beiden Mittelpunktkoordinaten der Bohrungen unabhängig voneinander und ihre Standardunsicherheiten jeweils gleich groß ($u_{xi}=u_{yi}=u_{Mi}$), gilt für die drei Messgrößen:

$$u_{\Delta XS} = u_{\Delta YS} = u_{MS} = \sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n u_{Mi}^2} \quad \text{und} \quad u_{\Delta W} = \frac{u_{MS}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2}} \quad (2)$$

Je mehr Bohrungen zu dem Lochmuster gehören, desto kleiner werden die Unsicherheiten. Alternativ kann die Unsicherheit auch durch numerische Simulation [9] oder nach DIN 1319 Teil 3 Anhang B [8] ermittelt werden. Sie soll hier als Differenzenmethode bezeichnet werden. Danach werden die Eingangsgrößen (hier die X- und Y-Koordinaten der einzelnen Bohrungsmittelpunkte) einzeln nacheinander um einen definierten Betrag Δx_i vergrößert und verringert, und die resultierenden Abweichungen der Messgrößen werden ausgewertet. So lassen sich nicht nur die Standardunsicherheiten, sondern auch die Kovarianzen bzw. Korrelationskoeffizienten der Messgrößen berechnen. Die Differenzenmethode arbeitet wesentlich schneller als die numerische Simulation, weil es für jede Eingangsgröße X_i nur zwei Werte gibt: $x_i + \Delta x_i$ und $x_i - \Delta x_i$. Alle drei Methoden liefern dieselben Unsicherheiten.

Zusätzlich lassen sich mit der Differenzenmethode die Sensitivitätskoeffizienten c_i und die Unsicherheitsbeiträge $u_i(y)$ der einzelnen Bohrungsmittelpunktkoordinaten bestimmen. Dazu wird die Änderung Δy_i der Messgröße Y ins Verhältnis gesetzt zu der ursächlichen Änderung Δx_i der jeweiligen Eingangsgröße X_i . An die Stelle des Differentialquotienten $\delta y / \delta x_i$ tritt der Differenzenquotient:

$$c_i = \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \quad \text{und} \quad u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (3)$$

Für den bei Gl. (2) angegebenen Sonderfall sind die Kovarianzen null, und der Streubereich des Schwerpunktes ist ebenfalls kreisförmig (Bild 5). Die Streubereiche der Mittelpunkte des eingepassten Lochmusters sind ellipsenförmig und tangential um den Schwerpunkt orientiert. Die großen Halbachsen werden mit wachsendem Abstand vom Schwerpunkt größer.

Damit lässt sich die Unsicherheit des größten Abstandes berechnen, hier bei der Bohrung links unten. Sie hängt offensichtlich von der Richtung der Abweichung und der Orientierung der Streuungsellipse ab. In radialer Richtung zum Schwerpunkt ist die Standardunsicherheit gleich der des Schwerpunktes u_{MS} aus Gl. (2). Tangential hängt sie zusätzlich vom Abstand r der Bohrung vom Schwerpunkt ab (Bild 5 b). Zur Vereinfachung kann mit der größten Unsicherheit u_{\max} entsprechend der große Halbachse der Streuungsellipse gerechnet werden. Diese sind im Bild 5 als Kreise mit dünnen Linien dargestellt:

$$u_{\max} = u_{MS} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^2} \quad \text{mit} \quad \bar{r} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (4)$$

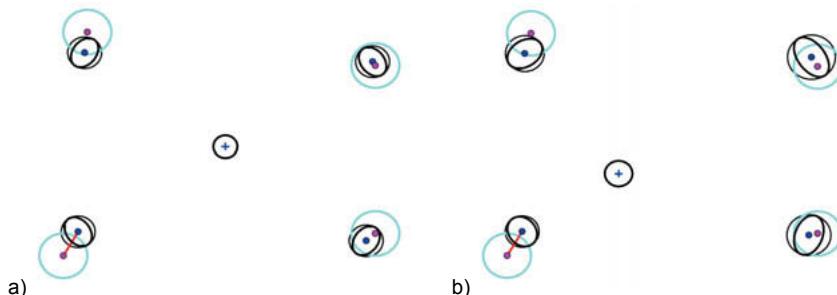


Bild 5: Best-Einpassung nach Gauß mit den Streubereichen der Mittelpunkte (hell), des Schwerpunktes und des eingepassten Lochmusters (dunkel) mit dem größtem Abstand; a) Einpassung mit vier Bohrungen, b) Einpassung mit drei Bohrungen

Bei der Modellbildung ist zu beachten, dass Koordinaten und Drehwinkel des Lochmusters aus den Ist-Positionen der Bohrungen berechnet wurden. Die Größen sind also voneinander abhängig, und die Unsicherheiten werden kleiner als bei unabhängiger Betrachtung.

6. Best-Einpassung nach Tschebyschew

Bei der Best-Einpassung werden drei Parameter ermittelt, zwei Schwerpunktkoordinaten und ein Winkel. Deshalb sind mindestens drei Bohrungen erforderlich, um drei Abweichungen zu berechnen. Zielfunktion ist die kleinste maximale Abweichung. Das bedeutet, dass dann die Abweichungen bei drei Bohrungen gleich groß sind (Bild 6). Die anderen Bohrungen spielen keine Rolle. Der Schwerpunkt und das eingepasste Lochmuster weisen ausgeprägte Streuungsellipsen auf, d.h. die Unsicherheiten sind stark richtungsabhängig. Hier wirken sich die Position der Bohrungen und die Richtung der Abweichungen aus.

Nach DIN 1319-3 sollen die Eingangsgrößen um einen Betrag Δx_i entsprechend der halben Standardunsicherheit $u(x_i)$ variiert werden [8]. Damit ergeben sich jedoch zu große Unsicherheiten, wenn die Modelfunktion nicht linear ist. Im Vergleich mit der numerischen Simulation hat sich die dreifache Standardunsicherheit $\Delta x_i = 3 \cdot u(x_i)$ als zweckmäßig herausgestellt.

Die Streuungsellipsen aus der Differenzenmethode und aus der Simulation sind im Bild 6 dargestellt. Beide sind stark richtungsabhängig, wobei sowohl die Lage der Bohrung als auch die Richtung der Abweichung eine Rolle spielen. Die Unterschiede sind sichtbar, aber als Näherung ist die Differenzenmethode gut geeignet. Die großen Halbachsen der Streuungsellipsen werden mit wachsendem Abstand vom Schwerpunkt größer (Bild 6 b).

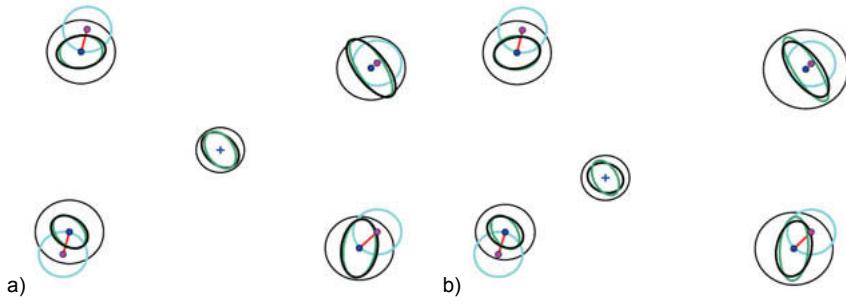


Bild 6: Best-Einpassung nach Tschebyschew mit den Streubereichen der Mittelpunkte (hell), des Schwerpunktes und des eingepassten Lochmusters, jeweils mit der Differenzenmethode (mittel) und aus der Simulation (dunkel);
 a) Schwerpunkt aus vier Bohrungen, b) Schwerpunkt aus drei Bohrungen

Die maximalen Standardunsicherheiten lassen sich wieder richtungsunabhängig mit Gl. (4) empirisch nach oben abschätzen. Hier wird für u_{MS} die mittlere Standardunsicherheit u_M der drei Bohrungsmittelpunkte eingesetzt, die für die Best-Einpassung benutzt wurden:

$$u_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{Mi}^2} \quad (5)$$

Die maximalen Standardunsicherheiten sind im Bild 6 als Kreise mit dünnen Linien um die Streuungsellipsen dargestellt.

7. Best-Einpassung nach L1-Norm

Hier tragen alle Bohrungen zur Best-Einpassung bei. Bei der Differenzenmethode wurde ein geringerer Einfluss des Variationsbetrages Δx festgestellt. Mit der dreifachen Standardunsicherheit $\Delta x_i = 3 \cdot u(x_i)$ sind die Ergebnisse relativ nahe an der Simulation.

Die Streuungen des Schwerpunktes und des eingepassten Lochmusters weisen wieder ein ausgeprägtes Richtungsverhalten auf (Bild 7). Auch hier wirken sich die Position der Bohrungen und die Richtung der Abweichungen aus, aber anders als in den Bildern 5 und 6.

Die Streuungen sind wieder stark richtungsabhängig, wobei sowohl die Lage der Bohrung als auch die Richtung der Abweichung eine Rolle spielen. Im Unterschied zu den anderen Einpassmethoden werden die Unsicherheiten mit zunehmender Nähe zum Schwerpunkt der Bohrungsmittelpunkte größer (Bild 7 b). Sie sind aber mindestens so groß wie die Standardunsicherheiten der einzelnen Bohrungsmittelpunkte.

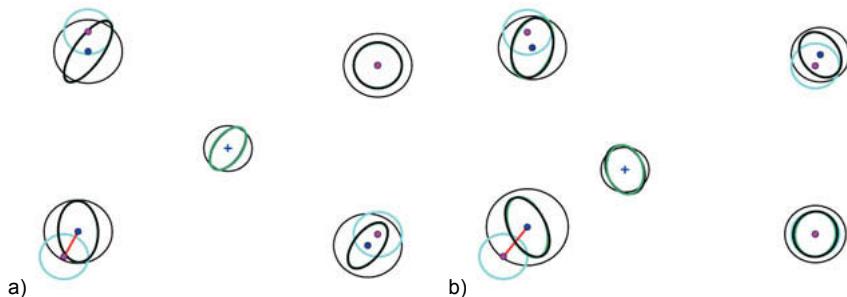


Bild 7: Best-Einpassung nach L1-Norm mit den Streubereichen der Mittelpunkte (hell), des Schwerpunktes und des eingepassten Lochmusters, jeweils mit der Differenzenmethode (mittel) und aus der Simulation (dunkel);
a) Schwerpunkt aus vier Bohrungen, b) Schwerpunkt aus drei Bohrungen

Die maximalen Standardunsicherheiten lassen sich wieder richtungsunabhängig empirisch nach oben abschätzen. Hier wird für u_M die mittlere Standardunsicherheit aller Bohrungsmittelpunkte nach Gl. (4) sowie der mittlere Radius \bar{r} nach Gl. (4) eingesetzt:

$$u_{\max} = u_M \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\bar{r}}{r}\right)^2} \quad (6)$$

Die maximalen Standardunsicherheiten sind im Bild 6 als Kreise mit dünnen Linien um die Streuungsellipsen dargestellt.

8. Diskussion

Die Untersuchung der Messunsicherheiten bestätigt die Erfahrung, dass die Best-Einpassung nach Gauß (Methode der kleinsten Quadrate) die kleinsten Messunsicherheiten liefert. Je mehr Elemente beteiligt sind, desto kleiner wird die Messunsicherheit. Allerdings sind die Abweichungen größer als bei der Einpassung nach Tschebyschew (Methode der kleinsten maximalen Abweichung, Minimax-Bedingung). Es kann also vorkommen, dass die Einpassung nach Gauß eine Toleranzüberschreitung anzeigt, die Teile aber trotzdem passen. Die L1-Norm mit den größten Abweichungen ist gar nicht zu empfehlen.

In Zeichnungen werden häufig Positionstoleranzen mit Bezugssystemen wie im Bild 1 a) eingetragen. Damit lassen sich die Abweichungen eindeutig bestimmen, z.B. um die Fertigung zu korrigieren. Das entspricht aber nicht der Funktion, wenn es bei den Bezügen Spiel zum Gegenstück gibt. Dieses wird bei der Bewertung der Abweichungen in der Regel nicht berücksichtigt, d.h. es werden passende Teile fälschlich als fehlerhaft bewertet.

Bei Eintragung einer kombinierten Toleranz nach Bild 2 c) stehen für alle fünf Bohrungen kreisförmige Toleranzzonen zur Verfügung (Bild 2 a) und b) und nicht nur drei wie beim Bezugssystem (Bild 1 b). Die Gesamtfläche der Toleranzfelder wird also deutlich größer, und es gibt mehr Werkstücke innerhalb der Toleranz.

Im Sinne einer wirtschaftlichen Fertigung und Qualitätsprüfung kann man die Anteile der Werkstücke ermitteln, die entweder aufgrund der eingeschränkten Toleranzzonen bei der Messung im Bezugssystem oder aufgrund der größeren Abweichung bei Anwendung der Gauß-Methode gegenüber der Minimax-Bedingung fälschlich als fehlerhaft bewertet werden. Die Frage lässt sich wieder mittels numerischer Simulation anhand des Beispiels aus Bild 1 bzw. 2 untersuchen. Dabei werden auf alle Fälle von Toleranzüberschreitungen im Bezugssystem nach Bild 1 b) noch einmal die Best-Einpassungen nach Gauß und nach Tschebyschew angewendet.

Bei der Simulation wurden verschiedene Verteilungen für die Abweichungen in den einzelnen Koordinaten untersucht, siehe Tabelle 1. Bei der Arcsin- und der Rechteckverteilung entspricht die Grenze des Streubereiches der Toleranzgrenze $T/2$. Bei der Normalverteilung wurden verschiedene Verhältnisse der Standardunsicherheit u zur Toleranzgrenze $T/2$ benutzt. Der letzte Wert $u = T/6$ entspricht in der Fertigung einem Prozessfähigkeitsindex c_p bzw. c_{pk} von 1,00 und kommt deshalb der Realität in der Serienfertigung am nächsten.

Tabelle 1: Anteile von Toleranzüberschreitungen aus der Simulation für die Einpassung nach Gauß bzw. Tschebyschew, wenn die Toleranzen im Bezugssystem überschritten sind (100 %)

Verteilung	Standardabweichung	Einpassung nach Gauß	Einpass. nach Tschebyschew
Arccsin	$u = T/2 / \sqrt{2}$	47 %	15 %
Rechteck	$u = T/2 / \sqrt{3}$	27 %	3 %
Normal	$u = T/2$ $u = T/4$ $u = T/6$	78 % 27 % 7 %	61 % 7 % 0,4 %

In allen Fällen ist der Verbesserungseffekt bei der Best-Einpassung nach Gauß gegenüber der Auswertung im Bezugssystem deutlich größer als bei Anwendung der Minimax-Methode gegenüber Gauß.

Die Zahlenangaben beziehen sich ausdrücklich auf das Beispiel. Der Verbesserungseffekt nimmt tendenziell mit zunehmender Anzahl von Bohrungen ab, weil dann der Anteil der Toleranzzonen der Bezüge an der Gesamtfläche der Toleranzfelder kleiner wird.

9. Zusammenfassung

Die Zeichnungseintragung von Positionstoleranzen mit Bezugssystem entspricht dann nicht der Funktion, wenn es bei den Bezügen Spiel zum Gegenstück gibt. Dann können die Teile ihre gegenseitige Lage auch in den Bezügen ausgleichen. Diese Funktion wird besser durch eine kombinierte Toleranz (schwimmendes Lochmuster) beschrieben.

In diesem Fall müssen die Ist- zu den Nennpositionen der Bohrungen eingepasst werden. Dafür stehen drei gängige Methoden zur Verfügung, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen: Gauß, Tschebyschew und L1-Norm. Eine Standardfestlegung gibt es nicht.

Zur Ermittlung der Unsicherheit stehen prinzipiell drei Methoden zur Verfügung: Analytisch, Differenzenmethode und Numerische Simulation. Die beiden letzteren liefern ähnliche Ergebnisse, wenn bei der Differenzenmethode die Werte der Eingangsgrößen um den dreifachen Betrag der Standardunsicherheit variiert werden. Zusätzlich lassen sich damit die Sensitivitätskoeffizienten und die Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Bohrungsmittelpunktkoordinaten berechnen. Die Messunsicherheit der Gauß-Einpassung lässt sich leicht berechnen. Für die beiden anderen Methoden wurden einfache empirische Näherungen für die betriebliche Praxis vorgestellt.

Die Gauß-Methode liefert immer die kleinsten Messunsicherheiten und wird deshalb empfohlen. Die größeren Abweichungen gegenüber der Minimax-Methode nach Tschebyschew führen zu einem gewissen Anteil von Werkstücken, die allein aufgrund dessen als (fälschlich) fehlerhaft bewertet werden. Dieser ist jedoch deutlich kleiner als der (fälschliche) Fehleranteil aufgrund des nicht ausgenutzen Spiels in den Bezügen bei der Messung im Bezugssystem gegenüber der Einpassung nach Gauß.

10. Literatur

- [1] DIN EN ISO 1101: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Beuth Verlag Berlin 2017
- [2] DIN EN ISO 5459: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme. Beuth Verlag Berlin 2013
- [3] DIN EN ISO 5458: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Elementgruppen und kombinierte geometrische Spezifikation. Beuth Verlag Berlin 2018
- [4] VDI/VDE 2617 Blatt 7: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation. Beuth Verlag Berlin 2008
- [5] VDI/VDE 2617 Blatt 8: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten. Beuth Verlag Berlin 2018
- [6] VDI/VDE 2617 Blatt 11: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen. Beuth Verlag Berlin 2011
- [7] Hernla, M.: Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen. Ermittlung der aufgaben-spezifischen Messunsicherheit durch Unsicherheitsbilanzen. expert verlag Renningen 2016
- [8] DIN 1319 Teil 3: Grundlagen der Messtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße; Messunsicherheit. Beuth Verlag Berlin 1996
- [9] JCGM 101: Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo Method. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres 2008

Oberflächenformmodelle mechanisch bearbeiteter Werkstücke für die Messunsicherheitsbestimmung mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät

M. Sc. Thomas Kistner, Dr.-Ing. Dietrich Imkamp,
ZEISS IQS, Oberkochen

Kurzfassung

Zur Erweiterung des virtuellen Koordinatenmessgeräts hinsichtlich der Beurteilung der Wirkung der Messstrategie auf die Messunsicherheit sind geeignete Oberflächenmodelle erforderlich. Diese Modelle repräsentieren die zu messende Oberfläche und können anhand von Fertigungsgaben oder Referenzmessungen erstellt werden.

Abstract

The extension of the virtual coordinate measuring machine regarding the evaluation of measuring strategy's effect on the uncertainty succeeds with the provision of suitable surface models. These models represent the surface to be measured and can be created on the basis of manufacturing data or reference measurements.

1. Einleitung

Die Koordinatenmesstechnik wird im Rahmen der Qualitätsprüfung zur dimensionellen Messung von Werkstücken eingesetzt. Dabei umfasst der Begriff Koordinatenmesstechnik alle Messverfahren, welche durch Koordinatenpunkte das zu messende Objekt im Raum erfassen [1]. Der kartesische Aufbau klassischer Koordinatenmessgeräte führte dazu, dass sich die erfassten Koordinaten vorwiegend auf ein kartesisches Koordinatensystem beziehen. Die Erfassung der Punkte erfolgt bei taktilen Messungen meist mit einem kugelförmigen Antastelement. Dieses berührt das Werkstück mit einer vordefinierten Messkraft und erkennt beim Erreichen dieser Messkraft den Kontakt zwischen Werkstück und Antastelement als Messpunkt. Hinsichtlich der Erfassungsstrategie wird zwischen dem Einzelpunktmodus und dem Scanningmodus unterschieden. Beim Einzelpunktmodus werden die Messpunkte durch eine An-

tastung an einer definierten Stelle erfasst. Der bestehende Kontakt mit dem Werkstück während der Punktaufnahme wird nach der Punkterfassung durch die Steuerungssoftware gelöst. Im Scanningmodus hingegen bleibt das Antastelement kontinuierlich in Kontakt mit dem zu messenden Werkstück. Dabei verfährt es entlang einer vordefinierten Messbahn und nimmt mit einer einstellbaren Erfassungsrate Messpunkte auf. Unabhängig von der Erfassungsweise wird aus den erfassten Messpunkten durch Ausgleichsrechnung das assoziierte Element und damit das Ergebnis einer Messung berechnet. Aufgrund dieses Ergebnisses kann die Qualität des gemessenen Objekts bewertet werden. Meist wird dabei der Messwert mit dem Sollwert aus einer technischen Zeichnung verglichen.

Die Korrektur von Abweichungen eines Messergebnisses ist nur bedingt möglich. Der Messwert besteht aus dem wahren Wert, sowie zufälligen und systematischen Abweichungen. Im Gegensatz zu den systematischen Abweichungen sind zufällige Abweichungen nicht korrigierbar. Systematische Komponenten können hingegen ausgeglichen werden. Die Voraussetzung hierbei ist allerdings die Kenntnis über den Messvorgang und seine Einflussparameter. Anhand dieser Informationen kann die Unsicherheit berechnet werden, um welche der Messwert zum sogenannten vollständigen Messergebnis erweitert werden kann.

Die Messunsicherheit spielt eine entscheidende Rolle in Forschung und Industrie. Einerseits wird die Kenntnis über die eigenen Prozesse und deren Fähigkeit in Qualitätsrichtlinien gefordert. Hierbei ist die Messunsicherheit ein Indikator für deren Beurteilung. Andererseits kann die Kenntnis über die Messunsicherheit, vor allem über die Größenordnung der einzelnen Parameter, zur Verbesserung von Messprozessen genutzt werden.

Die Berechnung der Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen kann mit verschiedenen Methoden erfolgen [2]. Die folgende Darstellung beschränkt sich auf die Bestimmung der Messunsicherheit durch Simulation. Diese Art der Messunsicherheitsermittlung basiert auf der umfassenden Modellierung der Messaufgabe. Hierbei löst die Simulation das Problem der komplexen Überlagerung verschiedener Einflussgrößen unter Zuhilfenahme der Wahrscheinlichkeitstheorie [3]. Für das Koordinatenmessgerät wird diese Methodik durch das virtuelle Koordinatenmessgerät (kurz: „VCMM“ für Virtual Coordinate Measuring Machine) als Softwarelösung umgesetzt [4].

Eine erste Version der, maßgeblich durch die PTB entwickelten, Software befindet sich seit 2004 in Forschung und Industrie im Einsatz. Sie wird hauptsächlich in Kalibrierlaboratorien eingesetzt. Eine zweite Version dieser Software wurde im Jahr 2018 fertiggestellt. Diese Weiterentwicklung ermöglicht unter anderem die Messunsicherheitsbetrachtung von Scanningmessungen und Messaufgaben mit verschiedenen Tastersystemen [2].

Durch die Integration der Simulation in die Messsoftware der Hersteller können bestehende Messprogramme im Anschluss an die Messung oder zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt mit dem virtuellen Koordinatenmessgerät ausgewertet werden. Begleitend zum Messwert wird die von der Software berechnete aufgabenspezifische Messunsicherheit im Protokoll der Messung ausgegeben. Die Parametrisierung der gerätespezifischen Einflussgrößen erfolgt bei der Installation des VCMM am Messgerät. Diese Größen, wie zum Beispiel die Restabweichungen der Führungsbahnen, müssen bei Änderungen am Gerät aktualisiert werden, da ansonsten die Aussagekraft des virtuellen Koordinatenmessgerät nicht mehr gegeben ist. Messaufgabenspezifische Einflussgrößen werden von dem Anwender direkt vor der Messung erfasst und durch die Software automatisch parametrisiert.

Eine messaufgabenspezifische Einflussgröße ist die Oberflächenrauheit und -welligkeit, die letztlich nur durch eine, für die Koordinatenmesstechnik hohe Anzahl von Messpunkten vollständig erfassbar ist. Der Punktabstand muss für die Erfassung vom Übergang der Rauheit zu den Anteilen mit noch kürzeren Wellenlängen ausreichend sein. Mit dieser Messstrategie wird eine ausreichende Strukturauflösung (Punktabstand $< \lambda$ Grenzwellenlänge des kurzweligen Profilfilters nach [5]) erzielt. Diese Anforderung erfordert einen Messpunktabstand in der Größenordnung von wenigen Mikrometern.

Um für den praktischen Einsatz die Anzahl der Messpunkte zu begrenzen, und die Reproduzierbarkeit der Messung zu steigern, wird durch die punktgenaue Festlegung der Messstrategie als Teil der Messaufgabendefinition der Einfluss der Oberflächenform inklusive der Oberflächenwelligkeit (gesamtes Spektrum der Oberflächenformabweichungen gemäß Bild 8 in [6]) eliminiert. Dieses Vorgehen ist beim Kalibrieren von Normalen zweckmäßig und etabliert. Bei der Messung von Werkstücken, bei denen die unvollständige Erfassung der Oberfläche durch eine begrenzte Messpunktanzahl („Unterabtastung“) zur Messunsicherheit beiträgt, ist das allerdings nicht zielführend.

2. Beitrag der Unterabtastung zur Messunsicherheit

Bei der Betrachtung der Unterabtastung vergleicht man zwei Messstrategien miteinander. Ausgangspunkt ist hierbei die vom Anwender als Standard gewählte Messstrategie. Die Erfassung der Werkstückoberfläche erfolgt mit dem in der Standardstrategie festgelegten Messpunktabstand. Dabei wird, in Abhängigkeit der Geometrie des verwendeten Tastobjekts, das Oberflächenprofil einer Werkstückoberfläche erfasst. Zur Schaffung eines Referenzwerts am betrachteten Oberflächenprofil erfolgt die Abtastung der Werkstückoberfläche mit einem geringeren

Messpunktabstand im Vergleich zur Standardstrategie. Um die Messstrategie der Werkstückoberfläche auf eine mögliche Unterabtastung und den damit einhergehenden Verlust an Informationen zu überprüfen, vergleicht man die erfasste Formabweichung des Oberflächenprofils beider Messstrategien miteinander. Ist die Formabweichung der Standardstrategie geringer als die erfasste Formabweichung der Referenzstrategie, findet eine Unterabtastung statt. Die Differenz beider Formabweichungen wird als Beitrag zur Messunsicherheit verrechnet [7]. Bild 2.1 zeigt den beschriebenen Vorgang in einer schematischen Darstellung. Hierbei sind die verschiedenen Abtastraten nebeneinander dargestellt. Beim ursprünglichen Formmodell handelt es sich in diesem Beispiel um eine Sinusfunktion, bei der Amplitude und Wellenlänge jeweils 6 µm betragen. Die Messung mit der Referenzstrategie gibt nicht mehr jede einzelne Welle wieder, die Amplitude ist dennoch vollständig erfasst. Bei der Standardstrategie wird eine Formabweichung von 5,5 µm erfasst. Die Unterabtastung, durch die nicht ausreichende Messstrategie beträgt somit in diesem Fall 0,5 µm und fließt als zusätzlicher Beitrag in die Messunsicherheitsberechnung durch das virtuelle Koordinatenmessgerät ein.

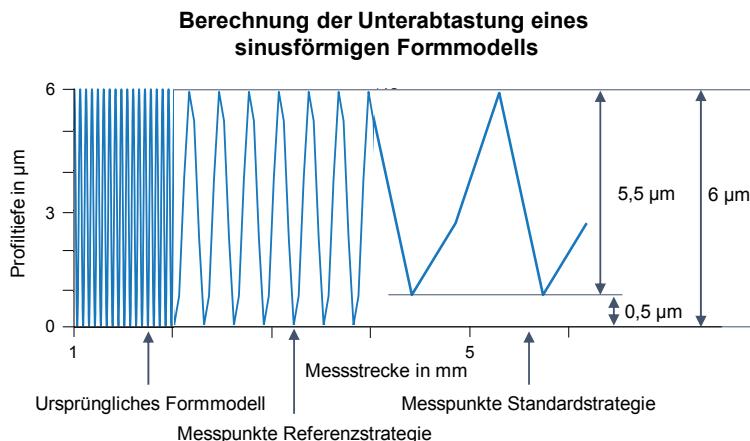


Bild 2.1: Schematische Darstellung der Unterabtastung

Bei Messaufgaben, welche hinsichtlich Durchlaufzeit durch eine geringere Punktedichte und damit höhere Scanning-Geschwindigkeit optimiert werden, kann somit der Verlust an Information durch die Optimierungsaufgabe berücksichtigt werden. Das VCMM ermöglicht somit die Abschätzung bis zu welchem Punkt der Verlust an Information durch eine geringere Abtastrate für den Anwender akzeptabel ist.

3. Messstrategie und Werkstückoberfläche

Die Größe des Tastobjekts stellt einen wesentlichen Einflussfaktor bei der Messung mechanisch bearbeiteter Werkstücke dar. Durch die mechanische Filterwirkung bei der taktilen Abtastung mit einem kugelförmigen Tastobjekt werden die Werkstückoberflächen nicht mehr vollständig erfasst. Verschiedengroße Antastelemente erfassen die Werkstückoberfläche in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Bei Messungen mit kleinen Tastkugeldurchmessern erfolgt eine detailliertere Erfassung der Werkstückoberfläche als bei Messungen mit großen Tastkugeldurchmessern. Daraus resultieren verschiedengroße erfassbare Formabweichungen in Abhängigkeit vom Tastkugeldurchmesser und von der Geometrie der Werkstückoberfläche. Bild 3.1 stellt ein Drehprofil mit dem Mittenrauwert $R_a = 2,5 \mu\text{m}$ dar. Die Abtastung erfolgt mit einer Tastkugel mit dem Durchmesser 1 mm. Die Schrittweite beträgt $0,1 \mu\text{m}$. Die hohe Abtastrate bewirkt die Erfassung sämtlicher Oberflächencharakteristiken, soweit sie mit dem Tastobjekt erreichbar sind. Bei der Messung mit einem Tastkugeldurchmesser von 1 mm beträgt die erfasste Formabweichung $4,8 \mu\text{m}$. Verglichen mit dem Ausgangsprofil mit einer Profiltiefe von $12,8 \mu\text{m}$ erfolgt eine Erfassung von 38 % der Profiltiefe, da nur die Profilspitzen angetastet werden. Die aus dem mit der 1mm Kugel bestimmten Profil berechnete Ausgleichsgerade ist um $4 \mu\text{m}$ gegenüber der Ausgleichsgerade des ursprünglichen Profils gegen die Antastrichtung verschoben.

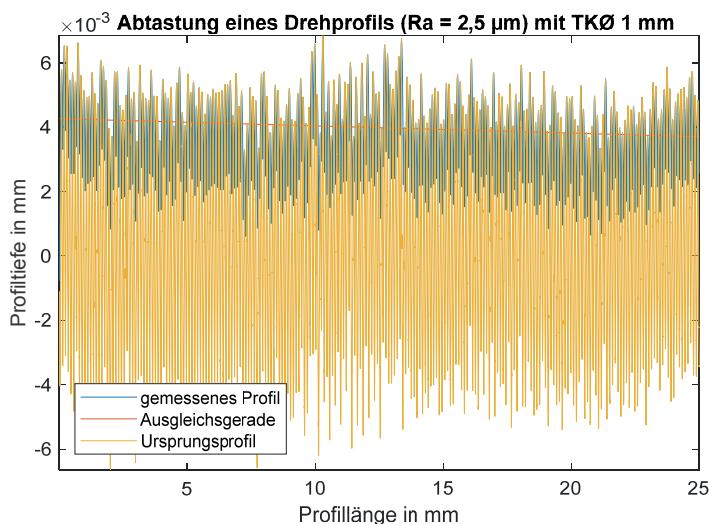


Bild 3.1: Drehen $R_a 2,5 \mu\text{m}$ - $TKØ 1 \text{ mm}$

Bei der Messung mit einem Tastkugeldurchmesser von 8 mm, dargestellt in Bild 3.2, beträgt die erfasste Formabweichung nur noch 2,5 μm . Man erkennt, dass das Profil nur noch an den Profilspitzen erfasst wird. Im Vergleich mit dem Ausgangsprofil wird nur noch knapp 20 % der ursprünglichen Profiltiefe erfasst. Die Lage der Ausgleichsgerade verschiebt sich nach oben und liegt um 1 μm parallel versetzt zur Ausgleichsgerade der Messung mit der 1 mm Tastkugel. Es verändert sich also nicht nur die erfasste Profiltiefe der Werkstückoberfläche, sondern auch die Lage des assoziierten Ausgleichelements.

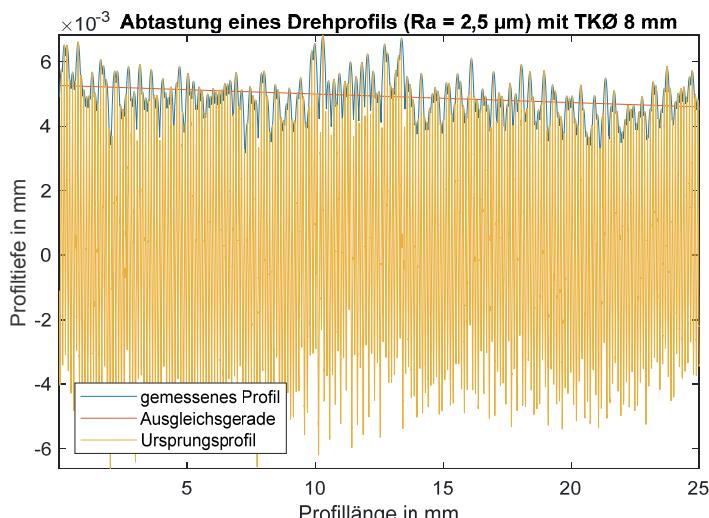
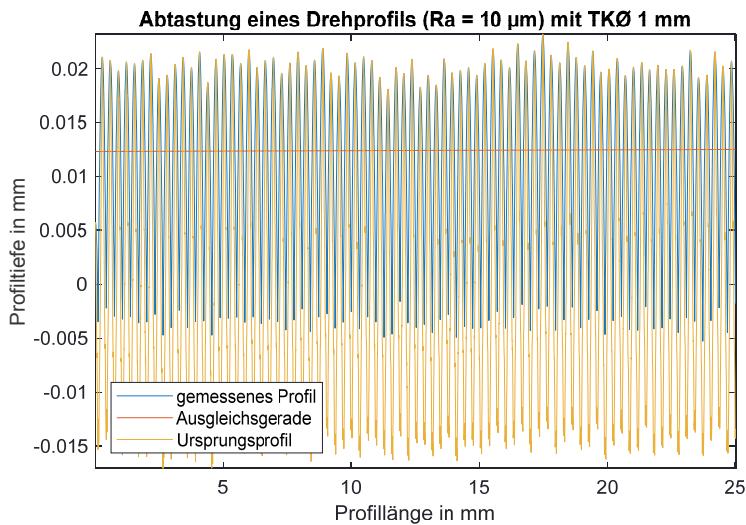
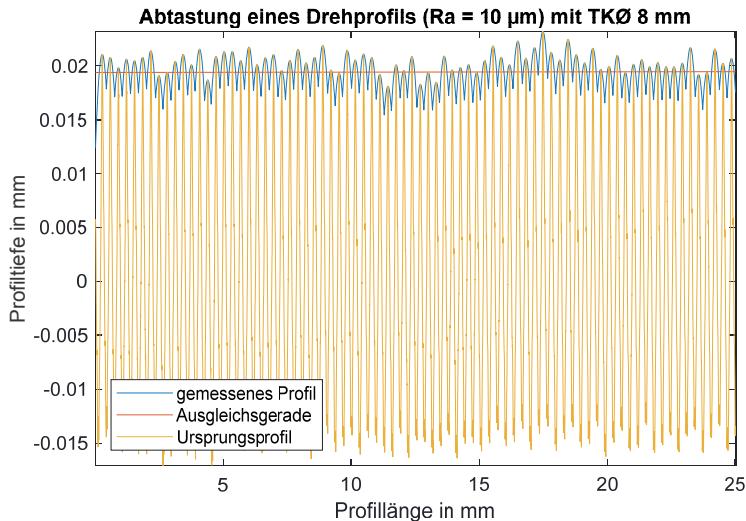


Bild 3.2: Drehen $\text{Ra} = 2,5 \mu\text{m}$ - $\text{TKØ} = 8 \text{ mm}$

Der Effekt zeigt sich verstärkt bei Oberflächenprofilen mit einer deutlich ausgeprägten Oberflächenstruktur. Bild 3.3 und 3.4 zeigen die mit kugelförmigen Tastobjekten erfasste Geometrie einer gedrehten Werkstückoberfläche mit dem Mittenrauwert $\text{Ra} = 10 \mu\text{m}$ und einer gemessenen Profiltiefe von 37 μm . Bei der Messung mit einem Tastkugeldurchmesser von 1 mm ist hier fast die vollständige Erfassung des Profils gegeben. Die aufgrund der unterschiedlichen Größe des Antastelements entstehende Differenz bei der Profilerfassung ist hier stärker ausgeprägt als beim feineren Drehprofil. Mit einem kleinen Taster wird eine Profiltiefe von 25 μm erfasst. Dies entspricht der Erfassung von knapp 2/3 der vorhandenen Profiltiefe. Der 8 mm-Taster erfasst nur eine Profiltiefe von circa 5 μm . Die erfassten Differenzen zeigen wie bedeutsam die Wahl des passenden Antastelements für die Erfassung der Werkstückoberfläche und die anschließende Interpretation des Messergebnisses ist.

Bild 3.3: Drehen $R_a 10 \mu\text{m}$ - $TK\varnothing 1 \text{ mm}$ Bild 3.4: Drehen $R_a 10 \mu\text{m}$ - $TK\varnothing 8 \text{ mm}$

4. Verschiedene Modellierungsarten

Die, bei der Betrachtung der Unterabtastung im virtuellen Koordinatenmessgerät verwendete, Modellierung einer Werkstückoberfläche basiert auf sich überlagernden Sinuswellen [2]. Die Informationen zur Formabweichung der Werkstückoberfläche kommen aus der technischen Zeichnung oder aus Erfahrungswerten zustande. Die sich überlagernden Wellen werden durch konstante Werte für Amplitude, Phase und Wellenlänge definiert. Jedem Parameter ist im VCMM ein zufälliger Beitrag zugeordnet, so dass die simulierte Oberflächenform für jeden Simulationsschritt in ihren Grenzen variiert wird. In Bild 3.2 ist beispielhaft ein Sinusmodell aus der sich überlagernden Wellen mit unterschiedlichen Werten für Amplitude, Phase und Wellenlänge dargestellt. Die Erfassung des Modells erfolgt entsprechend der im Messprogramm vorgegebenen Abtastrate. Aus den Messpunkten berechnet sich die erfasste Formabweichung. Die Größe des Antastelements wird hierbei nicht berücksichtigt.

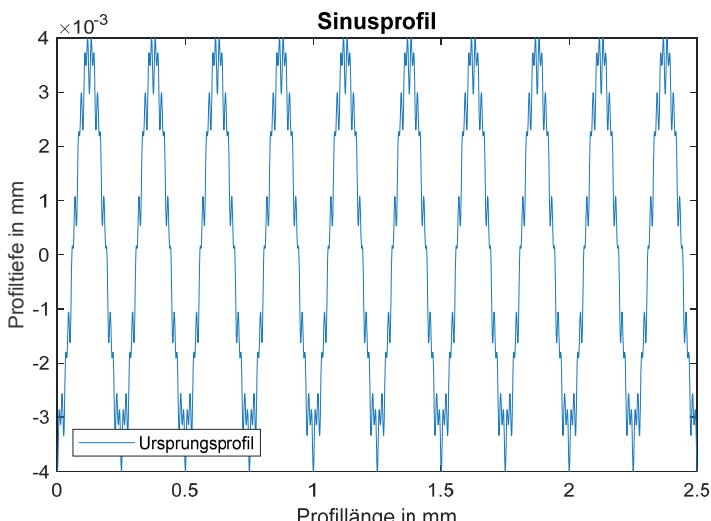


Bild 4.1: Sinusprofil

Anstelle des Sinusmodells kann auch ein aus dem Fertigungsprozess abgeleitetes Formmodell verwendet werden. Die Modellierung der resultierenden Werkstückoberfläche zur Generierung von relevanten Informationen für die Oberflächenmesstechnik findet hauptsächlich über theoretische, den Fertigungsprozess im Idealfall beschreibende, Formeln statt. Damit

können die Ausprägungen hinsichtlich Welligkeit und Rauheit einer Werkstückoberfläche ausreichend beschrieben werden.

Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide erzeugen aufgrund der Relativbewegung zwischen Werkzeugschneide und Vorschubeinheit eine regelmäßige Struktur auf der Werkstückoberfläche [8]. Dies ermöglicht die Modellierung der resultierenden Werkstückoberfläche über einfache mathematische Formeln in Abhängigkeit verschiedener Werkzeugparameter. In Formel 4.1 ist der Zusammenhang zwischen erzielbarer theoretischer Rautiefe R_{th} und den Fertigungsparametern Eckenradius r und Vorschub f für den Drehprozess dargestellt [9].

$$R_{th} = \frac{f^2}{8 * r}$$

Unter Verwendung der Formel 4.1 lassen sich beliebige Drehoberflächen simulieren. Die Größenordnung der, das Oberflächenprofil bestimmenden Parameter, Eckenradius und Vorschub, werden aus Prozessangaben der Schneidwerkzeughersteller gewonnen und können herstellerspezifisch verschieden sein. Bild 4.2 zeigt ein typisches Drehprofil. Aus dem Eckenradius $r = 0,8 \text{ mm}$ und Vorschub $f = 0,22 \text{ mm/U}$ resultiert ein Profil mit der theoretischen Rautiefe $R_{th} = 7,6 \mu\text{m}$. Die so erzeugten Profile weisen eine ideale Oberflächenstruktur auf.

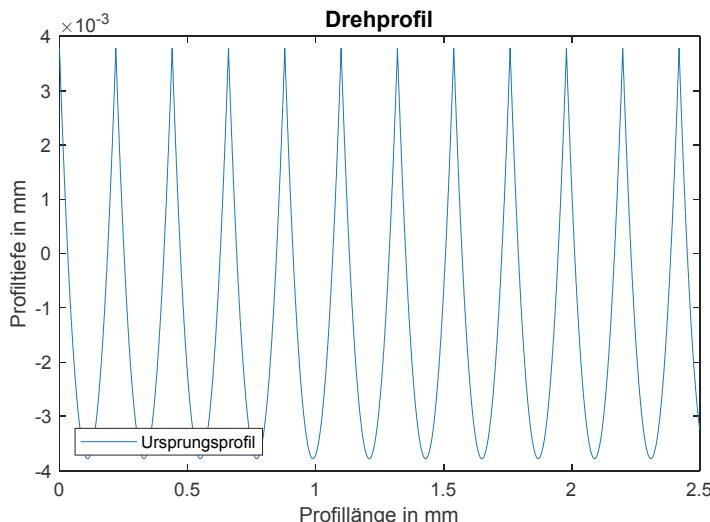


Bild 4.2: Drehprofil

Das Formmodell wird in einem weiteren Schritt an das bei der Messung verwendete Tastobjekt angepasst, indem dessen mechanische Filterwirkung berücksichtigt wird. Dafür erfolgt die virtuelle Abtastung des errechneten Drehprofils. Die daraus resultierende Werkstückoberfläche wird als Formmodell für das VCMM zu Verfügung gestellt. Bild 4.3 stellt das Resultat der mechanischen Abtastung des simulierten Drehprofils mit einem Tastkugeldurchmesser von 4 mm dar. Neben der mechanischen Filterwirkung des Tastobjekts ist auch die Abplattung der Werkstückoberfläche durch den Antastprozess berücksichtigt.

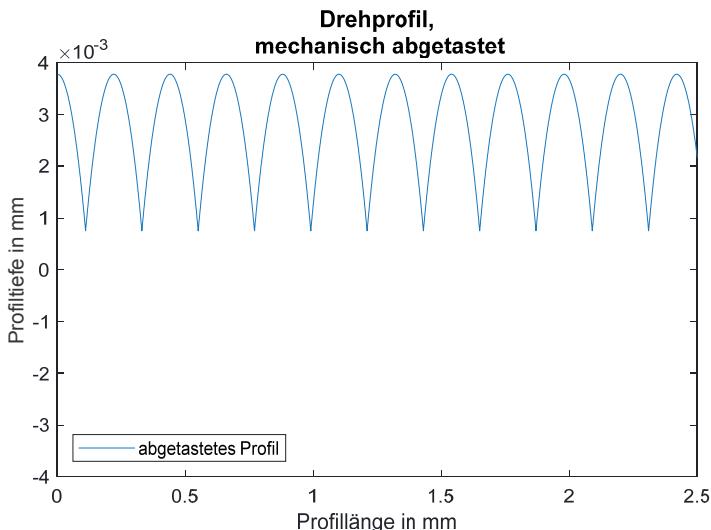


Bild 4.3: Drehprofil, mechanisch abgetastet

Die so entstehenden Profile können im virtuellen Koordinatenmessgerät verwendet werden. Je nach Applikation und Wahl des Tastelements kann das passende Formmodell für die Messunsicherheitsabschätzung verwendet werden. Durch die Anpassung des Formmodells an konkrete Fertigungsparameter unter Berücksichtigung der mechanischen Filterwirkung des Tastobjekts können für den konkreten Anwendungsfall passende Modelle erstellt werden.

5. Ausblick

Die Modellierung der Werkstückoberfläche in Verbindung mit der Simulation der mechanischen Filterwirkung des Tastobjekts und der entsprechenden Messpunktverteilung eröffnet neue Möglichkeiten für die Messung an Koordinatenmessgeräten. Durch die Verbindung mit

dem virtuellen Koordinatenmessgerät wird die Beurteilung der messaufgabenspezifischen Messstrategie ermöglicht, einhergehend mit einer Optimierung hinsichtlich Messzeit oder Messgenauigkeit. Oberflächenmodelle, erstellt anhand von Angaben aus dem Fertigungsprozess in Verbindung mit der Größe des Tastelements, können anwenderspezifisch erstellt werden und bei der Messunsicherheitsermittlung verwendet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Weckenmann, A. (Hrsg): *Koordinatenmesstechnik: Flexible Messstrategien für Maß, Form und Lage*; 2. Aufl. München: Hanser Verlag, 2012.
- [2] Franke, M.; Kistner, T.; Hausotte, T.; Heißelmann, D.; Schwehn, C.; Wendt, K.: *Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme*. tm - Technisches Messen, 84(5), S. 325-335.
- [3] JGCM 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*, JGCM (Joint Committee for Guides in Metrology), 2008. (Internet: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>).
- [4] Kistner, T.; Gabbia, A.; Imkamp, D: *Messunsicherheit durch Simulation: Stand der Technik und neue Entwicklungen für die Koordinatenmesstechnik in der industriellen Produktion*, 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016, Nürnberg, 2016
- [5] DIN EN ISO 4287:2010-07-00 *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009)*; Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC;2008 + A1:2009.
- [6] VDI/VDE-Richtlinie 2631 Blatt 3, *Formprüfung – Eigenschaften und Auswahl von Filtern*, September 2018.
- [7] Heißelmann, D.; Franke, M.; Kistner, T.; Schwehn, C.: *Das virtuelle Koordinatenmessgerät VCMM*, Koordinatenmesstechnik 2018 – Technologien und Anwendung, DIN-Tagung, Braunschweig, 2018.
- [8] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*, 4. Aufl. Berlin-Heidelberg : Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-23458-6.
- [9] Grote, K.-H.; Bender, B.; Gröhlich, D. (Hrsg.): *Dubbel – Handbuch für den Maschinenbau*, 25. Aufl. Berlin – Heidelberg : Springer, 2018 – ISBN 978-3-662-54804-2

Modellbildung in der Messtechnik – ein Überblick

Nadine Schiering, Olaf Schnelle-Werner,
ZMK & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen;
Klaus-Dieter Sommer,
Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Kurzfassung

Modelle sind untrennbarer Bestandteil der Messtechnik und Metrologie. Grundsätzlich dienen sie dazu, den Zusammenhang von Messgröße und Ausgangssignal bzw. Anzeige herzustellen oder – im Falle indirekter Messungen – eine dritte Messgröße oder Zustand zu quantifizieren. Mit der steigenden Zahl von Sensoren und deren Vernetzung sowie der Verknüpfung mit dem Internet gewinnt die Modellbildung in allen wesentlichen Sphären wie Industrie, Gesundheit, Verkehr etc. derzeit eminent an Bedeutung. Sie ist für die weitere technologische Entwicklung unverzichtbar. Der Rückgriff auf analytisch-parametrische Modelle wird mit steigenden Datensätzen immer weniger möglich, so dass sog. datengetriebene Modelle – bis hin zu einfachen *Machine-Learning*-Anwendungen in der Messtechnik an Bedeutung gewinnen.

Der Beitrag gibt einen Überblick über das verfügbare Instrumentarium der Modellbildung in der Messtechnik und den laufenden Entwicklungen.

Abstract

Models are an inseparable part of measurement technology and metrology. Basically, they are used to establish the relationship between the measurand and the output signal or indication or - in the case of indirect measurements - to quantify a third measured quantity or condition. With the increasing number of sensors and their networking as well as the connection to the Internet, modelling in all essential spheres such as industry, health, traffic etc. is currently gaining eminently in importance. It is indispensable for further technological development. The recourse to parametric-analytical models becomes less and less possible with increasing amounts of data, so that so-called data-driven models - up to simple *machine-learning* applications in metrology - gain in importance.

The article gives an overview of the available instruments for modelling in metrology and the current developments.

1. Einleitung

Ein Modell ist als pragmatisch auf das Relevante reduziertes Abbild der Wirklichkeit zu verstehen. Modellbildung hat alternativ zwei grundsätzlich mögliche Zielsetzungen:

- Die reale Welt bzw. den Messprozess in seinen wesentlichen Eigenschaften und Einflussfaktoren abzubilden, zu abstrahieren, zu verstehen, zu nutzen, zu verarbeiten etc.
- Existierende Messprozess gezielt weiterzuentwickeln sowie neue Messprinzipien und -verfahren zu entwerfen und gezielt zu entwickeln.

Ein Modell kann prinzipiell dargestellt werden in Textform, als anschauliches (mehr-dimensionales) Bild, als Diagramm, Wertetabelle, als mathematisch-funktionaler Zusammenhang etc.

Modelle sind untrennbarer Bestandteil der Messtechnik und Metrologie. Ganz überwiegend dienen sie dazu, den Zusammenhang von Messgröße und Ausgangssignal bzw. Anzeige herzustellen oder – im Falle indirekter Messungen – eine dritte Messgröße oder Zustand zu quantifizieren. Mit der derzeit rasant steigenden Zahl eingesetzter Sensoren und deren Vernetzung sowie der Verknüpfung mit dem Internet gewinnt die Modellbildung in allen wesentlichen Sphären der Anwendung von Messtechnik wie Industrie, Gesundheit, Verkehr etc. eminent an Bedeutung. Sie ist für die weitere technologische Entwicklung praktisch unverzichtbar. Dabei wird der Rückgriff auf *klassische* analytisch-parametrische Modelle mit steigenden Datenmengen und flexibel zu haltender Vernetzung immer weniger möglich bzw. zu aufwendig, so dass die sogenannten *datengetriebenen Modelle* – bis hin zu einfachen *Machine-Learning*-Anwendungen – in der Messtechnik an Bedeutung gewinnen.

Gegenstand der Modellierung in der Messtechnik sind (Mess-) Systeme, Signale und Größen. Der Beitrag gibt eine kompakte Übersicht über Ziele, Strategien und Techniken der Modellbildung in der Messtechnik in Abhängigkeit von der Messaufgabe und der System- und Signal-Charakteristika. Dabei wird im Regelfall als Ziel der Modellierung die Schaffung der Möglichkeit des Rückschlusses von am Ausgang des Messsystems vorliegender Information auf den Wert der Messgröße oder des zu bestimmenden Zustandes gesehen.

2. Auswahlkriterien für den Modellansatz

Grundsätzlich können wir in Abhängigkeit von der Messaufgabe unterscheiden:

- den Ursache-Wirkungs-Zusammenhang (Vorwärtsmodell), sowie
- das inverse Modell der Auswertung (Messgleichung).

Die eigentliche Messaufgabe (Rückschluss auf den Wert der Messgröße) ist dabei stets ein sog. inverses Problem, das die Invertierung des naturgemäß aus den physikalischen Kenntnis-

sen einfacher aufzustellenden Vorwärtsmodells erfordert. Das sog. Inverse Modell oder die Messgleichung bildet auch die Grundlage der Messunsicherheitsbewertung.

Ursache-Wirkungs-Modelle selbst werden vorrangig für die Beschreibung von Maßverkörperungen und Normalen sowie den Entwurf und die Entwicklung von Messsystemen verwendet. Weitere wichtige Aufgaben-Unterscheidungen für die Auswahl eines Modellansatzes – insbesondere für die klassische analytisch-parametrische Modellierung – sind [1]:

- Lineare oder nichtlineare zeitinvariante Systeme
- Zeitinvariante oder zeitabhängige Systeme und Signale
- Konzentrierte oder verteilte Systeme und Parameter
- Zeitdiskrete oder (in zunehmendem Maße) ereignisdiskrete Signale und Systeme.

In der klassischen analytisch-parametrischen Modellbildung werden die konzentrierten zeitinvarianten Systeme vorzugsweise mittels algebraischer Gleichungen, lineare Systeme (LTI-Systeme) speziell mit linearen Gleichungssystemen beschrieben. Zeitabhängige Systeme werden (bei „langsameren“ Vorgängen) üblicherweise mittels Differentialgleichungen mit der Zeit als Variable oder als in den Frequenz- oder Bildbereich transformierte Übertragungsfunktion dargestellt. Gebräuchlich sind auch sog. Zustandsraum-Modelle. Räumlich oder allgemein parameterverteilte Systeme werden meist mittels partieller Differentialgleichungssysteme beschrieben [1].

Darüber hinaus kann und sollte man für die Auswahl des Modellbildungsansatzes unterscheiden [2]:

- Messungen unter Feldbedingungen (*in-the-wild* [2])
- Messungen und Kalibrierungen unter definierten (Labor-) Bedingungen.

Messungen unter Feldbedingungen sind charakterisiert durch folgende Punkte:

- Geringe Kontrolle über den Messprozess oder
- Keine Kontrolle über die Umgebungsbedingungen
- Messsystem sehr komplex, Systemverhalten unzureichend bekannt
- Parameter und Anfangsbedingungen für Signal- und Systemmodelle nicht verfügbar

Bevorzugt verwendete Ansätze sind daher: Datenergebnis Modelle mit unterschiedlichen, bereichsübergreifenden Werkzeugen (Zeitreihenanalyse, Bildanalyse, allgemeine und statistische Prozessmodelle, Optimierungswerkzeuge für große Datensätze etc.

Messungen unter definierten Bedingungen sind durch folgende Punkte charakterisiert:

- Messungen unter gut kontrollierten Bedingungen

- Systemverhalten und ggfs. Anfangsbedingungen sehr gut bekannt

Bevorzugt verwendete Ansätze sind dabei: Klassisches Toolkit zur Systemanalyse und analytisch-parametrischen Modellierung.

3. Bestandteile der Modellbildung

Wir können prinzipiell den Modellbildungsprozess in die folgenden sechs Bestandteile aufteilen:

Abgrenzung (Geltungsbereich des Modells):

- Betriebsbereich (z. B. linearer Bereich)
- Bestimmt Generalisierbarkeit des Modells (Extrapolierbarkeit)

Abstraktion:

- Bildung gleichartiger modellierbarer Systeme
- Übertragbarkeit des Modells auf gleichartige / ähnliche Systeme

Reduktion (Weglassen von weniger relevanten Einflussfaktoren, Systemdetails):

- Welche zusätzlichen Unsicherheiten müssen berücksichtigt werden?

Dekomposition (Zerlegung in funktionale, verständliche Teilsysteme):

- Wahl der Grenzen der Teilsysteme
- Abhängigkeit von der Zugänglichkeit der Ein-/Ausgänge der Teilsysteme

Aggregation ((Wieder-) Zusammenfügung der Teilsysteme):

- Kombinierbarkeit der Teilmodelle
- Stabilität des entstehenden Gesamtmodells

Verifizierung:

- (Empirische) Bestimmung von Abweichungen zwischen Modell und Realität

4. Analytisch-parametrische Modellierung

Analytisch-parametrische Modelle basieren in der Regel auf physikalisch und empirisch gut bekannten Zusammenhängen, die das Verhalten des Messsystems erklären. Die Funktionsweise des Modells ist daher weitgehend bekannt und die Erklärbarkeit gegeben, d. h. wir haben es mit einem sog. *White-Box-Modell* zu tun [3].

Die Variablen im Modell sind meist konkrete physikalische Größen, z. B. Druck, Temperatur etc. Dieser Modellbildungsansatz ist gut anwendbar bei neu zu synthetisierenden Systemen,

es können klassische und gut verständliche Ansätze der Systemtheorie wie Blockschaltbilder verwendet werden [3].

Ausgewählte Grundlagen der analytisch-parametrischen Modellierung sind:

- Bekannte oder vermutete physikalische Zusammenhänge
- Einfache mathematische oder verhaltensbasierte funktionale Zusammenhänge
- Differentialgleichungs-Ansätze für zeitlich zustandsbasierte Systeme (dynamische Systeme)
- Partielle Differentialgleichungen für sog. verteilte Systeme.

Dekomposition und Aggregation sind zumindest implizit durch Aufteilung in Teilsysteme enthalten.

Für die Ermittlung bzw. Anpassung der konkreten quantitativen Zusammenhänge von Mess- und Einflussgrößen einerseits sowie der Anzeige bzw. dem/den Ausgangssignal(en) andererseits an die Realität kommen klassische statistische Ansätze wie Ausgleichsrechnung und einfache Simulationsansätze zur Anwendung. Insofern haben wir es mit einer logisch-verständlichen deduktiven Vorgehensweise zu tun. Dieser Modellbildungsansatz ist bisher sehr erfolgreich gewesen und wird auch weiterhin der Kern und Ausgangspunkt jeglicher Modellierung sein. Seine wesentlichen Vorteile sind:

- Gute Interpretierbarkeit
- Relativ einfach mögliche Plausibilitätsprüfung
- Oft gute Extrapolations-Möglichkeit über weite Wertebereiche [3].

Problematisch ist in vielen Fällen, dass bei der analytisch-parametrischen Modellbildung oft stark vereinfacht und idealisiert werden muss, um eine analytisch erklärbare Beschreibung oder Lösung zu ermöglichen. Zudem sind heute viele der interessierenden Vorgänge Kombinationen aus unstetigen oder nichtlinearen Prozessen, die in komplexer Weise miteinander vernetzt und rückgekoppelt sind und für die keine geschlossene Theorie oder adäquate Beschreibung in analytischer Form mehr vorliegt.

Bei der analytischen Modellbildung, dem *White-Box-Modell*, ist die innere Struktur des Systems bekannt, es wird jedoch bewusst und unter pragmatischen Gesichtspunkten reduziert. Logischerweise wäre daher die dadurch bewusst in Kauf genommene *Modellunsicherheit* bei der Auswertung von Messungen zu berücksichtigen. Das ist heute jedoch in der metrologischen Praxis nicht der Fall.

5. Datengetriebene Modellbildung

Die datengetriebene Modellbildung verzichtet auf die Abbildung und den Bezug auf physikalische Systemeigenschaften. Sie beobachtet und analysiert rein funktional die Wechselwirkung des Systems mit seiner Umgebung. Insofern haben wir es hier mit einem sog. *Black-Box-Modell* zu tun. Der Reduktionsschritt der Modellbildung erfolgt implizit; berücksichtigt wird nur das, was in der Wechselwirkung des Systems mit der Umgebung bemerkbar ist [3]. Die Schritte *Dekomposition* und *Aggregation* als klassische Bestandteile der Modellbildung (siehe Abschn. 3) fallen weg. Die Variablen im Modell sind nicht notwendigerweise physikalische Größen. Das Vorwissen zur Modellbildung sollte aber zumindest die relevanten Messgrößen und den Anwendungsbereich der Modellbildung umfassen.

Ausgewählte Ansätze bzw. Ausgangspunkte der datenbasierten Modellbildung sind [3]:

- Merkmalsbasierte Ansätze
- Tabellen und Datenbanken
- Statische Auswertung mittels Principal-Component Analysis etc.
- Anwendung neuronaler Netze bzw. einfacher Machine-Learning- Ansätze.

Die Vorteile der datengetriebenen Modellierung liegen darin, dass die Modellierung ohne genaue Detailkenntnis der inneren Zusammenhänge möglich ist und auch für komplexe Messsysteme anwendbar ist.

Wesentliche Vorteile der datengetriebenen Modellbildung sind daher [3]:

- Kein physikalisches Verständnis und Expertenwissen über das (Mess-) System erforderlich
- Für sehr komplexe Systeme mit unbekanntem Aufbau und Verknüpfung anwendbar
- Lernen des Systemmodells und Parametrierung im Betrieb möglich (einfache *Machine-Learning*-Ansätze)
- Gut geeignet für die Ermittlung relevanter reduzierter Information bez. Systemzuständen (*Condition Monitoring*), z. B. für *Predictive Maintenance*.

Bei der datengetriebenen Modellbildung ist die innere Struktur des Messsystems unbekannt, es lässt sich nur das Verhalten bzw. die Interaktion der Eingangsgrößen beobachten und modellieren. Die Hintergründe lassen sich meist nicht oder nur zum Teil verstehen – hier spricht man von einem Blackbox-Modell.

Problematisch oder gar nachteilig sind daher die folgenden Punkte [3]:

- Systembeobachtung und Expertenwissen über den Betrieb des Systems erforderlich
- Modell-Variable ggfs. schwer interpretierbar

- Geringe Abstraktionsfähigkeit, z. B. hinsichtlich Klassen ähnlicher Systeme schwierig, da Systemaufbau unbekannt.

6. Mischformen

Logischer- und vernünftigerweise gibt es viele Mischformen aus analytisch-parametrisch und datengetriebenen Modellen, die Vorteile beider Ansätze kombinieren. Bekannte Zusammenhänge (z. B. von Teilsystemen) werden für die Modellbildung genutzt, unbekannte Zusammenhänge werden mittels datengetriebener Modellbildung nutzbar gemacht. Bei diesen gemischten Ansätzen spricht man von *Greybox-Modellen*.

7. Validierung eines Modells

Am Ende der Modellbildung muss die Qualität des Modells noch mit Hilfe geeigneter Techniken bewertet, d. h. validiert werden.

Klassischer Ansatz ist die Beurteilung der *Residuen*, d. h. der ermittelten Unterschiede zwischen dem Modell und der Realität. Sie können genutzt werden, um ein tieferes Verständnis der relevanten Eigenschaft des Modells zu generieren und vielleicht auch um ein verbessertes Modell zu generieren. Die Analyse der Residuen gibt letztlich Aufschluss darüber, ob das Modell anwendbar ist oder ob es den beabsichtigten Zweck nicht erfüllt. Dafür gibt es eine Reihe statistischer Ansätze, u. a. den *Chi-Quadrat-Test* oder eine *Residuen-Analyse*.

In zunehmenden Maße, mit der steigenden Anzahl eingesetzter Sensoren und zunehmender Vernetzung wird ein Bezug der Residuen auf die Realität zu aufwendig oder gar unmöglich. Stattdessen werden auswertbare redundante Informationen genutzt oder es wird Bezug auf ein vorgegebenes (Standard-) Modell, einem sog. *Digitalen Zwilling* genommen.

8. Neue Herausforderungen an die Modellbildung

Die Modellbildung gewinnt mit der zunehmenden Zahl von Sensoren und Messsystemen sowie ihrer Vernetzung in der praktischen Anwendung in allen relevanten Sphären wie Industrie, Landwirtschaft, Medizin etc. notwendigerweise und unvermeidbar immer mehr an Bedeutung. Durch Anwendung von *Smart-Sensor-Technologien* und digital vernetzten und Internet-gekoppelten Messsystemen (*IoT*-Systeme) entwickeln sich neue Herausforderungen in Bezug auf Kalibrierung und Rückverfolgbarkeit.

In der Industrie besteht eine Herausforderung darin, mit der Vielzahl von Sensoren umzugehen und ihre Messrichtigkeit zu sichern. Sie können schon heute nicht mehr generell aus dem System entfernt werden, so dass klassische Kalibrierungen in Zukunft immer weniger möglich sein werden.

Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass die in sehr hoher Stückzahl produzierten Sensoren oft identische (systematische) messtechnisch relevante Eigenschaften bzw. Verhalten besitzen. Daher wird die Berücksichtigung von entsprechenden Korrelationen ein sehr wichtiger Punkt und muss z. B. bei der Ermittlung der Messunsicherheit berücksichtigt werden.

Weiterhin werden in einem System eingesetzte Sensoren ein unterschiedliches dynamisches Verhalten aufweisen, d. h. eine Synchronisation der Erfassung der Ausgangsinformation wird erforderlich.

Es müssen also neue Strategien zur Kalibrierung und Sicherung der Rückverfolgbarkeit entwickelt werden, die das System der existierenden hierarchischen Rückführkette in der metrologischen Infrastruktur ergänzen. Ein derzeit international verfolgter vielversprechender Weg ist die direkte Rückführung auf die sog. *Defining Constants im Erneuerten Internationalen Einheiten-System* [4].

Andere Lösungsansätze auf niederen Hierarchieebenen zur Sicherstellung der Rückverfolgbarkeit könnten aus dem *Machine Learning* resultieren. Beim Machine Learning werden Algorithmen verwendet, um Daten zu analysieren, Muster zu erkennen, daraus zu lernen und dann eine Bestimmung oder Vorhersage über etwas zu treffen.

Literatur

- [1] Sommer, K. D.: Modelling of Measurements, System Theory, and Uncertainty Evaluation. In: Pavese, F.: Data Modeling for Metrology and Testing in Measurement Science. BIRKHÄUSER 2008, ISBN 978-0-8176-4592-2
- [2] Wright, L. et al.: Modelling in Measurement and Uncertainty Evaluation. Präsentation Berlin 2017, VDI/VDE-GMA-Fachausschuss 1.10 *Grundlagen der Messsysteme*
- [3] Heizmann, M.: Pers. Mitt. zur Gliederung der Modellbildung i. d. Messtechnik, 2017
- [4] National Institute of Standards and Technology (NIST): NIST-on-a-Chip-Portal, [www.Nist.gov/pml/productservices/nist-chip-portal](http://Nist.gov/pml/productservices/nist-chip-portal), 2018. [Online; Zugriff 14.08.2019].

Verbesserung dimensioneller Messungen auf Grundlage der Einzelpunktgüte und -Messunsicherheit

Andreas Michael Müller, Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte,
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT),
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Kurzfassung

Zu einem Messergebnis als Näherungswert für den wahren Wert einer Messgröße soll immer die Angabe einer Messunsicherheit gehören. Diese grenzt nach der Korrektur der bekannten systematischen Messabweichungen einen Wertebereich ein, innerhalb dessen der wahre Wert der Messgröße mit einer anzugebenden Wahrscheinlichkeit liegt (üblich sind Erweiterungsfaktoren für gaußverteilte Messwerte $k = 1$ für ca. 68 %, bzw. $k = 2$ für ca. 95 %). Dieser Artikel soll zeigen, dass die punktweise Bestimmung und Angabe der Messunsicherheit für einzelne Bereiche einer vollständig erfassten Bauteiloberfläche anstatt für einzelne Messgrößen in vielen Szenarien nutzbare Potenziale bzgl. der Verbesserung dimensioneller Messungen aufweist. Zusätzlich sollen Anwendungsszenarien von lokalen Güteparametern für die industrielle Röntgen-Computertomografie zur Klassifizierung von Messartefakten und Abschätzung der lokalen Qualität der Messung vorgestellt werden.

1. Einleitung und Motivation

Die Norm DIN EN ISO 17450-1:2011 „Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung“ beschreibt eine Reihe von Operationen an Geometrieelementen [1]. Ausgangspunkt soll für die folgenden Ausführungen das Ergebnis einer 3D-Koordinatenmessung als Repräsentation des „nicht-idealen Oberflächenmodells“ darstellen. Die Operationen „Zerlegung“, „Erfassung“, „Filterung“, „Zuordnung“, „Zusammenfassung“, „Erzeugung“ und „Rekonstruktion“ können in beliebiger Reihenfolge verwendet werden [1] und sind notwendig, um ideale oder nicht-ideale Geometrieelemente zu erhalten [1], auf deren Basis die dimensionellen Messgrößen eines Bauteils definiert sind. Die Anwendung der Operationen ist der Datenauswertung zuzuordnen, welche die Endsignale der Messkette eines Messsystems aufnimmt und weiterverarbeitet. Aus den physikalischen Wirkprinzipien und Zusammenhängen bei dem Ablauf einer Messung ist im Allgemeinen davon auszugehen und experimentell belegbar, dass verschiedene erfasste Oberflächenpunkte eines Werkstücks auch mit verschiedenen Messabweichungen behaftet sind. Somit kann argumentiert werden, dass durch die Berücksichtigung von punktweise definierten Unsicherheits-

bzw. Qualitätsparametern bei der Anwendung der Operationen an Geometrieelementen nach DIN EN ISO 17450-1:2011 auch ein verbessertes dimensionelles Messergebnis erzielt werden kann. Die genannte Norm sieht bei keiner der definierten Operationen eine explizite punktweise Gewichtung bei deren Anwendung vor. Insbesondere die Operation „Zuordnung“ kann jedoch sehr empfindlich gegenüber Ausreißern und einer lokal variablen Punktdichte sein (z. B. bei Bestimmung des größten einbeschriebenen bzw. des kleinsten umschriebenen Zylinders), was durch die Anwendung des Filteroperators reduziert werden kann. Jedoch existieren für die Operatoren „Filterung“ und „Erfassung“ bisher keine allgemeingültigen Standardkriterien [1]. Die Effekte der Beeinflussung des Zuordnungsoperators durch diese beiden Operatoren können bspw. durch die Verwendung des Ausgleichs nach Gauß zwar abgemindert, jedoch nicht völlig eliminiert werden. Weiterhin ist dieser Ausgleich nicht für alle Prüfszenarien geeignet. Durch die Verfügbarkeit von lokal bestimmten Unsicherheits- bzw. Qualitätskennwerten kann die Grundlage zur Verbesserung dimensioneller Messungen geschaffen werden, indem diese punktweise ermittelten Parameter bei der Anwendung der Operatoren nach DIN EN ISO 17450-1:2011 mit eingehen. Insbesondere könnten die Operatoren „Zerlegung“, „Filterung“, „Zuordnung“ und „Rekonstruktion“ direkt punktweise bestimmte, lokale Parameter mitberücksichtigen.

Dieser Artikel stellt zwei unterschiedliche Verfahren vor, mit denen unter bestimmten Bedingungen für einen beliebigen Oberflächenpunkt die sog. „Einzelpunktmessunsicherheit“ sowie abstrakte Qualitätsparameter bestimmt werden können. Es werden unterschiedliche Anwendungsszenarien demonstriert, mit denen dimensionelle Messungen direkt oder indirekt verbessert werden können.

2. Die Einzelpunktmessunsicherheit

Die Bestimmung der Einzelpunktmessunsicherheit (EPMU), auch Einzelpunktsicherheit, ermöglicht die lokal aufgelöste Berechnung und somit Zuordnung der systematischen und zufälligen Messabweichungen sowie der systematischen geometrischen Gestaltabweichungen für beliebige Punkte auf der gemessenen Oberfläche eines Messobjekts. Für das Verfahren müssen folgende Grundvoraussetzungen und Eigenschaften erfüllt sein:

- Ein Messsystem, welches in der Lage ist, die Geometrie eines Messobjekts zu erfassen, sodass eine bestimmte Vollständigkeitsbedingung (vgl. unten) erfüllt ist.
- Die Erstellung einer Messreihe des Messobjekts mit einer ausreichend hohen Anzahl an Wiederholmessungen (z. B. $n = 20$ nach VDI/VDE 2630 [2], bzw. DIN EN ISO 15530-3 [3]) unter kontrollierten Bedingungen.

- Die Referenzmessung des Messobjekts mit einem Referenzmesssystem, welche ebenfalls die oben genannte Vollständigkeitsbedingung (vgl. unten) erfüllt.
- Die Nominalgeometrie (z. B. CAD-Modell) des Messobjekts ist verfügbar.
- Ausreichend Rechenkapazität, idealerweise GPU-Beschleunigung, ist verfügbar.

Es existieren somit drei verschiedene Repräsentationen der Geometrie des Messobjekts (aus der Nominalgeometrie, der Referenzmessung und den Wiederholmessungen). Die notwendige Vollständigkeitsbedingung besagt dabei, dass

- entweder die affinen Transformationsvorschriften zwischen den drei genannten Geometrirepräsentationen im Voraus bekannt sein müssen,
- oder die Beschreibung der Beziehung von verschiedenen Geometrieelementen des Messobjekts zur Definition eines gemeinsamen Koordinatensystems vorliegt und diese Geometrieelemente gleichzeitig bei den Messungen mit hinreichend hoher Qualität erfasst werden können,
- oder die geometrischen Voraussetzungen für die Bestimmung der affinen Transformationsvorschrift zwischen den genannten Geometrien ohne weitere Vorkenntnisse erfüllt sein müssen (z. B. durch sog. „best-fit Registrierung“, siehe auch [4]).

Durch die Erfüllung der Vollständigkeitsbedingung wird sichergestellt, dass die verschiedenen Geometrien „deckungsgleich“ aufeinander ausgerichtet werden können. Die nachfolgenden Berechnungen erfordern die Darstellung der Oberflächen als Dreiecksnetze, wobei bei Nominal- und Referenzgeometrie darauf geachtet werden muss, dass möglichst homogene Oberflächenpunkteverteilungen vorliegen. Wenn dies erfüllt ist, wird davon ausgegangen, dass lineare Interpolation zwischen Messpunkten (Dreieckseckpunkten) sowie die statistische Auswertung der abgeleiteten EPMU über die gesamte Oberfläche zulässig ist. Die Berechnung der EPMU und der systematischen Gestaltabweichungen des Werkstücks findet in zwei Schritten statt:

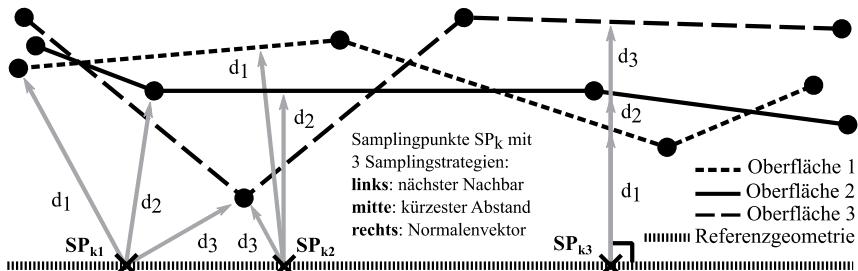


Bild 1: Berechnung der Abstände zwischen jedem Samplingpunkt (SP) und den gemessenen Oberflächen der Messreihe nach drei verschiedenen Ansätzen.

Zunächst werden ausgehend von jedem Samplingpunkt (SP) die Abstände d_i zu jeder Oberfläche der Messreihe berechnet (Abb. 1). Somit werden jedem SP n Abstände zugeordnet. Bei der Berechnung können je nach Anwendung verschiedene Ansätze anwendet werden, indem die Abstände ausgehend von jedem SP über das „nächster-Nachbar“-Kriterium, die Bedingung „kürzester Abstand zur Oberfläche“ oder „Abtastung in Richtung des Normalenvektors“ ermittelt werden (Abb. 1). Diese Samplingstrategien unterscheiden sich hinsichtlich der Vertrauenswürdigkeit der Normalenvektoren der SP (z. B. wegen Messrauschen) sowie den benötigten Rechenkapazitäten [5]. Aus den Zwischenergebnissen lassen sich nun für jeden SP die systematischen Messabweichungen aus dem Mittelwert der dem SP zugeordneten Abstände d_i und die zufälligen Messabweichungen aus der Standardabweichung der Abstände abschätzen. Somit sind alle notwendigen Informationen vorhanden, um für jeden SP eine Messunsicherheit mit Hilfe des quadratischen Mittelwerts der berechneten systematischen und zufälligen Messabweichungen und dem Erweiterungsfaktor k angeben zu können. In einem zweiten Schritt können dann ausgehend von den SP auf der Oberfläche der Referenzmessung die punktweisen lokalen Abstände zur Nominalgeometrie berechnet werden, was eine punktweise Abschätzung der systematischen Gestaltabweichungen (Geometrieabweichungen) des Werkstücks zur Nominalgeometrie darstellt. Dies ermöglicht schließlich die Angabe der Messunsicherheit und der systematischen Gestaltabweichungen für jeden SP auf der Oberfläche der Referenzmessung. Das Erstellen einer Referenzmessung und die damit verbundenen notwendigen Datenverarbeitungsoperationen sind mit einem nicht unerheblichen messtechnischen und rechentechnischen Aufwand verbunden. Für den Fall, dass keine solche Referenzmessung zur Verfügung steht, kann stattdessen die Nominalgeometrie des Messobjekts mit der

Messreihe verglichen werden. Dann sind zwar die lokalen zufälligen Messabweichungen trotzdem abschätzbar, jedoch können prinzipbedingt die Einflüsse der systematischen Gestaltabweichungen und der systematischen Messabweichungen nicht voneinander getrennt werden. Als größter Nachteil der beschriebenen Vorgehensweise kann der große messtechnische Aufwand der, mit der Notwendigkeit einer großen Zahl an Messwiederholen verknüpft ist, genannt werden. Weiterhin ist der Berechnungsaufwand zur Bestimmung der benötigten Abstände für jeden SP nicht unerheblich, was jedoch durch die konsequente Anwendung von Parallelisierungstechniken und GPGPU-Programmiertechniken (vgl. [6, 7]) abgemildert werden kann. Trotzdem gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten, für die ein deutlicher Mehrwert durch Bestimmung der EPMU erzielt werden kann (vgl. nächstes Kapitel). Weiterhin gibt es für viele Messsysteme seit einigen Jahren intensive Bemühungen, virtuelle sog. „Digital Twins“ bereitzustellen (z. B. für die taktile Koordinatenmesstechnik [8], industrielle Röntgen-Computertomografie (CT) [9]). Somit kann bei hinreichend großer Leistungsfähigkeit dieses Programms ein Großteil des benötigten Messaufwands virtuell, und damit zu deutlich geringeren Kosten, bewältigt werden.

3. Anwendungsmöglichkeiten für die Einzelpunktmessunsicherheit

Die lokal bestimmte EPMU bietet ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten, welches sich grob in zwei gleichwertige Bereiche unterteilen lässt. Auf der einen Seite ermöglichen die EPMU-Werte eine konkrete Verbesserung von Messergebnissen. Ein Beispiel hierfür ist die Korrektur der lokalen systematischen Messabweichungen einer realen CT-Messungen, wobei die benötigten EPMU-Kennwerte mit Hilfe eines „Digital Twin“ des Messsystems [9] abgeschätzt werden können [10]. Die lokal bestimmte Abschätzung der zufälligen Messabweichungen („Einzelpunkstreuung“) kann als punktweise definierte Gewichtungsfaktoren in die Regressionsanalyse bei der Ausgleichsrechnung zur Bestimmung von Geometrieelementen mit einfließen (GPS-Operator „Zuordnung“), wodurch für ein bestimmtes Szenario eine Reduzierung der Messunsicherheit erzielt werden konnte [11]. Vergleichbare Nutzenpotentiale sind bei der Verwendung der EPMU bei weiteren GPS-Operatoren wie bspw. „Zerlegung“ und „Filterung“ denkbar.

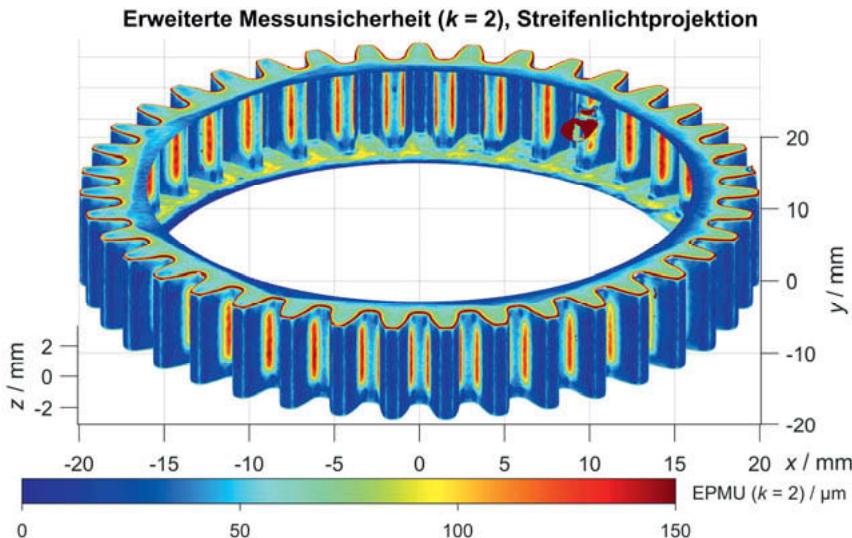


Bild 2: Visualisierung der EPMU für eine Zahnradmessung (Kunststoff POM), Streifenlichtprojektion GOM Atos Core [12], 20 Wiederholmessungen, Referenzmessung mit industriellem CT Zeiss Metrotom 1500. Messung mit Drehachse mit 200 Messungen / 360° , Achse Zahnrad parallel ausgerichtet zur Drehachse, optische Achse des Messsystems rechtwinklig ausgerichtet zur Drehachse, kein Post-Processing der Dreiecksnetze, Details in [13].

Bei der Festlegung von Bauteiltoleranzen im Rahmen der dimensionellen Auslegung eines Produkts spielt die Messunsicherheit eine wichtige Rolle. Mit Hilfe des Werkzeugs der EPMU können in der Entwurfsphase mit Hilfe von Bauteilprototypen bereits Informationen über die zu erwartenden Messunsicherheiten bei der geometrischen Produktverifikation zur Verfügung gestellt werden, was im Zusammenspiel mit leistungsfähigen Toleranzsimulationsanalysen zu deutlich verbesserten Toleranzspezifikationen führen kann [14, 15].

Auf der anderen Seite ermöglicht die Visualisierung der Verteilung der EPMU Rückschlüsse auf physikalische Wirkprinzipien bei einer Messung. Somit können bspw. die Auswirkungen der optischen Zugänglichkeit des Zahnfußes bei einer optischen Zahnrädermessung direkt in den Ergebnissen der EPMU beobachtet werden (vgl. Abb. 2) [13]. Durch die Visualisierung der Verteilung der auftretenden Messunsicherheit steht dem Anwender ein interessantes Werkzeug zur Validierung und Optimierung der anwendeten Messstrategie zur Verfügung.

Dies ist besonders der Fall, wenn die Beziehung zwischen dem Werkstückkoordinatensystem und dem Koordinatensystem des Messgeräts einen Einfluss auf die erzielten Messergebnisse nehmen kann (z. B. industrielle CT, Streifenlichtprojektion). Neben der Bestimmung der EPMU für industrielle CT und Streifenlichtprojektion wurden am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik außerdem erfolgreich Untersuchungen mit taktiler Koordinatenmesstechnik [16] und Fokusvariation [17] durchgeführt.

4. Die Bestimmung der Einzelpunktgüte in der Röntgen-Computertomografie

Röntgen-Computertomografie basiert auf der Aufnahme von Röntgenbildern eines Messobjekts aus verschiedenen Winkelstellungen, wobei i. d. R. eine bestimmte Vollständigkeitsbedingung bzgl. der so aufgenommenen Daten erfüllt sein muss [18]. Das Ergebnis der anschließenden 3D-Rekonstruktion des erfassten Messvolumens ist ein 3D-Voxel-Modell, wobei der Wert (auch Grau-Wert genannt) jedes einzelnen Volumenelements den Röntgenabsorptionskoeffizienten an dieser Stelle im erfassten Messvolumen repräsentiert. Die Ermittlung der Grenzfläche zwischen den stark absorbierenden Bereichen (Bauteil) und solchen mit schwacher Absorption (Atmosphäre) wird Segmentierung genannt und stellt als geometrische 2D-Oberfläche die Grundlage der beabsichtigten dimensionellen Untersuchungen dar. Reale CT-Messungen sind von bestimmten physikalischen und technischen Limitationen beeinflusst, sodass Messungen i. d. R. mehr oder weniger starke Messartefakte aufweisen. Diese Artefakte führen zu inkorrekten Grauwerten im rekonstruierten Volumen der Messung und beeinflussen somit auch die Segmentierung im Rahmen der Oberflächenbestimmung. Verschiedene Arten von Artefakten (z. B. Kegelstrahlartefakte [19], Strahlauflaufhärtung [20], Compton-Streuung [21]) können entweder gar nicht oder nur mit großem Aufwand reduziert werden.

Am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik wurde ein Verfahren zur Bestimmung der Einzelpunktgüte (EPG) entwickelt [22, 23] und zum Patent angemeldet (DE 10 2015 201 271 A1, EP 3195258, WO 2016042105), mit dem die Materialübergänge in der Umgebung der bestimmten Oberfläche untersucht und quantitativ sowie qualitativ bewertet werden können. Hierfür wird ausgehend von jedem Punkt der bestimmten Oberfläche der Suchvektor in beide Richtungen des jeweiligen Normalenvektors bestimmt und die Volumendaten entlang dieses Vektors für eine bestimmte Länge (i. d. R. 4 – 15 Voxel) abgetastet. Die so bestimmten Kurven repräsentieren somit die Grauwertübergänge für die Punkte der Bauteilloberfläche (Abb. 3). Jeder Grauwertübergang und die daraus abgeleiteten Größen (Gradient, Krümmung) können dann mathematisch hinsichtlich verschiedener Kriterien qualitativ bewertet werden, um dadurch Bereiche mit niedrigerer und höherer Qualität zu klassifizieren.

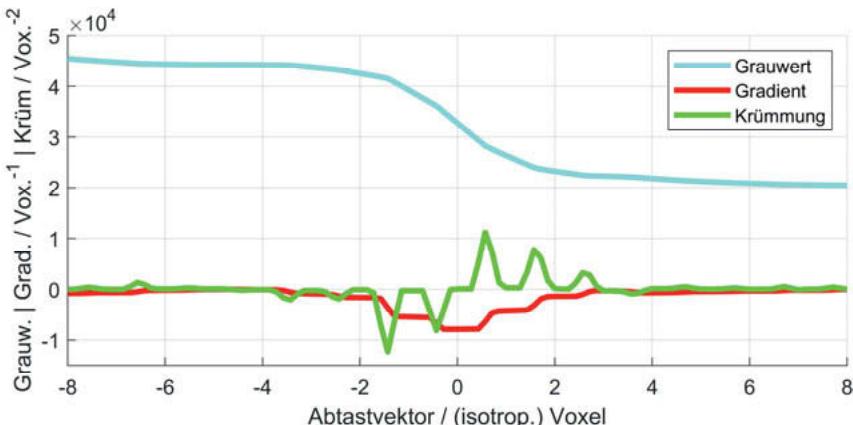


Bild 3: Grauwertübergang und berechnete Steigungs- und Krümmungskurve einer CT-Messung senkrecht zur bestimmten Bauteiloberfläche (Pos. 0). Die Unstetigkeit der Daten verstärkt sich mit höheren Ableitungen.

Solche Kriterien zur Bewertung der Grauwertübergänge können bspw. umfassen:

- Wert und Ort des maximalen Gradienten, Breite der Gradientenkurve,
- Wert der maximalen Krümmung, Koordinaten der Nulldurchgänge,
- Symmetrie des Übergangs mit Bezug auf den Ort des bestimmten Oberflächenpunkts,
- Kontrast und Monotonie des Übergangs,
- Statistisches Verhalten der genannten Kriterien in einer Nachbarschaft des Samplingpunktes.

Nach der Bestimmung der EPG für alle Oberflächenpunkte einer CT-Messung erfolgt die Auswertung auf Basis einer Visualisierung der Verteilung der EPG-Werte für diese Messung (z. B. mit Falschfarbendarstellung). I. d. R. ist Expertenwissen notwendig, um geeignete EPG-Parameter für eine bestimmte Messung auszuwählen. Ein guter Indikator kann die Bestimmung der Trennschärfe mittels einer Histogramm-Darstellung sein, wobei hierfür auf eine möglichst homogene Punkteverteilung auf der gemessenen Oberfläche zu achten ist, um die Aussagekraft dieser Auswertung für diesen Anwendungsfall zu gewährleisten. Die EPG wird mittels abstrakter Parameter bestimmt, die als solches keine direkte Rückführung auf die SI-Einheit „Meter“ zulassen. Im folgenden Kapitel werden einige Möglichkeiten der Verwendung der Einzelpunktgüte zur Verbesserung dimensioneller Messungen diskutiert.

5. Anwendungsszenarien für die Einzelpunktgüte

Dadurch, dass durch die Bestimmung der Einzelpunktgüte Oberflächenbereiche mit niedrigerer Qualität identifiziert werden können, ist es möglich, ein auf gewichteter Datenfusion basierendes Verfahren zu implementieren. Dabei wird das selbe Bauteil wiederholt mit verschiedenen Orientierungen im Messvolumen gemessen und die Einzeloberflächen dann miteinander fusioniert. Dabei werden Oberflächenpunkte mit höherer Einzelpunktgüte stärker gewichtet als solche mit niedrigerer Güte, wodurch auch sehr starke Strahlaufhärtingsartefakte korrigiert werden können [24].

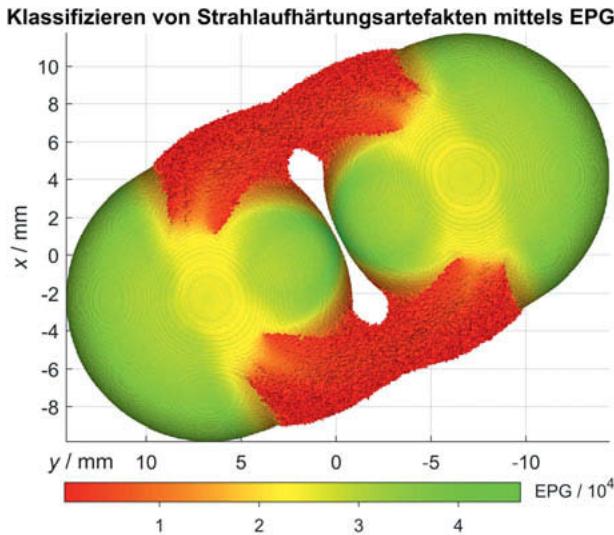


Bild 4: Messung von zwei Stahlkugeln mit CT Zeiss Metrotom 1500. Die starken entstehenden Strahlaufhärtingsartefakte können mit dem Verfahren zur Bestimmung der EPG erfolgreich klassifiziert werden. Die Ringmuster auf den Kugeloberflächen wurden durch ein Daten-Resampling zur Reduzierung der Punktanzahl verursacht.

Dem erfahrenen Anwender ist es möglich, die Auswirkungen verschiedener Artefakte auf eine bestimmte Messung durch die Visualisierung der verschiedener EPG-Parameter abzuschätzen. In Abb. 4 ist ein Beispiel dargestellt: Die Strahlaufhärtingsartefakte der Messung zweier Stahlkugeln können erfolgreich klassifiziert werden, sodass bestimmt nachfolgende Messdatenauswertungsoperationen (z. B. GPS-Operatoren) diese Zusatzinformation zur Verbesserung eines Messergebnisses nutzen können. Die Bestimmung der EPG basiert im gezeigten

Beispiel auf der Auswertung des Kontrastes der Grauwertübergänge, wobei ein hoher Kontrast einer hohen Einzelpunktgüte entspricht. Neben der Klassifizierung von Strahlaufhärtingsartefakten bzw. Metallartefakten können für andere Beispiele auch Kegelstrahlartefakte sowie der Einfluss verschiedener Durchstrahlungslängen zuverlässig erkannt werden. Ein besonderes Nutzenpotential ergibt sich aus der Tatsache, dass für bestimmte Szenarien eine qualitative, positive Korrelation zwischen der EPG und der EPMU (genauer Einzelpunktstreuung) beobachtet werden kann. Somit kann für diese Fälle ein direkter Rückschluss auf die lokale Streuung auf Basis der Auswertung einer einzelnen Messung vorgenommen werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dem Artikel wurden zwei verschiedene Verfahren vorgestellt. Die Bestimmung der lokal aufgelösten Einzelpunktmessunsicherheit (EPMU) inkl. der systematischen Gestaltabweichungen des Bauteils ermöglicht die Optimierung von Messstrategien und bietet Möglichkeiten zur Verwendung als Gewichtungsfaktoren bei der Anwendung verschiedener GPS-Operatoren. Für die industrielle Computertomografie (CT) wurde ein Verfahren präsentiert, mit der die lokale Einzelpunktgüte (EPG) für eine einzelne Messung durch Auswertung der mit jedem bestimmten Oberflächenpunkt assoziierten Grauwertübergang abgeschätzt werden kann. Hier bietet v. a. die visuelle Aufbereitung der Ergebnisse die Möglichkeit, CT-typische Artefakte zu lokalisieren und zu klassifizieren. Außerdem ist auch hier die Möglichkeit gegeben, die Güteparameter als Gewichtungsfaktoren in darauf angepasste Auswertealgorithmen (z. B. die der GPS-Operatoren) einfließen zu lassen. Die für einzelne Beispiele beobachtete Korrelation zwischen der EPMU (hier zufällige Messabweichungen) einer Messreihe und der EPG einer einzelnen Messung derselben eröffnet interessante Möglichkeiten zu Verbesserung von dimensionellen Messungen.

Bei der Bestimmung der EPMU besteht derzeit eine Herausforderung darin, dass die Ergebnisse maßgeblich von der Richtigkeit der notwendigen Koordinatentransformationen zwischen den verschiedenen Oberflächen beeinflusst wird. Zusätzlich ist die Bestimmung für Kantenbereiche von Bauteilen noch nicht vollständig gegeben, da hier die gezeigten Samplingstrategien gewisse Limitationen aufweisen. Neben der Untersuchung dieser beiden Sachverhalte werden sich künftige Betrachtungen auch mit der Auswertung der lokalen Verteilung der ermittelten Abstände für jeden Samplingpunkt befassen, um ggf. Drifteffekte und andere systematische Abweichungen identifizieren zu können.

Zukünftige Weiterentwicklungen bei der Bestimmung und Auswertung der EPG werden sich darauf fokussieren, allgemeingültige Auswertekriterien für bestimmte Artefakte zu definieren und die Vergleichbarkeit der ermittelten Werte für verschiedene Messungen zu verbessern.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projektes FOR 2271, Teilprojekt 3 unter der Fördernummer HA 5915/9-1 und für die finanzielle Unterstützung bei der Beschaffung des Computertomografen Zeiss Metrotom 1500 unter Fördernummer 324672600.

Literaturverzeichnis

- [1] *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung (ISO 17450-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 17450-1:2011, DIN EN ISO 17450-1:2011.*
- [2] *Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozeßeignung von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren, VDI/VDE 2630 Blatt 2.1, 2015.*
- [3] *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen (ISO 15530-3:2011); Deutsche Fassung EN ISO 15530-3:2011, DIN EN ISO 15530-3:2011, 2018.*
- [4] B. Bellekens, V. Spruyt, R. Berkvens, R. Penne und M. Weyn, „A Benchmark Survey of Rigid 3D Point Cloud Registration Algorithms“, *International Journal on Advances in Intelligent Systems*, Jg. 8, 1 & 2, <https://repository.uantwerpen.be/docman/irua/fcbe4d/a47aa6d2.pdf>, 2015.
- [5] A. M. Müller und T. Hausotte, „Comparison of different measures for the single point uncertainty in industrial X-ray computed tomography“ in *9th Conference on Industrial Computed Tomography*, 2019.
- [6] J. D. Owens, D. Luebke, N. Govindaraju, M. Harris, J. Krüger, A. E. Lefohn und T. J. Purcell, „A Survey of General-Purpose Computation on Graphics Hardware“, *Computer Graphics Forum*, Jg. 26, Nr. 1, S. 80–113, 2007.
- [7] J. D. Owens, M. Houston, D. Luebke, S. Green, J. E. Stone und J. C. Phillips, „GPU Computing“, *Proc. IEEE*, Jg. 96, Nr. 5, S. 879–899, 2008.
- [8] M. Franke, T. Kistner, T. Hausotte, D. Heißelmann, C. Schwehn und K. Wendt, „Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme“, *tm - Technisches Messen*, Jg. 84, Nr. 5, 2017.

- [9] F. Wohlgemuth, A. M. Müller und T. Hausotte, „Development of a virtual metrological CT for numerical measurement uncertainty determination using aRTist 2“, *tm - Technisches Messen*, Jg. 85, Nr. 12, S. 728–737, 2018.
- [10] A. M. Müller, F. Wohlgemuth und T. Hausotte, „Simulation-based correction of systematic errors for CT measurements“ in *8th Conference on Industrial Computed Tomography*, 2018.
- [11] A. M. Müller und T. Hausotte, „Utilization of single point uncertainties for geometry element regression analysis in dimensional X-ray computed tomography“ in *9th Conference on Industrial Computed Tomography*, 2019.
- [12] GOM GmbH, *ATOS Core – Optischer 3D-Scanner*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.gom.com/de/messsysteme/atos/atos-core.html>. Zugriff am: 17.04.2019.
- [13] A. Müller, S. Metzner, T. Hausotte, D. Schubert und D. Drummer, „Separation of locally determined work piece deviations and measurement uncertainties for structured-light scanning of customized polymer gear wheels“ in *20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019*, 2019, S. 527–534.
- [14] A. M. Müller, T. Oberleiter, K. Willner und T. Hausotte, „Implementation of Parameterized Work Piece Deviations and Measurement Uncertainties into Performant Meta-models for an Improved Tolerance Specification“, *Proc. Int. Conf. Eng. Des.*, Jg. 1, Nr. 1, S. 3501–3510, https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/C1C964DDFADF929B3B4454E4D0D4783D/S2220434219003573a.pdf/implementation_of_parameterized_work_piece_deviations_and_measurement_uncertainties_into_performant_metamodels_for_an_improved_tolerance_specification.pdf, 2019.
- [15] A. M. Müller, B. Heling, B. Schleich, T. Oberleiter, K. Willner, S. Wartzack und T. Hausotte, „Methoden zur Reduzierung und Berücksichtigung der Unsicherheiten von dimensionellen Messgrößen in der Toleranzanalyse“ in *Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271*, 2019, S. 64–73.
- [16] A. Müller, S. Metzner und T. Hausotte, „Characterization of the single point precision of steel gear wheel measurements using tactile coordinate measurement machines in scanning mode“ in *20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019*, 2019, S. 756–762.
- [17] A. M. Müller und T. Hausotte, „About the need for optical gear measurements using a beam diversion mechanism in order to obtain truthful surface texture parameters / Beurteilung der Notwendigkeit einer Strahlumlenkung für optische Zahnrädamessungen zur Bestimmung korrekter Oberflächentexturkennwerte“, *tm - Technisches Messen*, Jg. 86, S1, S. 87–91, 2019.

- [18] H. K. Tuy, „An Inversion Formula for Cone-Beam Reconstruction“, *SIAM J. Appl. Math.*, Jg. 43, Nr. 3, S. 546–552, 1983.
- [19] S. Bartolac, R. Clackdoyle, F. Noo, J. Siewerdsen, D. Moseley und D. Jaffray, „A local shift-variant Fourier model and experimental validation of circular cone-beam computed tomography artifacts“, *Medical physics*, Jg. 36, Nr. 2, S. 500–512, 2009.
- [20] J. F. Barrett und N. Keat, „Artifacts in CT: recognition and avoidance“, *Radiographics: a review publication of the Radiological Society of North America, Inc.*, Jg. 24, Nr. 6, S. 1679–1691, 2004.
- [21] H. Krieger, *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [22] M. Fleßner, A. Müller, E. Helmecke und T. Hausotte, „Automated detection of artefacts for computed tomography in dimensional metrology“ in *Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, 2015.
- [23] M. Fleßner, A. M. Müller, E. Helmecke und T. Hausotte, „Evaluating and visualizing the quality of surface points determined from computed tomography volume data“ in *PTB open access repository*, 2015.
- [24] A. M. Müller und T. Hausotte, „Data fusion of surface data sets of X-ray computed tomography measurements using locally determined surface quality values“, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Jg. 7, S. 551–557, <https://www.j-sens-sens-syst.net/7/551/2018/>, 2018.

Metrology in direkter Photonenimpulsmessung

Metrology in direct photon momentum measurement

Suren Vasilyan, Norbert Rogge, Thomas Fröhlich,

Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau

Abstract

Advances in the field of mass/force measurements together with the redefinition of SI unit system provides chances to achieve progress towards setting up technologically new applications in other fields where (including the quantum physics) measurements with significantly improved uncertainty is already a demand. In this work, thus, is described a newly established method of calibrating the average power of high power lasers (several 100 W to kW) with proposed several orders of magnitude lowered measurement uncertainty in comparison to the existing national- and international primary standards. The method is based on the measurements of the total momentum transfer of the photons momentum that is produced due to reflection of the laser beam from an ultra-high reflective surface (mirrors). The measurement of the effective force, which is traceable to the mass which by itself is traceable already to the h the Planck constant, that quantifies this process is proportional the power of the laser.

1. Introduction and Method description

A practice of tracing the measured physical quantity to a standard that mutually have been agreed upon by interested parties requires also to provide the uncertainty of this measure. There are cases when it is necessary to establish a combination of measurements in a chain, known as a traceability path, and provide also the associated uncertainties at each point throughout this path. Therefore, as short and simple would be this path/chain that advantageous/effective would be the traceability and lower uncertainty of the chosen measurement method [1].

The use of the radiation pressure of a laser field as an effect of the momentum transfer of the absorbed and re-emitted photons provides a complementary possibility for metrology to generate calibration forces or to calibrate the optical power directly traceable to the International System of Units (SI). The method we introduced [2] has been also experimentally confirmed by our measurements, which gave evidence on options to extend the effective use of radia-

tion pressure for generating optical forces in the sub-microNewton (μN) range. The comparison of the initial experiments with the theoretically calculated values illustrate the wide range of possibilities suggested by this method, that also are compatible with the results obtained by other authors [4] which use the same effect of optically generated forces. By this, the generated forces and their further detection are enabled in the sub- μN range which can already be compared with the lowest limit of SI traceable mass artifacts using standard practices for mass/force measurements.

One of the conceptual advantages of this method is the simple underlying straightforward theoretical model consisting minimal mathematical formalism. The main idea is to compare the measured and derived force values, which are produced by the momentum of the photon once it is being absorbed and re-emitted by a reflective object.

On the account of an idealized case when the object/material has a surface with near to ideal reflectivity (there are commercially available ultra-high mirrors with 20 ppm to 50 ppm), the energy/momentum losses of the active laser field can be considered negligible after the photons are absorbed and re-emitted.

$$E^2 = (m_p c^2)^2 + (p v)^2 \quad (1)$$

here E is the total energy of the particle, p is the momentum of the particle, c is the speed of the light. Under the assumptions that the mass of the photon is $m_p = 0$ and the speed of the photon is $v = c$, the Eq. (1) for the photon momentum and therefore for the generated force in the vector form would be given in the form presented in Eq. (2), where \mathbf{n} is a unit vector indicating the photon's motion direction. The force produced by the photon can be derived from the time-derivative of its momentum; therefore, for a given power of the light (laser beam) it yields

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{E}{c} \frac{d\mathbf{n}}{dt} = \frac{E}{c} \frac{\Delta \mathbf{n}}{\Delta t} = \frac{\text{Power}}{c} \Delta \mathbf{n} \quad (2)$$

when considering for an object as an ultra-high mirror $R_L \rightarrow 1$ (no transmission, negligible absorption), then

$$F = \frac{\text{Power}}{c} (1 + R_L) \quad (3)$$

As an example, for a high reflective mirror (assuming $R_L > 99.9\%$ of reflectance, see Fig.1) the force exerted by the laser source with 15mW power can be approximated theoretically as 100 pN, which is equivalent to the gravitational force acting to the $\approx 0.01 \mu\text{g}$ mass piece

$$F = mg \quad (3)$$

The remaining portion of the reflected laser power (in the above example case the remaining 99.9%) has still a momentum that could be measured as a force. Therefore, considering a

system alike a cavity, then the path of the laser beam could be folded/trapped within by big number ($N \rightarrow \infty$) of reflections and then the remaining power of the laser beam after each reflection can be harvested completely in controllable manner, such that at every next reflection the power of the laser beam will fall in accordance to some geometric series until it vanishes completely. Thus, the total sum of forces produced by the N number of reflections of the laser beam would approach asymptotically to some finite value

$$\sum_{i=1}^N F_i = \frac{(1 + R_L)}{c} \sum_{i=1}^N Power_i \quad (4)$$

In accordance to this theoretical calculations, the saturation force produced by the 10 W laser source approaches the 133 μN ($\approx 13.3 \text{ mg}$) asymptote after of about 1500 reflections for the surfaces with 99.5 % reflectivity, and to the 26.35 μN ($\approx 2.6 \text{ mg}$) after of about 250 reflections for the surfaces with 97.5% reflectivity, whereas during the first reflection it produces only 66.3 nN ($\approx 6.63 \mu\text{g}$), and 65 nN ($\approx 6.5 \mu\text{g}$) forces, respectively.

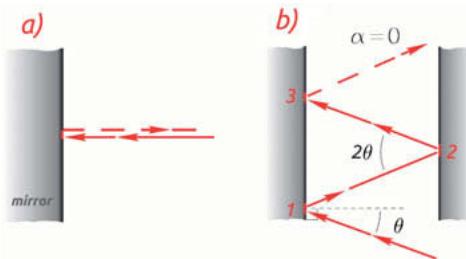


Fig. 1: Geometry of the laser beam and flat surface mirrors. a) single reflection, incidence angle of the laser beam is parallel to the normal of the surface, b) two quasi-parallel mirrors with relative α angle, incidence angle is θ .

From Eq.(3), Eq.(4) and (5) follows that the power of the laser field can be made with simple and short traceability chain directly connecting it to the base/derived units, to the mass standard, within the early version of SI unit system. However, knowing that

- the mass is already redefined by the numerical value of other defining constant, the h , the Planck constant, and
- it is necessary to measure a force instead of the mass

then the usage of the calibrated mass pieces can be avoided entirely. This is considered in case when using a Planck balance [5, 6] like mass/force measurement system and considering that we need to measure only the force exerting to the system by a photon momentum of

the laser beam. Thus, if replacing the “*force mode*” of the Planck balance [5] with the “*photon momentum mode*” or “*momentum mode*” [3] instead, then the value of the *mass* and therefore its *measurement uncertainty* will not enter to the general calibration equation.

An additional advantage of implementing measurements without the “*force mode*” is that the knowledge of the value of the gravitational acceleration will not be required at all; which means that the measurements can be done independent of the gravitational field at the site of the measurement and not necessarily in the vertical motion direction but for the horizontally directed measurement schemes as well [2, 3, 7].

Thus, as it is done for the calibration of the mass pieces traceable to the value of the Planck constant, the power of the laser field also can be calibrated making it traceable to the Planck constant (see Fig.3). Or when using the reversed traceability path, one can calibrate forces or mass pieces tracing it to the well-calibrated laser power detectors.

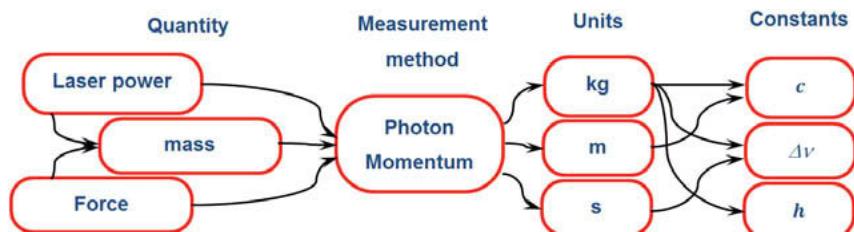


Fig. 2: Traceability path.

Note: From the quantum optics the photon-counting statistics provide simplistic formulation for counting the photons in terms of the power of the laser.

$$Power = \frac{\mathcal{R}}{\eta} \cdot h \cdot f_p = \Phi \cdot h \cdot f_p \quad (5)$$

where \mathcal{R} is the average photon count rate, Φ is the photon flux, η is the quantum efficiency of the detector to be used for cross-referencing the measurements. The laser is considered perfectly coherent monochromatic beam (stream of photons) with constant intensity. Here also, only the $\Delta\nu(133Cs)_{hfs}$, the hyperfine splitting frequency of cesium 133, is required in order to define the frequency and the photon flux

Thus, with this paper we aim to focus our attention on several aspects of the interaction dynamics of the photon momentum generated forces as a cause of the laser irradiation with the mirrors, on the bases of the application specific force measurement setup (FMS).

2. Measurements, validation and reproducibility of the method

The initial analysis presented in [2, 3] have been made assuming one of the most simple and stable type of optical configuration known as Herriott cells with the usage of planar mirrors facing by their reflective coated sides to each other such that one can obtain a distinct specular type of reflections. Meanwhile, we assumed the photon momentum generated (radiation pressure) forces under the quasi-static assumption. In addition, we assumed that the mirrors were not moving during measurements, but rather being controlled with a servo-system on their original - naturally achievable - mechanically stable zero position in closed-loop operation regime. The servo-system is an integrated part of the commercially available EMFC balance (see Fig.4 and Fig.5). However, even in this configuration as the number of reflection and the distance between the mirrors changes, the laser beam (or the reflection spots) can start overlapping onto each other and the cavity can change from the Herriot cell to the Fabry-Perot resonator that in some cases can be unstable even against negligible (parasitic) mirror movements.

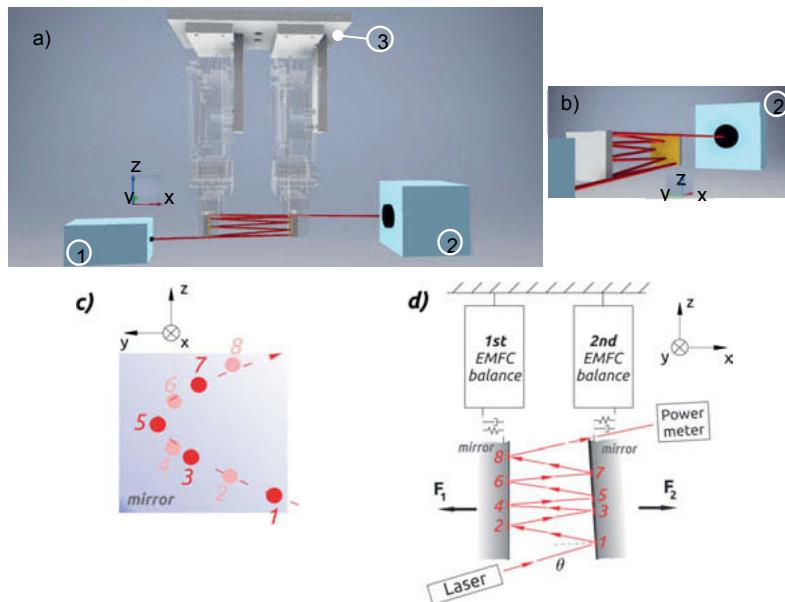


Fig. 4: a) and b) Isometric model of the experimental setup with an illustration of the specular reflections between the mirrors, items: 1 - laser source, 2 – Reference power meter, 3 - FMS, consist of the common bearing plate, EMFC balances (transparent), and the one inch mirrors fix to the EMFC balance in quasi-parallel configuration having a separation distance of about $L=0.09$ m, c) typical pattern of the specular reflections, d) sketch of the simplified experimental setup.



Fig. 5: Photo of the force measurement setup, see Fig.4.

The force measurements were made using a diode lasers at the wavelengths and laser power levels as follows: a) 420 ± 10 nm, $980 \text{ mW} \pm 1\%$, b) 450 ± 7 nm, adjustable 50 mW to 2000 mW $\pm 1\%$, c) 520 ± 2 nm, adjustable 100 mW to 900 mW $\pm 1\%$. The mechanical alignment of the laser source was adjusted to achieve different incidence angles of the beam to the surface of the mirrors. The cross sectional area of the beam for all laser sources was adjusted to be about 3 mm in diameter. Before each experiment the geometry of the multiple reflections has been deliberately tuned such to maintain the same diameter at the first reflection with negligible divergence and upon entrance to the reference power meter (see Fig. 4 and Fig.5). We used the conventional optical one-inch square mirrors, which have reflectivity of $>99.5\%$ at the corresponding wavelengths of the lasers (according to the datasheet specifications provided by manufacturer for the fused silica mirrors). Prior the experiments the laser modules were calibrated (in-house) and the dependence of the average output laser power against the supply electric current were identified with relative uncertainty of below 1 %. The maximal operational output power of each laser source was limited in order to avoid thermal dissipations or other non-linear behaviors. We used the FMS as presented in [2, 3] and additionally integrated photodiode power sensor (SI based from Ophir) that allowed to reference the residual power of the laser field directly at the exit of the cavity after the last reflection take place (see Fig. 4, 8). We have reexamined the following two

types of measurements. a) The measurements made with the period of the average laser power modulations above five seconds are considered as a static condition. b) During the dynamic measurements the average laser power were modulated using two distinct wave forms (sine and square) with different rms and offset values for frequencies in the range of 0.5 Hz to 10 Hz. The averaged maximum of the modulated laser power signal (within 1 % accuracy) we assumed to be reaching within several μ s from $P = 0$ to $P = P_{max}$ when the laser power was switched on and off periodically.

The following computation principle has been considered to analyze the measured force signals. Taking an example of the occurring 8 reflections (at each mirror groups of 4 reflections) the weighted averaged force on each mirror can be calculated as a sum of each individual reflection by Eq.4. The sum of all forces produced by impinging laser beam at each mirror is therefore can be described as $F_{PS8} = \sum F_{P2,P4,P6,P8}$ and $F_{PS7} = \sum F_{P1,P3,P5,P7}$ (see Fig. 4d, eq. 4). From here, the measured signal from the first and second EMFC balances contain $F_1 = -F_{PS8} + F_{err}$, and $F_2 = F_{PS7} + F_{err}$, where F_{err} is considered to be the common error in both EMFC balances originating mainly from the ground vibration noise. Thus, taking the difference of the signals, the total sum produced by the laser source would be equal to $F_{P\text{Total}} = F_{PS7} + F_{PS8}$.

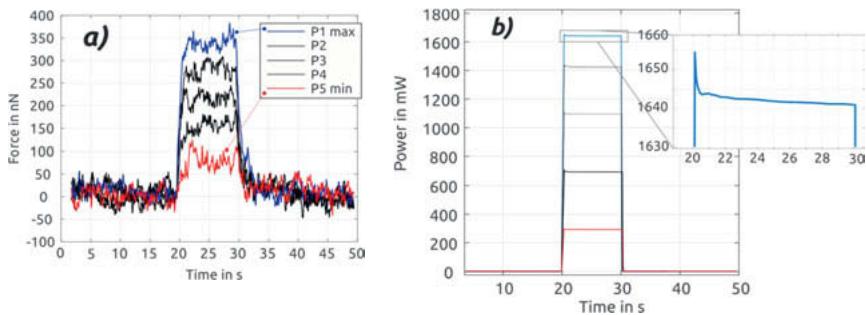


Fig. 6: Example of static force measurements with 10 s of exposure time of the applied laser power. a) Measured forces signal from the FMS in case of the 22 reflection for 5 different magnitudes of the applied average laser power, a feed backwards averaging filter is chosen with the last 15 bins to filter raw data (see Fig.6). b) Output power – the residual laser power measured by after the last reflection, at the input the corresponding power were [360; 850; 1350; 1765; 2000] mW.

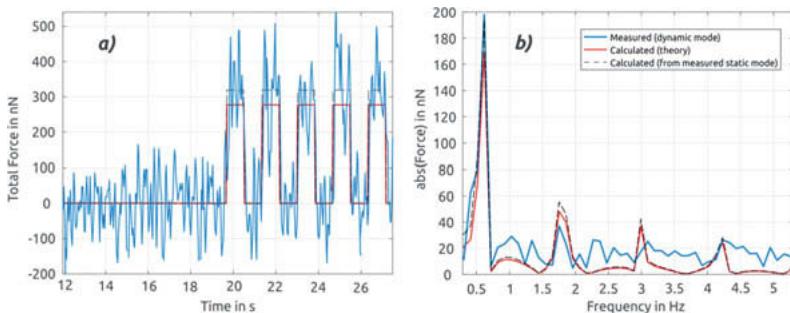


Fig. 7: Example force measurements for 22 reflection configuration at dynamic mode as a function of time in a) and its single-sided amplitude spectrum in b). The average laser power is modulated in a form of square wave at 0.6 Hz frequency with 2000 mW peak-to-peak amplitude. In both figures red solid curve represent theoretically calculated force values using the Eq. 4 as $F = F_{\text{Theory}}[1 + \text{sgn}(\sin ft)]$, in case of the black dashed calculations are made using the mean value of the measured force signal at the static mode as $F = \bar{F}_{\text{measured static}}[1 + \text{sgn}(\sin ft)]$.

In publication [3] we presented more deliberately made measurement results, resolving dynamical signals at and around 1 Hz which we consider as an optimal range of experimental operation for such a class of the systems. In general, our focus is to develop a framework where the following physical quantities Operational mode - 1 Hz, Average laser power level - 1 W, Force measurement range 10 nN to 10 μ N, reflectivity of the mirrors >99.5% to 99.995 % (50 ppm), would be included at in a the numerically convenient form.

In this paper we briefly discussed and demonstrated a method for generation or detection of precision small forces at the sub- μ N level using the total momentum transfer of the photons from multipass laser beam. By comparing the experimentally measured results with the theoretical computations, we confirmed that the multiple reflected laser beam can be used to extend the generated forces due to radiation pressure. We focused on both, the static and dynamic modes of measurements, to increase the generated optical forces from pN order to the several nN up to μ N level for the same laser source. This enables in perspective the comparison possibilities between the lowest limit of SI traceable mass artifacts with the optically generated forces, by the use of various commercially available force transducers. Here, one can notice the following methodologically complementary and reversible measurement/calibration approaches SI traceability is through the Planck constant, either: a) precipi-

sion generation or calibration of the small forces or mass pieces while having power and frequency stabilized laser sources, b) the calibration measurements of the laser power linking it to precise/accurate force measurements or mass piece, c) calibration of the reflectivity coefficients of the optical mirrors.

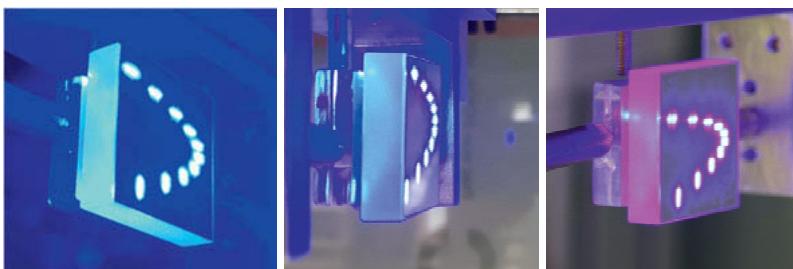


Fig. 8: Example of the 10 reflection spots appearing on the same (one) mirror while using the same laser source (450 nm) during three different measurement days, for 20 reflections configuration (appearing on both mirrors collectively). The average power of the laser was preset at 40 mW before taking the photographs. The difference in colors in all three photographs is due to different ambient lighting at the laboratory and insufficient visualization capacities of the photo-camera.

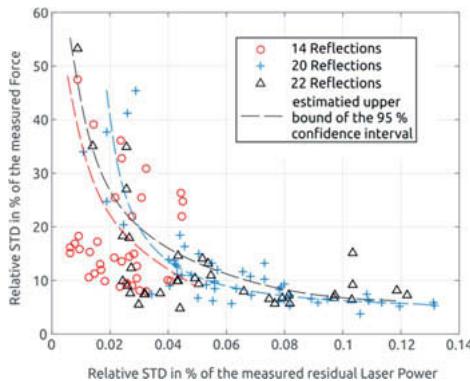


Fig. 9: Example of relative standard deviation of the measured force values during the static mode over the residual power of the laser field (450 nm) for the occurring 3 different number of multiple reflections (14, 20, and 22) and the estimated upper bound of the 95 % confidence interval. The light blue crosses symbolize the measurements made for 20 reflection configuration using the measurement data for all three cases presented in Fig. 8.

Our measurement results presented are made with varying experimental conditions. Such that for the same number of reflections but with different opto- mechanical configuration a number of measurements were carried out (e.g. repetitive measurements at different days, different modulation periods and magnitudes, with the different patterns of the specular reflections, different dead path of the impinging laser beam, see Fig. 8). The measurements of the average residual power show objectively a good reproducibility with the following statistical dispersion values; the mean percentage error is below 0.6 %, the percentage variance is about 0.4 % and the combined relative measurement uncertainty of below 0.2 %. Despite the possibility that there are power losses of the laser field due to the usage of non-ultra-high mirrors, we found in our preliminary work that they are reproducible too. In comparison with the relative uncertainty of the force measurements, it is very small value (see Fig. 8 and 9). However, it should be also mentioned that the uncertainty of the power meter is ± 3 %, and the linearity drift is ± 0.5 % according to the datasheet specifications of the device. Furthermore, it is planned to study in the future the laser beam characteristics, which will be used to generate the radiation pressure induced forces.

3. Conclusion

In this study, we presented photon-momentum (radiation-pressure) -induced precision small force measurements in static and dynamic modes, at a somewhat troublesome range of forces below 1 μ N and above 10 nN. In many cases, this range presents itself as a connecting link between the domains of quantum and classical mechanics [8, 9, 10]. The precision of the force measurements was limited by the capabilities of the state-of-the-art precision weighing cell (calibrated against the gravimetric method in the vertical direction, however used in our case for measurements in the horizontal direction). The forces were generated by the radiation pressure effect, created by multiply reflected beam of continuous wave visible (diode) lasers about 1 W average power which was amplified within the macroscopic cavity system up to several tens of W. Static (<0.2 Hz) and dynamic (range 0.2–10 Hz) modes of measurement were considered for different excitation signals with sine and square waveforms whose peak-to-peak amplitudes ranged from several hundreds of mW up to 2 W. The measurements provided understanding on how in the future, using well-known principles from the mass/force and optical metrology fields, a more simple, SI-traceable route for the referencing of the averaged laser power, reflectivity coefficient, and force measurements (particularly at the verifiable lower force end) could be accomplished, including the dynamical force calibrations.

References

- [1] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)
- [2] Vasilyan S, Fröhlich T and Manske E 2017 Total momentum transfer produced by the photons of a multi-pass laser beam as an evident avenue for optical and mass metrology Opt. Express 25 20798–816
- [3] E. Manske, T. Fröhlich and S. Vasilyan 2019 Photon momentum induced precision small forces: a static and dynamic check, Meas. Sci. Technol. 30 105004
- [4] Williams P, Hadler J, Maring F, Lee R, Rogers K, Simonds B, Spidell M, Feldman A and Lehman J 2017 Portable, high-accuracy, non-absorbing laser power measurement at kilowatt levels by means of radiation pressure Opt. Express 25 4382–92
- [5] Rothleitner C, Schleichert J, Rogge N, Günther L, Vasilyan S, Hilbrunner F, Knopf D, Fröhlich T and Härtig F 2018 The planck-balances using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights Meas. Sci. Technol. 29 074003
- [6] Robinson I A and Schlamming S 2016 The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass Metrologia 53 A46–74
- [7] Vasilyan S, Rivero M, Schleichert J, Halbedel B and Fröhlich T 2016 High-precision horizontally directed force measurements for high dead loads based on a differential electromagnetic force compensation system Meas. Sci. Technol. 27 045107
- [8] Braginsky V B and Vyatchanin S P 2002 Low quantum noise tranquilizer for Fabry–Pérot interferometer Phys. Lett. A 293 228–34
- [9] Aspelmeyer M, Kippenberg T, Tobias J and Marquardt F 2014 Cavity optomechanics Rev. Mod. Phys. 86 1391–452
- [10] Karki S and Savage R L 2016 The advanced LIGO photon calibrators Rev. Sci. Instrum. 87 114503

Messunsicherheit bei vereinfachten Kalibrierabläufen der Messgrößen Kraft und Drehmoment unter Anwendung statistischer Verfahren

Dipl.-Ing. Lioba Stenner,
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt

Kurzfassung

Durch die konsequente Umsetzung von Normanforderungen steigt der Bedarf an akkreditierten Kalibrierungen, die in nach ISO 17025 [1] akkreditierten Kalibrierlaboren durchgeführt werden müssen. Für Kraft- und Drehmoment-Aufnehmer existieren schon seit langem Normen mit sehr umfangreichen und damit aufwändigen statischen Kalibrierverfahren. Damit Industrieaufnehmer auch effizient kalibriert werden können, wurden Richtlinien zur Kalibrierung nach vereinfachten Verfahren erstellt. Die Berechnung der Messunsicherheit beruht bei diesen Verfahren teilweise auf statistisch ermittelten Kenngrößen. Es werden die Voraussetzungen und die Vorgehensweisen für die statistischen Verfahren beschrieben, wobei die praktische, anwendungsspezifische Herangehensweise im Vordergrund steht. Für den praxisgerechten Einsatz eines Aufnehmers in der Anwendung sind weitere Aspekte hilfreich, damit nicht nur Normen erfüllt werden, sondern auch das Ergebnis der Kalibrierung für messtechnische Anwendung optimal genutzt werden kann

1. Normen und Richtlinien für die statische Kraft- und Drehmoment-Kalibrierung

Schon früh wurde der Bedarf für eine Norm zur Kalibrierung von Kraftaufnehmern erkannt. Hintergrund war die Anwendung zur Kalibrierung von Materialprüfmaschinen. So entstanden zuerst auf nationaler, später auf internationaler Ebene die Vorläufer der heutigen ISO 376 [2]. Neben der Beschreibung des statischen Kalibrierverfahrens beinhaltet diese auch eine Klassifizierung und im Anhang das Verfahren zur Berechnung der Messunsicherheit. Damit alle Eigenschaften, sowohl des Aufnehmers als auch der Kalibrieranlage berücksichtigt werden, ist das Verfahren sehr aufwändig. Neben der Vorbelastung der Aufnehmer zur Konditionierung, sind Wiederholreihen zur Bestimmung der Wiederholpräzision b' und Drehungen des Aufnehmers für Messreihen in drei Einbaustellungen zur Bestimmung der Vergleichspräzision b notwendig. Es ist eine Mindestanzahl von acht Kalibrierstufen festgeschrieben, damit die Grundlage zur Berechnung der Interpolationsabweichung höheren Grades gegeben ist. Eine

weitere Besonderheit der mechanischen Messgrößen ist die Hysterese. Damit diese bestimmt werden kann sind Auf- und Abwärts-Messreihen notwendig. Der vollständige Ablauf einer Kalibrierung nach ISO 376 ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

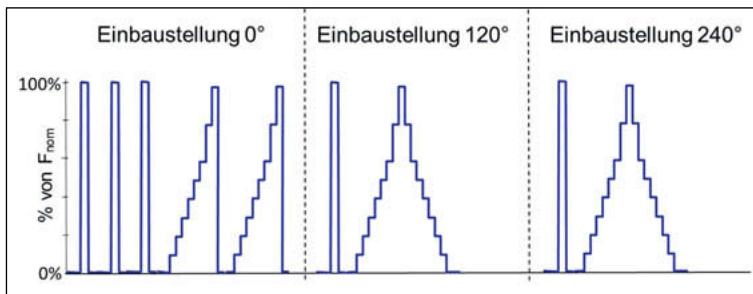


Bild 1: Darstellung der Vorbelastungen und Messreihen beim Kalibrierablauf nach ISO 376

Die ISO 376 enthält Klassifizierungskriterien für die Kraftaufnehmer, damit diese bei der weiteren Anwendung zur Kalibrierung von Materialprüfmaschinen klar zugeordnet werden können. Neben den darin definierten Anforderungen für die messtechnischen Eigenschaften fordert die jeweilige Klasse auch eine Mindest-Messunsicherheit für die Kalibrieranlage, auf der die Kalibrierung durchgeführt wird.

Ähnlich aufwändig wie die Kalibrierung nach ISO 376 ist auch der Ablauf einer Kalibrierung von Drehmoment-Aufnehmern nach DIN 51309 [3], die grafische Darstellung der Messreihen ist Bild 2 zu entnehmen.

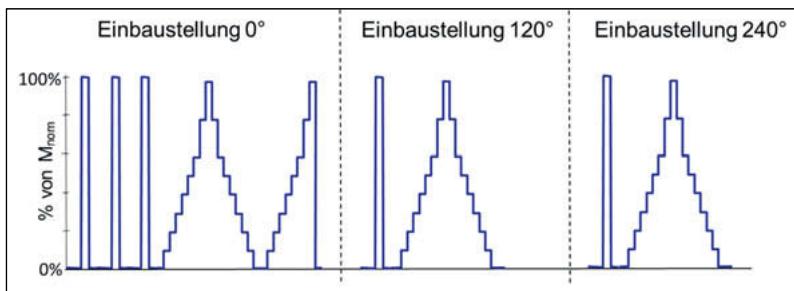


Bild 2: Darstellung der Vorbelastungen und Messreihen beim Kalibrierablauf nach DIN 51309

Diese umfangreichen Abläufe sind notwendig, um alle relevanten, individuellen Eigenschaften des jeweiligen Aufnehmers zu erfassen und daraus seine Messunsicherheit zu bestimmen. Der zeitliche Aufwand ist, bedingt durch die geforderten drei Einbaustellungen und die Anzahl

der Stufen, bei beiden Normen jedoch sehr hoch. Deshalb wurden vereinfachte Kalibrierverfahren entwickelt, die eine Kalibrierung in nur einer Einbaustellung und mit einer reduzierten Anzahl an Stufen erlauben. Dies sind die DKD-R 3-3 [4] für Kraftaufnehmer und die VDI 2646 [5] für Drehmomentaufnehmer. Deren Abläufe sind in Bild 3 und Bild 4 dargestellt, sie verkürzen die Kalibrierzeit in den Kalibrieranlagen signifikant, bieten so die Möglichkeit eines wirtschaftlich angemessenen Preis-Leistungsverhältnisses bei geringerem Genauigkeitsanspruch.

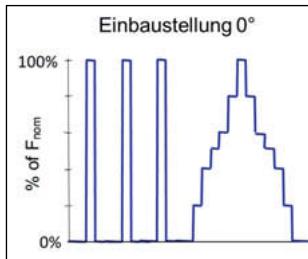


Bild 3: Schematische Darstellung Kalibrierablauf DKD-R 3-3, Ablauf C

Besonders viele Möglichkeiten den Kalibrierablauf für den Kraftaufnehmer anzupassen bietet DKD-Richtlinie DKD-R 3-3. Angefangen vom Ablauf A, der im Vergleich zur ISO 376 eine reduzierte Anzahl an Stufen erlaubt, jedoch weiter alle 3 Einbaustellungen fordert, bieten die Abläufe B bis D in nur einer Einbaustellung die Möglichkeit fehlende Unsicherheitsbeiträge durch „a-priori-Wissen“ zu bestimmen.

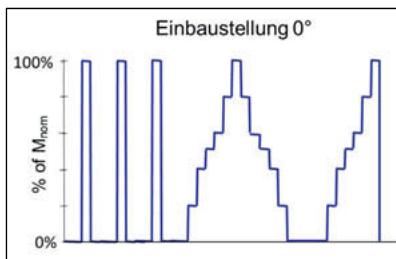


Bild 4: Schematische Darstellung Kalibrierablauf VDI 2646

Im Vergleich zur DKD-R 3-3 wird bei der VDI 2646 auch die Wiederholpräzision im Ablauf selbst bestimmt (siehe Bild 4). Die Vergleichspräzision ist auf andere Art, z.B. statistisch zu ermitteln.

2. Vereinfachte Kalibrierverfahren - statistische Bestimmung der Kenngrößen

Die DKD-Richtlinie DKD-R 3-3 zur Kalibrierung von Kraftmessgeräten lässt als „a-priori“-Wissen für fehlende Kenngrößen drei Möglichkeiten zu, dies sind:

- Bauartprüfungen (statistische Verfahren)
- Kalibrierscheine vorhergehender, umfangreicher Kalibrierungen nach ISO 376 oder DKD-R 3-3, Ablauf A, derselben Seriennummer
- Datenblattangaben für den jeweiligen Typen.

Die VDI-Richtlinie VDI 2646 zur Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten erlaubt die Ermittlung der fehlenden Werte für die Vergleichspräzision aus statistischen Verfahren.

Neben dem Handwerkszeug der statistisch bekannten Auswerteverfahren, sind die messtechnisch relevanten Randbedingungen von Interesse.

Basis bildet ein bekanntes statistisches Auswerteverfahren, dabei kann die Mindestanzahl der für die Statistik verwendeten Kalibrierungen von jedem Labor eigenverantwortlich festlegt werden. Dabei ist bei Verwendung der Student-Verteilung der t-Faktor entsprechend anzuwenden. Eine größere Anzahl an Stichproben ist vorteilhaft, da aufgrund der größeren Zuverlässigkeit der statistischen Aussage auch der t-Faktor einen kleineren Wert annimmt. Bei der Auswertung müssen Ausreißer zuverlässig erkannt werden und es muss eine Festlegung zu deren Bewertung geben.

Die ideale Grundlage ist eine Datenbank aller Kalibrierungen nach einem umfangreichen Kalibrierablauf. Bei der statistischen Auswertung sollte jede Seriennummer nur einmal berücksichtigt werden.

Typgruppen müssen vorab definiert werden, hierbei ist nicht nur die Typbezeichnung relevant, je nach Messkörperdesign und -material müssen bei einem Typen unterschiedliche Nennkräfte / Nenndrehmomente getrennt betrachtet werden. Andererseits können gegebenenfalls Typgruppen mit unterschiedlichen Bezeichnungen durchaus zusammengefasst werden, da das Messkörper-Design identisch ist.

Die Anzeigeeinheiten der in die Statistik eingehenden Messwerte sind nicht einheitlich, da das Messen einer mechanischen Verformung immer über die Umwandlung in ein elektrisches Signal geschieht. Dabei kann bei Messketten auch eine Anpassung des angezeigten Signals in die mechanische Einheit erfolgen, oder die Ausgabe auf einen normierten Spannungs- oder Stromausgang. Deshalb müssen die Messwerte vorab normiert werden.

Eine Besonderheit bei Kraftkalibrierungen ist der Einfluss der Belastungsrichtung auf die Kenngrößen. Der Unterschied zwischen einer Zug- und Druckkraftkalibrierung (Prinzipien siehe Bild

5) ist so relevant, dass die Auswertung getrennt erfolgen muss. Bild 6 zeigt den Unterschied der Vergleichspräzision b bei Zug- und Druckbelastung am Beispiel eines Industrieaufnehmers, bei diesem Typen ist der Wert für die Druckbelastung im Vergleich zur Zugbelastung um den Faktor 3 größer. Dieses Verhalten ist spezifisch für eine Typgruppe, kann nicht auf andere Typgruppen übertragen werden. So kann bei anderen Typgruppen die Vergleichspräzision bei Zugbelastung dominieren.

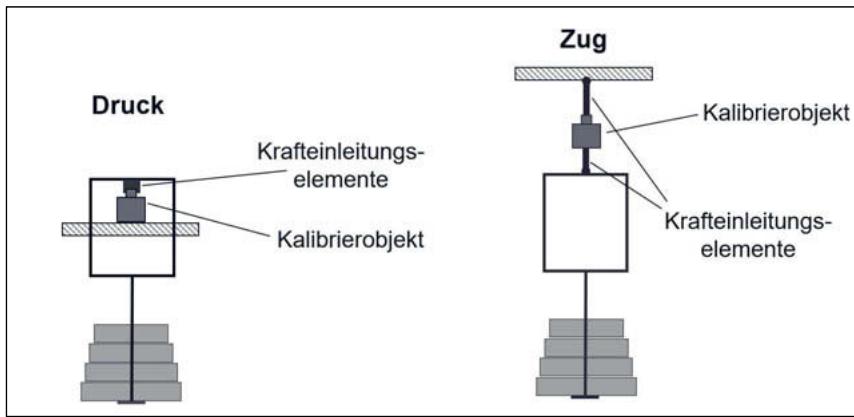


Bild 5: Belastungsprinzip Druck- und Zugkraft bei einem Kraftaufnehmer in einer Direktbelastungsanlage

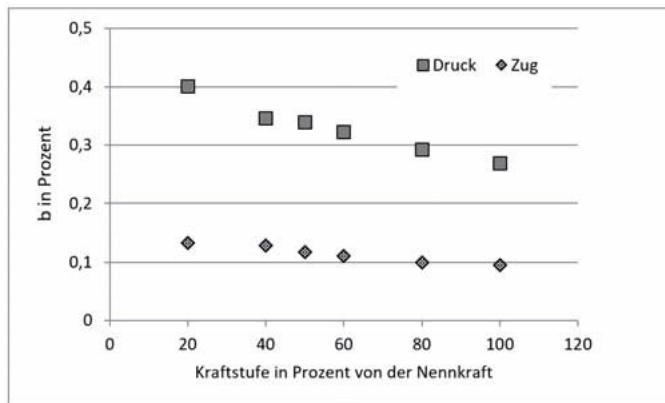


Bild 6: Statistisch ermittelte Werte für die Vergleichspräzision in Zug- und Druckkraft

Aufgrund des rotationssymmetrischen Aufbaus ist es bei Drehmomentaufnehmern dagegen ausreichend nur eine Belastungsrichtung zu betrachten.

Eine weitere Entscheidung, die für die statistische Auswertung getroffen werden muss, ist der Kalibrierbereich einer Auswertung, ob die Kalibrierpunkte einzeln ausgewertet werden, oder zusammengefasst werden, um dann immer den schlechtesten Wert einer Messreihe zu verwenden. Wie man anhand des Beispiels in Bild 7 erkennen kann, gäbe eine Zusammenfassung zusätzliche Sicherheit, sie würde aber, insbesondere bei dem Industrieaufnehmer, die anderen Kalibrierpunkte unangemessen verschlechtern. Aus diesem Grund ist eine getrennte Betrachtung der Kalibrierstufen sinnvoll, natürlich müssen dafür immer die Kenngrößen genau dieser Stufen aus den umfangreichen Kalibrierverfahren vorliegen.

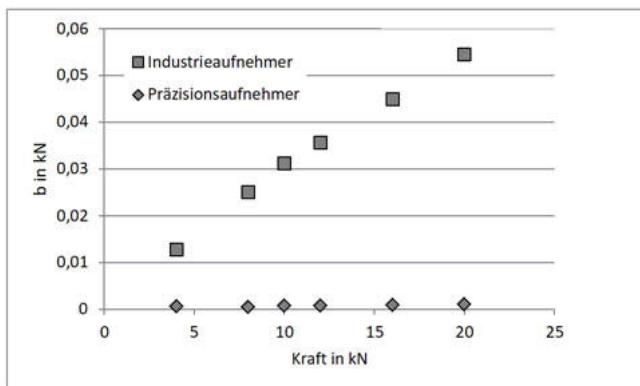


Bild 7: Statistisch ermittelte Werte für b in Abhängigkeit von der Kraft

Bezugsnormale für Kraft- und Drehmomentkalibrierung können nach unterschiedlichen Prinzipien aufgebaut sein, weit verbreitet sind Direktbelastungsanlagen und Referenzanlagen. Das Prinzip der Direktbelastung beruht auf Gewichten, die im Schwerfeld der Erde die Kraft erzeugen. Bei Referenzanlagen wird der Wert des Kalibiergegenstandes mit dem eines zuvor kalibrierten Referenzaufnehmers verglichen. Die Richtlinie EURAMET cg-04 (Uncertainty of Force Measurements) [6] gibt einen sehr guten Überblick über diese und weitere Prinzipien und den jeweils erreichbaren CMC (accredited calibration and measurement capability). Die erreichbare relative Messunsicherheit für Direktbelastungsanlagen wird darin mit 5×10^{-5} bis 1×10^{-4} angegeben, erwartungsgemäß ist die Messunsicherheit für Referenzanlagen mit 5×10^{-4} bis 5×10^{-3} dagegen höher anzusetzen. Die Messunsicherheit des Bezugsnormals geht immer mit in die Messunsicherheitsberechnung einer Kalibrierung ein, das Normal selbst hat

aber auch aktiven Einfluss auf die Vergleichs- und Wiederholpräzision. So können Biegemomente, oder bei Referenzanlagen, eine nicht synchrone Datenerfassung einen Einfluss auf das Kalibrierergebnis haben. Aus diesem Grunde dürfen immer nur die auf der identischen Bezugsnormalmesseinrichtung ermittelten statistischen Daten verwendet werden, ein Übertrag auf andere Kalibrieranlagen ist nicht möglich, wird in den Richtlinien explizit ausgeschlossen.

Die mit den vereinfachten Verfahren zu erreichenden Messunsicherheiten können naturgemäß nie die Messunsicherheit einer umfangreichen Kalibrierung ausweisen, da Beiträge statistisch ermittelt werden. Die prozentuale Verteilung der Varianzen einer ISO 376-Kalibrierung ist in Bild 8 dargestellt, darin erfolgt der Vergleich zwischen einem Industrieaufnehmer und einem Präzisionsaufnehmer. Die Summe der Varianzen ergibt immer 100%. Beim Industrieaufnehmer trägt die Vergleichspräzision (w^2_{rot}) mit 74% wesentlich zur Messunsicherheit bei, beim Präzisionsaufnehmer ist dieser Anteil vernachlässigbar. Die Relation der Absolutwerte für die beiden Aufnehmertypen ist am einfachsten für w^2_{cmc} nachzuvollziehen, die erweiterte Messunsicherheit der Kalibrieranlage betrug jeweils 0,005%, beim Präzisionsaufnehmer entspricht dies 38%, beim Industrieaufnehmer nur 1%.

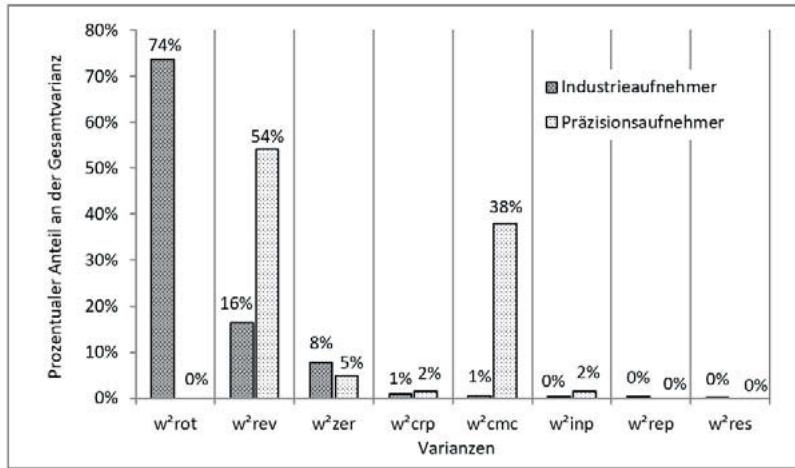


Bild 8: Darstellung der prozentualen Anteile der Varianzen bei einer ISO 376 Kalibrierung
rot-Vergleichbarkeit, rev-Umkehrspanne, rep-Wiederholbarkeit

Entsprechend trägt die Vergleichspräzision auch bei einer vereinfachten Kalibrierung nach DKD-R 3-3 beim Industrieaufnehmer mit 0,3% als Absolutwert wesentlich zur Messunsicherheit bei. Aber auch beim Präzisionsaufnehmer stellen die statistisch ermittelten 0,01% im Vergleich zu den bei einer Kalibrierung nach ISO 376 durchaus erreichbaren 0,007% eine deutliche Verschlechterung dar.

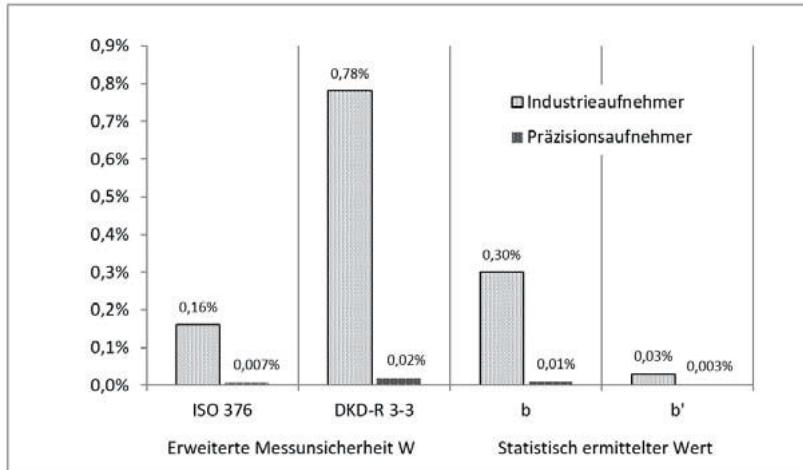


Bild 9: Erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) und Vergleichspräzision, Wiederholbarkeit für zwei unterschiedliche Aufnehmertypen

3. Praxisgerechte Anwendung der Kalibrierergebnisse

Die im Kapitel zwei dargestellten Ergebnisse zeigen, dass es bei Kraft- oder Drehmomentaufnehmern, die als Referenz- oder Transfernormal eingesetzt werden sollen, auf alle Fälle sinnvoll ist, weiter nach den umfangreichen Kalibrierverfahren zu kalibrieren, damit die bestmögliche Messunsicherheit erreicht wird. In industriellen Anwendungen sind oft auch die vereinfachten Kalibrierverfahren mit der größeren Messunsicherheit geeignet. Die Anforderung an die Messunsicherheit in der Anwendung sollte immer das Auswahlkriterium sein.

Beim Einbau der Aufnehmer ist die Montageanleitung des Herstellers genau zu beachten, die angegebenen Anzugsmomente sind einzuhalten, bei Flanschtyp-Drehmomentaufnehmern ist darauf zu achten, dass die Schraubenköpfe nicht anliegen. Kraftnebenschlüsse sind generell zu vermeiden. In der Anwendung selbst ist es empfehlenswert zu Beginn Wiederhol-messungen durchzuführen, schon allein um Vertrauen in den Gesamtaufbau zu gewinnen. Dabei geht

es weniger um den Einfluss des Aufnehmers, dessen Eigenschaften dem Kalibrierschein entnommen werden können, als um mechanische Störgrößen, wie Axial- und Querkräfte oder Biegemomente. Diese sind eigentlich zu vermeiden, oder anhand der Datenblattangaben des Herstellers abzuschätzen und in der Messunsicherheitsberechnung zu berücksichtigen. Weitere Störgrößen sind Temperaturgradienten oder EMV-Einflüsse, diese sollten möglichst vermieden, oder auf ein Minimum reduziert werden.

Idealerweise wird der Aufnehmer gemeinsam mit dem Messverstärker inkl. Kabel, mit dem er eingesetzt wird als Messkette kalibriert. Damit sind die Auflösung des Messverstärkers und seine Eigenschaften im Kalibrierergebnis enthalten. Der Messverstärker kann auch (zusätzlich) einzeln DAkkS-kalibriert werden, so ist ein Austausch leichter möglich. Falls der Messverstärker nicht kalibriert wird, sind seine Datenblattangaben als Beitrag zur Messunsicherheit zu verwenden. Die Kalibrierung des Aufnehmers muss dann zumindest bei der später verwendeten Brückenspeisespannung und Trägerfrequenz durchgeführt werden. Der Einfluss der Brückenspeisespannung kann nie vernachlässigt werden. Der Einfluss der Trägerfrequenz bezieht sich auch auf die Kabel, hochwertige Messkabel sind zu verwenden. Bei langen Kabeln ist, unabhängig von der Trägerfrequenz, der Spannungsabfall über dem Kabel nicht mehr vernachlässigbar [7], bei DMS-Aufnehmer kann dies mit Widerständen ($R_b/2$) in der Rückführleitung kompensiert werden. Beim Einsatz mit kontinuierlicher oder dynamischer Belastung müssen Laufzeitdifferenzen der Messverstärker minimiert, oder berücksichtigt werden.

Einen sehr guten Überblick über Einflussgrößen bei der Kraftmessung im industriellen Einsatz gibt die Richtlinie EURAMET cg-4 im Kapitel 7. Die Richtlinie befindet sich gerade in der Überarbeitung, in der neuen Version wird das Thema noch ausführlicher behandelt.

Die bisher in diesem Artikel aufgeführten Verfahren beziehen sich alle auf die statische Kalibrierung von Kraft- und Drehmomentaufnehmern. Die Nationalen Metrologischen Institute haben jedoch den Bedarf zur Forschung auf dem Gebiet der dynamischen Kalibrierung erkannt und im Rahmen des EMRP (European Metrology Research Programme) wurden bereits zwei Projekte durchgeführt. (EMRP IND09 (<https://www.ptb.de/emrp/ind09.html>) und EMRP 14SIP08 <http://empir.npl.co.uk/dynamic/>). Zusätzlich zeigen Veröffentlichungen z.B. [8] den aktuellen technischen Stand auf diesem Gebiet.

- [1] DIN EN ISO/IEC 17025:2018: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017)
- [2] DIN EN ISO 376:2011: Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Kraftmessgeräten für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung (ISO 376:2011)
- [3] DIN 51309:2005: Werkstoffprüfmaschinen – Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente
- [4] DKD-R 3-3:2007: Kalibrierung von Kraftmessgeräten
- [5] VDI/VDE 2646:2006: Drehmomentmessgeräte Mindestanforderung an Kalibrierungen
- [6] EURAMET cg-4 Version 2.0: 2011: Uncertainty of Force Measurements
- [7] Schäck, Marco M.: Underestimated Impact of Measuring Cables on High Precision Carrier Frequency Amplifier Results and Compensation Methods Therefor. XXI IMEKO World Congress, 30 August to 4 September, 2015, Prague, Czech
- [8] Schäfer, André, Eichstädt, Sascha: Evaluations of Dynamic Measurement Uncertainty for Industrial Applications. XXIII IMEKO TC3 International Conference, 30 May to 1 June, 2017, Helsinki, Finland

Der digitale Zwilling für metrologische Anwendungen

Ludwig Günther, Dr.-Ing. Prof. h. c. Frank Härtig,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Kurzfassung

Digitale Zwillinge in der Messtechnik sind numerische Bilden von realen Messobjekten oder Messprozessen. Mit ihnen werden zufällige und systematische Abweichungen beschrieben und daraus Vorhersagen über das Verhalten getroffen. Grundlage bildet eine Modelfunktion und die Kommunikation mit anderen digitalen Zwillingen. Mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen ist es möglich, selbst nicht-lineare oder korrelierte Zusammenhänge auf einfache Weise zu berücksichtigen ohne, dass der mathematische Aufwand signifikant zunimmt. Die Kombination eines virtuellen Messgeräts, dargestellt durch die Modelfunktion und eine Monte Carlo Simulation sowie Kalibrierdaten, bildet einen digitalen Zwilling des abgebildeten Messgeräts oder -prozesses. Dabei wird vor allem das metrologisch relevante Verhalten unter vorgegebenen Umgebungsbedingungen berücksichtigt. An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wurde der digitale Zwilling eines Wägestücks als erster Demonstrator des Konzepts implementiert. Dieser bildet im derzeitigen Stand den Einfluss von Umweltbedingungen, des Reinigungszustands, der geometrischen Form und der Materialeigenschaften auf das messbare Gewicht ab.

1. Einleitung

Die Messunsicherheit ist ein wichtiges Maß für die Qualität und die Aussagekraft von Messergebnissen. Der traditionelle Ansatz zur Abschätzung der Messunsicherheit, beschrieben in "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement methods" (GUM) [1], hat besonders bei nicht-linearen oder korrelierten Zusammenhängen den Nachteil, dass die Berechnungen sehr umfangreich und kompliziert werden. Supplement 1 des GUM beschreibt die Bestimmung von Messunsicherheiten mit einer Monte Carlo Simulation [2]. Diese Variante hat den Vorteil, dass die mathematische Komplexität für den Anwender auch für komplexe Anwendungsfälle in etwa gleich bleibt. Da genaue Modelfunktionen von derzeitigen Messgeräten oft auch nicht-lineare Anteile beinhalten und den Einfluss von verschiedenen Teilsystemen des Geräts berücksichtigen müssen, kann die Genauigkeit der Messunsicherheitsbestimmung mit Monte Carlo Simulationen verbessert werden. Die Kombination aus detaillierter Modelfunktionen und Monte Carlo Simulation für die Messunsicherheitsbestimmung wird als *virtuelles Messgerät* bezeichnet.

Wird das virtuelle Messgerät zusätzlich mit detaillierten Informationen eines spezifischen Messgeräts erweitert, erhält man den *digitalen Zwilling* dieses spezifischen Messgeräts. In metrologischen Anwendungen beinhalten diese Zusatzinformationen beispielsweise aktuelle und vorangegangene Kalibrierdaten oder auch Eigenschaften, welche das Verhalten des Geräts beschreiben wie beispielsweise Materialeigenschaften. Als Demonstrator dieses Konzepts wurde an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) der digitale Zwilling für Wägestücke (DZW) zur Anwendung in der Massemetrologie oder anderen hochgenauen Gewichtsbestimmungen entwickelt. Dieser beschreibt das Verhalten eines spezifischen Wägestücks unter bestimmten Umgebungsbedingungen, welche das Messergebnis bei der Massebestimmung beeinflussen können.

Im Idealfall existieren für alle im Messaufbau enthaltenen Geräte digitale Zwillinge, welche miteinander vernetzt sind und die entsprechenden Eingangsdaten für den DZW bereitstellen. Die digitalen Zwillinge verfügen daher über eine einheitliche und standardisierte Kommunikationsschnittstelle zum Austausch von Daten zwischen den digitalen Zwillingen oder der Benutzersoftware.

Da die Kalibrierdaten einen besonders wichtigen Teil der gerätespezifischen Informationen darstellen, wird derzeit an der PTB der digitale Kalibrierschein (DCC) mit einem einheitlichen Datenaustauschformat entwickelt [3]. Damit wird die digitalisierte Bereitstellung, Verarbeitung und Ablage von Kalibrierdaten ermöglicht. Dies vereinfacht auch die Verwendung von digitalen Zwillingen in der Metrologie und in industriellen Anwendungen und sichert die Rückführbarkeit der erzielten Messergebnisse.

2. Unsicherheitsbestimmung mit virtuellen Messgeräten

Voraussetzung für Messunsicherheitsbestimmungen ist eine vollständige Modelfunktion, welche den Messprozess realistisch abbildet. Bild 1 zeigt den grundsätzlichen Ablauf, mit dem der Erwartungswert und dessen zugehörige Messunsicherheit eines Messvorgangs bestimmt werden. Die Modelfunktion f hängt von m Eingangsgrößen X_1, \dots, X_m ab und hat den Erwartungswert Y als Resultat. Mit Hilfe der im GUM beschriebenen Methode lässt sich die Unsicherheit $u(Y)$ abschätzen, indem eine Unsicherheitsbilanz aus Typ A und Typ B Unsicherheiten erstellt wird, wobei Typ B aus den Unsicherheiten der Eingangsvariablen $u(X_1), u(X_2), \dots, u(X_m)$ berechnet wird [1].

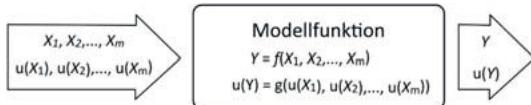
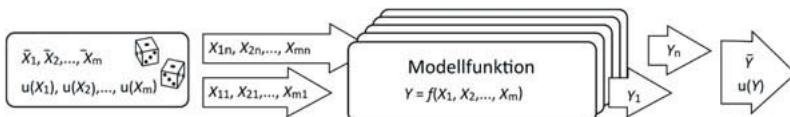


Bild 1: Unsicherheitsbestimmung eines Messprozesses entsprechend GUM.

Im Supplement 1 des GUM wird die Unsicherheitsbestimmung mit Monte Carlo Simulationen vorgestellt [2]. Die Streuung des Messergebnisses wird durch n wiederholte Berechnungen mit zufallsgenerierten Eingangsvariablen bestimmt. Aus den einzelnen Ergebnissen dieser Berechnungen werden anschließend die Unsicherheit $u(Y)$ und der Erwartungswert Y des Messergebnisses abgeleitet (siehe Bild 2). Die Verteilungsfunktion, mit der der Zufallsgenerator die einzelnen Eingangsgrößen erzeugt, kann frei gewählt werden und an das Verhalten der realen Eingangsgrößen angepasst werden. Somit lässt sich der Einfluss der Eingangsvariablen auf die Unsicherheit des Messergebnisses genauer berücksichtigen. Anders als mit der klassischen GUM-Methode erhöht sich für den Anwender die mathematische Komplexität mit Monte Carlo Simulationen nicht wesentlich, wenn diese auf nicht-lineare, korrelierte oder andere aufwändige Modellfunktionen angewendet werden.

Bild 2: Messunsicherheitsbestimmung mit n virtuellen Experimenten (Monte Carlo Simulation).

Eingangsgrößen für die Modellfunktion sind die Eingangsmesswerte für den Messvorgang und alle relevanten parasitären Einflussgrößen, wie die Umgebungsbedingungen. Dabei ist bei metrologischen Anwendungen besonders darauf zu achten, dass diese Eingangswerte auf SI-Einheiten zurückgeführt werden. Hierdurch werden insbesondere die systematischen Abweichungen zuverlässig, d. h. im Sinne von Kalibrierwerten, angegeben.

Parasitäre Einflüsse auf das Messergebnis lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- bekannte systematische Abweichungen,
- unbekannte systematische Abweichungen,
- zufällige Abweichungen.

Bekannte systematische Abweichungen sind zeitunabhängige, reproduzierbare Einflüsse auf das Messergebnis. Da diese bekannt sind, ist es möglich und nach GUM empfohlen, ein Ergebnis um die systematischen Abweichungen zu korrigieren. Sonst muss der Einfluss der systematischen Abweichung in der resultierenden Messunsicherheit berücksichtigt werden [4]. Zufällige Abweichungen beschreiben stochastisches Verhalten, welches nicht mit hinreichender Sicherheit wiederholt werden kann, daher ist eine Korrektur im Messergebnis nicht möglich. Unbekannte systematische Abweichungen können Art und Umfang des Einflusses zufällig ändern, bleiben aber für die Dauer des jeweiligen Experiments konstant. Beispielsweise die Position eines Wägestücks auf der Wägeschale, welches mit einem Lastwechsler angehoben und wieder abgesetzt wird. Bei Messungen ohne Lastwechsel ist die Position des Wägestücks auf der Wägeschale nicht exakt bekannt, ändert seine Position im Verlauf des Experiments jedoch nicht und muss dementsprechend anders berücksichtigt werden als bei Experimenten mit Lastwechseln.

3. Im virtuellen Wägestück modellierte Effekte

Das virtuelle Wägestück umfasst in derzeitigen Messprozessen der Massenmetrologie relevante Einflussgrößen, welche das gemessene Gewicht des Wägestücks beeinflussen. Vor allem Auftriebseffekte durch Schwankungen der Luftdichte dominieren die Einflüsse. Dieser Abschnitt beschreibt die Einflussgrößen, welche derzeit in der Modellfunktion berücksichtigt werden. Um die Leistungsfähigkeit des virtuellen Wägestücks zu verbessern, wird diese Modellfunktion zukünftig um weitere Einflussgrößen erweitert.

3.1 Luftauftrieb

In Massebestimmungen mittels Messung der Gewichtskraft oder bei Vergleichen mit bekannten Massenormalen beeinflusst das Medium in dem sich die Wägestücke befinden das Messergebnis. Der wirksame Auftrieb hängt von der Dichte des durch das Wägestück verdrängten Mediums und der Dichte des Wägestücks ab.

Die angezeigte Masse m eines Prüflings berechnet sich aus der gemessenen Gewichtskraft F , der Fallbeschleunigung g und der Dichte des umgebenden Mediums ρ_m und des Wägestück ρ entsprechend

$$m = \frac{F}{g} \left(\frac{\rho}{\rho - \rho_m} \right). \quad (1)$$

Die Dichte von feuchter Luft ρ_a , welche das Medium ist, in der die Messungen üblicherweise durchgeführt werden ($\rho_f = \rho_a$), hängt von den Umgebungsbedingungen ab und kann mit Hilfe der sogenannten CIPM-Formel berechnet werden [8]:

$$\rho_a = \frac{p M_a}{ZRT} \left(1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right). \quad (2)$$

Dabei ist p der Luftdruck in Pa, T die Temperatur in K, x_v der molare Anteil des Wasserdampfs, M_a die molare Masse trockener Luft in g mol⁻¹, M_v die molare Masse von Wasser, ebenfalls in g mol⁻¹, Z der Kompressibilitätsfaktor und R die spezifische Gaskonstante in J mol⁻¹ K⁻¹. Die aktuellste Version der CIPM-Formel stammt aus dem Jahr 2007 und dient als Ausgangspunkt zur Modellierung von Luftauftriebseffekten [8].

M_v und R werden als unabhängig von den Umgebungsbedingungen angenommen und dementsprechend als unveränderliche Werte mit einer zugehörigen Messunsicherheit berücksichtigt. Z und x_v hängen von den Umgebungsbedingungen Luftfeuchtigkeit, -druck und -temperatur ab. Die molare Masse von trockener Luft berechnet sich zu 28.96546 g mol⁻¹ [8]. Der Anteil von CO₂ wird üblicherweise als 400 ppm angenommen [6]. Es wurde jedoch festgestellt, dass der CO₂ Anteil in verschiedenen Laboren erheblich von dieser Annahme abweicht [8]. Um dies zu berücksichtigen berechnet sich M_a als

$$M_a = \left(28.96546 + 12.011 (x_{CO_2} - 0.0004) \right) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

mit x_{CO_2} als Anteil von CO₂ an der Umgebungsluft [8].

Das Volumen der vom Wägestück verdrängten Luft hängt von der Volumenausdehnung des Wägestück und damit von der Umgebungstemperatur ab [6]. Mit dem Volumenausdehnungskoeffizient α_v des Materials mit der Referenztemperatur T_0 wird das tatsächliche Volumen V bei einer bestimmten Temperatur T :

$$V = V(T_0) \cdot (1 + \alpha_v(T - T_0)). \quad (4)$$

3.2 Oberflächenbelag

Bei hochpräzisen Anwendungen in der Massenmetrologie muss die an der Oberfläche des Wägestücks adsorbierte Wasserschicht berücksichtigt werden. Die Menge des adsorbierten Wassers hängt von der Feuchtigkeit in der Umgebungsluft und dem Reinigungszustand der Oberfläche des Wägestücks ab. In [6] wird, basierend auf der Brunauer-Emmet-Teller (BET) Formel, die Masse des Wassers an der Oberfläche des Wägestücks m_A entsprechend

$$m_A = A \cdot \left(\mu_{h=0} + \frac{\mu_m c_B h}{(1-h)(1+h \cdot (c_B - 1))} \right) \quad (5)$$

berechnet.

Die Masse m_A des adsorbierten Wassers hängt von der Oberfläche des Wägestücks A und der relative Luftfeuchtigkeit h ab. Die BET Konstante c_B und die Oberflächenbelegung durch eine monomolekulare Schicht μ_m hängen vom Reinigungsstatus des Wägestücks ab, welcher mit $\mu_{h=0}$ als Oberflächenbelegung für eine Luftfeuchtigkeit von 0 % angegeben wird [6][7].

Gradient der Fallbeschleunigung

Wie in Gleichung (1) zu sehen, geht die lokale Fallbeschleunigung g direkt in das Messergebnis bei einer Massebestimmung ein. Die relative Schwereänderung durch den Gradienten der Fallbeschleunigung beträgt in der Regel $-2,5$ bis $-3,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ mit zunehmendem Abstand von der Erdoberfläche [9]. Für verschiedene Wägestückformen, -größen oder -materialien gibt es einen unterschiedlichen Abstand des Schwerpunkts von der Wägeschale. Dies führt zu Änderungen der wirksamen Fallbeschleunigung auf das Wägestück.

4 Anwendungen

Die zentrale Anwendung des virtuellen Wägestücks ist im digitalen Zwilling eines Wägestücks (DZW), welcher sich derzeit an der PTB in Entwicklung befindet und als Demonstrator implementiert wurde.

4.1 Unsicherheitsbestimmung in der Wägetechnik

Digitale Zwillinge sind virtuelle Bilder eines spezifisch zugeordneten Geräts oder Prozesses. Wie in Bild 3 gezeigt verbinden digitale Zwillinge in metrologischen Anwendungen:

- eine allgemeine Modelfunktion zusammen mit einem Modul für Monte Carlo Simulationen (virtuelles Messgerät),
- Kalibrierdaten,

- Datenspeicher für Langzeitspeicherung und -analyse und
- eine einheitliche Datenschnittstelle zur Ein- und Ausgabe von Daten.

Über das Dateninterface werden alle Eingangsgrößen und die Umweltbedingungen in den digitalen Zwilling eingelesen und anschließend die Berechnungsergebnisse für andere digitale Zwillinge oder den Anwender bereitgestellt. Die Rückführbarkeit der Ergebnisse muss durch Verschlüsselung und Signaturen sichergestellt und Kalibrierinformationen nur autorisierten Stellen zugänglich gemacht werden. Die umfangreiche Dokumentation der Schnittstellen und Datenformate für den Datenaustausch wird derzeit von der PTB und vielen Projektpartnern im Projekt Smart-COM vorangetrieben [11].

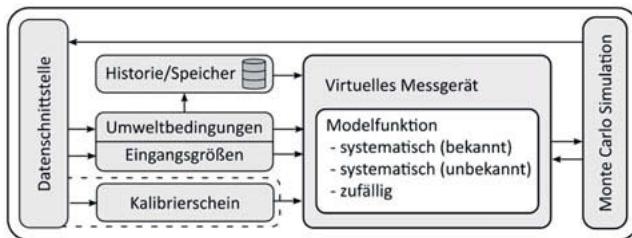


Bild 3: Schema eines digitalen Zwillings.

Der DZW wird mit diesen Kalibrierergebnissen versehen:

- Masse zum Zeitpunkt der Kalibrierung,
- Unsicherheit der Massekalibrierung,
- Volumen des Wägestücks,
- Unsicherheit der Volumenmessung und
- Umgebungsbedingungen zum Zeitpunkt der Kalibrierung.

Weiterhin werden dem DZW folgende für das Wägestück spezifische Informationen bereitgestellt:

- Oberfläche des Wägestücks und Höhe des Schwerpunkts,
- Langzeitdrift der Messunsicherheit der Massekalibrierung und
- Reinigungszustand der Oberfläche.

Mit diesen spezifischen Informationen und der Modelfunktion aus dem virtuellen Wägestück kann das Verhalten für eine gegebene Anwendung oder Umgebungsbedingung simuliert werden. Bild 4 zeigt einen Screenshot der Benutzeroberfläche des Demonstrators des DZW.

Als Teil eines umfangreichen Messaufbaus muss der DZW mit anderen digitalen Zwillingen kommunizieren. Bei der Durchführung einer Messung fragen digitale Zwillinge Messwerte beim DZW an, welcher wiederum Messwerte bei den digitalen Zwillingen der Geräte zur Erfassung der Umgebungsbedingungen abruft. Mit diesem Ablauf lässt sich die Messunsicherheit sehr präzise bestimmen, da die aktuellen Umgebungsbedingungen und das daraus folgende Verhalten aller verwendeten Geräte und Standards detailliert berücksichtigt werden.

In zukünftigen Implementierungen soll der DZW durch Verwendung von machine-learning Algorithmen seine Modellfunktion aktiv weiter verbessern, in dem dieser auf die Historie vorangegangener Kalibrierungen zurückgreift. Mit diesen Informationen zum Alterungsprozess kann der DZW an den Anwender auch nötige Rekalibrierungen anzeigen, wenn sich ein unerwartetes Verhalten einstellt oder ungünstige Umweltbedingungen festgestellt werden.

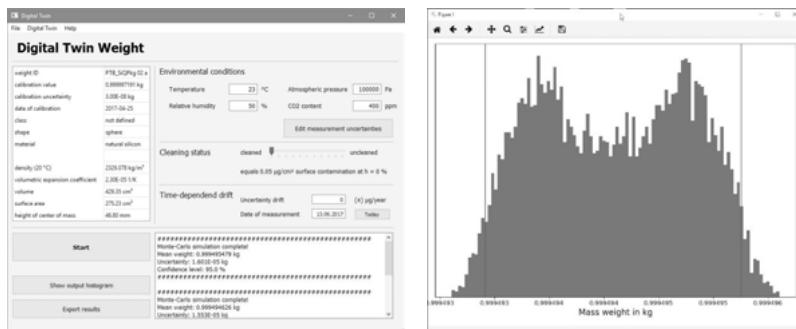


Bild 4: Screenshot der Hauptanwendung und des Histogrammfensters des digitalen Wägestücks.

Simulation der Messunsicherheit für unterschiedlichen Anwendungsszenarien

Der DZW kann, durch die Simulation wie bestimmte Umweltbedingungen die Messunsicherheit des Wägestücks beeinflussen, als Entwurfswerkzeug für die Bewertung von unterschiedlichen Anwendungsfällen verwendet werden. Die Qualität eines Messaufbaus zur Massebestimmung und die Auswirkungen von möglichen Veränderungen am Messaufbau auf das Messergebnis lassen sich so evaluieren. Der Anwender wird bei der Auswahl von Geräten und nötigen bzw. möglichen Strategien zur Fehlerkorrektur oder -verringerung unterstützt, um eine gewünschte Messunsicherheit zu erreichen. Mit dem DZW lässt sich auch der Einfluss von bestimmten Umweltbedingungen auf das Messergebnis abschätzen, indem bei der Monte Carlo Simulation alle anderen Einflüsse konstant gehalten werden und die Auswir-

kungen auf das Messergebnis berechnet werden. Dadurch lassen sich die Aspekte des Messaufbaus mit dem höchsten Potenzial zur Verbesserung der Ergebnisse identifizieren.

Zusammenfassung

Der digitale Zwilling eines Wägestücks bildet das Verhalten eines spezifisch zugeordneten Wägestücks unter vorgegebenen Umweltbedingungen ab. Er verbindet eine Modelfunktion, das virtuelle Wägestück, mit Kalibrierinformationen und weiteren Eigenschaften des zugeordneten Wägestücks. Mit einer Monte Carlo Simulation entsprechend dem GUM Supplement 1 wird die Unsicherheit, einschließlich der Einflüsse von Umgebungsbedingungen, des Wägestücks bestimmt. Mit der Monte Carlo Simulation ist es möglich auch umfangreiche, nichtlineare sowie korrelierte Zusammenhänge und die realistische Verteilungsfunktion von streuenden Eingangsgrößen zu berücksichtigen.

Der digitale Zwilling eines Wägestücks ist ein zentraler Baustein für die online Unsicherheitsbestimmung von Waagen, besonders für die Planck-Waage [11]. Er ist dabei mit den anderen Teilsystemen der Planck-Waage verbunden und wird zur Unsicherheitsbestimmung und zur Verbesserung der Teilsysteme verwendet. Als Teil des gemeinsamen Projekts der PTB und der Technischen Universität Ilmenau wurde ein erster Demonstrator implementiert, welcher die wichtigsten systematischen Einflüsse auf das Verhalten eines Wägestücks abbildet. Der digitale Zwilling des Wägestücks ist ein Teil der Bestrebungen der PTB die Digitalisierung in der Metrologie voran zu treiben.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten in diesem Projekt werden durch das Programm "Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials – VIP+" vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und durch die VDI/VDE Innovation + Technik GmbH getragen.

Literaturhinweise

- [1] Joint Committee for Guides in Metrology: "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement". Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2008
- [2] Joint Committee for Guides in Metrology Working Group 1: "Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method". Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2008
- [3] Hackel S.; et al.: "Digital Calibration Certificate", PTB-Mitteilungen 4/2017

- [4] Härtig, F.; Krystek, M.: "Berücksichtigung systematischer Fehler im Messunsicherheitsbudget". 4. Fachtagung Messunsicherheit. Düsseldorf : VDI-Wissensforum, 2008
- [5] Franke M.; Kistner T.; Hausotte T.; Heißelman D.; Schwehn C.; Wendt K.: "Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme". Technisches Messen, 84(5): 325–335, 2017
- [6] Schwartz, R.; Borys M.; Scholz F.: "Leitfaden für Massebestimmungen hoher Genauigkeit". PTB-MA-80, PTB-Bericht, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2006
- [7] Schwartz, R.: "Untersuchung des Sorptionseinflusses bei Massebestimmungen hoher Genauigkeit durch Wägung und durch Ellipsometrie unter kontrollierten Umgebungsbedingungen". PTB-Bericht MA-29, Braunschweig, 1993
- [8] Picard, A.; Davis, R. S.; Gläser M.; Fuji K.: "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)". Metrologia 45, 149–155, 2008
- [9] Kohlrausch, F.: "Praktische Physik: Band 1". Teubner Verlag, Stuttgart, 24. Aufl., 1996
- [10] <https://www.ptb.de/empir2018/smartcom/home/>
- [11] Rothleitner C.; Schleichert J.; Rogge N.; Günther L.; Vasilyan S.; Hilbrunner F., Knopf D.; Fröhlich T.; Härtig F.: "The Planck-Balance—using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights". Measurement Science and Technology 29, 2018

Ein Vergleich von statistischen Tests und Monte-Carlo-Methoden zur Konformitätsbewertung

A comparison of statistical testing and Monte Carlo methods for Conformity assessment

Dr. Jos van der Grinten,

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Kurzfassung

Die Konformitätsbewertung in Bezug auf Toleranzen kann mit herkömmlichen statistischen Tests und Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt werden. Diese Methoden werden in zwei Beispielen verglichen. Der erste ist ein einseitiger Test, bei dem ein Fahrer die Erkennungsschwelle eines Radargeschwindigkeits-Beobachtungspostens ausnutzen möchte. Der zweite ist ein zweiseitiger Test einer Gaszählerkalibrierung. Für beide Beispiele stimmen die durch herkömmliche statistische Tests und Monte-Carlo-Simulationen berechneten Vertrauensniveaus innerhalb von 0,05% überein. Bei Tests, die auf mehreren Eingabeveriablen basieren, denen jeweils ein anderes PDF zugeordnet ist, kann die Berechnung der Verteilungsfaltung kompliziert oder sogar unmöglich sein. In diesem Fall bieten Monte-Carlo-Methoden eine einfache und robuste Möglichkeit, statistische Tests durchzuführen.

Abstract

Conformity assessment with respect to tolerances can be performed with conventional statistical testing and Monte Carlo simulations. These methods are compared in two examples. The first is a one-sided test where a driver aims to exploit the detection threshold of a radar speed observation post. The second is a two-sided test of a gasmeter calibration. For both examples the confidence levels calculated by conventional statistical tests and Monte Carlo simulations agree within 0.05%. For tests that are based on more than one input variable, each with a different PDF associated, the calculation of the convolution of distributions can be complicated or even impossible. In that case Monte Carlo methods provide an easy and robust means to perform statistical tests.

1. Introduction

Conformity assessment is the activity to determine whether specified requirements relating to a product, process, system, person or body are fulfilled (JCGM-106 [1], section 3.3.1). In the daily practise of calibration and testing of measuring instruments, laboratories and their clients use the measurement results to decide whether the instrument meets its pre-set specifications. Often this decision is complicated by the measurement uncertainty of the calibration result, especially if the tolerance of the instrument lies within the range of values that can be reasonably attributed to the measurand. Fortunately, statistical methods are available to determine the probability that the decision is right. Two of these methods will be compared here. The first is the conventional statistical testing and the second the Monte Carlo method [2].

Statistical testing is the process to decide if a null hypothesis is to be rejected in favour of an alternative hypothesis (ISO 3534-1 [3], section 1.48). The decision needs to be taken with a certain level of confidence, e.g. 95%. This implies that the risk of taking an erroneous decision has a probability of 5%. In the case of demonstrating conformity, the null hypothesis is that the instrument operates inside the applicable tolerances. If the test or verification confirms the hypothesis, the hypothesis is accepted, and the instrument is conforming. If not, the instrument is not conforming.

Non-conforming instruments are searched during market surveillance or inspections. Here the null hypothesis is that the instrument is operating outside its legal tolerances. A practical example of an inspection is speed enforcement by the police [4], which was also used in the JCGM Guide on conformity assessment [1]. If a test with a pre-set confidence level confirms the hypothesis, the instrument is non-conforming. If not, the instrument is not non-conforming. The recently revised ILAC G8 document [5] distinguishes the following decision criteria: pass, conditional pass, conditional fail and fail. The above processes are depicted in Fig. 1 below. If the observations with their expanded uncertainties ($k = 2$) are within tolerances the conformity assessment is successful. If the inspection reveals the observations are outside the tolerances the inspection is successful. If the observation with its corresponding uncertainty intersects the tolerance, the instrument neither conforming nor non-conforming. For later use in this paper acceptance criteria (AC) are indicated.

Please note that the above methodology works when a high level of confidence needs to be achieved. In practice other decision rules are applied. The recently updated ILAC G8 guide [5] gives a nice overview of current practices. The OIML guide G 19 [6] provides additional information for legal metrology applications. The bottom line is that any criterion or decision rule can be applied as long as it complies to legal or normative requirements or is agreed beforehand with stakeholders.

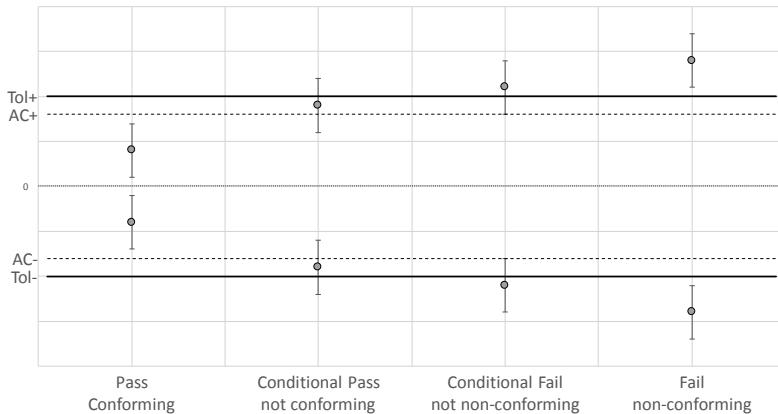


Fig. 1: Schematic drawing of decisions in conformity assessment and inspection processes. Observations are indicated by dots; the corresponding uncertainties are expanded uncertainties: $k = 2$. Tol indicates the upper and lower tolerances and AC the lower and upper acceptance criteria.

2. Conventional statistical testing

For a statistical test the following information is needed: the mean, the standard deviation, the associated statistical distribution, the confidence level and whether the test is one-sided or two-sided. A one-sided test is performed during an inspection where the null hypothesis is that the upper tolerance is exceeded, i.e. the instrument is reading too much. During a two-sided test two criteria must be fulfilled simultaneously: the instrument deviation must be higher than the lower tolerance and lower than the upper tolerance.

From the calibration we receive the value, which is mostly the average of several repeats and which is corrected for known deviations. The expanded uncertainty has a specified coverage level, which has been evaluated by statistical methods (type A) or other methods (type B) involving the knowledge of the tester [7]. In addition, the statistical distribution of the repeated observations and influence parameters is generally unknown. For the uncertainty evaluations this is hardly a problem because for linear models the combination of standard uncertainties is independent of the underlying statistical distributions.

So before performing a statistical test we need to translate the available information into statistical terminology. For the mean we use the (corrected) average, the expanded uncertainty is converted to a standard uncertainty which is equivalent to a standard deviation. For the

statistical distribution we will use a normal distribution. Why? Because among most of the statistical distributions, the normal distribution has one of the widest 95% confidence intervals given the mean and the standard deviation. For lower confidence levels the actual distribution must be taken into account.

3. Deliberately driving too fast

As most people have practical experience with vehicle speed enforcement, this is still one of the most appealing examples of a one-sided statistical test. In many countries, a vehicle speed enforcement system is in operation that uses a detection threshold and that subtracts the legal tolerance of the radar speed equipment from the observed car speed. However, even within one country different threshold values may be used, and the equipment tolerance is not always subtracted from the car speed observation. So, the driver be warned.

In the example discussed here, a motorist deliberately aims to exploit the detection threshold. He or she is driving on a road where the speed limit is 80 km/h. On the roadside a radar observation post will flash fast cars when 87.0 km/h is exceeded. For speeds up till 100 km/h, the legal tolerance for the radar speed equipment is ± 3 km/h. Without further knowledge the driver must reckon with the fact that the speed radar may flash at already 84 km/h. The driver sets the car's cruise control at 85 km/h, and wonders about the risk to exceed the lower radar tolerance (84 km/h). The car's odometer is somewhere between 2 and 3 km/h fast, and the cruise control maintains the car speed within ± 2 km/h. A summary of this information is given in Table 1.

Table 1: Overview of the car speed calculation, the input data, the associated limits, and the associated standard uncertainties. The uncertainty of the corrected car speed in the bottom-right cell is the root-sum-square of the above uncertainty contributions.

Quantity	Value	Limits	Standard uncertainty
Cruise control setting	85 km/h	± 2 km/h	$2/\sqrt{3}$ km/h
Deviation odometer	2.5 km/h	± 0.5 km/h	$0.5/\sqrt{3}$ km/h
Car speed (corrected)	82.5 km/h		1.19 km/h

The cruise control stability of ± 2 km/h can be viewed as a rectangular distribution. Also, the deviation of the odometer between 2 and 3 km/h will be regarded as being rectangular. The associated standard uncertainty is half width divided by $\sqrt{3}$. The corrected car speed is the set speed on the cruise control minus the deviation of the odometer. The standard uncertainty of

the car speed is the root-sum-square of the odometer and cruise control uncertainty contributions.

The car speed is composed from two rectangular distributions with uncertainties that are different by a factor 4. Now there are two ways to go. The first is to calculate the convolution of two arbitrary rectangles according to [8], which results in a trapezoidal distribution. Without showing the math here, the distribution is described by combining the corrected car speed with the limits shown in Table 1: $(82.5 - 2 - 0.5)$ km/h, $(82.5 - 2 + 0.5)$ km/h, $(82.5 + 2 - 0.5)$ km/h and $(82.5 + 2 + 0.5)$ km/h. The second method is to attribute a normal distribution to the car speed.

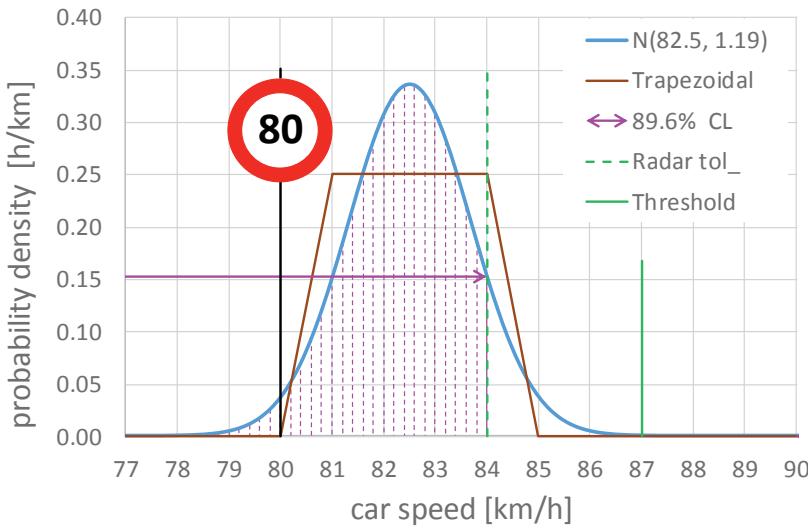


Fig. 2: Speed limit, radar detection threshold, radar tolerance and normal distribution $N(82.5, 1.19)$ attributed to a car speed. The shaded area covers 89.6% of the area under the curve.

Fig. 2 depicts the car speed as both a trapezoidal and a normal distribution. In addition, the speed limit, the detection threshold and the lower radar tolerance are shown. Assuming a normal distribution, this means for the driver that the confidence level of not exceeding the lower radar tolerance is 89.6%, i.e. a 10.4% risk. When a trapezoidal distribution is assumed, the confidence level is 87.5% (12.5% risk). The assumption of a normal distribution leads in this case to an underestimation of the risk.

In addition, it can be calculated that the probability of driving less than 80 km/h is 3.7% for the applied normal distribution and 0% for the applied trapezoidal distribution.

4. Initial verification

An example of a two-sided test is the initial verification of an industrial gas flowmeter using high-pressure natural gas. The meter is an OIML class 0.5 gasmeter [9], for which tolerances of $\pm 0.5\%$ in the upper flowrate range are specified. In the lower flowrate range the tolerances are $\pm 1\%$. Most European countries use legal tolerances of $\pm 1\%$ and $\pm 2\%$ respectively, which are derived from the MID [10]. These legal tolerances are much too wide for the operators of the gas transportation network (TSOs). Even the OIML class 0.5 tolerances are too wide for the TSOs. Currently, some TSOs specify $\pm 0.3\%$. However, there are no official tolerances for industrial gasmeters that are tighter than $\pm 0.5\%$. The currently achievable measurement uncertainties, called CMCs, for high-pressure gas flow measurement range between 0.13% and 0.30% depending on flowrate and pressure. In addition, OIML R137-1,2 [9] states in §11.1.2 that for type approvals the CMC should be better than 1/5 of the tolerance and for initial verifications better than 1/3 of the tolerance. These uncertainties are hard to achieve for high-pressure gas flow calibrations. For that reason, OIML R137-1,2 [9] offers in the same section an escape. Use acceptance criteria AC where the applied tolerance, also called Maximum Permissible Error (MPE), is reduced with the excess of the uncertainty. For an initial verification this means that if $U > \frac{1}{3} MPE$ then $AC = \pm \left(\frac{4}{3} MPE - U \right)$. This is a decision criterion which is feasible according the ILAC G8 guide [5]. It means that 95% of the gasmeters tested operates within $\frac{4}{3} MPE$. A graphical impression of these criteria is shown in Fig. 1.

Alternatively, a two-sided statistical test can be performed with at least 95% confidence. In this example the result from the calibration is a deviation $e = -0.175\%$ and an expanded uncertainty $U = 0.292\%$ ($k = 2$), which is greater than 1/3 tolerance. This result is obtained from a Monte Carlo example discussed in chapter 6. Like in the previous sections a normal distribution $N(e, U/2)$ is attributed to the measurement result. Now at least 95% of the area below $N(e, U/2)$ must lie between the tolerances.

Fig. 3 shows the result of the statistical test. The normal distribution attributed to the calibration result is shown together with the tolerances and the afore-mentioned OIML acceptance criteria (ACs). The measured value is the top of the normal distribution, which lies both between the tolerances and the OIML ACs. The confidence level (CL) is the probability that $N(e, U/2)$ is smaller than the upper tolerance minus the probability that $N(e, U/2)$ is smaller than the lower

tolerance. It is the shaded area between the tolerances and amounts to 98.7%. This means that this initial verification is successful with at least 95% confidence.

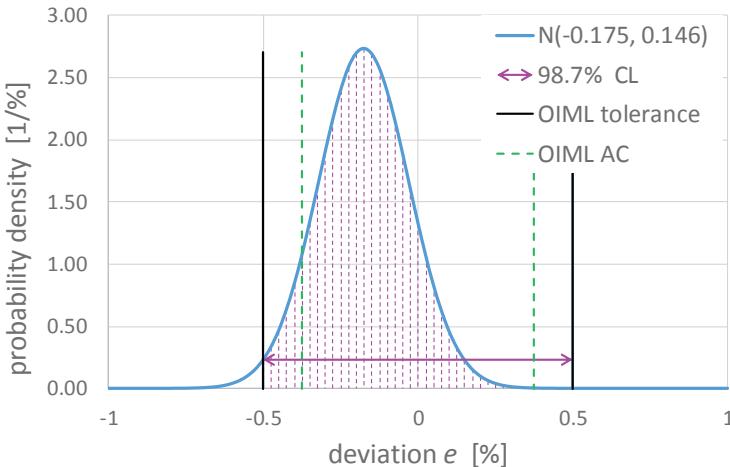


Fig. 3: OIML gasmeter tolerances, OIML acceptance criteria *AC* and normal distribution $N(-0.175, 0.146)$ attributed to a calibration result of a gasmeter. The probability density [1/%) is plotted versus the deviation e [%]. The shaded area is the confidence level (CL), i.e. the area under the normal distribution curve between the tolerances.

5. Monte Carlo Method

With the present performance of desktop and laptop computers, Monte Carlo methods are in everybody's reach today. JCGM-101 [2] describes the use of Monte Carlo methods in the processing of measurement uncertainties. Monte Carlo Methods are especially useful for non-linear problems or cases where the uncertainty is great in comparison with the measurand. Monte Carlo methods can also be used for statistical testing [11], which is explained below. The Monte Carlo process is schematically displayed in Fig. 4. The measurand Y depends on n input quantities $X_1..X_n$ according to the mathematical relationship $Y = f(X_1..,X_n)$. To each of the input quantities X_i a probability density function (PDF) is attributed. By varying all input quantities X_i , M estimates y_k for the measurand are obtained. These are put in ascending order, which gives the cumulative distribution function (CDF). The estimate \bar{y} of the measurand Y is the arithmetic mean of $y_1..y_n$. The standard uncertainty of \bar{y} is the experimental standard deviation of $y_1..y_n$.

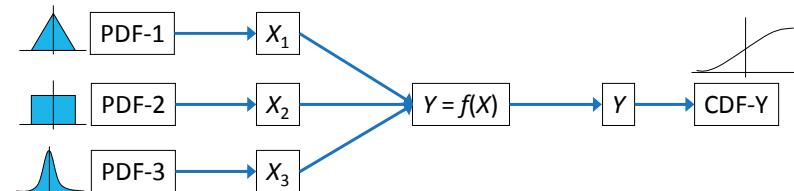


Fig. 4: Schematic representation of the Monte Carlo process.

Now the probability that $y \leq y_q$ equals q/M . The 95% coverage interval lies between y_q and $y_{q+0.95 \cdot M}$, which is shown as the blue interval in the upper part of Fig. 5. If the 95% coverage interval lies between the tolerances, like in the bottom part of Fig. 5, the observation meets the tolerances. In that case the hypothesis that the instrument meets the tolerances, can be accepted with a confidence level of at least 95%

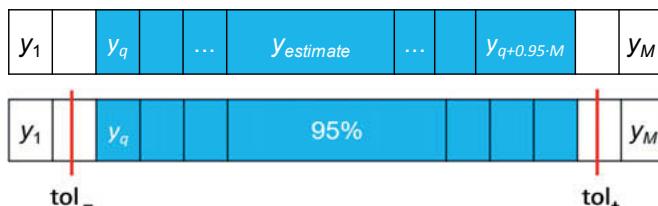


Fig. 5: In the upper part output estimates y_k , $k = 1..M$, are shown in ascending order. The blue cells represent the 95% coverage interval. In the bottom part, the 95% coverage interval lies between the upper and lower tolerances.

Due to the availability of the CDF and the fact that probabilities are directly derived from the rank numbers of the CDF array elements, makes the Monte Carlo Method is very adaptable for statistical tests. When input parameters have different PDFs, the output estimate will not be entirely normally distributed. The 95% coverage interval will be shorter than the corresponding interval of a normal distribution. This means a higher probability for accepting a hypothesis.

6. Comparing conventional results with Monte Carlo

The Monte Carlo Method with the possibility to perform a statistical test was implemented in a Visual Basic tool running under an Excel dashboard [11]. The deviation is described as a function of 44 input parameters. In the absence of better knowledge most of the input parameters

have a normal deviation, only the pulse values have a rectangular deviation. This means that the output value has a normal distribution. The calibration model is described in [11].

Project information															
Client	PTB					Reference	Recal. Workshop								
Problem description	High pressure gas flow calibration using full gas composition and AGA-8 Equation of State					Date of analysis	03 June 2019								
Model description	Instationary integral mass balance					Output file	Recal								
Project/Engineer	Jos van der Grinten		Dept.	1.43		Tag number	43619201389146								
Environmental and other parameters															
Quantity	Unit	Value	Quantity	Unit	Value	Quantity	Unit	Value							
Barometric pressure	mbar	1015	Base pressure	bar	1.01325	Gravitational acceleration	m/s ²	9.812184							
Room temperature	°C	15	Base temperature	°C	0										
Relative humidity	%	45	Combustion temperature	°C	25										
Output request															
Quantity	Value	Unit	Quantity	Value	Statistical testing										
Output quantity y	y	-	Bins for histogram	101	Criterion	lower tol.	lower crit.	upper crit.	upper tol.						
Number of Trials	100 000		Random seed	- 654 321	Value	-0.50%	-0.30%	0.30%	0.50%						
Coverage interval	95.0%		Detailed output	TRUE	CDF	1.31%	19.74%	99.94%	100.00%						
Output results for uncertainty															
Quantity	y	u(y) (k=1)	C1 95.0%	C2 95.0%	Min	Q1	Median	Q3	Max	Kolmogorov Smirnov					
Unit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D value					
Value	-0.175%	0.146%	-0.461%	0.111%	-0.778%	-0.274%	-0.175%	-0.077%	0.474%	P Value					
Nominal			-0.461%	0.111%	symmetric					0.0015					
Relative			-0.462%	0.111%	Gaussian					0.9738					
Model equation	Number of ReF	Number of MuT	Number of VoL	Conf. level						Result meets tolerances					
AGA8	2	0.01	1												
Input quantities															
Quantity	Unit	X	PDF	mu	sigma	nu	a	b	d	x	q	Detail y	Detail u(y)		
p_11	bar	X(1)	Gaussian	59.875	0.0031623							-0.1742%	3.1E-05		
t_11	°C	X(2)	Gaussian	14.12	0.0618466							-0.1742%	1.8E-04		

Fig. 6: Excel dashboard of the Monte Carlo simulation. The output results relevant for this test are marked with red boxes. The left red box shows the deviation with its standard uncertainty. The upper right box shows the results of the statistical test, duplicated in Table 2. The lower right box shows that at a confidence level of 95%, the result complies with the tolerances.

Fig. 6 gives a picture of the dashboard with the result of the uncertainty analysis and the statistical test based on 10^5 trials. The left red box shows the deviation with its standard uncertainty $e = -0.175\% \pm 0.146\%$. The upper right box shows the results of the statistical test, duplicated in Table 2. The lower right box shows that at a confidence level of 95%, the result complies with the tolerances.

Table 2: Values of the CDF (bottom row) obtained at test criteria (top and middle row) of a statistical test performed using a Monte Carlo simulation resulting in output quantity $e = -0.175\% \pm 0.146\% (k = 1)$.

Criterion	lower tol.	lower crit.	upper crit.	upper tol.
Value	-0.50%	-0.30%	0.30%	0.50%
CDF P($e \leq \text{tol}$)	1.31%	19.74%	99.94%	100.00%

In Table 2, the difference of the CDF between the upper and the lower tolerances is the confidence level of the statistical test: $CL = 100\% - 1.31\% = 98.69\%$, which is identical to the $CL = 98.70\%$ found in section 4. If instead of the $\pm 0.5\%$ tolerances, criteria of $\pm 0.3\%$ were applied, the confidence level associated with accepting the result is 80.20% , which is less than the required 95% confidence level.

Similarly, the Monte Carlo simulation can be applied to the example in section 3, in which the detection threshold of the speed enforcement is exploited by the car driver. The result based on 10^6 trials, is shown in Table 3. When a normal distribution is assumed for both the cruise control uncertainty and the uncertainty of the odometer deviation, the result $CL = 66.34\%$ is close to the analytical result of 66.28% obtained in section 3. When two rectangular distributions are combined the CL is 62.46% , which is practically equal to the analytical result of 62.50% . The accuracy obtained using 10^6 trials in the Monte Carlo simulations is approximately 0.05% . More trials, e.g. 10^7 , do not result in the same CL values.

Table 3: Results of a Monte Carlo simulation of speed enforcement assuming a normal and a trapezoidal probability density function (PDF). The columns show the PDF, the vehicle speed, the associated standard uncertainty, the speed criterion, the confidence level using the Monte Carlo and the confidence level calculated by analytical methods.

PDF	v (km/h)	$u(v)$ (km/h)	Criterion (km/h)	$CL_{\text{Monte Carlo}}$ $P(v \leq \text{crit})$	$CL_{\text{Analytical}}$
Normal	83.50	1.74	84	89.64%	89.62%
Trapezoidal	83.50	1.19	84	87.55%	87.50%

Fig. 7 shows the graphical output of the Monte Carlo simulation. Both the probability density (right axis) and CDF (left axis) are shown as a function of the car speed. The shaded area is the trapezoidal PDF formed by two rectangular distributions. The trapezoidal CDF is the dashed line that starts on the left-hand side at zero and ends at the right-hand side at 1. For reference the normal distribution is also shown as PDF and CDF. The confidence interval CI is for the trapezoidal distribution shorter than for the normal distribution. The graph also shows that at 84 km/h the normal CDF is higher than the mixed CDF.

The driver may decide to push his or her luck even a bit further by considering the rectangular distribution of the radar equipment. In this case the math associated with the convolution of

three rectangular distributions can easily be replaced by a Monte Carlo simulation. Now, with 85 km/h on the cruise control, the probability to get flashed is less than 1%.

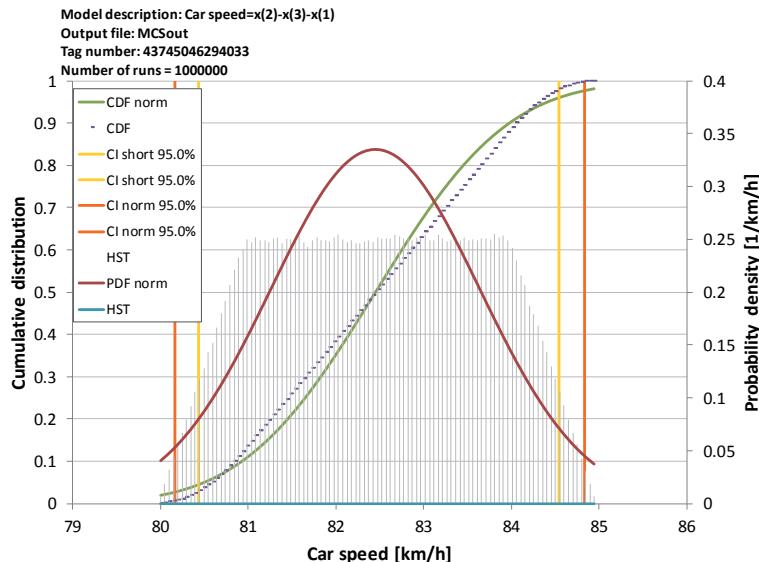


Fig. 7: Graphical output of the Monte Carlo simulation. Both the probability density and CDF are shown as a function of the car speed [km/h]. The shaded area is the PDF formed by two rectangular distributions. The CDF is the dashed line that starts on the left-hand side at zero and increases to 1. For reference the normal distribution is also shown as PDF and CDF. In addition, the confidence intervals CI are shown for both distributions.

7. Conclusion

In the previous examples analytical results using single distributions or convolutions of two distributions, and Monte Carlo simulations were compared for one-sided and two-sided statistical tests. The confidence levels calculated by conventional statistical tests and Monte Carlo simulations agree within 0.05%. The examples also show that in case of risks clearly higher than 5% or confidence levels clearly lower than 95%, the assumption of a normal distribution

may lead to an underestimation of the risk or to overoptimistic confidence levels. For tests that are based on more than one input variable, each with a different PDF associated, the calculation of the convolution of distributions can be complicated, if not impossible. In that case Monte Carlo methods provide an easy and robust means to perform statistical tests.

Abbreviations

- AC Acceptance criterion
CDF Cumulative Distribution Function,
i.e. the probability that the observation is less than or equal to a pre-set value
CI Coverage Interval
CL Confidence Level
MPE Maximum Permissible Error, used in a legal metrology context, equivalent to tolerance
PDF Probability Density Function
Tol tolerance
TSO Transport System Operator

References

- [1] JCGM 106 (2012): Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment, Guide JCGM 106.
- [2] JCGM 101 (2008): [Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement](#) - Propagation of distributions using a Monte Carlo method, Guide JCGM 101.
- [3] ISO 3534-1 (2006): Statistics - Vocabulary and symbols - Part 1: General statistical terms and terms used in probability, Corrected version 2007, ISO, Geneva
- [4] J.G.M. van der Grinten (2003): Confidence levels of measurement based decisions, [OIML Bulletin Volume XLIV · Number 3 · July 2003](#), pp. 5 – 11
- [5] ILAC G8 (2019): [Guidelines on Decision Rules and Statement of Conformity](#), ILAC-G8:09/2019
- [6] OIML G 19 (2017): [The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology](#), OIML, Paris
- [7] JCGM 100 (2008): [Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement](#); BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML.
- [8] Frank Killmann and Elart von Collani (2001): [A Note on the Convolution of the Uniform and Related Distributions and Their Use in Quality Control](#), Economic Quality Control, Vol 16 (2001), No. 1, 17 – 41, see page 26 and 27.
- [9] OIML R137-1,2 (2012): [Gas meters](#), OIML Paris.
- [10] MID Recast (2014): [Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council of 26 Feb 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments \(recast\)](#), Official Journal, No L 96, pp. 149-250.
- [11] 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.

Messunsicherheiten und Konformität mit Anforderungen

Uncertainty in measurements and conformity with requirements

Rolf Michel, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz,
Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung

Der Beitrag behandelt das Problem der Messunsicherheit als Folge unvollständiger Information und beschreibt den inzwischen international akzeptierten Ansatz zur Quantifizierung von Messunsicherheiten. Dazu ist es notwendig, die statistischen Grundlagen des Konzeptes der Messunsicherheit zu betrachten. Die Norm ISO 11929 wird als Werkzeug vorgestellt, Anforderungen an Nachweisbarkeit auf der Grundlage des ISO Guides for the Expression of Uncertainty in Measurement zu beurteilen. Abschließend wird die Berücksichtigung von Messunsicherheiten bei der Beurteilung von Konformität mit Anforderungen im Detail dargestellt.

Abstract

The problem of uncertainty as a general consequence of incomplete information and the approach to quantify uncertainty in metrology is addressed. Then, the statistical foundation of the concepts of uncertainty in measurements is discussed. The basics of the ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement as well as of characteristic limits according to ISO 11929 are described and, finally, the role of measurement uncertainties in the assessment of conformity to requirements is dealt with in detail.

1. Einleitung

Statistik bietet die Grundlage zur Quantifizierung von Messunsicherheiten. Sie erlaubt Entscheidungen darüber, ob ein Messergebnis größer ist als ein Untergrund oder Blindwert; sie erlaubt die Beurteilung, ob ein Messverfahren Sensitivitätsanforderungen genügt und - nicht zuletzt - ob ein Messergebnis gesetzlichen oder technischen Anforderungen genügt. Auf-

grund aktueller Entwicklungen in der Metrologie existiert eine Reihe von Leitfäden und Normen, mit denen alle diese Aspekte in konsistenter und international akzeptierter Weise behandelt werden können.

Das Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) hat eine Reihe von Leitfäden publiziert, die kostenlos im Internet zum Download zur Verfügung stehen. Es gibt ein International Vocabulary in Metrology [1], kurz VIM genannt, das die allgemeine Terminologie definiert, um eine eindeutige Sprachregelung für metrologische Themen zu haben. Der Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [2], kurz GUM genannt, und die Supplements 1 [3], kurz GUM S1 genannt, und 2 [4], kurz GUM S2 genannt, sind die Grundlage zu Quantifizierung von Messunsicherheiten. Schließlich bietet der Leitfaden "Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment" [5] Anleitung für die Beurteilung von Konformität mit Anforderungen. Verfahren zur Berechnung von Messunsicherheiten und zur Beurteilung des Nachweisvermögens von Messverfahren sind in ISO 11929 [6,7] genormt; siehe hierzu auch [8,9].

2. Die statistischen Grundlagen

Es gibt zwei grundlegend unterschiedliche Schulen der Statistik; die der Bayes Statistik und die der konventionellen oder frequentistischen Statistik. Diese beiden Schulen sind widersprüchlich, obwohl viele, aber nicht alle mit ihnen abgeleiteten Aussagen nahezu identisch sind. Das Problem ist, dass der Begriff Wahrscheinlichkeit in den beiden Schulen nicht die gleiche Bedeutung hat. Die frequentistische Ansicht ist, dass Wahrscheinlichkeit der stochastische Grenzwert von Häufigkeitsverteilungen ist, während die Bayessche Ansicht ist, dass Wahrscheinlichkeit ein Maß für das Vertrauen ist, die ein Individuum in eine unsichere Aussage setzt. Wegen dieses fundamentalen Unterschieds, dürfen die beiden Statistiken nicht miteinander vermengt werden.

Bayesianer folgen dem Prinzip, dass die mathematische Theorie der Wahrscheinlichkeitslehre auf dieses Maß des Vertrauens, das ein Individuum in eine unsichere Aussage setzt, anwendbar ist. Das Bayessche Theorem kann als Werkzeug benutzt werden, um angesichts neuer Information dieses Maß zu aktualisieren. Diese Aktualisierung wird als Bayessches Schließen bezeichnet. In seinem "Essay towards solving a problem in the doctrine of chances", Thomas Bayes (*1702, †1761) führte das "Bayessche Schließen" ein, d.h. die Berechnung der Wahrscheinlichkeit für die Gültigkeit einer Aussage auf der Grundlage einer früheren Berechnung dieser Wahrscheinlichkeit und neuer relevanter Information [10].

Bayessches Schließen ist die natürliche Methode menschlichen Lernens: die Berücksichtigung neuer Erfahrungen in einem bestehenden Satz früherer Annahmen. Bzgl. einer allgemeinen Einführung in die Bayes Statistik siehe z.B. [11,12].

Unsicherheit ist eine allgemeine Charakteristik der menschlichen Existenz, sie resultiert aus Unwissenheit. Unsicherheiten sind wichtige Faktoren für menschliche Überlegungen, für Entscheidungen und Handlungen. Sie sind die Folge begrenzter und unvollständiger Information. Menschen müssen immer entscheiden und handeln unter Unsicherheit, d.h. auf der Grundlage unvollständiger Information. In diesem Zustand der Unwissenheit kann der Mensch sich nur auf Wahrscheinlichkeiten verlassen.

Die Theorie der Wahrscheinlichkeiten und die Wahrscheinlichkeitsrechnung liefern die Werkzeuge Wahrscheinlichkeiten zu berechnen und fortzupflanzen. Nur wenige Prinzipien reichen aus, um für ein gegebenes Problem anhand der verfügbaren Information die gesuchten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF = probability density function) zu ermitteln. Fundamental ist das Indifferenzprinzip, auch Prinzip vom unzureichenden Grund genannt [13]. Für eine gegebene Menge von $n > 1$ unterscheidbaren, einander ausschließenden und insgesamt vollständigen Ereignissen, sagt das Indifferenzprinzip, dass ohne weitere Information jedem der Ereignisse eine Wahrscheinlichkeit $1/n$ zuzuordnen ist. Das Indifferenzprinzip ist eng verwandt mit dem Prinzip der maximalen Informations-Entropie [14] und dem Bayesschen Theorem [10].

In der Metrologie werden diese Prinzipien genutzt, um Messunsicherheiten zu quantifizieren. In den 1990er Jahren wurde die Berechnung von Messunsicherheiten durch den ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [14] standardisiert. Nach einer jahrzehntelangen Kontroverse über die statistischen Grundlagen des GUM, machte dann der GUM S1 [3] klar, dass der GUM nur auf der Grundlage der Bayes-Statistik und einer Bayesschen Theorie der Messunsicherheiten [15] funktionieren kann. Die Bayessche Theorie der Messunsicherheiten benutzt das Bayes Theorem, das Prinzip der maximalen Informationsentropie und die Produktregel, um die benötigten PDFs aufzustellen und fortzupflanzen. Nach anfänglichen Akzeptanzproblemen und vielfachen Diskussionen wurde der GUM durch das JCGM erneut publiziert [2] und erweitert [3,4] und stellt heute die international akzeptierte Methodik für die Quantifizierung von Messunsicherheiten dar.

3. Quantifizierung der Unsicherheit

3.1 Messunsicherheiten

Das Konzept der Unsicherheit kann in der Metrologie wie folgt beschrieben werden. Durch eine Messung erhält man einen unsicheren Schätzwert \tilde{y} (Messergebnis) des unbekannten und unerkennbaren wahren Wertes \tilde{y} der Messgröße Y . Dann beschreibt die PDF $f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})$, d.h. die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert der Messgröße Y gerade \tilde{y} ist, gegeben das Messergebnis y und jede andere verfügbare Information \mathfrak{I} vollständig die Unsicherheit, die dem Messergebnis y zugeordnet werden kann. $f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})$ ist die PDF einer Zufallsvariablen, die als Schätzer von Y dient. Als eine PDF ist diese Funktion auf eins normiert: $\int_{-\infty}^{\infty} f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I}) d\tilde{y} = 1$.

Anstatt durch die PDF $f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})$, die die Unsicherheit vollständig beschreibt, kann die Unsicherheit auch durch einen Überdeckungsbereich¹ $[y^a, y^b]$ beschrieben werden (Abb. 1), das den wahren Wert der Messgröße mit einer vorgewählten Überdeckungswahrscheinlichkeit $(1 - \gamma)$ enthält. Mit der PDF $f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})$, ist der beste Schätzwert \hat{y} des wahren Wertes \tilde{y} der Messgröße Y der Erwartungswert $\hat{y} = E(f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{y} \cdot f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I}) d\tilde{y}$ und die ihm zugeordnete Standardunsicherheit $u(\hat{y})$ ist die Quadratwurzel der Varianz $Var(f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})) = u^2(\hat{y}) = \int_{-\infty}^{+\infty} (\tilde{y} - \hat{y})^2 \cdot f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I}) d\tilde{y}$.

Die PDF hängt von der verfügbaren Information ab. Der GUM [2] – nicht so explizit – und explizit der GUM S1 [3] benutzen das Bayes Theorem und das Prinzip der maximalen Informationsentropie (PME), um die verschiedensten PDFs, abhängig von der verfügbaren Information, abzuleiten.

¹ Der Begriff „Überdeckungsbereich“ wird hier anstatt des in der frequentistischen Statistik üblichen Begriffs „Konfidenzbereich“ benutzt, um den zugrundeliegenden Bayesschen Ansatz zu verdeutlichen.

3.2 Der allgemeine Ansatz

In einer Bayessche Theorie der Messunsicherheiten [15], die eine Grundlage für den GUM Methodik darstellt, wird die gesuchte PDF $f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})$ faktorisiert

$$f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I}) = C \cdot f_Y(\tilde{y}|y) \cdot f_Y(\tilde{y}|\mathfrak{I}) \quad (\text{mit einer Normierungskonstanten } C) \quad (1)$$

und man erhält $f_Y(\tilde{y}|y)$ z.B. mit Hilfe des PME [16]

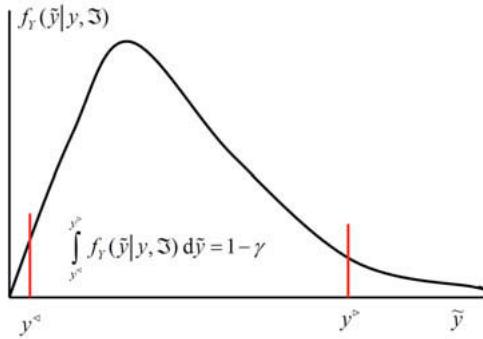


Bild 1: Schematische Darstellung einer PDF, $f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})$, und, in rot, der Grenzen eines Überdeckungsbereichs, $[y^a, y^b]$.

$$S = - \int f_Y(\tilde{y}|y) \cdot \ln(f_Y(\tilde{y}|y)) dy = \max. \quad (2)$$

Wenn nur y und $u(y)$ bekannt sind, dann sind sie der beste Schätzwert und die ihm zugeordnete Standardunsicherheit von $f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})$. Damit erhält man für die Anwendung des PME die Nebenbedingungen, $y = E(f_Y(\tilde{y}|y))$ und $u^2(y) = \text{Var}(f_Y(\tilde{y}|y))$. Mit diesen Nebenbedingungen führt das PME mit Hilfe der Variationsrechnung und der Lagrange-Multiplikatoren zur gesuchten PDF $f(\tilde{y}|y)$ und man erhält die Lösung $f_Y(\tilde{y}|y) = \exp(-(y - \tilde{y})^2 / (2 \cdot u^2(\tilde{y}))$ und damit

$$f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I}) = C \cdot f_Y(\tilde{y}|\mathfrak{I}) \cdot \exp\left(-(\tilde{y}-y)^2 / (2 \cdot u^2(y))\right). \quad (3)$$

Die Normalverteilung in Gleichung 3 ist weder eine Näherung noch eine Wahrscheinlichkeitsdichte resultierend aus wiederholten oder zählenden Messungen.

Der GUM und auch die auf ihm beruhende Norm ISO 11929-1 [6] sind minimalistisch zum Zweck allgemeiner Anwendbarkeit und nehmen deshalb an, dass lediglich y und $u(y)$ bekannt sind. Dies führt zu der Normalverteilung als resultierender PDF $f(\tilde{y}|y)$ in Gleichung 3. Die PDF, die die ansonsten verfügbare (Prior-) Information beschreibt, ist ebenfalls minimalistisch, indem lediglich angenommen wird, dass die Messgröße nicht-negativ ist. Das Wissen $\tilde{y} \geq 0$ wird dann mit Hilfe einer Heaviside-Funktion $H(y)$ berücksichtigt

$$f_Y(\tilde{y}|\mathfrak{I}) = H(y) = \begin{cases} \text{const} & (\tilde{y} \geq 0) \\ 0 & (\tilde{y} < 0) \end{cases}. \quad (4)$$

Es bleibt natürlich dem Anwender freigestellt, andere im speziellen Fall verfügbare Informationen zu berücksichtigen. Dazu hat er dem Ansatz des GUM S1 [3] zu folgen und die Werkzeuge, die mit dem Bayes Theorem, dem PME und der Produktregel vorliegen, zu benutzen, um die entsprechenden PDFs aufzustellen, zu aktualisieren und fortzupflanzen.

3.3 Messunsicherheiten nach dem GUM

Der GUM [2] unterscheidet zwei Arten, wie Messunsicherheiten ermittelt werden; sie werden als Typ A und Typ B bezeichnet. Typ A Unsicherheiten werden aus wiederholten oder zählenden Messungen ermittelt.

Bei wiederholten Messungen mit den Messwerten $(x_k; k = 1, \dots, n)$ einer Messgröße X ist der beste Schätzwert das arithmetische Mittel $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$ und die ihm zugeordnete Standardunsicherheit $u(\bar{x}) = \left(\frac{1}{n \cdot (n-3)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2} = \left(\frac{n-1}{n-3} \right)^{1/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$ mit der Standardabweichung $s = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2}$ [3]. Bei zählenden Messungen von Ereignissen eines Poisson-Prozesses ist die n Zählereignissen zugeordnete Standardunsicherheit $u^2(n) = n$ [7].

Typ B Unsicherheit stammen aus anderen Quellen. Sie ergeben sich aus früher gemessenen Daten oder aus Erfahrung oder allgemeinem Wissen über das Verhalten oder die Charakteristiken von Materialien, Phänomenen oder Instrumenten. Man erhält sie auch aus Spezifikationen von Herstellern, aus Kalibrier- oder Zertifizierungsdokumenten oder aus Handbüchern und Datensammlungen.

Im allgemeinen Sprachgebrauch spricht man von Typ A und Typ B Unsicherheiten. Aber sie sind gleichwertig und die "Typen" unterscheiden lediglich die Art und Weisen, wie diese Unsicherheiten ermittelt werden. Im Hinblick auf die Anwendbarkeit der unterschiedlichen Statistiken ist anzumerken, dass die frequentistische Statistik Typ B Unsicherheiten nicht behandeln kann. Des Weiteren erlaubt die frequentistische Statistik lediglich die Bestimmung der bedingten Wahrscheinlichkeit $f_{\tilde{Y}}(y|\tilde{y})$ nicht jedoch der PDF $f_{\tilde{Y}}(\tilde{y}|y)$. Nur die Bayes-Statistik kann Typ B Unsicherheiten berücksichtigen und die gesuchte PDF $f_{\tilde{Y}}(\tilde{y}|y)$ berechnen.

Der erste Schritt jeder Messung und Auswertung ist die klare Definition der Messgröße und die Aufstellung des Models der Auswertung G , das die Messgröße Y als Ergebnisgröße mit allen erforderlichen Eingangsgrößen X_i verbindet:

$$Y = G(X_i; i=1, \dots, n) \quad (5)$$

Das Modell der Auswertung G kann eine einfache Funktion, ein ganzer Satz von Funktionen oder auch ein Computerprogramm sein. Mit einem Modell der Auswertung $Y = G(X_i; i=1, \dots, n)$ wird ein Schätzwert y der Ergebnisgröße (Messgröße) Y berechnet über $y = G(x_i; i=1, \dots, n)$. Mit den Schätzwerten x_i der Eingangsgrößen X_i und den ihnen zugeordneten Standardunsicherheiten $u(x_i)$ berechnet man die dem Messergebnis y zugeordnete Standardunsicherheit $u(y)$ mit Hilfe der Kovarianzen $u(x_i, x_j)$

$$u^2(y) = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial G}{\partial x_i} \frac{\partial G}{\partial x_j} u(x_i, x_j) . \quad (6)$$

Im Falle voneinander unabhängiger Eingangsgrößen X_i erhält man die wohlbekannte Gleichung

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u^2(x_i) \text{ mit den Sensitivitätskoeffizienten } c_i \equiv \partial G / \partial X_i . \quad (7)$$

Trotz der weit verbreiteten und zunehmenden Anwendung des GUM [2], ist die Anwendbarkeit des GUM Ansatzes begrenzt. Der GUM benutzt eine Näherung. Die Standardunsicherheiten sind das Ergebnis einer Taylorreihen-Entwicklung, die nach dem linearen Term abgebrochen wird. Im Prinzip sollte der GUM Ansatz nur für lineare Modelle oder Modelle, die zumindest lokal hinreichend linearisierbar sind, benutzt werden. Wenn die GUM-Näherung für das Modell der Auswertung nicht hinreichend ist, hilft der Ansatz des GUM S1 [3] das Problem der Messunsicherheiten allgemein zu lösen. Der GUM [2] ist lediglich ein Spezialfall, der im allgemeineren Ansatz des GUM S1 [3] enthalten ist.

4. Überdeckungsbereiche

GUM [2], GUM S1 [3] und GUM S2 [4] enthalten die Grundlagen zur Quantifizierung von Messunsicherheiten, geben jedoch keine Entscheidungsregeln in Bezug auf die Erkennbarkeit eines Signals gegenüber einem Untergrund (Blank), die Eignung eines Messverfahrens bzgl. des Nachweisvermögen oder die Konformität mit Anforderungen. Solche Entscheidungsregeln wurden in ISO 11929 [6,7] über die sog. charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen von Überdeckungsbereichen) für Messungen ionisierender Strahlung festgelegt. ISO 11929 ist jedoch allgemein auch auf andere Messverfahren anwendbar.

Die Erkennungsgrenze entscheidet die Frage, ob mit den gezählten Signalen ein Beitrag der Probe gegenüber dem Untergrund erkannt werden kann. Die Nachweisgrenze ist der kleinste wahre Wert, der mit hoher Zuverlässigkeit erkannt werden kann, und erlaubt damit die Entscheidung, ob ein Messverfahren für den Messzweck im Hinblick auf das Nachweisvermögen geeignet ist.

Die Grenzen eines Überdeckungsbereichs y^{a} und y^{p} definieren ein Intervall $[y^{\text{a}}, y^{\text{p}}]$, das den wahren Wert \tilde{y} der Messgröße Y mit einer vorgewählten Wahrscheinlichkeit $(1 - \gamma)$ enthält:

$$P(y^{\text{a}} < \tilde{y} < y^{\text{p}} | y, \mathfrak{I}) = \int_{y^{\text{a}}}^{y^{\text{p}}} f_Y(\tilde{y} | y, \mathfrak{I}) d\tilde{y} = 1 - \gamma \quad (8)$$

Überdeckungsbereiche werden vielfach in der Metrologie benutzt. Sie erlauben auch die Entscheidung über die Konformität eines Messergebnisses mit Anforderungen [5,17].

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Definition eines Überdeckungsbereichs nach Gleichung 8 nicht eindeutig ist und das unterschiedliche Überdeckungsbereiche für dieselbe Wahrscheinlichkeit $(1 - \gamma)$ angegeben werden können. In ISO 1192 [6,7] werden Gleichungen zur Berechnung des probabilistisch symmetrischen und des kürzesten Überdeckungsbereich angegeben.

Im Folgenden wird das probabilistisch symmetrische Überdeckungsbereich in Verbindung mit ISO 19929-1 [6] zur Beantwortung der Frage nach der Konformität mit Anforderungen benutzt [17].

Die Grenzen des probabilistisch symmetrischen Überdeckungsbereichs werden in ISO 11929-1 [6] als Quantile der abgeschnittenen und renormalisierten Normalverteilung

$$f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I}) = C \cdot H(0) \cdot \exp\left(-(\tilde{y} - y)^2 / (2 \cdot u^2(y))\right) \quad (9)$$

berechnet mit den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} P(\tilde{y} < y^a | y, \mathfrak{I}) &= \int_{-\infty}^{y^a} f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I}) d\tilde{y} = \gamma / 2 \\ P(\tilde{y} > y^b | y, \mathfrak{I}) &= \int_{y^b}^{\infty} f_Y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I}) d\tilde{y} = \gamma / 2 \end{aligned} \quad (10)$$

Mit der Hilfsgröße $\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{y/u(y)} \exp(-\frac{\nu^2}{2}) d\nu = \Phi(y/u(y))$ ergeben sich die Grenzen des probabilistisch symmetrischen Überdeckungsbereichs zu

$$y^a = y - k_p \cdot u(y) \text{ mit } p = \omega \cdot (1 - \gamma / 2) \text{ und } y^b = y + k_q \cdot u(y) \text{ mit } q = 1 - \omega \cdot \gamma / 2. \quad (11)$$

Dabei sind k_p, k_q die Quantile der standardisierten Normalverteilung zu den Wahrscheinlichkeiten p und q . Werte dieser Quantile sind in z.B. in ISO 11929-1 [6] angegeben.

Wenn die relative Unsicherheit $u_{\text{rel}}(y) = u(y) / y$, die dem Messwert y zugeordnet ist, 25% nicht übersteigt, sind die Grenzen des probabilistisch symmetrischen Überdeckungsbereichs gegeben durch

$$y^{a,b} = y \pm k_{1-\gamma/2} \cdot u(y) \quad (12)$$

Abb. 2 zeigt das Beispiel eines probabilistisch symmetrischen Überdeckungsbereichs für den Fall, dass die relative Unsicherheit $u_{\text{rel}}(y)$ 25% übersteigt. In einem solchen Fall liegen die Grenzen des Überdeckungsbereichs y^a und y^b nicht wie in Gleichung 12 symmetrisch rela-

tiv zum Messergebnis y . In Abb. 2 ist auch der beste Schätzwert \hat{y} nach ISO 11929 eingezeichnet, auf den hier nicht näher eingegangen wird.

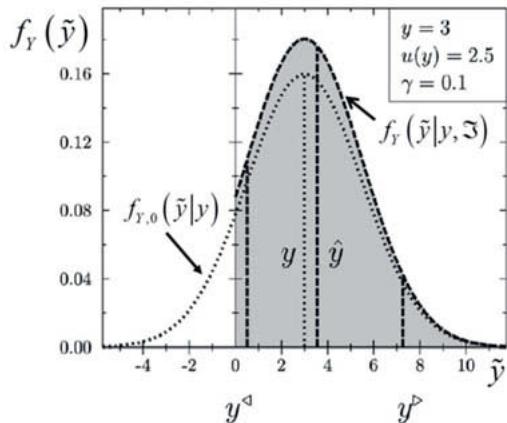


Bild 2: Beispiel eines probabilistisch symmetrischen Überdeckungsbereichs. Der graue Bereich stellt die abgeschnittene Normalverteilung nach Gleichung 9 dar.

5. Konformität mit Anforderungen

5.1 Toleranz- und Akzeptanzbereiche

Das JCGM hat auch Empfehlungen für die allgemeine Beurteilung von Konformität mit Anforderungen unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten herausgegeben [5]. Die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) hat auf der Grundlage des Leitfadens JCGM 106 [5] und der Norm ISO 11929-1 [6] explizite Empfehlungen zur Beurteilung der Konformität mit Anforderungen bei Messungen ionisierender Strahlung zum Zwecke des Strahlenschutzes herausgegeben [17]. Diese Empfehlungen sind jedoch allgemein auch auf andere Messverfahren und Messzwecke übertragbar.

Anforderungen an die Ergebnisse technischer Tests ergeben sich aus technischen Regelwerken nach dem Stand von Wissenschaft und Technik und aus gesetzlichen Vorschriften. Solche Anforderungen können für eine Messgröße in Form von einseitig oder zweiseitig begrenzten Toleranzbereichen $[T_u, T_o]$ (Abb. 3) festgelegt werden.

Wenn Anforderungen durch die Festlegung von einseitig oder zweiseitig begrenzten Toleranzbereichen formuliert werden, wird verlangt, dass der wahre Wert der Messgröße innerhalb des Toleranzbereichs liegt. Da der wahre Wert der Messgröße jedoch unbekannt und unerkennbar ist, können lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen, die die Messunsicherheiten berücksichtigen, über ihn gemacht werden.

Wenn nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über den wahren Wert der Messgröße gemacht werden können, besteht die Möglichkeit, sich fälschlicher Weise für die Konformität mit den Anforderungen zu entscheiden. Die wissenschaftliche Beurteilung des Messzweckes kann lediglich die Randbedingungen für akzeptable oder tolerable Wahrscheinlichkeiten, δ , einer falschen Entscheidung aufzeigen. Die Festlegung einer solchen Wahrscheinlichkeit ist Sache des Regulators oder gesellschaftlicher Übereinkunft. Die SSK hat in ihrer Empfehlung für Zecke des Strahlenschutzes eine Wahrscheinlichkeit von $(1 - \delta) = 95\%$ für richtige Entscheidungen und von $\delta = 5\%$ für falsche Entscheidungen für Zwecke des Strahlenschutzes empfohlen [17]. Ein Wert von $\delta = 5\%$ ist auch häufig in internationalen Normen angegeben. Angesichts der begrenzten Möglichkeiten, kleine Perzentile einer PDF auf der Grundlage der verfügbaren Information zuverlässig zu bestimmen, erscheint eine Wahrscheinlichkeit von 5% für falsche Entscheidungen sinnvoll und gerechtfertigt. Mit dem Konzept der Messunsicherheiten nach dem GUM [2] und dem GUM S1 [3] können Entscheidungsregeln für Konformität unter Benutzung des probabilistisch symmetrischen Überdeckungsbereichs der PDF $f_y(\tilde{y}|y, \mathfrak{I})$ angegeben werden.

Zum Zweck der leichteren praktischen Anwendung können Anforderungen auch durch einen Akzeptanzbereich $[A_u, A_o]$ in der Weise definiert werden, dass auf Konformität mit den Anforderungen entschieden wird, wenn ein Messwert unabhängig von seiner Unsicherheit im Akzeptanzbereich liegt. Dazu muss das Akzeptanzbereich innerhalb des Toleranzbereichs liegen und kleiner sein als dieser (Abb. 3). Die Festlegung der Grenzen eines Akzeptanzbereichs erfordert die Kenntnis der Standardunsicherheit eines Ergebnisses des Messverfahrens als Funktion des Messwertes. Abb. 3 zeigt exemplarisch das Konzept der Toleranz- und Akzeptanzbereiche für den Fall eines zweiseitig begrenzten Toleranzbereichs.

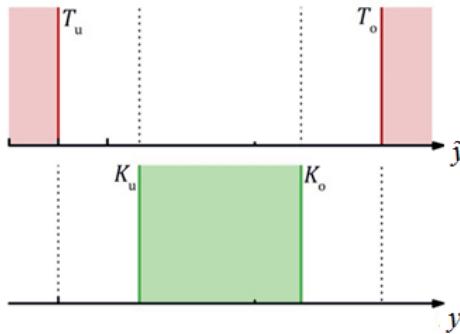


Bild 3: Toleranzbereich für den wahren Wert \tilde{y} , gegeben durch die Grenzen T_u und T_o , und Konformitätsbereich für Messwerte y , gegeben durch die Grenzen K_u und K_o ; vgl. auch Abb. 1 in [5].

5.2 Prüfung auf Konformität und Bedingungen für Akzeptanzbereiche

Sind Anforderungen durch einen Toleranzbereich $[T_u, T_o]$ festgelegt, in dem der wahre Wert der Messgröße mit hoher Wahrscheinlichkeit liegen soll, dann soll auf Konformität entschieden werden, wenn die allgemeinen Bedingungen nach Tab. 1 erfüllt sind. Diese Bedingungen beschreiben allgemein die Konformität mit Anforderungen und erlauben die Anwendung des GUM S1 [3]. Dies gilt auch für die Bedingungen zur Festlegung von Konformitätsbereichen über die impliziten Gleichungen in Tab. 1.

Die Nebenbedingungen im Falle eines zweiseitig begrenzten Toleranzintervalls sind erforderlich, da ohne weitere Information über die Messunsicherheiten dem Umstand Rechnung getragen werden muss, dass falsche Entscheidungen auf jeder Seite der Verteilung auftreten können, d.h. dass wahre Werte unterhalb bzw. oberhalb der Toleranzgrenze T_u bzw. T_o möglich sind. Für diesen Fall ist die Festlegung der Überdeckungswahrscheinlichkeit mit 95 % in Tab. 1 und 2 konservativ und stellt für jede relative Messunsicherheit die Einhaltung der 5 %igen Wahrscheinlichkeit für falsche Entscheidungen sicher.

Falls der GUM [2] zur Ermittlung der Messunsicherheit benutzt wird, gelten damit bei einer relativen Unsicherheit kleiner 25 % die Bedingungen für Konformität und die Festlegungen von Konformitätsbereichen in Tab. 2. Bei größeren relativen Unsicherheiten siehe ISO 11929

[6,7] bzgl. der Berechnung der Grenzen des Überdeckungsbereichs und Tab. 1 bzgl. der Bedingungen.

Die Festlegung eines Konformitätsbereichs $[K_u, K_o]$ setzt die Kenntnis der Standardmessunsicherheit als Funktion des primären Messergebnisses und eine hinreichende Reproduzierbarkeit der Messungen einschließlich der Standardmessunsicherheiten voraus. Der Konformitätsbereich ist dann definiert über die impliziten Gleichungen in Tab. 1 und 2.

Tabelle 1: Allgemeine Bedingungen für Konformität und für die Festlegung von Konformitätsbereichen.

Toleranzbereich	Bedingung für Konformität	Konformitätsbereich $[K_u, K_o]$
Einseitig nach unten begrenzt $[T_u, +\infty]$	$P(\tilde{y} < T_u y, u(y)) =$ $\int_0^{T_u} f_Y(\tilde{y} y, \mathfrak{I}) d\tilde{y} \leq \delta$	$P(\tilde{y} < T_u y = K_u, u(y = K_u)) = \delta$ $K_o = +\infty$
Einseitig nach oben begrenzt $[0, T_o]$	$P(\tilde{y} > T_o y, u(y)) =$ $\int_{T_o}^{+\infty} f_Y(\tilde{y} y, \mathfrak{I}) d\tilde{y} \leq \delta$	$P(\tilde{y} > T_o y = K_o, u(y = K_o)) = \delta$ $K_u = 0$
Beidseitig begrenzt $[T_u, T_o]$	$P(\tilde{y} < T_u \vee \tilde{y} > T_o y, u(y)) =$ $\int_{T_u}^{T_o} f_Y(\tilde{y} y, \mathfrak{I}) d\tilde{y} \leq 1 - \delta$ mit den Nebenbedingungen $P(\tilde{y} < T_u y, u(y)) \leq \delta / 2$ und $P(\tilde{y} > T_o y, u(y)) \leq \delta / 2$	$P(\tilde{y} < T_u y = K_u, u(y = K_u)) = \delta / 2$ und $P(\tilde{y} > T_o y = K_o, u(y = K_o)) = \delta / 2$

Tabelle 2: Bedingungen für Konformität und für die Festlegung von Konformitätsbereichen bei Anwendung des GUM [2] bzw. ISO 11929-1 [6] für $\delta = 0,05$ und $u_{\text{rel}}(y) \leq 0,25$.

Toleranzbereich	Bedingung für Konformität	Konformitätsbereich $[K_u, K_o]$
Einseitig nach unten begrenzt $[T_u, +\infty]$	$y - 1,65 \cdot u(y) \geq T_u$	$K_u = T_u + 1,65 \cdot u(y = K_u)$ $K_o = +\infty$
Einseitig nach oben begrenzt $[0, T_o]$	$y + 1,65 \cdot u(y) \leq T_o$	$K_o = T_o - 1,65 \cdot u(y = K_o)$ $K_u = 0$
Beidseitig begrenzt $[T_u, T_o]$	$y - 1,96 \cdot u(y) \geq T_u$ und $y + 1,96 \cdot u(y) \leq T_o$	$K_u = T_u + 1,96 \cdot u(y = K_u)$ $K_o = T_o - 1,96 \cdot u(y = K_o)$

6 Schlussfolgerungen

Mit den JCGM Leitfäden der Metrologie liegt eine international akzeptierte Methodik zur Behandlung von Messunsicherheiten vor. Mit einer Bayesschen Theorie der Messunsicherheiten existiert eine solide statistische Grundlage für die JCGM Leitfäden, die den Reiz hat, dass sie die normale Art und Weise menschlichen Lernens abbildet. Die Norm ISO 11929 erweitert die Methodik der JCGM Guides im Hinblick auf Entscheidungen unter Unsicherheit. Charakteristische Grenzen nach ISO 11929 können für praktische jedes Messproblem ermittelt werden. Sie sind auch anwendbar zu Entscheidung über Konformität mit Anforderungen. Eine Empfehlung der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) gibt explizite Anleitungen zur Beurteilung von Konformität mit Anforderungen auf der Grundlage der JCGM Leitfäden und ISO 11929.

Literaturnachweis

- [1] JCGM, 2012a. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), JCGM 200. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>; ISO/IEC Guide 99-2012-12.
- [2] JCGM, 2008a. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). JCGM 100. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>, ISO/IEC Guide 98 3.
- [3] JCGM, 2008b. Guide to the expression of uncertainty in measurement - Supplement 1 (GUM S1): Propagation of distributions using a Monte Carlo method, JCGM 101. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>, ISO/IEC Guide 98 3-1.
- [4] JCGM, 2011. Guide to the expression of uncertainty in measurement - Supplement 2 (GUM S2): Extension to any number of output quantities, JCGM 102. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>, ISO/IEC Guide 98 3-2.
- [5] JCGM, 2012b. Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. JCGM 106. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>, ISO/IEC Guide 98 4.
- [6] ISO, 2019a. ISO 11929-1:2019 Determination of characteristic limits (decision threshold, detection limit, and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation - Fundamentals and applications, Part 1: Elementary applications. ISO Geneva.
- [7] ISO, 2019b. ISO 11929-2:2019 Determination of characteristic limits (decision threshold, detection limit, and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation - Fundamentals and applications, Part 2: Advanced applications. ISO Geneva.
- [8] Michel, R., 2016. Measuring, estimating, and deciding under uncertainty, Applied Radiation and Isotopes, pp. 6-11, DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.12.013
- [9] Michel, R., 2017. Uncertainty, detectability, and conformity in measurements of ionizing radiation, Japan Journal Health Phys. 52 (3) 179 – 191, DOI: 10.5453/jhps.52.179
- [10] Bayes, Th., 1763. Essay towards solving a problem in the doctrine of chances, The Philosophical Transactions 53,370–418; reprinted by G.A. Barnard; Thomas Bayes, 1958, Biometrika 45(3/4) 293–315.
- [11] Bernardo, J.M., 2003. Bayesian statistics, in: Probability and Statistics (R. Viertl, ed.) of the Encyclopaedia of Life Support Systems (EOLSS). (UNESCO, Oxford).

- [12] Gregory, P.C., 2005. Bayesian logical data analysis for the physical sciences. (Cambridge University Press, Cambridge).
- [13] Laplace, P.S., 1812. Théorie analytique des probabilités.
- [14] ISO, 1993. ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement, corrected reprint, ISO, Geneva, corrected reprint 1995.
- [15] Weise, K., Wöger, W., 1993. A Bayesian theory of measurement uncertainty. *Meas. Sci. Technol.* 4, 1-11.
- [16] Jaynes E.T., 1982. Probability Theory: The logic of science. reprinted 2003, University Press, Cambridge, ISBN 0-521-59271-2.
- [17] SSK, 2016. Methodik zur Berücksichtigung von Messunsicherheiten bei messtechnischen Prüfungen im Geltungsbereich der Röntgenverordnung und der Strahlenschutzverordnung, Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK), verabschiedet auf der 228. Sitzung der Kommission am 16.9.2016; www.ssk.de.

Adaptive Prüfplanung – Die neue Richtlinie VDI/VDE 2600-3 als Leitfaden für die Industrie

Tobias Müller, Jonathan Greipel, Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt,
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Aachen

Kurzfassung

Steigende Kundenansprüche und ein Anstieg der Variantenfertigung resultieren in einem erhöhten Aufwand in der Prüfplanung. Anwendern stehen jedoch nachdem die VDI 2619 zurückgezogen wurde, keine ganzheitlichen Hilfestellungen zur Prüfplanung zur Verfügung. Im Fachausschuss 1.21 des VDI wird in der Richtlinie VDI/VDE 2600-3 ein 12-schrittiges, adaptiv gestaltetes Vorgehen entwickelt, welches diese Lücke schließen soll. Das Vorgehen umfasst neben Hilfestellungen zur Prüfplanerstellung auch Hinweise, wie bei Veränderungen der Randbedingungen Prüfpläne wirtschaftlich optimal angepasst werden können.

Adaptive Prüfplanung in der industriellen Praxis

Um im Wettbewerb zu bestehen, stimmen Unternehmen ihre Produkte zunehmend individuell auf die einzelnen Kundenanforderungen ab und produzieren somit vermehrt in Varianten [1]. Zeitgleich nehmen die Ansprüche der Kunden an die Qualitätssicherung, die Nachverfolgbarkeit sowie die Datennutzung im Kontext der Industrie 4.0 zu. Daraus resultiert ein vergrößerter Aufwand in der Prüfplanung, der zudem noch für jede Variante anfällt. Aufgrund dieser neuen Produktionsbedingungen erachtet der VDI die 1985 erstellte Richtlinie VDI 2619 „Prüfplanung“ nicht mehr als zeitgemäß und hat diese 2015 zurückgezogen. Ihre Hauptdefizite sind erstens, dass sie eine sinnvolle Einbettung informationstechnischer Lösungen für einen wirtschaftlichen Prüfplanaufwand, nicht beinhaltet. Zweitens fehlen für die Digitalisierung wichtige Aspekte wie z. B. die optimale Gestaltung von Schnittstellen zu Datenbanken oder Softwaresystemen. Drittens wurden über die Zeit Methoden entwickelt, um automatisiert Prüfpläne kontinuierlich hinsichtlich Nutzen, Zeit, Kosten und Risiko zu optimieren. Viertens ist die Verknüpfung zwischen Fertigungsplanung und Prüfplanung derzeit nicht ausreichend, um wirtschaftlich optimale Prüfpläne zu erhalten z. B. durch das Festlegen von Prüfungen zwischen bestimmten Fertigungsschritten.

Aktuelle Verfahren der Prüfplanung

Ziel der Prüfplanung ist es, eine ordnungsgemäße Qualitätsprüfung zu gewährleisten und diese optimal in Fertigungs- und Montageabläufe zu integrieren. Die Prüfplanung findet zumeist beim Start der Produktion eines neuen Produkts statt und wird von interdisziplinären Projektteams durchgeführt [3]. Dabei muss die Prüfplanung Betriebsstrukturen, Qualitätsspezifikationen der Produkte, Wirtschaftlichkeit sowie eine ordnungsgemäße Datenerfassung, Handhabung und Auswertung berücksichtigen. [4]. Gemäß Stand der Technik ist das einzig bisher bestehende Verfahren zur ganzheitlichen Prüfplanung in der zurückgezogenen VDI-Richtlinie 2619 enthalten. Andere Verfahren betrachten nur Teilespekte, wie die Optimierung der Durchlaufzeit, die optimale Einbindung der Prüfung in die Fertigung oder die Festlegung von Prüfumfang und Prüffrequenz etc. [6], [7], [9].

Gemäß Richtlinie VDI 2619 müssen zur Erstellung eines Prüfplans verschiedene Aufgaben der Prüfplanung gelöst werden, die die Auswahl von Prüfmerkmalen, die Festlegung von Prüfzeitpunkten (Material, Halbzeug, Fertigprodukt), die Bestimmung des Prüfumfangs sowie die Festlegung der Prüfart, des Prüfpersonals, des Prüfmittels, der Prüfdokumentation und die Auswertung der Prüfdaten umfassen. Das Ergebnis ist eine Prüfanweisung, welche die Anwendung des Prüfprozesses ermöglicht [4], [5]. Als letzte Aufgabe ist die Qualifizierung des Prüfprozesses notwendig und die Definition regelmäßiger Zeitpunkte zur Überprüfung des Prüfprozesses [8]. Diese Aufgaben bleiben grundlegend bei der Prüfplanung erhalten, werden aber um adaptive Aspekte erweitert.

Eine Definition für „Adaptive Prüfplanung“ ist die stetige Analyse anfallender Prüfergebnisse, des betrieblichen Kontexts und der sich stetig ändernden Produktionsumgebung sowie die Rückführung der Analyseergebnisse in die Prüfplanung, um Prüfpläne stetig nutzen-, kosten-, zeit- und risiko optimal anzupassen [3]. Gemäß SCHMITT ET. AL. ist eine Erweiterung der bisherigen Prüfplanung um adaptive Aspekte zur Berücksichtigung folgender wirtschaftlich relevanter Auslöser nötig:

- Proaktiv-interne Auslöser, die innerhalb eines Unternehmens erwünscht sind, z. B. durch Kostensenkungen oder kontinuierliche Prozessverbesserung etc. [3].
- Reaktiv-interne Auslöser, die unternehmensintern gesteuert werden und z. B. durch eine neue Risikobewertung oder Anpassungen des Produkts etc. notwendig sind [3].
- Reaktiv-externe Auslöser, die von außen getrieben werden und z. B. aufgrund einer Kundenbeanstandung oder neuer Normen und Gesetze etc. notwendig sind [3].

Zusammenfassend werden Prüfpläne derzeit nach der Produktentwicklung im Zuge des Aufsetzens eines neuen Produktionsprozesses erstellt. Eine Adaption der Prüfpläne nach Erlangen von Fertigungswissen um wirtschaftliche Potenziale zu nutzen, findet in der Praxis

selten statt. Gemäß Stand der Technik besitzen die folgend aufgeführten Arbeiten Potenzial, um in die neue Richtlinie VDI/VDE 2600-3 einzufließen. Die durchgeführten Arbeiten beschäftigen sich vor allem mit den Themen Kostenoptimierung von Prüfplänen, Aufwandsreduzierung bei Prüfmitteln sowie der Erweiterung von Stichprobenprüfplänen.

Kostenoptimierung von Prüfplänen

MÜLLER strebt eine Verbesserung der Fertigungs- und Prüfprozesse durch die Kombination von Arbeits- und Prüfplanung an, die aufgrund der Komplexität oft getrennt durchgeführt werden. Er entwickelte ein Verfahren zur Definition kosten-, zeit- und qualitätsoptimaler Fertigungs- und Prüfabläufe für sicherheitskritische Teile. Ein wesentlicher Aspekt für die Wirtschaftlichkeit ist die Festlegung der Anzahl der zu prüfenden Teile und der Prüfzeitpunkte, um z. B. eine unwissentliche Weiterverarbeitung von Ausschussteilen zu verhindern. Im Rahmen des Verfahrens werden Alternativen von Fertigungs- und Prüfabläufen auf Basis der Qualitätsmerkmale der Teile generiert. Die Alternativen werden nach Kosten, Zeit und Qualität bewertet [7].

CROSTACK ET AL. optimieren Prüfpläne mit fester Qualität kosten- und zeitgerecht. Im ersten Schritt werden nur die Kosten optimiert und ein reduzierter Lösungsraum möglicher Prüfpläne identifiziert. Dafür wird ein evolutionärer Algorithmus verwendet, der verschiedene Variationen von Prüfplänen durch unterschiedliche Parameter wie Prüfmittel, Prüfumfang, Prüfzeit und Prüfort erzeugt [6]. Aus den Variationen werden kostenoptimale Prüfpläne mit Hilfe eines Kostenmodells ausgewählt. In einem zweiten Schritt wird der kosten- und zeiotimale Prüfplan durch Simulation und eines verfeinerten Kosten- und Zeitmodells ermittelt [6].

BASSE ET AL. zielen auf die kostenoptimierte Erstellung von Prüfplänen ab. Dazu wird ein Entscheidungsmodell mit grundlegenden entscheidungstheoretischen Regeln und einer Kostenstruktur erstellt. Der optimale Prüfplan wird durch den Austausch zwischen alternativen Prüfzeitpunkten, Prüfarten, Prüfumfang, Prüfplatz, Prüfpersonal und Prüfmitteln ermittelt. Die Prüfmerkmale, ihre technischen Spezifikationen und ihre Notwendigkeit der Prüfung sind dagegen der Input für die Festlegung der Alternativen. Die Notwendigkeit der Prüfung eines Qualitätsmerkmals wird innerhalb einer Matrix nach Sicherheitsrelevanz, Kundenanforderung, Funktionalität, gesetzlichen Vorschriften, internen Vorschriften, Produktionsprozess und wirtschaftlicher Notwendigkeit ermittelt. Eine exponentielle Nutzenfunktion wird verwendet, um die Alternativen zu bewerten und die richtige Prüfplanalternative für einen risikoaversen, risikoneutralen oder risikosuchenden Entscheidungsträger auszuwählen [9].

Aufwandsreduzierung bei Prüfmitteln

STEINKAMP zielt darauf ab, die Zeit der Prüfplanung bei der Auswahl von Prüfmitteln und die Notwendigkeit von Expertenwissen zu reduzieren. Das von ihm entwickelte Verfahren zielt darauf ab, kostenoptimale Prüfmittel mit Hilfe von CAD-Daten von Teilen automatisch zu finden. Das Verfahren besteht aus zwei Schritten: Zunächst wird das Prüfmittel hinsichtlich der Erfüllung technischer Aspekte wie Messunsicherheit, Zugänglichkeit, etc. bewertet. Zum anderen werden die verbleibenden Prüfmittel nach organisatorisch-ökonomischen Aspekten wie Messzeit, Prüfkosten etc. bewertet [10].

Das Ziel von MÜLLER ist die Entwicklung eines allgemeingültigen Verfahrens zur aufwandsreduzierten Bestimmung der Messunsicherheit komplexer Messprozesse. Das Verfahren baut auf dem GUM auf und ergänzt dieses um eine aufwandsreduzierte Vorgehensweise zur Modellierung von Messprozessen. Erreicht wird dies durch die Nutzung von Machine-Learning-Algorithmen, der erstmaligen Bereitstellung und Einbindung von Verfahrensschritten für die Relevanzbewertung von Einflüssen sowie der systematischen Einbindung von Erfahrungswissen. Ergebnis ist ein Verfahren, das den Aufwand für die Messunsicherheitsbestimmung und insbesondere die Modellierung des Messprozesses und seiner Einflussfaktoren reduziert [12], [13].

Erweiterung von Stichprobenprüfplänen

Ziel von GREIPEL ET AL. ist die Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Aufwandsreduzierung der adaptiven Prüfplanung in der Variantenproduktion. Die Lösung, um diese Aufwände zu reduzieren, besteht darin, auf statistischen Methoden basierende Algorithmen zur Definition von Schlüsselmerkmalen und von Mischlosen zu entwickeln. Schlüsselmerkmale werden definiert, indem vom ersten Algorithmus mit historischen Messdaten je Variante Prüfmerkmale mit redundanten Prüfaussage identifiziert und davon die fertigungskritischen Prüfmerkmale als Schlüsselmerkmale festgelegt werden. Der zweite Algorithmus nutzt die Schlüsselmerkmale und vergleicht sie variantenübergreifend anhand ihrer Messdaten. Bei fertigungstechnischer und statistischer Ähnlichkeit werden sie zu Mischlosen gruppiert. Diese dienen als Input für adaptive Stichprobenprüfpläne, die die Prüffrequenz und den Prüfumfang anpassen [11], [14].

Ziel von CRAMER ist die Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Qualitätsvorhersage für Produktionsmaschinen. Um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen, verfolgen KMU das Ziel, ihren Prüfaufwand zu reduzieren. Eine Option ist die Vorhersage der Produktqualität anhand von Prozessdaten, anstatt Produktmerkmale physisch zu messen. Der Lösungsweg um eine merkmalsbasierte Qualitätsvorhersage zu ermöglichen, besteht darin, ein Verfahren

basierend auf Neuronalen Netzen zu entwickeln. Um die Vorhersagen stetig zu validieren, wird eine Stichprobenprüfplan auf Basis der Vorhersageunsicherheit entwickelt [15].

Zusammenfassend handeln die betrachteten Arbeiten nur Teilespekte der Prüfplanung ab. Es fehlt ein Verfahren, das diese Arbeiten und aktuelle Entwicklungen in der Produktion in einen Zusammenhang setzt. Aus diesen Gründen ist der VDI-Fachausschuss 1.21 derzeit bestrebt, die neue Richtlinie VDI/VDE 2600-3 zu erstellen. Die ersten Ergebnisse des Fachausschusses werden im Folgenden vorgestellt. Sie umfassen das konzeptionelle Verfahren zur Prüfplanung.

VDI/VDE 2600-3 „Adaptive Prüfplanung“ – die neue Richtlinie zur Prüfplanung

Für die neue Richtlinie VDI/VDE 2600-3 ist der in Bild 1 dargestellte Ablauf vorgesehen. Das Vorgehen wurde im Fachausschuss 1.21 „Eignungsnachweis von Mess- und Prüfprozessen“ entwickelt. Es besteht aus 12 aufeinander aufbauenden, adaptiv gestalteten Schritten und vier prozessbegleitenden Strömen, die sich durch alle Schritte ziehen. Die Prüfplanung selbst wird durch ein interdisziplinäres, geschultes Team durchgeführt. Hierbei können sich die Prozessverantwortlichen in den einzelnen Schritten unterscheiden, grundsätzlich sollten jedoch folgende Personengruppen involviert werden:

- Projektmanager als Gesamtverantwortlicher der Produkt- und Prozessentwicklung
- Prüfplaner als Gesamtverantwortlicher des Prüfplanungsprojekts
- Entwickler zur Identifikation kritischer Prüfmerkmale
- Einkauf zur Identifikation kritischer Prüfmerkmale und zum Festlegen von Prüfungen beim Lieferanten oder Abnahmeprüfungen
- Produktionsplaner zur optimalen Integration des Prüfplans in die Produktion
- Qualitätsmanager zur optimalen Integration des Prüfplans in das Qualitätsmanagement
- IT-Manager zur Anbindung der Prüfplanung und der Messsysteme an das IT-System sowie zur Konzeption von IT-Lösungen
- Vertrieb zur Identifikation kritischer Prüfmerkmale und juristischer Randbedingungen
- Prüf- und Messtechniker zum Einbringen von vorhandenem Prüfprozesswissen
- Logistikverantwortliche zur Optimierung des prüftechnisch bedingten Produktflusses

Das Projektteam arbeitet die Schritte beginnend mit dem Auftrag zur Prüfplanung ab. Zuerst werden das Prüfobjekt und einzelne Qualitätsmerkmale sowie risikobasiert Prüfmerkmale definiert. Aus den Prüfmerkmalen werden die Messgrößen abgeleitet, sodass im Anschluss Prüfstrategie, Prüfmethode und Prüfmittel festgelegt werden können. Nachdem das Vorgehen zur Prüfmittelüberwachung, Kalibrierung und Rückführung beschrieben wurde, wird der Eignungsnachweis durchgeführt. Sofern dieser positiv ausfällt, wird definiert, wie die Prüfdatenerfassung, -auswertung und Rückführung der ermittelten Informationen zur

kontinuierlichen Adaption des Prüfplans aussehen. Mit der Festlegung von Reaktions- und Maßnahmenplänen wird die Prüfplanung fortlaufend überwacht. Zuletzt wird der Prüfplan dokumentiert und von den Verantwortlichen überprüft und freigegeben. Das Vorgehen ist in *Bild 1* dargestellt. Beim Vorgehen handelt es sich um ein Konzept, das in den nächsten Sitzungen des Fachausschusses unter Beachtung der im Kapitel „Aktuelle Verfahren der Prüfplanung“ dargestellten Methoden weiter detailliert wird. Während des Durchlaufens der 12 Schritte werden prozessbegleitend die im Folgenden beschriebenen vier Ströme beachtet.



Bild 1: Vorgehen zur Prüfplanung

Umsetzung der Adaptivität durch Ströme

Um der Ausgestaltung einer adaptiven Prüfplanung gerecht zu werden, werden Ströme integriert. Diese beschreiben Maßnahmen, die in jedem Prozessschritt zu beachten sind. Zudem beschreiben sie Maßnahmen, die während der Nutzung eines erstellten Prüfplans gelten, um beispielsweise herauszufinden, wann dieser den gegebenen Randbedingungen anzupassen ist. Derzeit sind in der Richtlinie VDI/VDE 2600-3 folgende vier Ströme vorgesehen.

1. Strom: Analyse der Randbedingungen

Ziel ist es stetig einen optimalen Prüfplan zur Verfügung zu stellen. Dafür wird die gesamte Prüfplanung adaptiv gestaltet, d. h. dass eine ständige Analyse sich ändernder Randbedingungen (Stückzahlen, Produktanforderungen, etc.) nötig ist. Dies hat Auswirkungen

auf die Neuerstellung eines Prüfplans sowie auf bestehende Prüfpläne. Da bei der Neuerstellung aufgrund von Planungsunsicherheiten, nicht immer zu Beginn der Prüfplanung alle Randbedingungen festgesetzt werden können, werden die Randbedingungen zu Beginn jedes Prozessschritts erneut analysiert und dokumentiert. Eine ständige Analyse der Randbedingungen ermöglicht auch die Adaption bereits bestehender Prüfpläne. Bei prozessschrittunabhängigen Änderungen der Randbedingungen ist der Prüfplan vollständig zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Bei Änderungen der Randbedingungen in Prozessschritten sind jeweils der Prozessschritt sowie alle mit dem Prozessschritt im Zusammenhang stehende Schritte zu prüfen und gegebenenfalls zu adaptieren.

2. Strom: IT- Infrastruktur

Ziel ist es, dass ein optimales IT-Gesamtkonzept für das Unternehmen umgesetzt wird, um z. B. auch Datenanalysen im Sinne der Industrie 4.0 zu ermöglichen. Bei jedem Schritt wird analysiert und ermittelt, welche Softwaresysteme, Datenbanken und Schnittstellen nötig sind. Aufgrund der Bedeutung für die Prüfplanung werden die IT-Komponenten in dem Schritt „Festlegung der Prüfdatenerfassung und -auswertung“ nochmals hinterfragt und zu einem Gesamtkonzept fusioniert. Auch wird neben der Vernetzung der einzelnen Systeme die Vernetzung zu übergeordneten Systemen inkl. der notwendigen Schnittstellen festgelegt.

3. Strom: Planung der Mitarbeitereschulung

Ziel ist es, ein ganzheitliches Schulungskonzept für die Prüfer zu entwickeln. Hierfür wird für jeden Schritt dokumentiert, welche Schulungen relevant sind. Anhand dessen wird das Schulungskonzept entwickelt, das z. B. Nutzung der Messsysteme, Nutzung der Softwarelösungen, und allgemeine Regeln zur Gewährleistung einer validen Prüfung beinhaltet. Die Schulungen qualifizieren Prüfer dafür, die Prüfung durchzuführen. Schulungen müssen auch nach der Adaption eines bestehenden Prüfplans durchgeführt werden.

4. Strom: Dokumentation des Vorgehens

Ziel ist die Dokumentation aller während der Prüfplanerstellung oder -änderung getroffenen Entscheidungen und deren Hintergründe. Dies ist nötig, um den Anforderungen der DIN EN ISO 9001 gerecht zu werden, eine adaptive Prüfplanung und dessen Effizienz sowie eine Argumentation zu getroffen Entscheidungen gegenüber Kunden zu gewährleisten. Entscheidungen sind so zu dokumentieren, dass eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist und evaluiert werden kann, ob eine Anpassung eines bestehenden Prüfplans bei der Änderung einer Randbedingung notwendig ist.

Schritte zur Prüfplanerstellung

Im Folgenden werden die 12 Schritte zur Prüfplanerstellung aus Bild 1 vorgestellt. Die Schritte sind adaptiv gestaltet, sodass eine stetige Optimierung insbesondere von bestehenden Prüfplänen ermöglicht wird. Prozessschrittübergreifend wird für die Umsetzung der adaptiven Gestaltung eine starke Einbindung von Software empfohlen.

1. Schritt: Auftrag zur Prüfplanung

Die Prüfplanung beginnt mit dem Auftrag zur Prüfplanung. Ein Auftrag kann durch gesetzliche, normative oder interne Vorgaben entstehen und ist die Grundlage für den nachfolgenden Prozess. Aus den Vorgaben geht die Zielstellung der Prüfplanung hervor, welche die Rahmenbedingungen bilden. Sollten sich die Vorgaben ändern, so ist die Prüfplanung auf Aktualität zu prüfen. Das Ergebnis des Schritts ist das Anstoßen des Prüfplanungsprozesses.

2. Schritt: Prüfobjekt definieren

Aus dem Auftrag zur Prüfplanung geht hervor, welches Objekt zu prüfen ist. Die Definition des Prüfobjekts umfasst zusätzlich die Beschreibung aller relevanten Eigenschaften (u. a. Größe, Gewicht, Toleranzen). Dieser Schritt ist zu wiederholen, wenn sich das Prüfobjekt oder die relevanten Eigenschaften verändern. Das Ergebnis ist die Definition des Prüfobjekts inklusive einer Beschreibung der relevanten Eigenschaften.

3. Schritt: Festlegung der Qualitätsmerkmale

Aus der Beschreibung der Eigenschaften aus Schritt 2 werden Qualitätsmerkmale extrahiert. Ein Qualitätsmerkmal beschreibt nach DIN EN ISO 9000 ein Merkmal eines Objekts, welches sich auf eine Anforderung bezieht [16]. Es ist zu beachten, dass ein Qualitätsmerkmal nicht zwingend prüfbar ist. Qualitätsmerkmale können aus Kundenanforderungen, (CAD-) Zeichnungen, Stücklisten oder der FMEA stammen. Methoden zur Festlegung von Qualitätsmerkmalen sind u. a. das Brainstorming, das House of Quality oder die Expertenbefragung. Das Ergebnis ist eine Auflistung aller Qualitätsmerkmale des Prüfobjekts.

4. Schritt: Risikoklassifizierung und Festlegung der Prüfmerkmale

Da nicht jedes Qualitätsmerkmal prüfbar ist, sind Prüfmerkmale festzulegen. Ein Prüfmerkmal wird gemäß VDI/VDE 2600-1 definiert als Merkmal, anhand dessen eine Prüfung durchgeführt wird. Input für die Festlegung der Prüfmerkmale kann aus den Vorgaben aus Schritt 1 hervorgehen. Sollte dies nicht der Fall sein und ein Qualitätsmerkmal nicht direkt in ein Prüfmerkmal zu überführen sein, so ist über eine Expertenbefragung das Prüfmerkmal

festzulegen. Gleiches gilt für die Definition der Messgröße auf Basis des Prüfmerkmals. Für die Messgröße ist die Festlegung der Toleranzen anzusteuern, sollten diese noch nicht definiert sein. Die Festlegung der Toleranzen ist insbesondere auch für die Bestimmung der Eignung des Prüfprozesses relevant. Die Risikoklassifizierung wird analog zu der VDI/VDE 2600-1 durchgeführt. Hierbei wird auf Basis der Folgen von Fehlentscheidungen sowie der Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Prüfentscheids eine Risikoklasse definiert. Die Klassifizierung des Risikos beeinflusst u. a. die Auswahl der Methode zum Eignungsnachweis und den damit verbundenen Aufwand. Das Ergebnis ist eine Liste der Messgrößen inklusive der Zuordnung zu den jeweiligen Prüfmerkmalen respektive Qualitätsmerkmalen sowie einer Risikoklassifizierung.

5. Schritt: Festlegung von Prüfstrategie, Prüfmittel und Prüfmethode

Die Festlegung der Prüfstrategie umfasst den Prüfzeitpunkt, die Prüfart, den Prüfumfang, die Prüffrequenz, den Prüfort und das Prüfpersonal. Anhand der Prüfstrategie werden Prüfmethode und Prüfmittel festgelegt. Der Prüfzeitpunkt legt fest, wann die Prüfung durchgeführt werden soll und bezieht hierbei auch die Fertigungsplanung mit ein. Er wird zumeist nach ökonomischen Aspekten definiert. Z. B. kann es wirtschaftlich sinnvoll sein, Zwischenprüfungen von Halbzeugen einzuführen, um Ausschuss frühzeitig zu verhindern. Die Prüfart legt fest, ob attributiv, z. B. mit Lehren, oder variabel geprüft wird. Beim Prüfumfang wird entschieden, ob Prüfmerkmale zu 0%, 100% oder stichprobenartig zu prüfen sind. Bei Stichprobenprüfplänen herrscht großes Prüfkosteneinsparpotenzial. Für Prozesse mit nachgewiesener Prozessfähigkeit sollten 100%-Prüfungen entsprechend angepasst werden. Die Prüffrequenz ist nur bei Stichprobenprüfungen relevant und gibt an, nach welchen Intervallen zu prüfen ist. Der Prüfort kann z. B. den Warenein- und -ausgang, die Produktion oder den Messraum umfassen. Beim Prüfpersonal wird definiert, ob eine Werkereigenprüfung oder eine Fremdprüfung durchgeführt wird. Ein weiterer strategischer Aspekt ist die Festlegung, ob die Prüfung teile- oder merkmalsbezogen abläuft. Dies hat Auswirkung auf Prüf- und Rüstzeiten. Auch, ob eine Prüfung zeitfern zur Produktion als Abnahmeprüfung dient oder, ob die Prüfinformationen zur Produktion zurückgeführt werden sollen und zeitnah zu erfolgen haben. Auf Basis der Prüfstrategie werden Prüfmittel und Prüfmethode festgelegt. Bei der Auswahl des Prüfmittels wird die Prüfstrategie in Anforderungen an ein Prüfmittel übersetzt. Zur Aufwandsreduktion wird hierbei häufig ein Messprinzip festgelegt anhand dessen mögliche Prüfmittel in Marktrecherchen identifiziert und eins davon ausgewählt wird. Danach wird die Prüfmethode, die allgemeine Beschreibung der logischen Vorgehensweise

bei der Durchführung einer Prüfung, definiert. Hierbei werden z. B. notwendige Prüfvorrichtungen festgelegt. Ergebnis ist eine Beschreibung einer Prüfstrategie und Prüfung.

6. Schritt: Festlegung der Prüfmittelüberwachung, Kalibrierung und Rückführung

Ziel der Prüfmittelüberwachung nach DIN 32937 ist es, sicherzustellen, dass ein Prüfmittel die Anforderungen erfüllt, die für seine beabsichtigte Verwendung gelten sowie die Funktionsfähigkeit der Prüfmittel für deren Einsatz zu gewährleisten. Bei der Prüfmittelüberwachung wird sowohl die Kurz- als auch die Langzeitstabilität berücksichtigt. Gemäß der VDA 5 werden dafür z. B. Einstellmeister in Verbindung mit Regelkarten genutzt. Bei der Messung eines Einstellmeisters darf die Messabweichung des Prüfmittels vorher festgelegte Grenzen nicht überschreiten. Bei Überschreitung muss das Prüfmittel kalibriert werden. Bei der Kalibrierung wird das Prüfmittel auf ein nationales Normal zurückgeführt, indem systematische Fehler des Prüfmittels ausgeglichen werden. Grund für eine Rekalibrierung ist z. B. die Abnutzung. Allgemein verbindliche Festlegungen über den Zeitpunkt der Rekalibrierung bestehen nicht. Die Intervalle müssen vom Anwender festgelegt werden. Hierzu muss ggfs. von einem Erfahrungswert ausgegangen werden. Diese können durch die Beobachtung der Regelkarte gespreizt oder verengt werden.

7. Schritt: Eignungsnachweis des Prüfprozesses

Der Eignungsnachweis ist gemäß der Richtlinie VDI/VDE 2600-1 durchzuführen. Hierbei wird risikobasiert zwischen Einzelnachweis, repräsentativem Eignungsnachweis, der Abschätzung der Eignung und dem Eignungsnachweis über die Fertigung unterschieden. Je nach ausgewähltem Vorgehen wird auf entsprechende Verfahren (u. a. VDA 5, GUM) verwiesen. Bei komplexen Messprozessen kann zusätzlich die VDI/VDE 2600-2 als Hilfestellung genutzt werden. In der VDI/VDE 2600-1 ist beschrieben, wie mit negativen Eignungsnachweisen umzugehen ist. Das Ergebnis des Schritts ist der Nachweis der Eignung des Prüfprozesses.

8. Schritt: Festlegung der Prüfdatenerfassung und -auswertung

Bei der Prüfdatenerfassung und -auswertung wird festgelegt, wie die Prüfdaten aufgenommen, gespeichert und ausgewertet werden. Dieser Schritt ist eng mit dem übergreifenden Strom „IT-Infrastruktur“ verbunden. Die im Strom erarbeiteten Konzepte dienen als Input und werden finalisiert. Es wird z. B. die CAQ-Software festgelegt und wie die Daten ausgewertet werden. D. h. welche Qualitätswerzeuge (z. B. verschiedene Regelkarten) genutzt und welche Data-Analytics-Verfahren genutzt werden. Das Ergebnis ist eine definierte Software zur Datenerfassung sowie festgelegte Methoden zur Datenauswertung.

9. Schritt: Festlegung des Reaktions- und Maßnahmenplans

Der Reaktions- und Maßnahmenplan beschreibt das Vorgehen, wenn eine Prüfung negativ ausfällt, bzw. wenn in der Datenauswertung Auffälligkeiten (z.B. Überschreiten von Warngrenzen) angezeigt werden. Hier muss definiert werden, wie mit dem entsprechenden Bauteil umgegangen wird und welche Maßnahmen zu ergreifen sind. Der Plan kann Auswirkungen auf die Prüfstrategie und damit den Prüfumfang und die Prüffrequenz haben. Das Ergebnis ist ein dokumentierter Reaktions- und Maßnahmenplan.

10. Schritt: Überwachungsplan des Prüfplans

Neben den Auslösern, welche durch eine Änderung der Randbedingungen eine Überprüfung des Prüfplans auslösen, muss eine regelmäßige Prüfung des Prüfplans vorgesehen werden. Die regelmäßige Prüfung sieht vor, dass jeder der vorangegangenen Schritte durch einen Experten geprüft wird. Sollten sich Randbedingungen geändert haben oder aus anderen Gründen eine Anpassung notwendig sein, so ist der Prozess der Prüfplanung vollständig zu durchlaufen. Alle Änderungen sind zu begründen und zu dokumentieren. Das Ergebnis ist ein Überwachungsplan, der regelmäßige Prüfungen determiniert.

11. Schritt: Dokumentation des Prüfplans

Neben der Dokumentation der Prüfplanung gibt es die prozessbegleitende Dokumentation der Prüfplanung ab. Bei dieser wird die Nachvollziehbarkeit der erzielten Ergebnisse fokussiert. Bei der Dokumentation des Prüfplans wird der jeweilige Prüfplan beschrieben, welcher alle notwendigen Informationen enthält, um die Prüfung des in Schritt 1 definierten Prüfobjekts durchzuführen. Wichtigster Bestandteil ist das Festlegen der allgemeinen verbindlichen Prüfanweisungen, die vor allem aus Schritt 5 abgeleitet werden.

12. Schritt Überprüfung und Freigabe des Prüfplans

Im letzten Schritt wird der Prüfplan geprüft. Neben dem Prüfplan sollte in diesem Schritt die Dokumentation von jedem einzelnen vorangegangenen Schritt vorliegen. Nachdem die Dokumente auf Vollständigkeit geprüft wurden, wird der Prüfplan auf fachliche Richtigkeit geprüft und freigegeben. Sollten Schritte mangelhaft sein, sind diese nachzuarbeiten. Die Nacharbeit eines Schritts führt dazu, dass alle nachfolgenden Schritte erneut überprüft und gegebenenfalls an die veränderte Situation angepasst werden müssen. Das Ergebnis ist ein unterschriebener, mit Datum und Versionsnummer versehener, freigegebener Prüfplan.

Zusammenfassung

Fehlende bzw. veraltete Hilfestellungen zur Prüfplanung erfordern ein neues, strukturiertes und ganzheitliches Vorgehen. Durch eine zunehmend individualisierte Produktion und stetig wechselnde Randbedingungen wird eine adaptive Gestaltung der Prüfplanung notwendig. Die neue Richtlinie VDI 2600-3 soll diese Lücke schließen und dem Anwender erstmalig seit dem Zurückziehen der VDI 2619 eine ganzheitliche Hilfestellung geben. In diesem Beitrag wurde das für die Richtlinie VDI 2600-3 erarbeitete, 12-schrittige Konzept zur adaptiven Prüfplanung vorgestellt. Das Konzept dient dem Fachausschuss 1.21 als Basis für weitere Arbeiten sowie der Detailierung der einzelnen Methoden; insb. hinsichtlich der adaptiven Gestaltung.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20618N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Qualität e.V. (FQS), August-Schanz-Straße 21A, 60433 Frankfurt am Main wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] Redlich, T.; Moritz, M.; Wulfsberg, J. P. (2018): Interdisziplinäre Perspektiven zur Zukunft der Wertschöpfung. Wiesbaden: Springer Gabler.
- [2] Brecher, Christian (2012): Integrative Production Technology for High-Wage Countries. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [3] Schmitt, Robert (2016): Leitfaden zur Gestaltung einer ganzheitlichen Prüfplanung. Anwender-Leitfaden und CD-ROM. 1. Auflage. Frankfurt am Main: FQS Forschungsgemeinschaft Qualität e.V (FQS-DGQ-Schriftenreihe, 84,10).
- [4] Schmitt, Robert; Pfeifer, Tilo (2015): Qualitätsmanagement. Strategien - Methoden - Techniken. 5., aktualisierte Auflage. München: Hanser.
- [5] Juran, Joseph M. (2017): Juran's quality handbook. The complete guide to performance excellence. Seventh edition. Hg. v. Joseph A. DeFeo. New York: McGraw-Hill Education.
- [6] Crostack, Horst-Arthur (2004): QUINTE+, Optimierung der Prüfplanung nach Kosten und Durchlaufzeit mit Hilfe der Simulation. Forschungsgemeinschaft Qualität e.V.
- [7] Müller, Johannes (2018): Integrative Gestaltung von Fertigungsprozess- und Prüffolgen für sicherheitskritische Bauteile. Integrative design of production process and inspection sequences for safety-critical components. 1. Auflage. Aachen: Apprimus Verlag (Ergebnisse aus der Produktionstechnik, Band 5/2018).
- [8] Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie 5, 2010: Prüfprozesseignung.
- [9] Basse, I.; Jansen, C.; Schmitt, S.; Schmitt, R. (2013): A decision model for cost-optimized inspection planning. In: 2013 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE) & IEEE International Technology Management Conference. 2013 IEEE International Technology Management Conference & 19th ICE Conference (ITMC). The Hague, Netherlands, 24.06.2013 - 26.06.2013: IEEE, S. 1–15.
- [10] Stenkamp, Axel (2008): Automatisierte Prüfmittelauswahl in einer CAD-basierten Prozesskette der Prüfplanung. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik).
- [11] Greipel, Jonathan; Ortiz Sarceño, Daniel; Schmitt, Robert H. (2017): Adaptive Prüfplanung für Kleinserien. Automatisierbare Methodik zur Erstellung eines adaptiven Stichproben-Prüfplans für Kleinserien. In: wt-online, S. 780–785.
- [12] Mueller, Tobias; Huber, Meike; Schmitt, Robert H.: Modelling complex measurement processes for measurement uncertainty determination. In: International Journal of Quality & Reliability Management. In Review

- [13] Mueller, Tobias; Schmitt, Robert H. (2019): „Messunsicherheitsbestimmung komplexer Messprozesse mittels Machine Learning – Eine Alternative zu klassischen Verfahren“ In: QZ-Qualität und Zuverlässigkeit, Jahrgang 64. In Press
- [14] www.approve.wzl.rwth-aachen.de [Letzter Zugriff: 18.08.2019]
- [15] Intelligente Systeme zur Qualitätsvorhersage speziell für KMU, WGP-Newsletter, <https://wgp.de/de/intelligente-qualitaetsvorhersage-kmu/> [Letzter Zugriff: 21.08.2019]
- [16] DIN EN ISO 9000:2015 – Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe

Kalibrierscheine werden digital

Hoher Mehrwert durch leichte Nachnutzung aller Kalibrierdaten

Dr. rer. nat., Dipl.-Phys. Siegfried Hackel,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig



Besonders interessant für

- Grundlagen der digitalen Metrologie
- Kalibrierlaboratorien
- Qualitätsmanagement und Zertifizierung
- Industrie 4.0

Herkömmliche Kalibrierscheine können um der Vergangenheit angehören. Um nachzuweisen, dass und wie ein Messgerät kalibriert wurde, könnten die metrologischen Institute weltweit statt der analogen Versionen zukünftig „Digitale Kalibrierscheine (DK)“ verwenden. Vor allem die Maschinenlesbarkeit würde Fertigungs- und Qualitätsüberwachungsprozesse, bei denen die Digitalisierung immer stärker Einzug hält, deutlich unterstützen. Das Ziel ist es, universelle DK-Austauschformate in gesamten Bereich der Metrologie zu entwickeln.

In der industriellen Produktion lässt sich eine gute Qualität der Produkte nur gewährleisten, wenn die eingesetzten Messmittel regelmäßig kalibriert, also direkt oder indirekt auf die nationalen Normen rückgeführt werden. Dies zu ermöglichen ist eine der Kernaufgaben der nationalen Metrologieinstitute. Kalibrierscheine sind dabei ein entscheidender Bestandteil jedes metrologischen Qualitätsmanagementsystems.

Der Digitale Kalibrierschein kann nun allerdings mehr leisten als den Nachweis der metrologischen Rückführung. Da der jetzt entwickelte DK auf dem international anerkannten und bewährten Austauschformat XML (Extensible Markup Language) beruht, ist er maschinenlesbar, und alle Angaben inklusive der numerischen Kalibrierkurven können direkt und automatisiert in alle digital unterstützten Prozesse übernommen werden. Zugleich sorgen kryptografische Signaturen als Sicherungsverfahren dafür, dass der Anspruch an die Integrität und Authentizität eines Kalibrierscheines gewahrt bleibt. Die beim DK eingesetzten kryptografischen Verfahren sind bereits seit langer Zeit in anderen Bereichen bewährt, beispielsweise bei der Anwendung des Personendatengesetzes (Standesamt), in der Abfallwirtschaft oder im Beschaffungswesen der Bundesverwaltung.

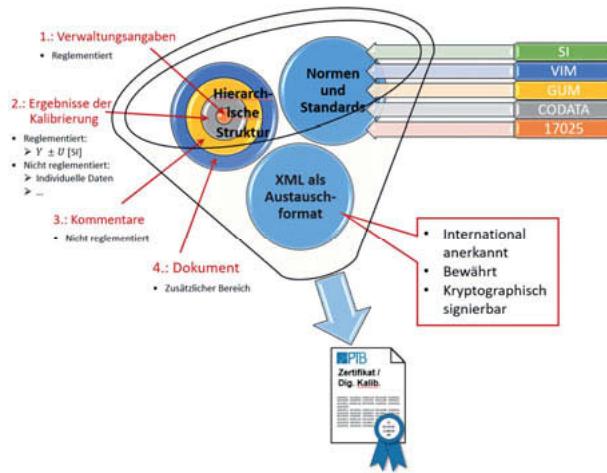
Beim Digitalen Kalibrierschein wird bereits an einer Fortentwicklung zum sogenannten Digitalen Zwilling gearbeitet, der noch weitgehende Daten und Software enthalten und somit eine Simulation des Messprozesses ermöglichen würde. Für Gewichtsstücke ist ein solcher Digitaler Zwilling bereits erfolgreich erprobt worden. Dieses „digitale Wägestück“ enthält sowohl die Informationen aus Kalibrierungen, als auch Abschätzungen zum erwarteten Verhalten des Massestücks bei bestimmten Umgebungsbedingungen.

Ansprechpartner

Siegfried Hackel
Projekt 1.01 Digitalisierung in der Abteilung „Mechanik und Akustik“
Telefon: (0531) 592-1017
siegfried.hackel@ptb.de

Frank Härtig
Abteilung 1 Mechanik und Akustik
Telefon: (0531) 592-1010
frank.haertig@ptb.de

Wissenschaftliche Veröffentlichung
Siegfried Hackel, Frank Härtig, Julia Hornig, Thomas Wiedenhöfer:
The Digital Calibration Certificate, PTB-Mitteilungen 127 (2017), Heft 4, doi: 10.7795/310.20170499



Prinzipieller Aufbau des Digitalen Kalibrierscheins (DK):

1. Die Verwaltungsdaten (reglementiert) enthalten Informationen von zentralem Interesse. Sie sind für die eindeutige Identifizierung unabdingbar. Ihre Datenfelder sind daher fest vorgegeben.
2. Der Bereich der Messergebnisse ist reglementiert, wenn es um die folgenden Angaben auf der Basis des SI geht: Bezeichner, Messwert, erweiterte Messunsicherheit, Erweiterungsfaktor, Einheit und Zeit (optional). Einheiten können zusätzlich auch außerhalb des SI dargestellt werden (z. B. Seemeilen, Millimeter Quecksilbersäule, Grad Oechsle). Unabhängig davon gelten immer die Angaben in SI.
3. Kommentare und Grafiken werden im nicht reglementierten Bereich abgespeichert. Ebenso können hier Daten in bereits etablierten (oder noch zu schaffenden) Datenaustauschformaten abgelegt werden.
4. Eine von Menschen lesbare Datei, die sich an dem analogen Kalibrierschein orientieren könnte, schließt den DK ab.

Katalogdefinitionen als Grundlage der VDI 2623 zum Datenaustausch zwischen Prüfmittelmanagementsystemen

Dipl.-Phys. **Torsten Ring**, Böhme & Weihs Systemtechnik, Wuppertal

Kurzfassung

Die Erfahrungen im Einsatz der Schnittstelle, die mit der VDI 2623 beschrieben wird, hat ergeben, dass weitere Definitionen notwendig sind, damit die Dateninhalte bestimmter Felder nicht fehlinterpretiert werden können.

Man möchte über Katalogdefinitionen erreichen, dass die „Datenreibung“ verringert wird. Unter „Datenreibung“ muss man sich den Aufwand vorstellen, der notwendig ist, um transportierte Daten korrekt interpretieren zu können. Dieses muss unabhängig von einer Sprache oder der Schreibweise geschehen.

Abstract

The experiences made when using the interface described in VDA 2623 showed that further definitions are necessary to avoid that data contents of certain fields are misinterpreted.

Via catalogue definitions, the “data friction” shall be reduced. “Data friction” describes the effort being required to correctly interpret the transported data, regardless of the language or spelling.

1. Die VDI 2623

Bei der Verpflichtung der Unternehmen, die vorhandenen Prüfmittel regelmäßig zu kalibrieren, kam der Bedarf auf, eine Vereinfachung des Datentransports zu erreichen. Auf einem Kalibrierschein sind eine Vielzahl an Daten gefordert aus den Bereichen der Prüfmittelstammdaten, der Kalibriervorschriften, Daten, die das Kalibrierlabor beschreiben, Daten zur Rückführung auf das nationale Normal, messtechnische Randbedingungen, usw.

Da ein Teil der Daten im Laufe der Verwendungszeit des Prüfmittels immer wieder verwendet werden muss, von dem bestimmte Daten konstant sind und andere einer permanenten

Änderung unterworfen sind, wurde versucht, ein System zu entwickeln, bei dem möglichst effizient die Daten erfasst und weiter gegeben werden können.

In der VDI 2623 wird beschrieben, welche Daten des Prüfmittels bei einem Kalibrierauftrag wie in eine XML-Datei verpackt werden. Hier werden die verschiedenen Bereiche eines Kalibrierauftrages beschrieben:

- Kalibrierauftrag
 - o Kaufmännischer Teil
 - Daten des Prüfmittel-Eigentümers
 - Daten des Kalibrierlabors
 - o Technischer Teil
 - Prüfmittelstammdaten
 - Kalibrierplan des Prüfmitteleigentümers
 - Kalibrierplan des Kalibrierlabors
 - Kalibrierergebnisse des Kalibrierlabors

Struktur der XML-Datei:

Tabelle 1: XML-Struktur [1]

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			
Daten des Labors			<supplier>				
				Adresse			
				Ansprechpartner			
				Akkreditierung			
Technische Daten		<technical section>					
Auftragsposition			<position>				
Stammdaten des Prüfmittels				<master data>			
					Stammdaten		
Daten des Eigentümers zur Logistik, Kalibrierplan sonstige Anweisungen				<buyer data>			
					Logistikdaten		
					Kalibrierplan		
Daten des Labors zur Logistik, Kalibrierplan, Messergebnisse, Komformität, Kalibrierschein					Anweisung fürs ext. Labor		
				<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 abbildungbar sind.



links Bild 1: XML-Tag-Struktur

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!-- XML example for VDI/VD 2623 -->
<!-- Generiert: VDI/VD4-OMA FA 3.14 IT Schleifstelle im Prüfmittelmanagement -->
<!-- Datum: 08.12.2011 -->
<!-- Version: 0.0 -->
<!-- K -->
<!-- Beschreibung / description -->
<!-- Dieses XML Beispiel representiert das Beispiel aus der Richtlinie und das -->
<!-- bestmögliches Validatex -->
<!-- VDI/VD 2623 -->
<!-- Dieses XML Beispiel represent the example of the guideline and the exsample -->
<!-- K -->
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<header>
  <header_id>5029455</header_id>
  <date>2010-03-14</date>
  <time>12:24:54</time>
  <creator>Administrator</creator>
  <version>2010-00</version>
  <creator_id>10765423</creator_id>
  <creator_name>Beispielauftrag</creator_name>
  <change>
    <user_id></user_id>
    <user_name></user_name>
  </change>
  <user_id></user_id>
  <user_name></user_name>
</header>
<calibration_procedure>
  <specification>
    <specification_id>
      <master_id></master_id>
      <sub_id></sub_id>
      <clipsper_id></clipsper_id>
    </specification_id>
    <specification_name>PP1234</specification_name>
    <description>Hessabschieber 150mm</description>
    <calibration_procedure_id>VDI/VDE/DGQ 2018 Blatt 9.1</calibration_procedure_id>
    <characteristics>
      <characteristic>
        <characteristic_id>
          <class>000</class>
          <designation>Hessabschiebung</designation>
          <specification>
            <specification_id>
              <normal_value>0</normal_value>
              <upper_value>30</upper_value>
              <lower_value>-10</lower_value>
            </specification_id>
            <unit>4H</unit>
          </specification>
          <remark>Angabe in 4H steht im Common Code für "pm"!</remark>
        </characteristic_id>
        <attribute_value>
          <attribute>
            <code>001</code>
            <designation>Umgebungstemperatur</designation>
            <value>20</value>
            <upper_value>22</upper_value>
            <lower_value>18</lower_value>
            <unit>CEL</unit>
            <remark>20 CEL steht im Common Code für Temperatur in Grad Celsius</remark>
          </attribute>
          <attribute>
            <code>002</code>
            <designation>Prüfzeit</designation>
            <value>10</value>
            <upper_value>12</upper_value>
            <lower_value>8</lower_value>
            <unit>MIN</unit>
          </attribute>
        </attribute_value>
        <characteristic>
          <characteristic_id>
            <class>001</class>
            <designation>Bemerkung zur bestellten Werkstoffkodierung</designation>
          </characteristic_id>
          <data_instructions>
            <data_instruction>
              <code>001</code>
              <instruction>Bemerkung zur bestellten Werkstoffkodierung</instruction>
            </data_instruction>
            <data_instruction>
              <code>002</code>
              <instruction>000</instruction>
            </data_instruction>
            <data_attributes>
              <data_attribute>
                <code>000</code>
                <parameter>
                  <value>PDF</value>
                </parameter>
              </data_attribute>
            </data_attributes>
          </data_instructions>
        </characteristic>
      </characteristic>
    </characteristics>
    <buyer_instructions>
      <buyer_instruction>
        <code>001</code>
        <instruction>Bemerkung zur bestellten Werkstoffkodierung</instruction>
      </buyer_instruction>
      <data_instructions>
        <data_instruction>
          <code>001</code>
          <instruction>000</instruction>
        </data_instruction>
        <data_attributes>
          <data_attribute>
            <code>000</code>
            <parameter>
              <value>PDF</value>
            </parameter>
          </data_attribute>
        </data_attributes>
      </data_instructions>
    </buyer_instructions>
  </specification>
</calibration_procedure>

```

rechts Bild 2: XML-Beispieldatei [2]

Der Umstand, dass nie zu 100% alle existierenden Prüfmittel in den Daten der Kalibrierung beschrieben werden können und dass es zukünftig vielleicht Prüfmittel geben wird, die heute noch gar nicht existieren, hat dazu geführt, dass man eine Datenstruktur verwendet, die auch für zukünftige Fälle offen ist.

Die Hauptaufgabe und das eigentliche Ziel der VDI 2623 ist es, Definitionen von Datenpaketen zur Verfügung zu stellen und die Möglichkeit zu schaffen, dass Algorithmen zu verarbeitende Daten gegen diese Definitionen der VDI 2623 validieren und korrekt weiterverarbeiten können.

2. Der digitale Kalibrierschein

Mit einer Antwort-XML-Datei eines Kalibrierlabors an den Eigentümer des Prüfmittels - nach der extern erfolgten Kalibrierung - wird prinzipiell ein digitaler Kalibrierschein als Ergebnisbeschreibung der Kalibrierung versendet. Denn alle Daten, die auf einem Kalibrierschein auf Papier gedruckt werden, sind in der Antwort-XML-Datei vorhanden.

Seit 2017 arbeiten verschiedene Personen der PTB an der Entwicklung eines digitalen Kalibrierscheins (DCC), und es fand ein reger Austausch dieser Arbeitsgruppe mit Mitgliedern des VDI/GMA Fachausschusses 3.14 IT-Vernetzung im Prüfmittelmanagement statt.

Man ist überein gekommen, dass es kontraproduktiv sei, wenn die VDI 2623 sich dem Format des DCC anpassen würde, da sowohl bei der PTB der DCC als auch in der Industrie, die VDI 2623 produktiv eingesetzt wird.

Damit es bei der VDI 2623 zu keinen Problemen kommt, hat man sich entschieden, den DCC der PTB als ein weiteres Format der Kalibrierergebnisse zuzulassen, so dass neben den Kalibrierwerten des externen Kalibrierlabors im VDI 2623 Format auch noch der DCC als XML-Daten gekapselt werden kann.

3. Warum Katalogdefinitionen?

Es ist von elementarer Bedeutung, dass der Werte- Daten-Inhalt eines XML-Tags im Automatisierungsprozess korrekt interpretiert werden kann. Die XML-Datei kann man mit diversen Hilfsmitteln und Techniken sicher transportieren, aber ob der Inhalt dieses Datenpaketes auch sicher korrekt ist, das muss gewährleistet sein.

Als Beispiel kann man sich vorstellen, dass man bei einer Krankheit eine Medizin von seinem behandelnden Arzt verschrieben bekommt. Man geht in die Apotheke, gibt dem Apotheker das Rezept, und der Apotheker weiß genau, an welchem Schrank, aus welcher Schublade und aus welchem Fach er die Medizin herausholt. Das funktioniert auch, wenn die Verpackung der Medizinschachtel nicht lesbar wäre, weil der Apothekerschrank, die Schublade und das Fach beschriftet sind.

Solch eine Beschriftung ist vergleichbar mit einer Katalogdefinition in der VDI 2623. Das ist notwendig, weil die Software, welche die Daten eines VDI 2623-XML-Files einliest, „dumm“ ist und den Inhalt nicht interpretieren kann, sondern sich auf die Korrektheit verlassen muss.

Das ist der Grund, warum im Fachausschuss solche Kataloge definiert wurden.

Als Beispiele dafür werden folgende Katalogdefinitionen aufgeführt:

- Prüfmittelgruppen
- Prüfmittel-Status
- Ergebnisse
- Service
- Property (Eigenschafts)- Katalog

4. Die Katalogdefinitionen der VDI 2623

4.1 Katalog der Prüfmittelgruppe

Die Prüfmittelgruppe ist die wichtigste Information für die Betrachtung von Prüfmittelkalibrierdaten. Anhand der Prüfmittelgruppe entscheidet sich, wie das Prüfmittel kalibriert werden muss, welche Normale dafür benutzt werden müssen, welche Kalibriervorschriften verwendet werden müssen oder ggf. wo der Ort sein wird, wo das Prüfmittel kalibriert werden kann.

Alle beteiligten Kalibrierlabore haben eine Vereinigungsmenge der Prüfmittelgruppen aller Prüfmittel erzeugt, die bisher in diesen Laboren kalibriert wurden. Diese Menge der möglichen Prüfmittelgruppen wurde noch mit den vorkommenden Prüfmittelgruppen der Firma Robert Bosch abgeglichen. Es ergab sich eine Anzahl von ca. 1500 Prüfmittelgruppen. Diese Anzahl wurde reduziert, weil es:

- unterschiedliche Bezeichnungen einer Prüfmittelgruppe,
- Produktnamen, die sich in den Sprachgebrauch als Prüfmittelgruppe etabliert hatten,
- Rechtschreibfehler bzw. Änderung der deutschen Rechtschreibung (Meß... wurde zu Mess...) gab.

Damit blieben fast 400 Prüfmittelgruppen übrig.

Dieser Katalog ist nicht vollständig, aber bildet die Vielzahl an verschiedenen Prüfmittelgruppen ab.

Für jede Prüfmittelgruppe kann man definieren, was bei einer Kalibrierung für prüfmittelgruppenspezifische Merkmale zu berücksichtigen sind. Dieses wird im Property-Katalog abgebildet.

Damit eine Prüfmittelgruppe leicht zu identifizieren ist, soll auf einen Textstring verzichtet werden und stattdessen eine Ziffernfolge mit einem definierten Format verwendet werden, womit eine Sprachenproblematik in der Lesbarkeit umgangen wird. Dieses Format baut sich wie folgt auf:

1. Ebene: Physikalische Messgröße
2. Ebene: Messaufgabe der Prüfmittels
3. Ebene: Kategorie
4. Ebene: Prüfmittelgruppe

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 3: 1. Ebene des Prüfmittelkatalogs

Beispielsweise gibt es für eine dimensionelle Messaufgabe Prüfmittel, die für unterschiedliche Messaufgaben verwendet werden können. Es gibt Prüfmittel für Länge, Winkel, Gewinde, Verzahnung, Form, Oberfläche oder eine Kombination von diesen. Deshalb gibt es für die Messaufgabe, also die 2. Ebene bei dimensionellen Prüfmitteln 7 mögliche Einträge.

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Länge
2	Winkel
3	Gewinde
4	Verzahnung
5	Form
6	Oberfläche

Bild 4: 2. Ebene für die Messaufgabe von dimensionellen Prüfmitteln

Für die anderen physikalischen Größen der 1. Ebene gibt es folgende Möglichkeiten in der Aufgabenebene:

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Kraft
2	Masse
3	Beschleunigung
4	Drehmoment
5	Druck
6	Waage
7	Geschwindigkeit
8	Härte
9	mechanische Werkstoffeigenschaften
10	Winkelgeschwindigkeit/Drehzahl
11	Viskosität
12	Durchfluss
13	Strömungsgeschwindigkeit

Bild 5: 2. Ebene für die Messaufgabe von mechanischen Prüfmitteln

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Wellenlänge
2	Lichtstärke
3	Lichtstrom
4	Strahlungsleistung
5	Brechung
6	Fluoreszenz
7	Polarisation
8	Reflexion
9	Absorption
10	optische Eigenschaften

Bild 6: 2. Ebene für die Messaufgabe von optischen Prüfmitteln

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	pH-Wert
2	elektrolytische Leitfähigkeit
3	Masseanteil von Elementen
4	Substanzanalyse
5	chemische Werkstoffeigenschaften

Bild 7: 2. Ebene für die Messaufgabe von chemischen Prüfmitteln

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Schalldruck/Schallpegel
2	Frequenz
3	Klirrfaktor
4	akustische Werkstoffeigenschaften

Bild 8: 2. Ebene für die Messaufgabe von akustischen Prüfmitteln

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Zeit
2	Frequenz

Bild 9: 2. Ebene für die Messaufgabe von „zeitlichen“ Prüfmitteln

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Kapazität
2	Stromstärke
3	Induktivitäten
4	Leistung
5	Phase
6	Widerstand
7	Spannung
8	Isolation
9	Multimeter
10	Oszilloskop
11	Dämpfung
12	elektrische/magnetische Werkstoffeigenschaften
13	Ladungsmenge

Bild 10: 2. Ebene für die Messaufgabe von elektromagnetischen Prüfmitteln

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Feuchte
2	Temperatur
3	thermische Werkstoffeigenschaften

Bild 11: 2. Ebene für die Messaufgabe von thermodynamischen Prüfmitteln

ID	Aufgabe
0	Kombination
1	Radioaktivität

Bild 12: 2. Ebene für die Messaufgabe von atomphysikalischen Prüfmitteln

Auf der Ebene der Kategorie ist bei dem Prüfmittel wichtig, ob es sich um ein Messgerät, eine Maßverkörperung oder eine Kombination mehrerer Messgeräte oder messtechnisch relevanter Baugruppen (also eine Messeinrichtung) handelt.

ID	Kategorie
1	Messgerät
2	Maßverkörperung
3	Messeinrichtung

Bild 13: 3. Ebene - die Kategorie

Auf der 4. Ebene werden die Prüfmittelgruppen nur noch aufsteigend gezählt.

A	B	C	D	E	F
	ID	1. Ebene	2. Ebene	3. Ebene	4. Ebene
1 Bezeichnung Prüfmittelgruppe					
2 Laserinterferometer	1-0-1-1	1	0	1	1
3 Kugelnormal	1-0-2-2	1	0	2	2
4 3-D Taster	1-1-1-1	1	1	1	1
5 Außenschnelltaster	1-1-1-2	1	1	1	2
6 Bügelfeinzeiger	1-1-1-3	1	1	1	3
7 Bügelmessschraube	1-1-1-4	1	1	1	4
8 Bügelmessschraube mit auswechselbarem Amboss	1-1-1-5	1	1	1	5
9 Dickenmesser	1-1-1-6	1	1	1	6
10 Einbaumessschraube	1-1-1-7	1	1	1	7
11 Feinzeiger	1-1-1-8	1	1	1	8
12 Feinzeigermessschraube	1-1-1-9	1	1	1	9
13 Fühlhebelmessgerät	1-1-1-10	1	1	1	10
14 Höhenmessgerät	1-1-1-11	1	1	1	11
15 Höhenmessschraube	1-1-1-12	1	1	1	12
16 Höhenreißer	1-1-1-13	1	1	1	13
17 Induktiver Messtaster	1-1-1-14	1	1	1	14
18 Innenmessgerät	1-1-1-15	1	1	1	15
19 Innenmessschraube	1-1-1-16	1	1	1	16
20 Innenmessschraube mit 3-Linien-Berührung	1-1-1-17	1	1	1	17
21 Innenschneidtaster	1-1-1-18	1	1	1	18
22 Kantentaster	1-1-1-19	1	1	1	19
23 Längenmessbank	1-1-1-20	1	1	1	20
24 Laserentfernungsmessgerät	1-1-1-21	1	1	1	21
25 Werkzeugmessmikroskop	1-1-1-22	1	1	1	22
26 Messlupe	1-1-1-23	1	1	1	23
27 Messmikroskop	1-1-1-24	1	1	1	24
28 Messrad	1-1-1-25	1	1	1	25
29 Messschieber	1-1-1-26	1	1	1	26
30 Messtaster	1-1-1-27	1	1	1	27
31 Messuhr	1-1-1-28	1	1	1	28
32 Mikroskop	1-1-1-29	1	1	1	29
33 Optischer Gratmesser	1-1-1-30	1	1	1	30
34 Profilprojektor	1-1-1-31	1	1	1	31
35 Rauheitsmessgerät	1-1-1-32	1	1	1	32
36 Schichtdickenmessgerät	1-1-1-33	1	1	1	33
37 Seilzug Wegaufnehmer	1-1-1-34	1	1	1	34
38 Tiefenmessbrücke mit Messeinsätzen	1-1-1-35	1	1	1	35
39 Tiefenmessschieber	1-1-1-36	1	1	1	36
40 Tiefenmessschraube	1-1-1-37	1	1	1	37
41 Ultraschallentfernungsmessgerät	1-1-1-38	1	1	1	38
42 Wegaufnehmer	1-1-1-39	1	1	1	39
43 Zahnweitenfeinzeigermessschraube	1-1-1-40	1	1	1	40
44 Ausschusslehrdom	1-1-2-1	1	1	2	1
45 Ausschusslehrung	1-1-2-2	1	1	2	2
46 Ausschussrachenlehre	1-1-2-3	1	1	2	3

Bild 14: Prüfmittelgruppenkatalog mit eindeutiger ID

Diese ID soll als eindeutige Nummer für die Prüfmittelgruppe verwendet werden, da eine 1-1-1-26 genau die Prüfmittelgruppe eines Messschiebers definiert.

Dieses kann ein Algorithmus nicht fehlinterpretieren.

4.2 Katalog des Prüfmittel-Status

Folgende unterschiedliche Status kann ein Prüfmittel nach einer Kalibrierung haben.

Nr. / No.	Status
000	Keine Entscheidung bzw. durch Kunden
001	Einsatzfähig
002	Nicht einsatzfähig
003	Bedingt einsatzfähig (Einsatzgrenzen müssen angegeben werden)
004	Defekt
005	Verschrottet
006	Einsatzfähig mit Bemerkung

Bild 15: Prüfmittel-Status-Katalog

Diese sechs verschiedenen Status beschreiben die weitere Verwendung eines Prüfmittels beim Eigentümer.

4.3 Katalog der Konformität

Nr. / No.	Konformität (bezogen auf das Prüfmittel)
000	Keine Entscheidung bzw. durch Kunden
001	IO - Innerhalb der Spezifikation
002	NIO - Außerhalb der Spezifikation
003	Innerhalb der Spezifikation aber im Messunsicherheitsbereich
004	Außerhalb der Spezifikation aber im Messunsicherheitsbereich
005	Bedingt einsetzbar (z.B. bei Teilkalibrierungen)

Bild 16: Konformitätskatalog

Diese verschiedenen Konformitätsaussagen sind möglich. Hier sind die Unterscheidungen möglich, dass es gegebenfalls vorkommt, dass unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der wahre Messwert außerhalb des Toleranzfeldes liegt oder dass der Messwert außerhalb der Toleranz liegt, aber mit Berücksichtigung der Messunsicherheit noch innerhalb der Toleranz liegen könnte.

4.4 Katalog des Services

Welche Dienstleistung möchte der Prüfmitteleigentümer vom Kalibrierlabor in Anspruch nehmen. Reicht eine Werkskalibrierung oder wird eine DAkkS-Kalibrierung gefordert. Ebenso sind Daten für eine Erstkalibrierung möglich oder nur eine Justage, oder es handelt sich um eine Reparatur.

Nr. / No.	Service
000	Datenaustausch
001	Werkskalibrierung
002	Akkreditierte Kalibrierung
003	Erstkalibrierung
004	Justage
005	Reparatur
006	Überwachungsprüfung
007	Eichung

Bild 17: Service-Katalog

4.5 Katalog der Eigenschaften, Property-Katalog

Im Fachausschuss wurden für die einzelnen Prüfmittelgruppen die notwendigen Informationen bei einer Kalibrierung besprochen. Jede Prüfmittelgruppe hat ggf. andere notwendige Kriterien, die erfüllt werden müssen. All diese Eigenschaften wurden sukzessive im Property-Katalog zusammengetragen.

Dabei wurde einfach die Nummer der Eigenschaft hochgezählt. Es ergab sich, dass auch hier auf einer Ebene tiefer die Eigenschaften abgebildet werden müssen. Beispielsweise muss beim Werkstoff 006 unterschieden werden zwischen Stahl, Keramik, Hartmetall oder Hartgestein. Bei den Eigenschaften der Bauform kommen noch zwei Ebenen dazu, da es gerade bei Bügelmessschrauben eine Vielzahl an speziellen Bauformen gibt.

Der Property-Katalog ist mit jeder weiteren auftretenden Prüfmittelgruppe, die noch nicht im Prüfmittelgruppenkatalog erfasst ist, entsprechend zu erweitern. Deshalb ist es gerade hier wichtig, eine offene Struktur der Datenhaltung gewählt zu haben.

Tabelle 2: Bisher identifizierte und definierte Inhalte des Property-Katalogs

Nr. / No.	Eigenschaft-ID
000	Nicht definiert
001	Messbereichsanfang
002	Messbereichsende
003	Auflösung
004	Stellenanzahl
005	Genauigkeitsklasse / Güteklaasse
006	Werkstoff
006.1	Stahl
006.2	Keramik
006.3	Hartmetall
006.4	Hartgestein
007	Masse
008	Länge
009	Höhe
010	Breite
011	Bauform
011.1	Aufrollkapsel
011.2	Aufrollrahmen
011.2.1	Bügelmessschraube
011.2.2	Zahnweitenmessschraube
011.2.3	Gewindemessschraube
011.2.4	Bügelmessschraube mit prismat. Messflächen
011.2.5	Wanddickenmessschraube
011.2.6	Bügelmessschraube mit sphärischen Messflächen (Form D1)
011.2.7	Bügelmessschraube mit kleinem Bügel (Form D2)
011.2.8	Messschraube mit kleinen Messflächen f. Einstiche, Nuten (Form D3)
011.2.9	Bügelmessschraube mit schmalen Messflächen (Form D4)
011.2.10	Bügelmessschraube mit beidseitig großen Messflächen (Form D6)
011.2.11	Bügelmessschraube mit Aufnahme f. Messuhr oder Feinzeiger (Form D14)
011.3.1	2-Punkt Innenmessschraube
011.3.2	3-Linien Innenmessschraube
011.3.3	Innenmessschraube mit Messschnäbeln (2 Linien)
011.3.4	2-Punkt Innenmessschraube mit Verlängerungen
011.3.5	3-Linien Innenmessschraube mit ausw. Messstücken od. Messköpfen
011.4.1	Tiefenmessschraube
011.4.2	Tiefenmessschraube mit auswechs. Messeinsätzen
011.4.3	Tiefenmessschraube mit Verlängerungen
011.5.1	Innen-, Außen-, Tiefenmaße (Schraube) - Form 1A
011.5.2	Innen-, Außen-, Tiefenmaße (Klemme) - Form 2A
011.5.3	2xAußenmaße, 1xInnenmaß, Tiefenmaß
011.5.4	2xAußenmaße, 1xInnen mit ger. Messfl. - Form B
011.5.5	2xInnen-, 1xAußenmaße - Form D
011.5.6	1xInnen-, 1xAußenmaße - Form E

Nr. / No.	Eigenschaft-ID
011.5.7	nur Innenmaße
011.5.8	nur Außenmaße
011.5.9	Tiefenmaße - Form C
011.5.10	Tiefenmessschieber mit Haken
011.5.11	Tiefenmessschieber mit 2. Skala
011.6.1	Anschlagwinkel
011.6.2	Flachwinkel
011.6.3	Haarwinkel
011.7.1	Innendurchmesser
011.7.2	Außendurchmesser
011.7.3	Umfang (Innenmessung)
011.7.4	Umfang (Außenmessung)
011.8.1	ohne Zeigeranschlag
011.8.2	Zeigeranschlag Nullpunkt
011.8.3	Endwertbegrenzung Endpunkt
011.8.4	Zeigeranschlag Nullpunkt und Endwertbegrenzung
011.9.1	mit Drehstabschaft
011.9.2	mit Biegestabhebel
011.9.3	mit Skale oder Messuhr
011.9.4	mit elektronischer Messung
011.9.5	verstellbar ohne Skale
011.9.6	verstellbar mit Skale
011.9.7	fest eingestellt
012	Passung
013	Option
014	Softwarename & entsprechende Version
015	Aufstellort
016	Anzeigeart
016.1	Ziffernanzeige
016.2	Skalenanzeige
016.3	Strichskala mit Nonius
016.4	Strich- und Rundskala
017	Nennwert / Nennbezeichnung
018	Teilung
019	Signalart
019.1	1 Vss
019.2	11 µAss
019.3	TTL
019.4	mV/V
020	Abmaß
021	Aufmaß
022	Mittenmaßabweichung
023	Faktor
024	Offset
025	Adaption
025.1	4-Kant

Nr. / No.	Eigenschaft-ID
025.2	Rundwelle
025.3	Hohlwelle
026	Anwendungsbereich bei Härteprüfgeräten:
026.1	Shore A
026.2	Shore C
026.3	Shore D
026.4	Brinell
026.5	Vickers
026.6	Rockwell
026.7	Knoop
027	Prinzip bei Drehmoment:
027.1	anzeigend
027.2	auslösend
028	Funktionsrichtung bei Drehmoment
028.1	rechts (cw)
028.2	links (ccw)
028.3	beide Richtungen (cw, ccw)
029	Arten von Strom oder Spannung
029.1	Gleich-Spannung/-Strom
029.2	Wechsel-Spannung/-Strom
030	Koordinatensystem
030.1	1-Dimensional (kartesisch)
030.2	2-Dimensional (kartesisch)
030.3	3-Dimensional (kartesisch)
030.4	Polarkoordinaten
030.5	Zylinderkoordinaten
030.6	Kugelkoordinaten

5. Sicherheit des Dateninhalts

Mit dem Wort „Sicherheit“ ist nicht der sichere Transport der Daten in Form einer XML-Datei vom Prüfmitteleigentümer zum Kalibrierlabor und wieder zurück gemeint (dieses leisten Spezialisten der Sicherheits-IT und der Kryptographie). Die Sicherheit des Dateninhalts muss gewährleistet sein.

Ein Algorithmus, der in einer Software wie einem CAQ-Prüfmittelmanagementsystem arbeitet, kann nicht die Logik und Intelligenz besitzen, den Dateninhalt des XML-Tags der Prüfmittelegruppe zu interpretieren, denn das würde nicht funktionieren. Der Inhalt muss korrekt beschrieben sein in einer „Sprache“, die jeder Algorithmus heute und in der Zukunft verstehen kann.

Das ist das Ziel der Katalogdefinitionen und der Definitionen eines Übergabeformates wie das der VDI 2623 oder der DCC der PTB.

Eine Herausforderung für die Zukunft wird es daher sein, ein Gremium zu schaffen, welches in der Lage sein muss, schnell zu entscheiden, ob etwas in einen Katalog aufgenommen werden muss oder ein anderer vorhandener Katalogdatensatz verwendet werden soll.

Diese Definitionen müssen öffentlich zugänglich sein, damit Algorithmen die zu behandelnden Daten validieren können.

Diese Institution muss das Vertrauen der Anwender besitzen und über die Fähigkeit oder entsprechende Ressourcen besitzen, sich die notwendigen Fähigkeiten zu beschaffen.

Dieses sollte eine Organisation sein, die unabhängig ist und die mit der zu erwartenden Vielfalt und einer Sichtweise mit der „metrologischen Brille“ zureckkommt.

6. Wichtige MUSS-Felder

Es gibt MUSS-Felder oder Informationen von einem Prüfmittel, die für unterschiedliche Parteien bei einer Kalibrierung notwendig sind, ohne deren Kenntnis man seine Aufgaben nicht erfüllen kann.

Die unterschiedlichen Parteien und die jeweils zugeordneten MUSS-Informationen sind:

- Softwaresysteme, Eigentümer und externes Kalibrierlabor,
 - o Prüfmittel-ID-Nummer
 - o Prüfmittelgruppe
- Personen, die das Prüfmittel einsetzen,
 - o Prüfmittel-ID-Nummer
 - o Bezeichnung
 - o Bauform und Art
 - o Messbereich
 - o Letztes Kalibrierdatum
 - o Nächstes Kalibrierdatum
- Person, die das Prüfmittel für eine Messaufgabe bestimmt,
 - o Eignung des Prüfmittels für die Messaufgabe
 - o Prüfmittelgruppe
- Person, die das Prüfmittel administriert,
 - o Aufenthaltsort des Prüfmittels
 - o Wer hat das Prüfmittel

- Welcher Fertigungsartikel mit welchem Merkmal wird mit dem Prüfmittel überwacht
- Hersteller
- Eigenschaften
- Status
- Zustand
- Letztes Kalibrierdatum
- Nächstes Kalibrierdatum
- Zähler der Ausgabe des Prüfmittels
- Zähler der Anwendungen des Prüfmittels
- Kalibrierlabor,
 - Prüfmittelgruppe
 - Messbereiche
 - Genauigkeiten oder Klassen
 - Kalibriervorschriften
 - Richtlinien
 - Normen
 - Normale
 - Messunsicherheiten
 - Einflussgrößen
- Die Schnittstelle beschrieben durch die VDI2623, damit ein Austausch der Daten über Systemgrenzen hinweg funktionieren kann.
 - Version des Formates
 - Validierungsmöglichkeiten der Datensätze

Diese Auflistung ist nicht vollständig, soll aber eine Beschreibung darstellen, welche Vielzahl an Informationen definiert sein müssen, um einen reibungslosen Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen zu ermöglichen.

7. Fazit

Die Problematik bei den Definitionen der Datenfelder in der VDI 2623 ist in der Zeit des Umbruchs zur Digitalisierung kein Einzelfall.

Wenn man sich die Aufgabenstellung bei den Themen der Digitalisierung und der Objekte unter dem Schlagwort Industrie 4.0 anschaut, erkennt man, dass die Problematik des Daten-

austausches nur von Kalibrierdaten über verschiedene Softwaresysteme hinweg, sich sehr ähnelt.

Beispiel: Der Kunde stellt am Konfigurator im Internet sein neues Auto zusammen. Alle zu produzierenden Teile und Montagevorgänge erhalten die notwendigen und kundenspezifischen Angaben. Diese Daten steuern die Fertigungsmaschinen, damit der Kunde sein gewünschtes Auto erhält.

Ein analoger Prozess geschieht, wenn man Prüfmittel kalibrieren möchte.

Das Prüfmittel sagt den „Parteien“, was zu tun ist, denn alle notwendigen Daten sind dafür beim Prüfmittel vorhanden. Die Prüfmittelgruppe legt fest, wie zu kalibrieren ist.

Mit einer Definition, welcher Dateninhalt in welcher „Datenschublade“ liegt, ist ein Format definiert, dass jede „Partei“ interpretieren und für sich nutzen kann.

Damit ist es möglich, eine Art Blackbox zu entwickeln, die den Lebenslauf eines Prüfmittels mitloggt, ähnlich wie eine Blackbox im Flugzeug.

Die Möglichkeit, dass jeder die Prüfmitteldaten interpretieren kann, biete meiner Einschätzung nach ein sehr großes Entwicklungspotenzial, für die weitere Optimierung von Entscheidungen, die auf Grundlage von metrologischen Ereignissen getroffen werden können.

- [1] T. Ring: Datenaustausch mit dem Kalibrierlabor – Neues zur VDI 2623, in VDI-Berichte 2319 zur 3. Fachtagung Prüfprozesse in der industriellen Praxis, November 2017 in Erfurt
- [2] VDI 2623 – Februar 2012

Aktualisierte Entscheidungsregeln der Konformitätsbewertung aufgrund der neuen DIN EN ISO 17025:2018

Dipl.-Betriebswirt **Arnt König**,
Testo Industrial Services GmbH, Kirchzarten

Kurzfassung

„Ist mein Gerät noch in Ordnung oder nicht?“ Eine Antwort auf diese Frage erwarten Anwender, wenn sie ihre Mess- und Prüfmittel zu einem akkreditierten Kalibrierlabor senden. Nach der Kalibrierung werden die messtechnisch ermittelten Eigenschaften der Messgeräte im Rahmen der Konformitätsbewertung mit zuvor festgelegten zulässigen Abweichungen verglichen. Dabei wird festgestellt, ob das Messmittel erwartungsgemäß funktioniert. Ob das Messgerät innerhalb oder außerhalb der zulässigen Abweichung liegt, erscheint auf den ersten Blick einfach zu beantworten. In der Praxis stellen sich für das Kalibrierlabor und den Dienstleister folgende Fragen: Wie gut ist die Konformitätsbewertung und hilft sie dem Kunden wirklich weiter? Was ist das Risiko, dass eine Konformitätserklärung falsch ist? Inwieweit kann der Kunde der getroffenen Entscheidung vertrauen? Die neue DIN EN ISO/IEC 17025:2018 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien unterstützt diesen Vorgang durch die Einführung der Entscheidungsregel. Diese Regel „[...]beschreibt, wie die Messunsicherheit berücksichtigt wird, wenn Aussagen zur Konformität mit einer festgelegten Anforderung getätigt werden“ [1].

1. Grundlagen Konformitätsbewertung

Zunächst wird der Referent in die Thematik der Entscheidungsregel einführen. Hierzu gehört beispielsweise zu klären, anhand welcher Kriterien eine Aussage getroffen werden kann, ob ein Prüfmittel bei der Kalibrierung in Ordnung oder nicht in Ordnung ist.

Unter anderem wird hierzu der zentrale Parameter der Messunsicherheit adressiert. Messungen liefern keine absolut genauen Werte, da sie stets Unzulänglichkeiten und Unvollkommenheiten unterliegen, die nicht genau quantifiziert werden können. So ist das Ergebnis einer Messgröße von dem angewandten Messverfahren, den Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Umgebungsdruck, der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Messtechnik (Offset, Drift) und der Kompetenz des Kalibriertechnikers abhängig [2]. Die Messunsicherheit ist der Zweifel, der über das Ergebnis einer jeden Messung besteht.

2. Möglichkeiten der Konformitätsaussagen

Folgend zur Definition und Klärung der Messunsicherheit, wird die Konformitätsbewertung und die dazu bezugnehmenden Normen und Richtlinien erörtert.

Da jede Messung mit einer Messunsicherheit behaftet ist, wird auch die darauf beruhende Konformitätsbewertung per se unsicher. Entscheidungsregeln definieren die Kriterien, wie die Messunsicherheit bei der Konformitätsbewertung zu berücksichtigen ist.

Im Grunde stellen Entscheidungsregeln bei Konformitätsaussagen für akkreditierte Kalibrierlaboratorien kein Novum dar. Bereits vor der Veröffentlichung der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 wurde die Konformität auf Basis von Vorschriften und Normen ausgestellt. Der Referent wird daher auf die verschiedenen Möglichkeiten der Konformitätsaussagen eingehen:

- Konformitätsaussage nach 14253-1:2016
- Konformitätsaussage nach ILAC G9 8-2009
- Konformitätsaussage nach DAkkS-DKD-5
- Konformitätsaussage nach individueller Kundenanforderung

3. Best Practise: Entscheidungsregeln bei Testo Industrial Services

Kalibrierlabore müssen ihre Akkreditierung bis Ende November 2020 auf die revidierte DIN EN ISO/IEC 17025:2018 umstellen. Nicht umgestellte Akkreditierungen verlieren daraufhin ihre Anerkennung. Die Testo Industrial Services GmbH hat bereits Anfang 2019 den Antrag zur Umstellung bei der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) eingereicht. Im Zuge der Umstellung hat die Testo Industrial Services neue Entscheidungsregeln definiert, die den Prüfmittelbesitzer aktiv zur Wahl angeboten werden. Wünscht ein Auftraggeber eine Konformitätsbewertung zu seiner Kalibrierung, so stehen ihm zukünftig zwei binäre Entscheidungsregeln zur Wahl.

Der Referent stellt in Form eines best-practise-Beispiels die individuellen Entscheidungsregeln der Testo Industrial Services GmbH vor. Dabei wird geklärt: Was sind die Beweggründe für die Wahl von binären Entscheidungsregeln bei Testo? Wie reagiert aktuell der Kalibriermarkt auf die revidierte DIN EN ISO/IEC 17025:2018?

Literaturbasis

- [1] DIN ISO/IEC 17025:2018, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien.
- [2] S. Bell, „A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement,“ in Measurement Good Practice Guide, 1999.
- B. Pesch, Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM, Nordersted, 2003.
- JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data- Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- DIN ISO/IEC 17000:2005, Konformitätsbewertung - Begriffe und allgemeine Grundlagen.
- DIN ISO/IEC 17025:2005, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien.
- Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen.
- DAkkS-DKD-5 Anleitung zum Erstellen eines Kalibrierscheines, 2010.
- ILAC-G8:03/2009 Guidelines on the Reporting of Compliance with Specification.

Kontinuierliche Eignungsnachweise für KMGs

Mittels einer Predictive Analytics Plattform

Dr.-Ing. **Edgar Dietrich**, IconPro GmbH, Aachen

Kurzfassung

Für alle Messprozesse, die in der industriellen Produktion oder Fertigung eingesetzt werden, muss die Eignung für den jeweiligen Anwendungsfall nachgewiesen werden. Dies ist in der Regel eine temporäre Untersuchung, die nichts über die Messbeständigkeit (Stabilität) des Messprozesses über einen längeren Zeitraum aussagt. Um sicher zu stellen, dass die Messbeständigkeit gegeben ist, müssen geeignete Verfahren zur kontinuierlichen Überwachung des Messprozesses eingeführt werden. Nur so kann gewährleistet werden, dass die mit dem Messprozess erfassten Messwerte valide sind.

In dem folgenden Beitrag werden zunächst die Anforderungen und anschließend Vorgehensweisen bzw. Verfahren beschrieben, mit denen die Messbeständigkeit beobachtet und Voraussagen getroffen werden können, ab wann signifikante Abweichungen von der einmal bestätigten Eignung zu erwarten sind. Weiter wird aufgezeigt, wie mittels dieser Verfahren ein Betreibermodell für Anwender von Messprozessen und KMGs entwickelt werden kann.

Abstract

For all measuring processes used in industrial production or manufacturing, the suitability for the respective application must be proven. As a rule, this is a temporary examination which does not say anything about the stability of the measuring process over a longer period of time. In order to ensure that the measuring stability is given, suitable procedures for continuous monitoring of the measuring process must be introduced. This is the only way to ensure that the measured values recorded with the measuring process are valid.

The following article first describes the requirements and then the procedures with which the measurement stability can be observed and predictions made as to when significant deviations from the once confirmed suitability are to be expected. Furthermore, it is shown how an on operation model can be developed for the end-user of measurement processes and CMMs.

1. Einleitung

Die vorrausschauende Wartung birgt nicht nur für Maschinen und Einrichtungen, sondern auch für Messprozesse aller Art großes Einsparungspotenzial. Durch die Dynamisierung von Wartungs- bzw. Kalibrierintervallen werden insbesondere bei Koordinaten-Messgeräten durch rechtzeitiges Eingreifen unnötige Stillstands Zeiten und die damit verbundenen Kosten vermieden. Auch können dadurch solche Maßnahmen besser geplant werden.

Koordinaten-Messgeräte werden in der Regel ohne Rücksicht auf deren Nutzungsgrad einmal jährlich gewartet und neu kalibriert. Durch mehr Wissen über das Verhalten des Messgerätes können diese Intervalle dynamisiert werden:

- So kann es erforderlich sein, dass bei einer hohen Auslastung oder aufgrund von Abnutzungen oder Beschädigungen das Gerät früher als im jährlichen Rhythmus gewartet und kalibriert werden muss. Dies erhöht zwar die Kosten, die aber den Ausfallzeiten und den damit verbundenen Unannehmlichkeiten (z.B. Stillstands Zeiten, falsche gemessene Teile usw.) gegenzurechnen sind.
- Andererseits werden die Geräte zu oft gewartet und neu kalibriert, obwohl dies nicht erforderlich wäre, so dass sich Wartungs- und Kalibrierkosten sparen lassen.

Um das zu erreichen, muss das Verhalten von Messprozessen mit geeigneten Verfahren beobachtet werden. Mit diesen Erkenntnissen können die Prüf- bzw. Kalibrierintervalle variabel gestaltet werden, ohne an Sicherheit bzgl. der Messbeständigkeit zu verlieren bzw. diese sogar noch zu erhöhen (s. Folie 1). Dadurch werden Servicetermine besser planbar und die erforderlichen Ersatzteile können vorbereitet werden.

Dessen ungeachtet sind an neu zu vermessenden Teilen immer Eignungsnachweise durchzuführen, um sicher zu stellen, dass das Messgerät prinzipiell in der Lage ist, diese Messaufgabe zu erfüllen. Diese Nachweise sind basierend auf gültigen Normen, Leitfäden und Richtlinien (siehe [1], [5], [12] oder [13]) zu erstellen. Die so gewonnenen Ergebnisse werden ebenfalls für die hier beschriebene Aufgabenstellung herangezogen.

2. Anforderungen an Messprozesse

Prinzipiell sollte es im Interesse aller sein, die kontinuierliche Eignung der in der industriellen Produktion eingesetzten Messprozesse nachzuweisen. Nur so kann sichergestellt werden, dass die damit erfassten Messwerte von Qualitätsmerkmalen und Prozessparametern valide sind und damit die Realität ausreichend sicher widerspiegeln. Dies gilt für alle Hersteller von Produkten entlang einer Lieferkette. Gemäß dem Internationalen Wörterbuch der Metrologie

[10] versteht man unter der Stabilität eines Messprozesses, dass seine messtechnischen Eigenschaften über die Zeit konstant bleiben bzw. sich nicht signifikant ändern. Dabei kann die Stabilität auf verschiedene Weise quantifiziert werden. So dürfen sich, bezogen auf eine Zeitspanne bzw. ein Intervall, die messtechnische Eigenschaft des Messprozesses nur um einen bestimmten vorher festgelegten Betrag ändern.

Um sicherzustellen, dass diese Anforderung in der Praxis auch umgesetzt wird, sind in mehreren Standards und Richtlinien Vorgaben beschrieben, deren Einhaltung in Audits überwacht werden.

2.1 Anforderungen gemäß ISO 9001

So verweist die DIN EN ISO 9001 [3] auf die DIN EN ISO 10012 [4] „Messmanagementsysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel“, in der alle wesentlichen Vorgaben zum Betrieb eines Prüfmittelüberwachungssystems beschrieben sind. Darin muss festgelegt sein, wie die Messprozesse gelenkt und verwaltet werden. Weiter müssen alle verwendeten Messmittel bestätigt und verifiziert sein. Bezüglich der Intervalle für die Bestätigung muss sichergestellt sein, dass die fortgesetzte Übereinstimmung mit den festgelegten metrologischen Anforderungen gegeben ist. Dazu muss die Messunsicherheit von jedem im Messmanagementsystem verwalteten Messprozess nachgewiesen werden (s. Abschnitt 2.3). Weitere relevante Merkmale sind neben der Stabilität, der Höchstwert der Messabweichungen, die Wiederholbarkeit, die Vergleichspräzision auch die Qualifikation der Bediener.

2.2 Anforderungen gemäß IATF 16949

Die in der Automobilindustrie angewandte IATF 16949 [8] (s. Folie 2) fordert für alle im Produktionslenkungsplan festgelegten Arten von Prüfungen, Messungen und für alle darin aufgeführten Prüf- und Messsysteme, dass deren Eignung verifiziert wird. Entsprechende Analysen zur Bewertung der Streuung der Prüf- und Messergebnisse sind festzulegen. Die dabei angewendeten Verfahren und Annahmekriterien müssen denen in Referenzhandbüchern und Standards beschriebenen Vorgehensweisen entsprechen. Dabei wird auf die MSA (Measurement Systems Analysis) [1], VDA Band 5 Prüfprozesseignung [13] bzw. die Norm ISO 22514 Teil 7 (Statistische Verfahren im Prozessmanagement- Fähigkeit und Leistung – Teil 7: Fähigkeit von Messprozessen) [5] verwiesen.

Andere analytische Methoden und Annahmekriterien dürfen mit Genehmigung des Kunden angewendet werden.

2.3 Eignungsnachweise

In der DIN EN ISO 14253 ist festgelegt, dass für alle Geometrischen Produktspezifikationen (GPS) die Messunsicherheiten der jeweiligen Messprozesse zu bestimmen sind. So kann der Nachweis der Konformität oder Nichtkonformität einer Spezifikation überprüft werden. Dies gilt sowohl für Messprozesse beim Lieferanten als auch beim Abnehmer (Kunde). Diese Forderung kann auch auf andere physikalische Größen übertragen werden.

Für die Bestimmung der Messunsicherheit ist der GUM (Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen) [9] die etablierte Referenz. Die Umsetzung der darin beschriebenen Vorgehensweise hat sich in der Praxis als sehr schwierig herausgestellt. Daher erfolgt die Beurteilung der Fähigkeit eines Messprozesses in der Regel anhand des %GRR-Wert (Gauge Repeatability & Reproducibility), dessen Herleitung in der MSA [1] bzw. in Firmenrichtlinien [12] beschrieben ist. Alternativ dazu kann die Eignung basierend auf dem %QMS (Measurement System) bzw. dem %QMP (Measurement Process) Wert nachgewiesen werden. Die Vorgehensweise zur Bestimmung dieser Werte sind in [13] und [5] erläutert (s. Folie 3).

Die jeweils einzuhaltenden Grenzwerte sind den genannten Dokumenten zu entnehmen. Zur Bewertung dieser unterschiedlichen Verfahren sei auf [2] Eignungsnachweise für Prüfprozesse verwiesen.

2.4 Messbeständigkeit

Die in 2.3 beschriebenen Verfahren und Vorgehensweisen kommen alle nur temporär zum Tragen. Damit wird bestätigt, dass der Messprozess prinzipiell für den jeweiligen Einsatzfall verwendet werden kann. Es fehlt aber der Nachweis, dass die einmal gegebene Fähigkeit bzw. Eignung über den Zeitraum, in dem der Messprozess eingesetzt wird, weiterhin gegeben ist. Würde sich der Messprozess - aus welchen Gründen auch immer - verändern, können die damit ermittelten Messwerte nicht mehr als valide angesehen werden. Dies kann insbesondere in der Massenproduktion zu erheblichen Folgekosten führen. Die Gründe für solche Veränderungen sind vielschichtig: Verschleiß, sich ändernde Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Luftzüge, Sonneneinstrahlung, Vibrationen, Elektrosmog usw.), aber auch unbemerkte Beschädigungen aufgrund von Bedienfehlern wie Kollisionen und dergleichen mehr. Um signifikante Veränderungen eines Messprozesses möglichst zeitnah zu erkennen, müsste dieser in regelmäßigen Abständen erneut bewertet werden. Da die in 2.3 beschriebenen Verfahren für häufige Überprüfungen zu aufwendig sind, wird für die Stabilitätsüberwachung in der Regel nur ein Referenzteil (Normal bzw. kalibriertes Werkstück; s. Folie 4) verwendet. Dies wird ein oder mehrfach hintereinander gemessen und die Messwerte dokumentiert. Es wird

bewertet, ob die Messwerte beziehungsweise die in 2.3 beschrieben Kennwerte sich innerhalb vorgegebenen Grenzen bewegen. Ist das gegeben, kann der Messprozess als stabil angesehen werden. Da diese Untersuchungen zeitaufwendig sind und damit Kosten verursachen, sollten diese so selten wie möglich durchgeführt werden.

Wie häufig sind aber solche Messungen durchzuführen, ohne das Risiko zu erhöhen, dass Stabilitätsverletzungen über einen längeren Zeitraum nicht erkannt werden? Ein Bewertungskriterium können die Kennwerte %GRR, %QMS, %QMP oder die Messunsicherheit U selbst sein. Sind diese Werte klein, kann in der Regel auch eine hohe Stabilität des Messprozesses erwartet werden. In dem Fall sollte der Messprozess mindestens zu Schichtanfang und am Schichtende überwacht werden. Die Ergebnisse werden dokumentiert und mit den zurückliegenden Ergebnissen verglichen. Bewegen sich diese Werte innerhalb von vorgegebenen Grenzen, kann davon ausgegangen werden, dass der Messprozess in dem Zeitintervall zwischen den Prüfungen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit stabil war und damit valide Messwerte lieferte.

Sind die Kennwerte %GRR, %QMS, %QMP hoch und die Messunsicherheit groß, kann es im Extremfall dazu führen, dass der Messprozess vor jeder Messung neu zu kalibrieren ist.

2.5 Verfahren zur Überwachung der Messbeständigkeit bei Koordinaten-Messgeräten

Zur kontinuierlichen Überwachung der Messbeständigkeit haben sich folgende Verfahren als sinnvoll herauskristallisiert:

- Automatisierte Stabilitätsüberwachung mittels Normale (s. Abschnitt 3)
- Überwachung von internen Parametern (s. Abschnitt 4)
- Überwachung über externe Sensoren (s. Abschnitt 5)

Diese unterschiedlichen Verfahren sind im Folgenden kurz erläutert.

3. Automatisierte Stabilitätsüberwachung bei Koordinaten-Messgeräten

Insbesondere Koordinaten-Messgeräte (KMG) werden in der Regel einmal jährlich von einem Dienstleister – meistens der Hersteller des Gerätes – gewartet und neu kalibriert (s. Folie 5). Dies sind aufwendige und kostenintensive Tätigkeiten. Daher stellt sich die Frage inwieweit diese Tätigkeiten dynamisiert werden können, um kosteneffizienter zu sein. Falls anhand der oben beschriebenen Vorgehensweise signifikante Veränderungen an dem Gerät während des Einsatzes unterjährig erkannt werden, muss das Wartungsintervall verkürzt bzw. die erneute Kalibrierung zeitnahe vorgenommen werden. Andererseits kann das Wartungsintervall verlängert werden, falls keine signifikanten Veränderungen beobachtet werden.

Bei KMGs werden zur Überprüfung standardisierte Prüfkörper verwendet, die am Markt erworben werden können. Diese sind mit einem Kalibrierprotokoll versehen. Auch kann die erforderliche Messsoftware für das jeweilige KMG mitgeliefert werden. Ansonsten ist das jeweilige Messprogramm zu erstellen. Dies ist auf jeden Fall erforderlich, wenn anstatt eines Prüfkörpers ein eigens präpariertes und kalibriertes Werkstück verwendet werden soll. An diesen Prüfkörpern bzw. dem kalibrierten Werkstück, werden wie oben beschrieben in regelmäßigen Abständen Wiederholungsmessungen durchgeführt (s. Folie 6).

Um diese Ergebnisse schnell auswerten zu können, empfiehlt es sich diese Daten im AQDEF-Format (Advanced Quality Data Exchange Format) [11] abzulegen bzw. in die interne oder externe Cloud zu übertragen (Folie 7). Das AQDEF wurde von der Firma Q-DAS in Abstimmung mit mehreren Vertretern der Automobil- und Zulieferindustrie definiert. Zu diesem Datenformat wird zurzeit im ISO TC 69 SC 4 die Norm ISO TR 11462-5 vorbereitet. Neuere KMGs sind bereits in der Lage die Messergebnisse in diesem Format abzulegen. Ansonsten können die Ergebnisse auch über einen speziell angepassten Konverter in das AQDEF Format umgewandelt werden. Die im AQDEF Format vorliegenden Messergebnisse können beispielsweise mit der Q-DAS Software solara.MP wahlweise mit den in Abschnitt 2.3 beschrieben Verfahren ausgewertet und protokolliert werden.

Bei 3KMGs empfiehlt sich die in der DIN EN ISO 15530-3:2018-09 Geometrische Produktspezifikation und – prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen [7] beschriebene Vorgehensweise heranzuziehen.

Für die Stabilitätsbeurteilung werden die Kennwerte (%GRR, %QMP) oder die Messunsicherheit U für die jeweiligen Merkmale herangezogen. Liegen die Kennwerte innerhalb vorgegebener Grenzen, kann davon ausgegangen werden, dass die Stabilität des KMG weiterhin gegeben ist. Dies wird in einem speziell vorgegebenen Protokoll dokumentiert.

Werden diese Untersuchungen kontinuierlich durchgeführt, lassen sich Veränderungen über die Zeit erkennen und daraus Informationen zur Dynamisierung der Wartungs- und Kalibrierintervalle ableiten (s. Folie 8). Zurzeit realisiert die IconPro GmbH eine Softwareplattform, in die die Daten automatisch im AQDEF Format übertragen werden können. Dort finden die Datenhaltung, die Auswertung und der Versand des Protokolls in einen vorgegebenen Verteilerkreis statt. Weiter können über ein Monitoring System die zeitlichen Veränderungen beobachtet werden (s. Folie 9). Diese Plattform kann in einer firmeninternen Cloud installiert werden. Alternative bietet IconPro GmbH diese Plattform auch als Service-Cloud an, so dass für den Anwender keine zusätzlichen Aufwände für die Betreuung des Systems anfallen.

Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass sich die Stabilitätsbeurteilung an standardisierte und akzeptierte Verfahren orientiert. Weiter sind keine Eingriffe in das Messprogramm erforderlich.

4. Überwachung von internen Parametern des KMGs

Um die Vorhersagen für die Dynamisierung der Wartungs- bzw. Kalibrierintervalle zu optimieren, werden der Steuerung des KMGs im laufenden Betrieb weitere Information entnommen und mit den jeweiligen Messwerten verknüpft. Diese sind beispielweise:

- Betriebsstunden
- Temperaturwerte
- Anzahl der Starts
- Anzahl von Kollisionen
- Anzahl der Taster Wechsel
- Kilometerstände der Achsen
- Luftdrücke der Achslager
- Kräfte bei den Vorschüben, usw.

Dazu sind die Messprogramme entsprechend anzupassen bzw. zusätzliche Routinen zu integrieren. Diese Daten werden ebenfalls auf die Plattform übertragen, dort verwaltet und analysiert. Anhand dieser Informationen lässt sich der Nutzungsgrad und die Belastung des jeweiligen KMGs ableiten. Dazu laufen zurzeit mehrere Untersuchungen, um weitere detailliertere Erkenntnisse über das Verhalten eines KMGs zu gewinnen. Dabei soll insbesondere detektiert werden, welche Parameter sich für Vorhersagen besonders eignen und welche Grenzwerte sinnvoll sind. Dazu werden Technologien wie Maschine oder Deep Learning eingesetzt. Falls diese Untersuchungen zu brauchbaren Erkenntnissen führen, müssen mit dieser Vorgehens-

weise keine zusätzlichen Untersuchungen, wie in Abschnitt 3 beschrieben, durchgeführt werden. Dadurch würde man signifikanten Veränderungen zeitnah erkennen, anhand derer die Kalibrierintervalle dynamisiert werden können. Das würde zu erheblichen Einsparungen führen, ohne an Sicherheit zu verlieren.

5. Überwachung eines KMGs über externe Sensoren

Neben der Überwachung von internen Parametern des KMGs können auch externe Sensoren an dem KMG angebracht werden, die beispielsweise die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Vibration erfassen. Diese Daten werden in Verbindung mit jeder Messung auf einer Plattform abgelegt und dort analysiert. Auch diese Erkenntnisse lassen Aussagen über die Messbeständigkeit und den Nutzungsgrad zu. Damit können insbesondere kritische Ereignisse, wie zu starke Vibrationen aufgrund von unvorhergesehenen Stößen erkannt werden.

Für den Betrieb eines solchen Systems sind die entsprechenden Sensoren erforderlich, deren Installation vor Ort erfolgen muss und die Übertragung der Sensordaten auf die Plattform. Allerdings bedarf es keinerlei Eingriffe in die jeweiligen Messprogramme zum Auslesen der in Abschnitt 4 beschriebenen Parameterdaten aus der Steuerung. Das Risiko für Fehlmessungen während des Betriebes eines KMGs wird durch die zeitnahe Signalisierung instabiler Zustände minimiert.

6. Betreibermodell

Es wird sich der Trend fortsetzen, dass Unternehmen KMGs nicht mehr vom Herstellen der Geräte kaufen, sondern den Hersteller in Abhängigkeit vom Nutzungsgrad bezahlen. Gerade in diesem Fall ist es für den Hersteller wichtig das Verhalten seines KMGs - wie in Abschnitt 4 beschrieben - zu beobachten, um nutzungsabhängig mit dem Kunden abrechnen zu können. Mittels Simulation können unterschiedliche Preismodelle bewertet werden. In wie weit der Markt dieses Geschäftsmodell annimmt, muss die Zeit zeigen.

7. Literatur

- [1] A.I.A.G. – Chrysler Corp., Ford Motor Co., General Motors Corp. Measurement Systems Analysis, Reference Manual, 4. Auflage. Michigan, USA, 2010.
- [2] Dietrich, E., Schulze, A.
Eignungsnachweis von Prüfprozessen
Hanser München 2017
- [3] DIN - Deutsches Institut für Normung
DIN EN ISO 9001:2015: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen.
Beuth Verlag, Berlin
- [4] DIN EN ISO 10012:2004-03, Messmanagementsysteme- Anforderungen an Mess-
prozesse und Messmittel
Beuth Verlag, Berlin
- [5] DIN - Deutsches Institut für Normung
ISO 22514-7:2012: Statistische Verfahren im Prozessmanagement- Fähigkeit und
Leistung – Teil 7: Fähigkeit von Messprozessen.
Beuth Verlag, Berlin
- [6] DIN EN ISO 14253-1:2018-07
Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Mess-
geräten durch Messen - Teil1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformi-
tät oder Nichtkonformität mit Spezifikationen
Beuth Verlag, Berlin
- [7] DIN EN ISO 15530-3:2018-09
Geometrische Produktspezifikation und – prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung
der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) –
Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen
Beuth Verlag, Berlin

- [8] IATF 16949:2016-10
Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie,
Beuth, Berlin
- [9] ISO/IEC Leitfaden 98-3:2008-09
Messunsicherheit – Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
(GUM)
Beuth, Berlin
Englische Fassung JCGM 100 - GUM
- [10] ISO/IEC Leitfaden 99
Internationale Wörterbuch der Metrologie (VIM)
Beuth, Berlin
Englische Fassung JCGM 200 - VIM
- [11] Q-DAS® GmbH
Qualitätsdatenaustauschformat der Automobilindustrie AQDEF, Version 4.0
Weinheim, 2019.
- [12] Robert Bosch GmbH
Schriftenreihe „Qualitätssicherung in der Bosch-Gruppe Nr. 10“
Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen.
Stuttgart, 2010.
- [13] VDA - Verband der Automobilindustrie
VDA Band 5: Prüfprozesseignung
VDA, Frankfurt, 2010.
- [14] VDI/VDE 2617:2011 ff
Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen
VDI, Düsseldorf
- [15] VDI/VDE 2600 Blatt 2:2019-10
Prüfprozessmanagement - Ermittlung der Messunsicherheit komplexer Prüfprozesse
VDI, Düsseldorf

Datenmanagement bei Messprozessen

- Dateninhalte und Datenstrukturierung
- Datenverwaltung, Datenverdichtung, Auslagerung
- Prüfdynamisierung
- Machine tool feedback

Michael Wagner, Q-DAS GmbH, Weinheim

Kurzfassung

Im Zeitalter von Industrie 4.0 fallen in einem Unternehmen immer mehr Daten an, die als Grundlage für eine Prozessbewertung und darauf basierende Prozessverbesserungen dienen. Diese Daten können Mess- und Prüfdaten, Prozess- parameterwerte und andere Informationen sein, die in der Fertigung und in den Mess- und Prüfprozessen anfallen. Je nach Aufgabe und Funktion in einem Unternehmen möchten die Anwender jedoch aus dem gleichen Datenbestand verschiedenste Informationen gewinnen. Diese sollen ihn bei seiner täglichen Arbeit unterstützen, um z.B. eine Dokumentation der Prozesse zu betreiben und darauf basierend zielgerichtet Maßnahmen zur Verbesserung, Dynamisierung der Prüfungen, Kosteneinsparung und Rückmeldungen an Fertigungsmaschinen einleiten zu können. Die Darstellung dieser Ergebnisse sollen in übersichtlichen Dashboards dargestellt werden.

Dateninhalte und Datenstrukturierung

Basis für jede Datenanalyse ist die korrekte Berechnung der gewünschten Kennzahlen und deren grafischer Aufbereitung, die je nach Aufgabe und Funktion des Mitarbeiters im Unternehmen unterschiedlichen Anforderungen unterliegen kann. Bei den Q-DAS® Softwareprodukten legt dies die Auswertestrategie, ein Schema zur Definition der Berechnung von Statistiken und den Anforderungen an den Prozess (Entscheidungskriterium gut / bedingt geeignet / nicht erfüllt) fest. Neben individuellen firmenspezifischen Vorgaben können auch integrierte gängige Normen, Firmen- und Verbandsrichtlinien ausgewählt werden. Die berechneten Kennzahlen gilt es dann anhand aussagekräftiger Grafiken so darzustellen, dass wichtige Prozessinformationen dem jeweiligen Anwender sofort ersichtlich werden.



Bild 1: Datenquellen

Daten, die statistisch analysiert werden sollen, müssen aus dem Datenpool zielgerichtet gefiltert und selektiert werden. Hierbei ist es unabdingbar, dass im Vorfeld einer Projektdefinition klar festgelegt wird, welche beschreibenden Kopf- und Zusatzinformationen zum Messwert, Prozessparameterwert und den Prüfdaten mit abgelegt werden. Generell gilt die Regel, je mehr beschreibende Informationen zum eigentlichen Messwert abgelegt werden, umso flexibler ist man später bei der Datenanalyse auf Basis der Filter- und Selektionsmöglichkeiten. Hier steht man jedoch im Zwiespalt mit der generierten Datenmenge, die es zu überwachen, zu verarbeiten und dauerhaft bereitzustellen gilt. Mit dem Datenformat AQDEF (Advanced Quality Data Exchange Format) aus dem Hause

Q-DAS® gibt es einen empfohlenen Standard, der zusammen mit Unternehmen verschiedenster Branchen in einem Arbeitskreis festgelegt wird. Dieses Format bietet eine sehr gute Orientierung, um für die Analyse der Daten eine geeignete Datenbasis festzulegen. Langjährige Erfahrungen der beteiligten Unternehmen spiegeln sich in dem AQDEF Format wider.

Datenverwaltung, Datenverdichtung, Auslagerung

Dezentral erfasste Daten in einen Datenpool zentralzusammenzuführen und sofort den Anwendern im Unternehmen zur Verfügung zu stellen, spielt eine zentrale Rolle bei der Einführung eines Kennzahlensystems. Nichts kann gravierendere Folgen haben, als zu spät über kritische Abweichungen im Prozess informiert zu werden. Ein wesentlicher Punkt hierbei ist es, dass ein Datenpool alle relevanten Daten beinhaltet und nichtunterschiedliche Datenbanken oder Formate zur Ablage der Informationen verwendet werden. Tools und Datenbankfunktionen aus dem Q-DAS CAMERA Concept garantieren die sofortige zentrale Verfügbarkeit aller relevanten Informationen. Für die Datenspeicherung setzt man auch hier auf Standarddatenbanken (MS-SQL, Oracle, also keine herstellerspezifische Datenhaltung), die bereits in den meisten Unternehmen zum Einsatz kommen und von der Kunden-IT administriert werden.

Um die Datenflut, die von IOT-basierenden Systemen erzeugt wird, beherrschen zu können, muss man zukünftig auch auf dezentrale externe Datenspeicher ausweichen. Dieses Datenvolumen kann in cloudbasierten Systemen einfacher und kostengünstiger abgelegt werden. Dabei müssen aber die Sicherheitsaspekte ausreichend berücksichtigt werden.

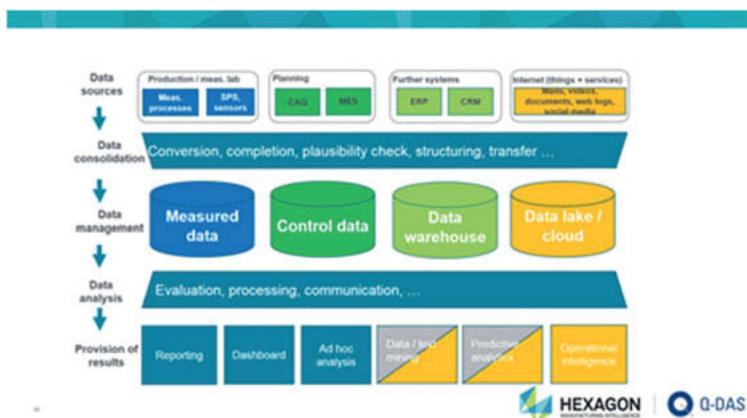


Bild 2: Data Evaluation – Smart Data and Data Analysis

Die Möglichkeit, Daten statistisch nach spezifizierten Vorgaben (Normen, Firmen- und Verbandsrichtlinien) automatisch aus- und bewerten zu können, ist die Grundlage für den Einsatz eines Kennzahlensystems. Nur so ist gewährleistet, dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Basis eines jeden Kennzahlensystems ist eine validierte Auswertung, die Vertrauen und Akzeptanz (intern wie extern) schafft. Nichts ist leidiger als die Fragwürdigkeit einer berechneten Kennzahl! Das Herzstück im Rahmen des Q-DAS CAMERA Concepts ist die Auswertestrategie. In dieser können die statistischen Berechnungen und Vorgaben kundenspezifisch definiert werden oder es kann auf bereits integrierte Standards zurückgegriffen werden. Das gibt Sicherheit für eine Entscheidungsgrundlage! Bei der Kommunikation der Ergebnisse im Kennzahlensystem ist die eindeutige, aufgaben- und anwendergerechte grafische Darstellung unumgänglich. Reine Zahlenkolonnen stellen vielleicht den gleichen Inhalt dar, sind für den Anwender jedoch ungeeignet, da kritische Informationen schnell übersehen werden können. Mit Hilfe von klar strukturierten Layouts für Ergebnisberichte sowie webbasierten Dashboards werden Informationen über die Kennzahlschnell gefunden bzw. deren zeitliche Veränderung sichtbar. Je nach Empfänger der Ergebnisberichte, kann im Rahmen des Q-DAS CAMERA Concepts ein entsprechender Verdichtungsgrad verwendet werden.



Bild 3: Webbasiertes Dashboard

Einen besonderen Komfort und Zeitersparnis liefern zeitlich getriggerte Auswertungen und Berichtserstellung/-versand. Dadurch wird der Anwender automatisch über die für ihn relevante Kennzahlen informiert bzw. kann er sich ein alarmbasiertes Monitoring aufbauen, um den Status der letzten Messungen zu visualisieren.

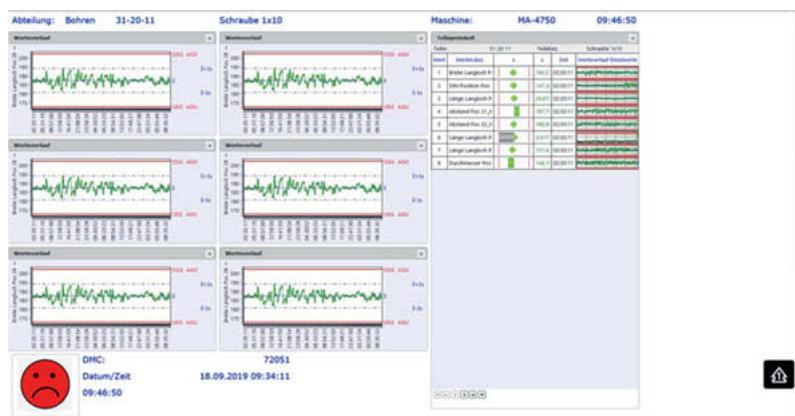


Bild 4: Alarmbasiertes Monitoring

Prüfdynamisierung

Die Prüfdynamisierung setzt bei der Anwendung von SPC an, demnach bei der kontinuierlichen Überwachung der gefertigten Produktqualität mittels statistischer Prozesslenkung. Damit können zwar realistischerweise nicht wirklich 100 % fehlerfreie Produkte garantiert, aber Fehleranteile im ppm-Bereich erreicht werden. Somit werden Prüfaufwände und Kosten im Vergleich zur 100 %-Prüfung deutlich gesenkt.

Bevor es zur Umsetzung von SPC kommt, sind die Qualifikation von Prüf- und Fertigungsequipment sowie die Herstellbarkeit der Produkte nachzuweisen. Die hierfür erforderlichen Schritte sind die Prüfprozesseignung (Messbarkeit der Produktmerkmale), die Maschinenfähigkeit (Machbarkeit der Produkte) und die Prozessfähigkeit (Produktqualität unter Prozessbedingungen zu gewährleisten). Erst dann beginnt die Regelung der Prozesse, um angemessen auf Änderungen im Prozess zu reagieren (SPC).

Hier werden definierte Produktmerkmale regelmäßig überwacht (gemessen) und im Falle von Abweichungen/ Verletzungen (zum Beispiel in Qualitätsregelkarten) erfolgt ein korrigierender Eingriff in den Prozess. Im Falle von stabilen Prozessen, also bei Einhaltung der Produktqualität, werden in der Regel keine weiteren Maßnahmen (automatisiert) eingeführt, sondern die Anwendung bleibt gemäß den definierten Vorgaben (Prüfhäufigkeit und -umfang) stabil.

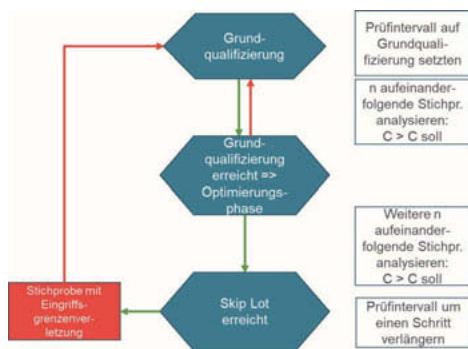
Genau hier setzt jedoch die Kernfunktion der Prüfdynamisierung an, um Prüfsysteme effizienter einzusetzen und Kosten für Einsatz, Wartung und Beschaffung zu reduzieren – alles auf Basis einer verlässlichen Statistik und eines vorher qualifizierten Systems (Prüf- und Fertigungsequipment, Herstellungsprozess).

Die Hauptziele der Prüfdynamisierung sind:

- Stabile Merkmale werden reduziert/weniger oft gemessen
- Messungen werden ausgelassen (geskippt)
- Instabile Merkmale werden häufiger gemessen
- Verstärkter und flexibler Einsatz der Prüfsysteme
- Investitionskosten senken (Beschaffung von Prüfsystemen)
- Reduzierte Wartungsaufwände (keine ungeplanten Anlagestopps)
- ppm Ziel „null Fehler“ weiterhin gewährleistet.

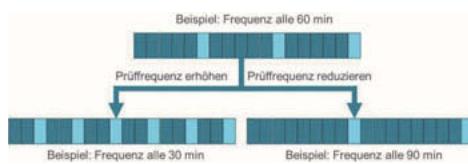
Das Grundprinzip der Prüfdynamisierung beruht auf DIN ISO 2859 – Teil 3 (Skip-lot-Stichprobenprüfung). Das Ziel des Skip-lot-Stichprobenverfahrens ist es, durch den Verzicht

auf die Prüfung eines Teils den Gesamtprüfaufwand möglichst zu verringern. Auch die reduzierte Prüfung und die Wahl eines geeigneten Prüfniveaus können eine Verringerung des Prüfaufwands bewirken.



Zunächst beginnt man mit einer Grundqualifizierung. In dieser wird geprüft, wie „stabil“ die Merkmale der geprüften Teile sind. Nach einer gewissen Anzahl von geprüften Teilen und sobald die statistischen Anforderungen an die Grundqualifizierung erfüllt wurden, beginnt die Optimierungsphase. In dieser Phase werden weitere Teile geprüft und erst, wenn weiterhin eine Stabilität gewährleistet ist, kann mit dem Skippen, also dem Auslassen von Prüfungen, begonnen werden. Sollte in dieser Phase eine Verletzung der Eingriffsgrenzen erfolgen, fällt das System wieder in den Ausgangszustand der Grundqualifizierung zurück.

In der Auswertestrategie (Festlegung der Berechnungsmethoden) der Q-DAS Softwareprodukte können neben den Einstellungen auf Prüfplanebene die anzuwendenden Kriterien eingestellt werden, die für die Dynamisierung herangezogen werden. Einstellungen auf Prüfplanebene legen fest, wie hoch die Anzahl an Stichproben für die Grundqualifizierung und Optimierungsphase ist sowie die maximale Anzahl der Vervielfachung des Prüfintervalls und die Schrittänge pro Skippen.



Ebenso kann diese Einstellung für Merkmalsgruppen individuell konfiguriert werden. So können einzelne Merkmale (z. B. kritische Merkmale) anderen Regel folgen als die restlichen Merkmale des geprüften Teils. Die Einstellungen erfolgen nicht nur pro Merkmal bzw. Merkmalsgruppe, sondern individuell konfigurierbare Einstellungen erlauben beispielsweise, dass bei einem schlechten Merkmal die gesamte Merkmalsgruppe wieder zurück in die Grundqualifizierung fällt.

Diese Lösung funktioniert nicht nur innerhalb der Q-DAS Software zur Dynamisierung der „eigenen“ Prüfpläne, also bei einer Datenerfassung in Q-DAS O-QIS (Operator Quality Information System), sondern die Dynamisierungsinformationen können ebenso an andere Prüf- und Beladungssysteme weitergegeben werden, die anschließend auf deren Basis automatisiert die Messroutine gemäß der Q-DAS Statistik anpassen (Häufigkeit und Umfang der Prüfung).



Bild 5: Übersicht über den Status der Dynamisierung

Machine tool feedback

Beim Machine tool feedback geht es im ersten Schritt darum, die im Fertigungsprozess relevanten Messdaten zu erfassen. Zu den hierfür betrachteten Quellen gehören:

- Werkzeugmaschinen
- In-Line Messsysteme
- Messgeräte (KMG, Arm, Handmessmittel,...)

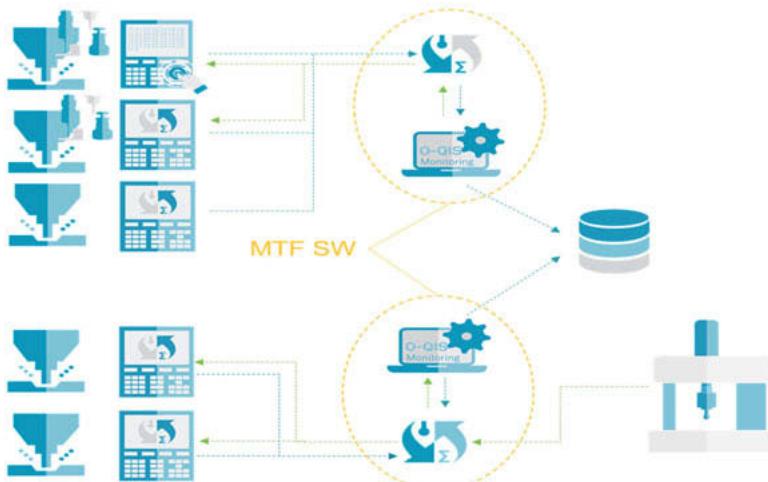


Bild 6: Datenfluss Machine tool feedback



Bild 7: Verknüpfung Werkzeug / Produktmerkmal

Mit diesen erfassten Daten findet im zweiten Schritt eine sofortige Visualisierung und Auswertung statt:

- Darstellung von Einzelmerkmalen
- Gruppierung von Merkmalen nach Zerspanungswerkzeugen & Werkstücknullpunkten
- Darstellung der Zerspanungswerkzeuge in separaten Grafiken
- Berechnung von Werkzeugkorrekturwerten und automatische Rückführung an die Werkzeugmaschine.

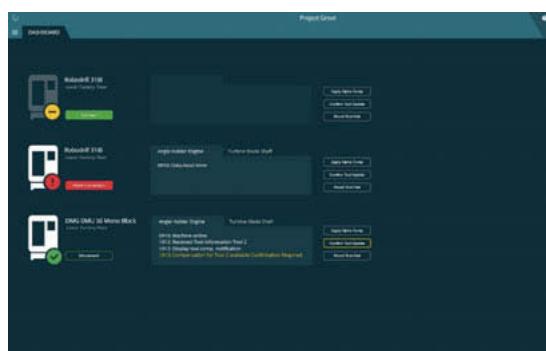


Bild 8: Dashboard für Korrekturstatus

Im letzten Schritt werden die ermittelten Korrekturwerte visualisiert bzw. automatisiert an die Steuerung übertragen:



Bild 9: Korrekturwerte visualisieren und an Werkzeugmaschine übertragen

Beim MTF (Machine Tool Feedback) wird die Statistik genutzt, um korrigierend (vorsichtig) in den Fertigungsprozess direkt einzugreifen. Je automatisierter dies geschieht, desto höher sind die Zeit- und Kosten- Einsparungen. Der Mitarbeiter hat jedoch immer die Hoheit, die finale Entscheidung“ zu treffen

Qualifizierung und Optimierung von Bauteilprüfprozessen auf Werkzeugmaschinen

Eignungsnachweis und Reduktion der Messabweichung mittels Modellwissen und integrierter Sensorik

P. Dahlem, D. Emonts, M. Peterek, Robert H. Schmitt,
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Aachen;
N. Lehmann, Siemens AG, Aachen

Kurzfassung

Die Prüfung geometrischer Bauteilmerkmale mit Hilfe eines taktilen Messkopfsystems auf einer Werkzeugmaschine kann zu einer signifikanten Verkürzung von Qualitätsregelkreisen führen und bietet daher insbesondere für die Fertigung von Großbauteilen ein hohes Kosteneinsparpotential für Unternehmen. [1 bis 3] Die Einhaltung der geforderten Toleranzen sowie die Qualifizierung solcher Prüfprozesse stellt derzeitig eine erhebliche Herausforderung im industriellen Einsatz dar. Die Autoren entwickelten ein Konzept für eine agile Qualifizierung eines solchen in-situ Messprozesses. Da eine Werkzeugmaschine in der Produktion ständig wechselnden thermischen Lasten ausgesetzt ist, wurde ein System zur Kompensation des Temperatureinflusses und somit zur Reduktion der resultierenden Messabweichung entwickelt. Das Vorgehen wurde auf einer Werkzeugmaschine in einer laufenden Produktion implementiert.

Abstract

A tactile on-machine measurement process enables inspection of geometric part features, which can lead to significant shortening of quality-control loops and major reduction of costs particularly for production companies of large volume parts. [1 till 3] The compliance of tolerances and the qualification of such inspection processes are current challenges in industrial applications. The authors developed a concept of an agile qualification procedure for such in-situ measurement process. Since a machine tool is permanently exposed to changing thermal loads, a system is developed in order to compensate temperature influences and consequently reduce the resulting measurement error. This procedure is implemented on a machine tool in an ongoing production.

1 Konzept zur Qualifizierung von komplexen Prüfprozessen

Eine Qualifizierung von Prüfprozessen zur Freigabe für den industriellen Einsatz ist abhängig von der Risikoklassifizierung des Prüfprozesses notwendig [4 bis 6]. Ein wesentlicher Bestandteil der Qualifizierung ist der Nachweis der Konformität mit den Annahmekriterien [6]. Die Anwendung bestehender Verfahren zur Konformitätsprüfung bzw. zum Nachweis der Eignung [7 bis 10] stellt jedoch für das hier betrachtete Fallbeispiel der Prüfung von Bauteilmerkmalen auf einer Werkzeugmaschine folgende Herausforderungen dar:

- kein mathematisches Modell des Prüfprozesses vorhanden,
- das Prüfmerkmal wird indirekt durch Hilfsmittel und besondere Auswerteverfahren (Kompensationssysteme) erfasst,
- besondere Auswerteverfahren (bspw. Temperaturkompensation) müssen ggf. iterativ zur Reduktion der Messabweichung angepasst werden,
- ein Referenzmessmittel für eine Vergleichsprüfung der zu prüfenden Merkmale steht nicht zur Verfügung,
- die Umgebungstemperatur wird als relevanter Einflussfaktor eingestuft, weshalb eine inhomogene Messunsicherheit über dem Parameterraum erwartet wird.

Aus diesen Gründen wurde von den Autoren eine agile und experimentelle Vorgehensweise zur Qualifizierung komplexer Prüfprozesse entwickelt und an diesem Fallbeispiel angewendet. Für das betrachtete Fallbeispiel wurde ein System zur Temperaturkompensation entwickelt, welches eine Anpassung der resultierenden Messabweichung ermöglicht. Die Implementierung des Systems zur Temperaturkompensation auf einer Groß-Vertikal-Drehmaschine zur Fertigung von Gasturbinen-Großbauteilen stellt somit ein Novum in der aktuellen Forschungslandschaft dar.

Die entwickelte Vorgehensweise zur Qualifizierung von Prüfprozessen kann in vier Phasen eingeteilt werden (siehe Bild 1) [11].

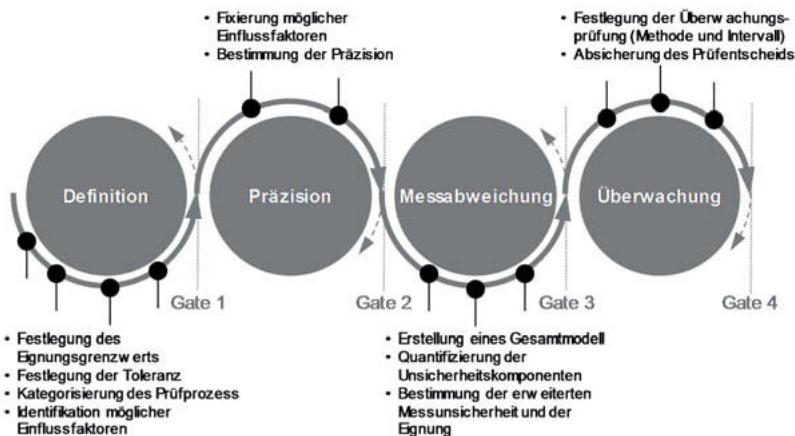


Bild 1: Agiler Prozess zur Qualifizierung komplexer Prüfprozesse

Jede der vier Phasen wird entweder mit einem Quality Gate abgeschlossen oder in einem Iterationszyklus wiederholt bis die Anforderungen an die notwendige Bedingung des jeweiligen Quality Gates erfüllt sind. Können die Anforderungen des Quality Gates nicht erfüllt werden, muss der Prozess zur Qualifizierung des Prüfprozesses abgebrochen werden. In den Quality Gates wird die Eignung mit den bis dahin bekannten Unsicherheitskomponenten des Prüfprozesses hinsichtlich der Annahmekriterien (Eignungsgrenzwert G_{pp} und Toleranz T) geprüft. Zur Prüfung der Eignung wird die erweiterte Messunsicherheit U ins Verhältnis zur geforderten Toleranz T gesetzt und mit dem Eignungsgrenzwert G_{pp} verglichen [10]. Abhängig von der Literatur wird ein Eignungsgrenzwert G_{pp} zwischen 0,1 und 0,2 empfohlen [7]. Abgeleitet aus der Berechnung der Qualitätsfähigkeitskenngröße $c_{gk} \geq 1,33$, welche aus der Automobilbranche bekannt ist, ergibt sich die Forderung nach einem Eignungsgrenzwert G_{pp} von 0,15 [8]. Die erweiterte Messunsicherheit U berechnet sich aus dem Produkt des Erweiterungsfaktors k und der kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$. Die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ ergibt sich hier aus unkorrelierten Standardunsicherheiten u_i (mit den Sensitivitätskoeffizienten $c_i = 1$), welche über die Wurzel der Quadratsumme zu $u_c(y)$ zusammengerechnet werden. Der Eignungskennwert g_{pp} wird für jedes Quality Gate berechnet und mit dem Eignungsgrenzwert G_{pp} verglichen. Hierbei setzt sich die kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$ aus den bis dahin bekannten Standardunsicherheiten $u(x)$ zusammen (siehe Formel 1) [9].

$$g_{pp} = \frac{2 \cdot k \cdot u_c(y)}{T} \leq G_{pp}; \quad \text{es gilt: } u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u(x_i))^2} \quad (1)$$

Im weiteren Verlauf werden Ziel und Zweck der einzelnen Phasen sowie die elementaren Schritte zur Qualifizierung des Prüfprozesses kurz erläutert.

Die Phase 1 „Definition“ dient der Festlegung der Anforderungen (Toleranz T , Erweiterungsfaktor k und Eignungsgrenzwert G_{pp}), der Bestimmung der Rahmenbedingungen (Methode zur Überwachung der Messgröße bspw. Referenzmesssystem) und der ganzheitlichen Analyse des zu betrachtenden Prüfprozesses für ein grundlegendes Prüfprozessverständnis (bspw. durch ein Flussdiagramm). Die Toleranz T kann abhängig von der vorgegebenen Merkmalstoleranz bestimmt werden. Der Eignungsgrenzwert G_{pp} beschreibt das maximal zulässige Verhältnis zwischen der zweiseitig betrachteten erweiterten Messunsicherheit und der geforderten Toleranz. Dieser Wert sollte basierend auf den zu prüfenden Stückzahlen und dem bisherigem Erfahrungswissen zum Prüfprozess gewählt werden. Für den betrachteten Prüfprozess wird ein Eignungsgrenzwert G_{pp} von 0,2 festgelegt. Der Erweiterungsfaktor $k = 2$ wird üblicherweise für ein Vertrauensbereich von 95% gewählt [10].

$$\begin{aligned} \text{Quality} \quad \frac{2 \cdot k \cdot u_c(y)}{T} \leq G_{pp} \Rightarrow \frac{4 \cdot u_c(y)}{T} \leq 0,2 \\ \text{Gate*}: \end{aligned} \quad (2)$$

* mit $k = 2$ und $G_{pp} = 0,2$.

Weiterhin werden die voneinander unabhängigen Glieder der Prüfprozesskette identifiziert, welche in einem Flussdiagramm respektive bereits bekannten Einflussfaktoren dargestellt werden können. Kann die ganzheitliche Prüfprozesskette nicht mit Hilfe einer Referenzmessung oder eines Referenzmittels aufwandsgerecht überprüft werden, können die unabhängigen Glieder der Prüfprozesskette individuell untersucht werden. Für das Fallbeispiel bedeutet dies zu Beginn der Untersuchung eine signifikante Reduktion des experimentellen Aufwands. Die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ des Prüfprozesses besteht in dieser Phase lediglich aus der Kalibrierunsicherheit des Referenzmessmittels u_{Referenz} zusammen (siehe Formel 3).

$$\begin{aligned} \text{Quality} \quad \frac{4 \cdot u_c(y)}{T} \leq 0,2 \Rightarrow \frac{4 \cdot \sqrt{(u_{\text{Referenz}})^2}}{T} \leq 0,2 \\ \text{Gate 1*}: \end{aligned} \quad (3)$$

Die Phase 2 „Präzision“ dient dem potenziellen Eignungsnachweis des Prüfprozesses auf Basis der bekannten Streuung. Zu diesem Zweck soll eine minimale Anzahl an Wiederholversuchen in Abhängigkeit der Kosten und des Aufwands festgelegt werden. Die Ergebnisse der

Wiederholversuche ohne Variation möglicher Einflussfaktoren können in einer Qualitätsregelkarte aufgetragen werden. Hierbei soll sichergestellt werden, dass der Prozess stabil und unter Kontrolle ist. Sodass nachgehend eine bewusste Variation möglicher Einflussfaktoren durchgeführt werden kann. Die Standardunsicherheit $u_{Präzision}$ der Ergebnisse, welche durch die empirische Standardabweichung bestimmt wird, geht in dieser Phase zusätzlich in die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ des Prüfprozesse mit ein. Daraus ergibt sich folgende Anforderung (siehe Formel 4) an das Quality Gate 2.

$$\text{Quality Gate 2*: } \frac{4 \cdot u_c(y)}{T} \leq 0,2 \Rightarrow \frac{4 \cdot \sqrt{(u_{Referenz})^2 + (u_{Präzision})^2}}{T} \leq 0,2 \quad (4)$$

Die Phase 3 „Messabweichung“ dient zur Untersuchung der systematischen und der zufälligen Messabweichung des Prüfprozesses in Abhängigkeit der relevanten Einflussfaktoren [12]. Zur experimentellen Bestimmung der Standardunsicherheit $u_{Messabweichung}$ und der systematischen Messabweichung b werden mögliche relevante Einflussfaktoren mit Hilfe von Expertenwissen oder auf Basis von Vorversuchen ausgewählt. Anschließend wird ebenfalls mit dem Wissen der Experten ein Parameterraum der möglicherweise relevanten Einflussfaktoren festgelegt und bspw. in einem Voll-Faktoriellen Versuchsplan [13] basierend auf den Kriterien Vorwissen, Kosten und Aufwand variiert. Mit Hilfe einer Regressionsanalyse lassen sich Abhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren und der Messabweichung bestimmen. Als Ergebnis der Regressionsanalyse werden die relevanten Einflussfaktoren als Eingangsgröße für das mathematische Modell verwendet. Die Standardunsicherheit $u_{Messabweichung}$ ergibt sich aus der Standardabweichung der Distanz zwischen den Datenwerten und den angepassten Werten des mathematischen Modells. Die systematische Messabweichung b (bias) beschreibt die maximale systematische Messabweichung des mathematischen Modells und wird innerhalb des definierten Parameterräums der relevanten Einflussfaktoren wie folgt berechnet:

$$\text{systematische Messabweichung } b^* : b = \max(|\min(\hat{y}_i)|; |\max(\hat{y}_i)|) \quad (5)$$

* mit \hat{y}_i i-ter angepasster Wert des mathematischen Modells.

In dieser Phase sollten alle Bestandteile der kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$ in der Berechnung berücksichtigt werden. Hierbei können die vorgestellten Standardunsicherheiten in Formel 6 sich wiederum aus mehreren Unsicherheitskomponenten zusammensetzen. Beispielsweise kann in Abhängig von verfügbaren Referenzmessmitteln der Prüfprozess in seine unabhängigen Kettenglieder aufgeteilt und individuell untersucht werden.

$$\text{Quality Gate 3*}: \frac{4 \cdot u_c(y)}{T} \leq 0,2 \Rightarrow \frac{4 \cdot \sqrt{(u_{\text{Referenz}})^2 + (u_{\text{Präzision}})^2 + (u_{\text{Messabweichung}})^2} + b}{T} \leq 0,2 \quad (6)$$

Entsprechend der spezifischen Anwendung sowie der Risikoklassifizierung können weitere Methoden zur Quantifizierung der kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$ berücksichtigt werden [14].

Die Phase 4 „Überwachung“ hat die Sicherstellung der Konformitätsbewertung zum Ziel. Diese kann sich von der experimentellen Untersuchung zur Messabweichung unterscheiden. Zur Identifizierung von Änderungen der zufälligen und der systematischen Messabweichung kann eine regelmäßige Überprüfungsroutine eingeführt werden. In jedem Fall sollten die in Phase 3 ermittelten und auch abschließend als relevant bewerteten Einflussfaktoren und deren Parameterraum kontinuierlich oder regelmäßig überwacht werden. Zusätzlich ist eine Kalibrierroutine in zeitlich angemessenen Abständen einzuführen, welche die zufälligen sowie systematischen Messabweichungen quantitativ bewerten kann. Zur Absicherung der Eignung muss die geforderte Toleranz T um die erweiterte Messunsicherheit U reduziert werden und das Ergebnis als Übereinstimmungsbereich für das zu prüfende Merkmal festgehalten werden. Die Definition der Maßnahmen zur Überwachung sowie die regelmäßige Überprüfung des Quality Gate 3 bilden somit die Anforderungen für das Quality Gate 4.

Im Folgenden wird diese Vorgehensweise zur Qualifizierung an dem Fallbeispiel der Bauteilprüfung auf Werkzeugmaschinen angewendet und näher erläutert.

2 Erklärung am Fallbeispiel einer Groß-Vertikal-Drehmaschine

Bei der Siemens AG Gas & Power werden Gasturbinengehäuse auf einer Vertikal-Drehmaschine der Firma Waldrich Coburg (siehe Bild 2a) spanend bearbeitet, wobei einige Bauteilmerkmale wie Innendurchmesser und Nutbreiten innerhalb einer geforderten Toleranz gefertigt werden müssen. Die geometrische Überprüfung dieser Merkmale erfolgt bislang manuell mittels Innenmikrometerschraube und soll zukünftig automatisiert mit einem taktilen Messkopfsystem auf der Werkzeugmaschine durchgeführt werden. Basierend auf bisherigen Untersuchungen weist der Messprozess im Vergleich zum Bearbeitungsprozess auf einer Werkzeugmaschine aufgrund kleinerer Prozesskräfte und optimierten Messstrategien kleinere systematische sowie zufällige Messabweichungen auf [1 bis 3].

Durch die Umsetzung einer automatisierten Bauteilprüfung mittels taktilem Messkopfsystem könnte für den Prüfer das Verletzungsrisiko an Spänen, die Prozesszeit sowie bestenfalls die Prozessstreuung signifikant gesenkt werden. Die Verlässlichkeit der Messergebnisse soll

durch die Qualifizierung des Prüfprozesses sichergestellt werden. Entsprechend der Indikatoren aus Richtlinie VDI/VDE 2600 Blatt 2 [7] handelt es sich bei der automatisierten Bauteilprüfung mittels taktilem Messkopfsystem um einen komplexen Prüfprozess.

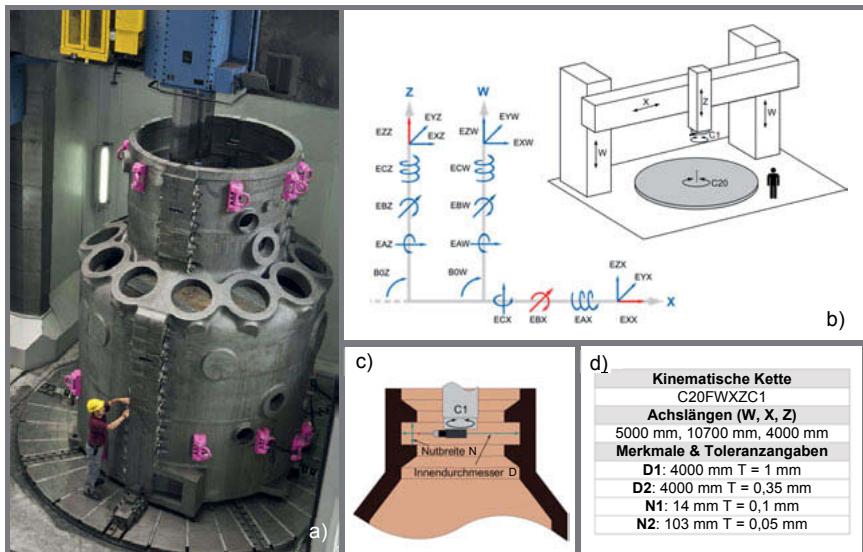


Bild 2: a) Foto der Maschine mitsamt zu messendem Gasturbinengehäuse, b) Kinematik der Maschine mitsamt allen geometrischen Fehlern der Linearachsen nach ISO 230-2 (für den Messprozess kritische Fehler sind hier rot markiert) [15]. c) Schema der Messstrategie für Nutbreite und Durchmesser. d) Technische Daten zu Maschine sowie Merkmale und Toleranzangaben.

2.1 Phase 1: „Definition“ – Analyse des betrachteten Prüfprozesses

Die Prüfmerkmale Innendurchmesser und Nutbreite werden über eine bidirektionale Zwei-Punkt-Messung geprüft. Die Prüfmerkmale mit zugehörigen Toleranzangaben sind in Bild 2c und 2d dargestellt. Die Zwei-Punkt-Messungen werden so ausgelegt, dass möglichst wenige Maschinenachsen verfahren werden und der Einfluss von geometrischen Maschinenfehlern auf die Messabweichung möglichst gering ist. Das heißt, dass bei der Prüfung der Nutbreite nur die Z-Achse und bei der Prüfung des Innendurchmessers nur die X-Achse der Maschinenkinematik verfahren werden muss. Die C1-Drehachse, die bei einer bidirektionalen Durchmessermessung zur Ausrichtung des Tasters dient, wird hier als Teil des taktilen Messkopfsystems

angesehen. Da die C1-Drehachse nur zwei Positionen annehmen muss, ist der Einfluss dieser Achse auf die Messabweichung verglichen mit der X- und Z-Achse gering. Zur Reduzierung des Aufwands wird der Einfluss der C1-Drehachse auf die Messabweichung zusammen mit der Taster Kalibrierung untersucht. Diese Vorgehensweise kann mit einer Sterntaster Kalibrierung verglichen werden [16 bis 19]. Die unabhängigen Kettenglieder der Prüfprozesskette (als graue Box dargestellt) sowie relevante Einflussfaktoren sind in Bild 3 als Flussdiagramm dargestellt.

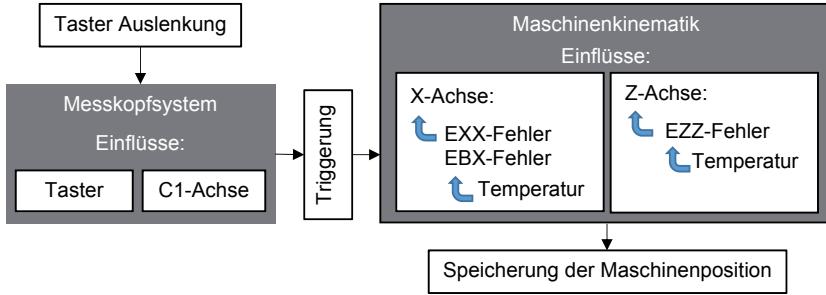


Bild 3: Flussdiagramm zu den Messprozessen mit Fokus auf die kritischen Einflussgrößen

Der volumetrische Fehler in X- und Z-Richtung bestimmt den Einfluss der Maschinenkinematik auf die Messabweichung. Nach Annahme des Starrkörpermodells ist für die vorliegende C20FWXZC1-Kinematik in erster Näherung der EZZ-Fehler für Messabweichungen in Z-Richtung und der EXX-Fehler sowie der EBX-Fehler für Messabweichungen in X-Richtung verantwortlich (vgl. Bild 2b). Alle anderen Fehler der Maschinenkinematik haben auf die Messabweichung einen vernachlässigbar kleinen Einfluss (z.B. Cosinus-Einfluss) [15, 20 bis 22]. Neben den statischen Einflüssen der Maschinenkinematik kommt dem dynamischen Einflussfaktor Temperatur eine zentrale Bedeutung zu. In der Literatur wird die Größenordnung des thermischen Fehlers mit bis zu 70% des unkompensierten Gesamtmaschinenfehlers eingestuft [23].

Als Referenzmessmittel werden einerseits materielle Maßverkörperungen (Parallelendmaße) mit einer Kalibrierunsicherheit $u_{\text{Referenz},1} = 4 \mu\text{m}$ und andererseits ein Laserinterferometer mit einer Kalibrierunsicherheit $u_{\text{Referenz},2} = 0,5 \mu\text{m}$ verwendet. Demnach ergeben sich wie in nachfolgender Tabelle 1 dargestellt die Eignungskennwerte g_{pp} zu:

Tabelle 1: Ergebnisse des Quality Gates 1

Prüfmerkmale	D1	D2	N1	N2
Eignungskennwert g_{pp}	0,016	0,045	0,160	0,320

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich wird, sind die verwendeten Referenzmessmittel zur Bewertung der Eignung für Prüfmerkmal Nutbreite N2 nicht geeignet, weshalb dieses Prüfmerkmal im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet wird.

2.2 Phase 2: „Präzision“ - Untersuchung der Prozessstreuung

Um die Präzision des Prüfprozesses und damit die potenzielle Eignung zu untersuchen, werden die unabhängigen Glieder der Prüfprozesskette (Messkopfsystem und Maschinenkinematik) zunächst einzeln betrachtet und anschließend die zugehörigen Standardunsicherheiten der $u_{präzision}$ kombiniert. Bei dieser experimentellen Untersuchung sollten nach Möglichkeit alle Einflussfaktoren stabil gehalten und somit nicht variiert werden.



Bild 4: a) Tasterkalibrierung an einem 25 mm Parallelendmaß. b) Zwei-Punkt-Messung in X-Richtung an drei 1-Meter-Endmaßen. Der Aufbau kann flexibel um 1 m Schritte erweitert oder verkürzt werden. Ein ähnlicher Aufbau wurde auch für die Zwei-Punkt-Messung in Z-Richtung verwendet.

Die Präzision der Maschinenkinematik wird mit einem Laserinterferometer innerhalb einer klassischen Maschinenkalibrierung untersucht. Hierdurch konnte der Versuchsaufwand signifikant reduziert werden. Die Anzahl der Wiederholmessungen n beträgt 5 nach DIN EN ISO 230 Standardkalibrierzyklus [15]. Entlang der Messachse wurde die Streuung des für die ausgewählten Zwei-Punkt-Messungen (vgl. Bild 2d) anhand des Abstands der beiden Messpositionen ermittelt. Da die einzelnen Lasermessungen eine Messdauer von weniger als

einer Stunde aufweisen, ist der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Werkzeugmaschine gering, aber dennoch vorhanden. Die reine Streuung der Maschinenkinematik ohne Temperatureinfluss wird somit konservativ abgeschätzt.

Die Präzision des Messkopfsystems wird an einem kalibrierten Endmaß untersucht. Hierbei werden die Linearachsen möglichst wenig verfahren, um den Einfluss der Maschinenkinematik gering zu halten. Aus diesem Grund wurde für diese Untersuchung ein kurzes Endmaß mit einer Länge von 25 mm verwendet (siehe Bild 2a). Der Einfluss des Taster- und des Aggregatswechsels wurde bei der Untersuchung der Präzision berücksichtigt. Die Ergebnisse zur Untersuchung der Präzision sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisübersicht zur Untersuchung der Präzision des Prüfprozesses

Kettenglied der Prüfprozesskette		Maschinenkinematik			Messkopfsystem	
Prüfmerkmal		D1	D2	N1	D1, D2	N1
Standardabweichung s in μm		7,3	7,3	1,3	2,0	0,9

Anhand der Ergebnisse zur Untersuchung der Präzision kann der Eignungskennwert g_{pp} entsprechend der Formel 4 berechnet werden. Der berechnete Eignungskennwert ist in Abhängigkeit des Prüfmerkmals in nachfolgender Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse des Quality Gate 2

Prüfmerkmale	D1	D2	N1
Eignungskennwert g_{pp}	0,034	0,098	0,172

2.3 Phase 3: „Messabweichung“ - Untersuchung der Messabweichung

In der dritten Phase wird die zufällige sowie auch systematische Messabweichung in Abhängigkeit der relevanten Einflussfaktoren untersucht und zur Bewertung der Eignung nach Formel 6 berücksichtigt. Da der als relevant identifizierte Einflussfaktor „Temperatur“ nicht gezielt manipuliert werden kann, wurden mehrere Versuchsreihen mit einer Dauer von 6 bis 24 Stunden an verschiedenen Endmaßen sowie mehrstündige Lasermessungen an unterschiedlichen Tagen durchgeführt um anschließend die natürlichen Temperaturschwankungen sowie die Messabweichungen bzw. die Maschinenfehler mittels linearer Regression analysieren zu können. Betrachtet man das Ergebnis der Messabweichung in Z-Richtung ergibt sich aufgrund der zentralen Beeinflussung durch den EZZ-Fehler ein starker Zusammenhang zum Temperaturausdehnungskoeffizienten des Linearmaßstabs der Z-Achse ($\alpha_{Z_{\text{ermittelt}}} \approx 8,9 \frac{\text{ppm}}{\text{K}} \approx$

$\alpha_{Z_{Literatur}} \approx 8 \frac{ppm}{K}$ für LC183-Maßstab). Dieser Zusammenhang ($Bias \approx |\alpha_{Achse} \cdot (t_{ist} - t_{komp}) \cdot l_{mess}|$) kann genutzt werden, um indirekt den zulässigen Temperaturbereich eines geeigneten Prüfprozesses zu ermitteln. Hierfür wird die Formel zur Bestimmung der Qualitätsfähigkeitskenngroße $c_{gk} \geq 1,33$ als Berechnungsgrundlage verwendet (siehe Formel 7) [8].

$$\frac{0,15 \cdot T - |\alpha_{Achse} \cdot (t_{ist} - t_{komp}) \cdot l_{mess}|}{3 u} > 1,33 \Leftrightarrow \Delta t < \frac{0,15 \cdot T - 1,33 \cdot 3u}{\alpha_{Achse} \cdot l_{mess}} \quad (7)$$

$$\Delta t_{N1} = < \frac{0,15 \cdot 0,1 \text{ mm} - 1,33 \cdot 3 \sqrt{(0,0013 \text{ mm})^2 + (0,0009 \text{ mm})^2}}{8,9 \frac{ppm}{K} \cdot 14 \text{ mm}} = 69,75 \text{ K} \quad (8)$$

Aufgrund der großen zulässigen Temperaturspanne von $\Delta t_{N1} < \pm 69,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ um den Einstellpunkt ist eine Langzeit-Fähigkeit der Maschine zur Messung von Prüfmerkmal N1 als unproblematisch anzusehen und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Betrachtet man das Ergebnis der Messabweichung in X-Richtung kann der Temperaturausdehnungskoeffizient in X-Achsen Richtung ($\alpha_{X_{gesch\ddot{a}tzt}} \approx 9,7 \frac{ppm}{K}$) nur gesch\ddot{a}tzt ermittelt werden. Verwendet man den Regressionskoeffizienten ($\alpha_{X_{gesch\ddot{a}tzt}} \approx 9,7 \frac{ppm}{K}$) zwischen EXX-Fehler und X-Achsenfundamenttemperatur, lässt sich der zulässige Temperaturbereich für das Achsfundament sch\ddot{a}tzen: $\Delta t_{D1} < \pm 3,16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\Delta t_{D2} < \pm 0,59 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Es wird ersichtlich, dass für die Prüfmerkmale D1 und D2 eine reine Überwachung der Temperatur nicht zielführend ist, da bei nat\ddot{u}rlicher Temperaturschwankung in der Maschine und deren Peripherie aufgrund der kleinen Temperaturbereiche eine Bauteilprüfung nicht planbar wäre. Es wurde daher das Konzept der modellbasierten Kompensation der thermischen Maschinenfehler verfolgt. Das lineare Regressionsmodell wurde aus den vorangegangenen Versuchsreihen aufgebaut und mit Hilfe der Eignungsuntersuchung an einem kalibrierten Endma\ddot{s} mit der Länge von 4 m (vgl. Bild 4b) für die Prüfmerkmale D1 und D2 validiert. Der Effekt der Temperaturkompensation ist im folgenden Diagramm dargestellt (siehe Bild 5).

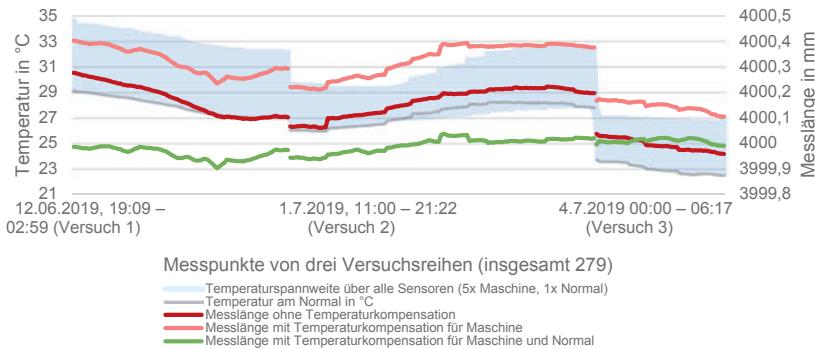


Bild 5: Darstellung der Durchmessermessergebnisse mit und ohne Temperaturkompensation mit Gegenüberstellung der vorliegenden Temperaturen.

Zu sehen sind insgesamt 279 Zwei-Punkt-Messungen verteilt über drei mehrstündige Versuchsreihen die zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt wurden. Insgesamt erstrecken sich die Versuche über eine Temperaturspanne von über 12 °C, die mit an der Werkzeugmaschine und am Endmaß platzierten Temperatursensoren gemessen wurde.

Weiterhin sind in Bild 5 die am Endmaß gemessenen Längen in unkomponierter Form in „rot“ dargestellt. Zu erkennen ist, dass eine systematische Messabweichung in der Messlänge dem Temperaturband folgt. In „grün“ dargestellt sind die Messergebnisse mit modellbasierter Kompensation der systematischen Messabweichung, die eine signifikante Reduktion der Messabweichung zeigen. Mit Hilfe der Formel 6 und den ermittelten Messabweichungen wird in nachfolgender Tabelle 4 der Eignungskennwert g_{pp} merkmalspezifisch ermittelt.

Tabelle 4: Quality Gate 3 mit und ohne modellbasierte Kompensation der systematischen Messabweichungen

Prüfmerkmale	D1 (ohne Kompen- sa- tion)	D2 (ohne Kompensa- tion)	D1 (mit Kom- pensation)	D2 (mit Kom- pensation)
Systematische Messabweichung b in μm	158	158	10	10
Standardabweichung s in μm	87	87	31	31
Eignungskennwert g_{pp}	0,508	1,451	0,139	0,396

Nach der modellbasierten Kompensation wird die Eignung des Prüfmerkmals D1 positiv bewertet. An dieser Stelle kann zusätzlich geprüft werden, ob eine Anhebung des Eignungsgrenzwert G_{pp} auf 0,4 toleriert werden kann, um auch die Eignung für das Prüfmerkmal D2 positiv bewerten zu können. Dies würde zugleich eine Verkleinerung des Übereinstimmungsbereichs bedeuten. Mit dieser Erkenntnis, dem bisherigen Vorwissen zur Fertigungsprozessstreuung und der zu prüfenden Stückzahl sollte eine Entscheidung in Abstimmung mit allen Stakeholdern getroffen werden.

Für das vorliegende Fallbeispiel ist Phase 4 noch nicht vollständig eingerichtet, weshalb hierauf im Ausblick näher eingegangen wird.

3 Lösungsansätze für die Befähigung mittels Modellwissen und integrierter Sensorik

In ihrer originalen Ausführung ist die untersuchte Werkzeugmaschine ohne Temperatursensorik an den Achsen und mit limitierter Möglichkeit zur Kompensation ausgestattet. Zur Kompensation des Einflussfaktors „Temperatur“ haben die Autoren am WZL entwickelte, funkbasierter Temperatursensoren an 5 neuralgischen Punkten der Werkzeugmaschine integriert. Die Sinumerik Powerline Steuerung wurde um die volumetrische Kompensationsschnittstelle *Volumetric Compensation System (VCS)* erweitert. Mit Hilfe dieser Schnittstelle können die geometrischen Fehler der Werkzeugmaschine in Form von Fehlertabellen hinterlegt werden. Dementsprechend müssen Kalibrierdaten vorliegen, welche durch ein 6D-Laserinterferometer erhoben wurden. Obwohl nur wenige geometrische Fehler (siehe rot markierte Fehler in Bild 2b) für die Prüfaufgabe relevant sind, wurden alle Fehler statisch kompensiert. Parallel zur Erhebung der geometrischen Fehler wurden die zeitlich aufgenommenen Temperaturdaten verwendet, um einen thermischen Referenzzustand für die nachgelagerte modellbasierte Temperaturkompensation zu erstellen. Auf Grundlage weiterer Versuchsreihen mit dem Laserinterferometer, dem Endmaß und den kontinuierlich aufgenommenen Temperaturdaten wurde das thermo-elastische Verhalten der Werkzeugmaschine untersucht und die temperaturbedingte systematische Messabweichung in X- und Z-Richtung modelliert. Das Empfänger-Gateway des Temperaturmesssystems verarbeitet die vorliegenden Temperaturen im Modell und übermittelt Korrekturwerte an die Werkzeugmaschine. Die Übertragung der Daten muss dabei nicht im Regelungstakt erfolgen, da positionsabhängige Maschinenfehler bereits durch das VCS kompensiert wurden.

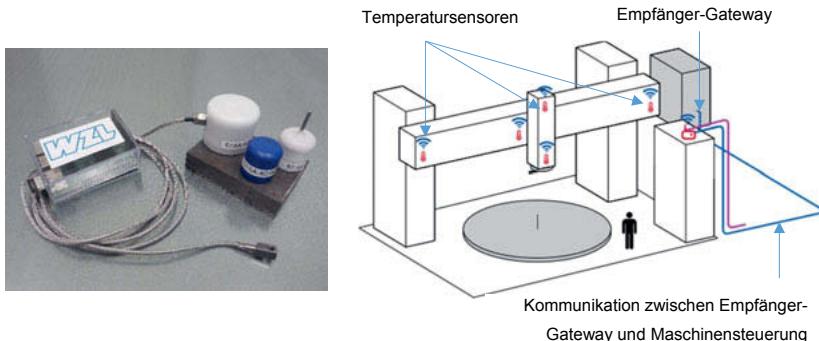


Bild 6: a) Aufbau des Temperaturmesssystems mit drei verschiedenen Sensortypen respektive Gateway, b) schematische Darstellung der Implementierung an der Werkzeugmaschine

4 Fazit und Ausblick

Die Anwendung der Vorgehensweise zur Qualifizierung komplexer Prüfprozesse hat gezeigt, dass die Einführung von Quality Gates eine schrittweise und iterative Herangehensweise ermöglicht und den Aufwand insgesamt reduziert. Zudem bietet dieser Ansatz die Möglichkeit einer experimentellen Bestimmung der Standardunsicherheitskomponenten in Abhängigkeit des Prüfprozesses und der vorhandenen Referenzmessmittel. Die Bestimmung der systematischen Messabweichung auf Basis des globalen Minimus/ Maximums ermöglicht eine konervative Abschätzung der erweiterten Messunsicherheit über den gesamten betrachteten Parameterraum. Dahingegen bedarf die Berechnung der systematischen Messabweichung über den arithmetischen Mittelwert einer weitergehenden Untersuchung, ob tatsächlich 95% der Messwerte innerhalb der erweiterten Messunsicherheit liegen. Eine Reduktion der erweiterten Messunsicherheit durch Einschränkung des Parameterraums ist bei mehreren Einflussfaktoren nur schwer möglich. Mit Hilfe der Regressionsanalyse besteht die Möglichkeit die erweiterte Messunsicherheit iterativ zu reduzieren, indem Einflussgrößen modellbasiert kompensiert werden oder deren Parameterraum systematisch eingeschränkt wird.

Die Optimierung durch das Modellwissen und die integrierte Sensorik führte zur Reduktion der Messabweichung und somit zur positiven Bewertung der Eignung. Die Sensorik kann einerseits zu einer kontinuierlichen Erweiterung des Modellwissen und andererseits zur Überwachung der Einflussgrößen dienen. Die Überwachung ist notwendig zur Sicherstellung der Eignung und damit für die kontinuierliche Absicherung des Prüfentscheids. Die Datenbasis zur

Bestimmung der Eignung ist mit drei Messungen an unterschiedlichen Zeitpunkten relativ gering, weshalb die Gültigkeit des Kompensationsmodells durch Wiederholmessungen der Phase 3 weiterhin untersucht werden sollte. Hierbei sollte insbesondere der Fokus auf die zulässige Zeitspanne zwischen den Messungen gelegt werden. Insbesondere Messabweichungen aufgrund von stärkeren Temperaturschwankungen sowie größere Zeitspannen werden voraussichtlich noch nicht ausreichend prognostiziert und kompensiert. Zur Generierung einer geeigneten Datenbasis bietet die dauerhafte Integration faserbasierter Laserlinien in den Arbeitsraum der Werkzeugmaschine ein vielversprechendes Messsystemkonzept [3, 24]. Hierdurch und durch Ansätze des maschinellen Lernens könnte die Leistungsfähigkeit der Kompensation in Zukunft deutlich gesteigert werden. Ein entscheidender Einflussfaktor, welcher hier für die Bestimmung der Eignung nicht betrachtet wurde, ist das Werkstück. Der thermische Einfluss auf das Bauteil kann gleichermaßen kritisch für den Fertigungsprozess und auch für die Bauteilprüfung sein [25, 26]. Laufende Forschungsaktivitäten am Werkzeugmaschinenlabor untersuchen das thermo-elastische Verhalten von Bauteilen und berücksichtigen mit Hilfe der hier verwendeten leicht integrierbaren Temperatursensoren auch die kritischen inhomogenen und instabilen Temperaturzustände des Werkstücks. Erkenntnisse in den Gebieten der Temperaturkompensation von Werkzeugmaschine und Werkstück müssen in Zukunft noch zusammengeführt werden. Im Industriearbeitskreis „Präzisionsfertigung von Großbauteilen“ wird dieses Konzept seit längerem untersucht und die Erkenntnisse in einem Richtlinienentwurf „Acceptance tests for coordinate measurements with machine tools according to ISO 10360“ zusammengefasst. In der Richtlinie wird eine Vorgehensweise zur allgemeingültigen Bestimmung der maximalen Längenmessabweichung einer Werkzeugmaschine erläutert [27].

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung der vorgestellten Arbeiten im Rahmen des Projekts „Manufacturing Center of Excellence – TP4 Digitalization of Measurements“ (03ET7085).

5 Literaturangaben

- [1] Mutilba, U., Gomez-Aedo, E., Kortaberria, G., Olarra, A. u. Yagüe-Fabra, J. A.: Traceability of On-Machine Tool Measurement. A Review. *Sensors* (Basel, Switzerland) 17 (2017)
- [2] Schmitt, R. H., Peterek, M., Morse, E., Knapp, W., Galletto, M., Härtig, F., Goch, G., Hughes, B., Forbes, A. u. Estler, W. T.: Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. *CIRP Annals* 65 (2016) 2, S. 643–665
- [3] Peterek, M.: Messunsicherheitsbestimmung für Geometriemessungen mit Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen u. IIF - Institut für Industriekommunikation und Fachmedien GmbH Dissertation 2017
- [4] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2600 Prüfprozessmanagement Blatt1. Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozessen (2013)
- [5] Damm, J.: Risikobezogene Aufwandsreduktion für Eignungsnachweise von Prüfprozessen in der Produktion. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2015. Edition Wissenschaft Apprimus, Bd. 2015,19. Aachen: Apprimus-Verl. 2015
- [6] Hager, R.: DIN EN ISO 9001. Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9001:2015 (2015)
- [7] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2600 Prüfprozessmanagement Blatt2. Ermittlung der Messunsicherheit komplexer Prüfprozesse (2018)
- [8] Verband der Automobilindustrie: VDA Band 5. Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie Prüfprozesseignung (2010)
- [9] Internationale Organisation für Normung: Guide to the expression of uncertainty measurement (GUM: 1995). Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM: 1995). ISO-IEC guide, 98-3. Geneva: International Organisation of Standardization 2008
- [10] Dietrich, E. u. Schulze, A.: Eignungsnachweis von Prüfprozessen. Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. München: Hanser 2017
- [11] Schmitt, R. H., Lehmann, N. u. Nienheyzen, P.: Qualifizierung einer digitalisierten Ultraschallprüfprozesskette. tm - Technisches Messen (2019)

- [12] Bureau International des Poids et Mesures: International vocabulary of metrology - basic and general concepts and associated terms (VIM). Vocabulaire international de métrologie - concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM). Sèvres: JCGM 2012
- [13] Siebertz, K., van Bebber, D. u. Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017
- [14] Abollado, J. R., Shehab, E., Rose, M. u. Schröter, T.: Uncertainty Assessment for Measurement Processes in the Aerospace Manufacturing Industry. Procedia CIRP 60 (2017), S. 326–331
- [15] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 230-2. Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 2: Bestimmung der Positioniergenauigkeit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen (ISO 230-2:2006) (2011)
- [16] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 10360-3. Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 3 (2000)
- [17] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 10360-1. Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1 (2003)
- [18] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 10360-2. Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen (ISO 10360-2:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10360-2:2009 (2010)
- [19] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 230-10. Test code for machine tools — Part 10: Determination of the measuring performance of probing systems of numerically controlled machine tools (2016)
- [20] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 230-1. Geometrische Genauigkeit von Werkzeugmaschinen (1999)
- [21] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 230-6. Test code for machine tools - Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (Diagonal displacement tests) (2002)
- [22] A.C., O. u. Yalcin M., E.: Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000) 1199–1213
- [23] Wennemer, M.: Methode zur messtechnischen Analyse und Charakterisierung volumetrischer thermo-elastischer Verlagerungen von Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen u. IIF - Institut für Industriekommunikation und Fachmedien GmbH Dissertation 2017

- [24] Robert H. Schmitt, Martin Peterek, Philipp Dahlem u. Benjamin Montavon: Structure-Integrated Optical Sensor For A Fast Machine Tool Calibration. CIRP Annals (2018)
- [25] M. Ohlenforst, P. Dahlem, M. Peterek, R. Schmitt: Geometriemessungen auf Werkzeugmaschinen. Vorgehen zum Bestimmen und Minimieren der Messunsicherheit. Werkstattstechnik Online (2016)
- [26] Ohlenforst, M.: Model-Based Thermoelastic State Evaluation of Large Workpieces for Geometric Inspection. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Aachen: Apprimus Verlag 2019
- [27] IAK: Arbeitskreis "Präzisionsfertigung von Großbauteilen". <https://www.ik-praezisionsfertigung.de/forschungsprogramm/>, abgerufen am: 02.09.2019Uhr

Repräsentativer Eignungsnachweis für dimensionale Messungen an Medical-Devices mittels Computertomographie

Dipl.-Ing. (FH) **Markus Kron**,
Sanofi-Aventis Deutschland GmbH, Frankfurt

Kurzfassung

Dieses Praxisbeispiel beschreibt die Vorgehensweise zur Durchführung eines Eignungsnachweises für dimensionale Messungen mittels Computertomografie (CT) an einem Medical-Device. Dabei wird die Vorgehensweise der VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] mit dem risikobasierten Ansatz der VDI/VDE 2600 Blatt 1 [2] verknüpft.

Ausgehend von der Prüfprozessbeschreibung, einer durchgeführten Risikoklassifizierung und der Identifikation von Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit wird der Parameterraum für den ausgewählten repräsentativen Prüfprozess festgelegt. Zur Ermittlung der Messunsicherheit U_{MP} werden Wiederholmessungen an einem kalibrierten Referenzwerkstück durchgeführt, die den festgelegten Parameterraum abdecken. Die so ermittelte Messunsicherheit kann für alle neuen Messaufträge herangezogen werden, die sich im definierten Parameterraum bewegen. Dies spart Ressourcen und Zeit bei der Durchführung von Eignungsnachweisen für Evaluierungsprüfungen im Prüflabor.

Abstract

This practical example describes the procedure for carrying out a proof of capability for dimensional measurements by means of computed tomography on a medical device. The procedure of VDI/VDE 2630 Part 2.1 [1] is combined with the risk-based approach of VDI/VDE 2600 Part 1 [2].

Based on the inspection process description, a performed risk classification and the identification of influencing factors on the measurement uncertainty, the parameter space for the selected representative inspection process is defined. In order to determine the measurement uncertainty U_{MP} , repeat measurements are carried out on a calibrated reference workpiece which cover the specified parameter space. The measurement uncertainty determined in this way can be used for all upcoming measurements that fall within the defined parameter space. This saves resources and time in the proof of capability for evaluation tests in the test laboratory.

1 Beschreibung der Ausgangssituation

Ein neu angeschafftes CT soll im Prüflabor zur dimensionalen Vermessung von Medical-Devices und Device-Komponenten bei der Entwicklung neuer und zur Weiterentwicklung vorhandener Produkte eingesetzt werden. Der CT erstellt 2-dimensionale digitale Röntgenaufnahmen eines Prüfobjektes. Aus einer Vielzahl von Röntgenaufnahmen, die während einer 360° Rotation des Werkstücks erstellt werden, erzeugt die Maschine mittels Auswertesoftware ein dreidimensionales und maßstabsgetreues Volumenmodell des Prüfobjektes. Ebenso kann aus den so gewonnenen 3-D Daten ein Oberflächenmodell generiert und geometrische Größen vermessen werden.

Bei der Vermessung von geometrischen Größen muss die Messunsicherheit ermittelt und der Eignungsnachweis des Prüfprozesses erbracht werden. Für die Entwicklung neuer Prüfprozesse existiert eine Sanofi Guideline zur Durchführung von Eignungsnachweisen, die sich an die VDI/VDE 2600 Blatt 1 [2] und die ISO 22514-7 [3] anlehnt.

Erfahrungen zur Durchführung von Eignungsnachweisen für Messprozesse mit einem CT liegen bisher nicht vor. Zudem war die interne Guideline zur Durchführung von Eignungsnachweisen noch relativ neu, sodass auch hier keine umfangreichen Praxiserfahrungen vorlagen. Über eine Normen- und Richtlinien-Recherche sind wir auf die VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] gestoßen. Diese Richtlinie gilt für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren. Sie beschreibt recht praxisnah das Vorgehen zur Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozesseignung bei der Routine-Prüfung von geometrischen Produktmerkmalen mittels Computertomographie.

2 Aufgabenstellung

Der zu etablierende Messprozess dient in erster Linie der Evaluierung von Medizinprodukten sowie deren Komponenten bei der Entwicklung neuer und Weiterentwicklung vorhandener Medizinprodukte. Es handelt sich nicht um Qualitätsprüfungen für Produkt- oder Chargenfrei-gaben.

Bei jeder dimensionalen Messung von Medical-Devices mittels CT soll dem Messergebnis eine Messunsicherheit zugeordnet werden. Bei Prüfungen gegen Spezifikationen soll ein Eignungsnachweis des Prüfprozesses erbracht werden. Der vom CT Hersteller spezifizierte MPE (maximum permissible error) sollte nicht zur Abschätzung der Messunsicherheit des Messprozesses U_{MP} herangezogen werden. Der MPE wird unter Verwendung von Prüfkörpern mit Kugelstäben und damit unter sehr idealisierten Bedingungen ermittelt. Aber gerade in der Computertomografie haben das Material des Prüfobjekts und insbesondere die Kombination unterschiedlicher Materialien, z.B. Metallfeder in einem Kunststoffbauteil auf Grund unterschiedlicher Transmissions- und Absorptionsverhalten einen entscheidenden Einfluss.

3 Vorgehensweise

Es wird ein experimentelles Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit unter Verwendung eines kalibrierten Referenzwerkstücks angewendet, welches sich am Vorgehen der VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] orientiert. Das Vorgehen in der Richtlinie ist allerdings fokussiert auf die Durchführung eines Einzelnachweises für einen Routine Prüfprozess. Um den Aufwand für den Eignungsnachweis bei Evaluierungsprüfungen der Aufgabenstellung und Kritikalität entsprechend im Rahmen zu halten wird der Ansatz eines repräsentativen Eignungsnachweises angewendet. Mit der ausführlichen Messunsicherheitsbetrachtung an einem repräsentativen Referenzwerkstück soll das Ergebnis, die erweiterte Messunsicherheit für den Messprozess U_{MP} , auch für möglichst viele zukünftige Messaufträge verwendet werden können.

Für die repräsentative Ermittlung der Messunsicherheit und die Erbringung des Eignungsnachweises wurde eine Vorgehensweise bestehend aus den nachfolgenden Schritten gewählt:

1. Prüfprozessbeschreibung
2. Risikoklassifizierung
3. Identifikation von Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit
4. Definition des Parameterraums
5. Bestimmung der Messunsicherheit
6. Durchführung des Eignungsnachweises

3.1 Prüfprozessbeschreibung

Als Messsystem kommt der CT im Prüflabor der Entwicklungsabteilung zum Einsatz. Dieser wird durch geschulte Labormitarbeiter betrieben.

Messobjekt ist immer ein Medical-Device bzw. ein Bauteile oder Baugruppe von einem Medical-Device. Die Messobjekte bestehen hauptsächlich aus Kunststoffbauteilen mit ggf. wenigen metallischen Bauteilen.

Die Prüfmethode ist so ausgelegt, dass sie jeweils für Prüfmerkmale aus einer der folgenden 3 Gruppen eingesetzt werden kann:

- Merkmalsgruppe 1: Kleines Längenmaß (<5mm) als Distanz zwischen zwei Bauteilkanten an einem innenliegenden Bauteil im Medical-Device
- Merkmalsgruppe 2: Mittleres Längenmaß (5-80mm) als Distanz zwischen zwei Bauteilkanten an einem innenliegenden Bauteil im Medical-Device
- Merkmalsgruppe 3: Durchmesser (<25mm) an einem innenliegenden Bauteil im Medical-Device

Es wurde ein hinsichtlich Form und Materialeigenschaften repräsentatives Medical-Device ausgewählt. Bei diesem repräsentativen Medical-Device wurde für jede Merkmalsgruppe jeweils ein Prüfmerkmal festgelegt, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Ausgewählte repräsentative Prüfmerkmale für den Eignungsnachweis

	Nominalmaß	Toleranz	Material
Merkmal 1	0,65 mm	$\pm 0,08$ mm	POM
Merkmal 2	32 mm	$\pm 0,20$ mm	POM
Merkmal 3	$\varnothing 6,85$ mm	$\pm 0,05$ mm	Glas

3.2 Risikoklassifizierung

Die Folgen eines fehlerhaften Messergebnisses sind bei Evaluierungsprüfungen mit gering bewertet. Die Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Messergebnisses wurde hingegen mit hoch eingestuft, da nur geringe Erfahrungen in Bezug auf die Messaufgabe vorhanden sind. Aus dieser 2-dimensionalen Risikoklassifizierung (Folgen und Wahrscheinlichkeit) folgte gemäß dem risikobasiertem Ansatz die Notwendigkeit eines repräsentativen Eignungsnachweises für den Prüfprozess, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Risikogerechte Auswahl der Methode zum Eignungsnachweis

Folgen eines fehlerhaften Messergebnisses	Hoch	Einelnachweis	Einelnachweis	Einelnachweis
	Mittel	Repräsentativer Nachweis	Repräsentativer Nachweis	Einelnachweis
	Gering	Prüfmitteleignung	Prüfmitteleignung	Repräsentativer Nachweis
		Gering	Mittel	Hoch
Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Messergebnisses				

3.3 Identifikation der Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit

In einer Teamsitzung mit Betriebsingenieur, Messtechnikingenieur, Technical Compliance Manager und CT Bediener wurden die potenziellen Einflussfaktoren hinsichtlich der Messunsicherheit zusammengetragen. Hilfreich bei der Identifizierung der Einflussfaktoren waren die 5-M der Messtechnik, siehe Bild 1. Die Einflussfaktoren wurden in den Bereichen Messsystem, Mensch, Mitwelt, Messobjekts und Messmethode gesucht.

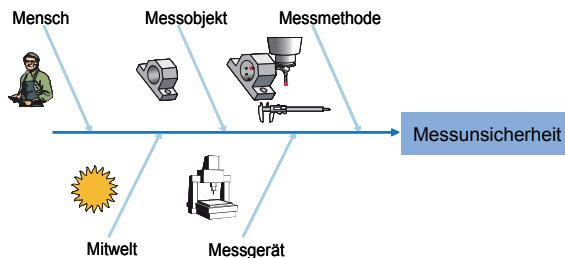


Bild 1: Standard Kategorien von Einflussfaktoren auf den Messprozess

Die identifizierten Einflussfaktoren wurden auf ihre Relevanz hin bewertet und wenn möglich Maßnahmen zur Einflussreduzierung festgelegt. Die folgende Tabelle 3 listet die Einflussfaktoren auf die, nach Umsetzung der Maßnahmen zur Einflussreduzierung, eine mittlere oder hohe Relevanz haben. Die Einflussfaktoren mit geringer Relevanz wurden in der weiteren Messunsicherheitsanalyse nicht berücksichtigt.

Tabelle 3: Einflussfaktoren mit mittlerer oder hoher Relevanz nach Umsetzung der Reduzierungsmaßnahmen

Einflussfaktor Gruppe	Einflussfaktor	Relevanz nach Umsetzung von Maßnahmen
Mensch	Scan und Filter Parameter	Hoch
	Einspannung	Mittel
	Ausrichtung Messobjekt	Mittel
	Benutzererfahrung	Hoch
	Vergrößerung	Hoch
	Brennpunktgröße	Hoch
Messmethode	Messstrategie	Mittel
	Anzahl Messpunkte	Mittel
	Glättungsfilter	Mittel
	Ausrichtung	Mittel

3.4 Definition des Parameterraums

Ausgehend von den identifizierten Einflussfaktoren wurde der Parameterraum für den repräsentativen Eignungsnachweis definiert. Dieser Schritt ist elementar. Denn zum einen hat dieser repräsentative Eignungsnachweis Gültigkeit für alle zukünftigen Messungen, die sich in

diesem Parameterraum befinden und zum anderen gibt der Parameterraum die Grenzen vor, die im Rahmen der Messunsicherheitsbetrachtung untersucht werden.

Ein großer Parameterraum ermöglicht es den repräsentativen Eignungsnachweis für viele unterschiedliche neue Messaufträge heranzuziehen und damit Ressourcen und Zeit zu sparen.

Auf der anderen Seite erhöht sich die Messunsicherheit mit zunehmendem Parameterraum, sodass der repräsentative Eignungsnachweis ggf. nicht mehr erbracht werden kann.

3.5 Ermittlung der Messunsicherheit

Die Ermittlung der einzelnen Unsicherheitsbeiträge erfolgt durch Wiederholmessungen an einem kalibrierten Referenzwerkstück.

Die Durchführung gliedert sich in die folgenden 4 Schritte:

1. Kalibrierung der Merkmale mit einem Koordinaten Messgerät (KMG)
2. Wiederholmessungen der Merkmale mit dem CT
3. Messunsicherheit bedingt durch Werkstoffeigenschaften
4. Berechnung der erweiterten Messunsicherheit

3.5.1 Merkmalskalibrierung mit KMG

Das Medical-Device, welches als Referenzwerkstück verwendet wird, wurde so modifiziert, dass es in seine Einzelbauteile zerlegbar ist. Die 3 repräsentativen Merkmale konnten somit im zerlegten Zustand an den Einzelbauteilen mit einem Koordinaten Messgerät kalibriert werden.

3.5.2 Wiederholmessung mit dem CT

Alle 3 kalibrierten Merkmale des zusammengebauten Referenzwerkstücks werden mit dem CT wiederholt vermessen. Die Wiederholmessungen werden unter unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. Dabei werden die identifizierten Einflussfaktoren (siehe Tabelle 3) variiert, sodass der definierte Parameterraum in den Wiederholmessungen ausgenutzt wird. Viele Einflussfaktoren sind der Gruppe *Mensch* zugeordnet. Die Wiederholmessungen werden aus diesem Grund mit 3 verschiedenen Bedienern durchgeführt werden. Mit dieser Vorgehensweise werden 21 Messwerte pro Merkmal erfasst und damit die Empfehlung der VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] zur Durchführung von mind. 20 Wiederholungsmessungen umgesetzt.

Die Standardmessunsicherheit aus dem Messprozess (u_p) wird als Standardabweichung aus den Messwerten der Wiederholprüfung gemäß Gleichung (9) der VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] bestimmt.

Zum Redaktionsschluss des VDI Tagungsbands lagen die Messergebnisse der Wiederholmessung am CT leider noch nicht vor. Die Ergebnisse können nach der Fachtagung aus den Vortragsfolien entnommen werden.

3.5.3 Messunsicherheiten durch Werkstoffeigenschaften

Weitere Beiträge zur erweiterten Messunsicherheit des Messprozesses können sich aus der Variation der Werkstückeigenschaften aufgrund von Material- und Produktionsschwankungen ergeben. Sie werden unter der Standardmessunsicherheit u_w zusammengefasst. Nach VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] setzt sich die Standardmessunsicherheit u_w hinsichtlich Form und Materialeigenschaften mindestens aus u_{w1} und hinsichtlich der Wärmeausdehnung bezogen auf die Bezugstemperatur von 20°C aus u_{w2} zusammen.

Auf Grund der geringen Folgen eines fehlerhaften Prüfentscheids werden bei Evaluierungsmessungen die folgenden Vereinfachungen angenommen:

- Das verwendete kalibrierte Referenzwerkstück wird hinsichtlich Form und Materialeigenschaften als ausreichend repräsentativ angesehen, daher kann die Unsicherheitskomponente u_{w1} vernachlässigt werden.
- Der CT verfügt über eine klimatisierte Messkabine. Diese Messkabine wird auf die Referenztemperatur von 20°C geregelt und Prüfobjekte in der Messkabine vor der Messung akklimatisiert. Somit kann auch die Unsicherheit bezüglich der Wärmeausdehnung u_{w2} vernachlässigt werden.

Der Messunsicherheitsbeitrag hinsichtlich Form und Materialeigenschaften wird bei Evaluierungsmessungen somit vernachlässigt.

3.5.4 Erweiterte Messunsicherheit (U_{MP})

Die Unsicherheitsbeiträge, die in die Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit U_{MP} einfließen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit des Messprozesses (U_{MP}) wird die kombinierte Messunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor k multipliziert. Es wird ein k -Faktor von 2 (~ 95% Vertrauensniveau) verwendet.

Tabelle 4: Messunsicherheitsbudget für den Messprozess

Messunsicherheitsbeitrag		Berechnung
Standardmessunsicherheit der Kalibrierung Referenzwerkstück	u_{cal}	$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k}$ (1)
Standardmessunsicherheit aus dem Messprozesses	u_p	$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ (2)
Standardmessunsicherheit in Folge eines systematischen Fehlers	u_{BI}	$u_{BI} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \bar{y}_p - y_{cal} $ (3)
Kombinierte Messunsicherheit	u_{MP}	$u_{MP} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_{BI}^2}$ (4)
Erweiterte Messunsicherheit des Messprozesses	U_{MP}	$U_{MP} = k \cdot u_{MP}$ (5)

Die erweiterte Messunsicherheit wird für jedes der 3 repräsentativen Prüfmerkmale ermittelt und kann zukünftig für Evaluierungsmessungen, die dem jeweiligen Parameterraum entsprechen, verwendet werden.

Zum Redaktionsschluss des VDI Tagungsbands lagen die Messergebnisse der Wiederholmessung am CT leider noch nicht vor. Somit konnte die erweiterte Messunsicherheit auch noch nicht berechnet werden. Nach der Fachtagung kann die erweiterte Messunsicherheit je Merkmal aus den Vortragsfolien entnommen werden.

3.6 Durchführung des Eignungsnachweises

Für den Nachweis der Prüfprozesseignung wird der Eignungskennwert Q_{MP} wie folgt berechnet

$$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{T} \leq Q_{MP,max} \quad (6)$$

Die Eignung ist gegeben, wenn der Eignungskennwert Q_{MP} den Eignungsgrenzwert $Q_{MP,max}$ nicht überschreitet. Der Eignungsgrenzwert von $Q_{MP,max} = 0,20$ wurde basierend auf der jeweiligen Toleranzklasse des Merkmals entsprechend der Empfehlung der VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [1] festgelegt.

Der Eignungskennwert für die 3 repräsentativen Merkmale konnte noch nicht berechnet werden, da die Messergebnisse der Wiederholmessung am CT leider noch nicht vorlagen. Nach der Fachtagung kann der Eignungsnachweis je Merkmal aus den Vortragsfolien entnommen werden.

Literaturangaben

- [1] VDI/VDE 2630 Blatt 2.1:2015-06: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozesseignung von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren
- [2] VDI/VDE 2600 Blatt 1:2013-10: Prüfprozessmanagement – Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweis von Prüfprozessen
- [3] ISO 22514-7:2012-09: Statistical methods in process management – Capability and performance – Part 7: Capability of measurement processes

Messunsicherheit bei Härteprüfungen

Dipl.-Ing. (FH) **C. Weißmüller, C. Sieg**, IfEP GmbH, Marl

Kurzfassung

Aufbauend w den Forderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 hat sich in den letzten Jahren die Bestimmung der Messunsicherheit zu einem wichtigen Aspekt der Laborarbeit entwickelt. Akkreditierungsstellen fordern für jedes Prüfgebiet aussagekräftige Modelle und Beispielrechnungen. Eine große Zahl der Betroffenen verfügt jedoch nicht über die ausreichende Kompetenz, diese Forderungen sinnvoll in praktische Ergebnisse umzusetzen. Das kann an einer Vielzahl von Beispielen aus Eignungsprüfungen gezeigt werden. Auch 20 Jahre nach Einführung der DIN EN ISO/IEC 17025 sind immer noch Defizite in der Umsetzung vorhanden, obwohl alle aktuellen Normen in der Werkstoffprüfung einen dokumentierten Ansatz zur Abschätzung der Messunsicherheit beinhalten.

1. Einleitung

Die Angabe und Berechnung der Messunsicherheit stellt viele Laboratorien des mechanisch-technologischen Prüfsektors vor erhebliche Schwierigkeiten. In der Werkstoffprüfung sind die Angaben zur Messunsicherheit immer noch nicht praxisrelevant - zu groß sind die Spannen der zulässigen Werkstoffkennwerte und die in der Konstruktionstechnik eingesetzten Sicherheitsbeiwerte. Die Zahl der nach DIN EN ISO / IEC 17025 „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“ [1] akkreditierten Werkstoffprüflaboratorien steigt ständig an und ist als Kompetenznachweis dem Kunden gegenüber beinahe unabdingbar. Die DIN EN ISO / IEC 17025 [1] fordert seit der ersten Veröffentlichung im Jahr 2000 vom Labor in jedem Fall die Erarbeitung des Themas „Messunsicherheit“. Akkreditierungsstellen verlangen, auch auf dem mechanisch-technologischen Prüfsektor, den entsprechenden Kompetenznachweis in Form von Arbeitsanweisungen und Berechnungsbeispielen zur Messunsicherheitsbestimmung.

Für mechanisch-technologische Prüfverfahren sind immer mehr Modelle zur Angabe und Berechnung der Messunsicherheit verfügbar. Im Rahmen der Normung von Prüfverfahren wird versucht, dem Labor Lösungswege zum Thema Messunsicherheit aufzuzeigen. Die 2006 veröffentlichten Normreihen zur Härteprüfung kann als Meilenstein auf dem Gebiet der genormten Berechnung der Messunsicherheit angesehen werden. Obwohl in der Zwischen-

zeit überarbeitet, stellen die dort gezeigten Modelle in ihrer ursprünglichen Form immer noch den Stand der Technik dar. Diese Entwicklung setzt sich zurzeit auch im Bereich des Zugversuchs fort.

Aktuell kann der Wissensstand der Prüflaboratorien in Eignungsprüfungen abgefragt werden. Nach der Theorie und den von Begutachtern im Rahmen der Akkreditierung und Überwachung von Prüflaboratorien eingesehenen Unterlagen muss jedes Prüflabor in der Lage sein, auf Kundenwunsch die Messunsicherheit eines Prüfergebnisses anzugeben. Eignungsprüfungsanbieter, wie das Institut für Eignungsprüfung (IfEP GmbH) in Marl, fragen daher im Rahmen von Eignungsprüfungen die geschätzte oder berechnete Messunsicherheit von den Teilnehmern ab. Zudem besitzen sie langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Berechnung von Messunsicherheiten. Unter Ausnutzung dieser Daten können Eignungsprüfungsanbieter dem Labor Hilfestellung bei der Wahl eines geeigneten Modells geben und so die Erfüllung von behördlichen oder durch Akkreditierungsstellen vorgegebenen Anforderungen erleichtern. Weiterhin kann überprüft werden, ob belastbare Kriterien gefunden werden können, die die Messunsicherheit mit in die Leistungsbewertung einer Eignungsprüfung einbeziehen.

2. Messunsicherheit im Zugversuch / TTSR-2018-UM

Das Institut für Eignungsprüfung (IfEP) veranstaltete im Jahr 2018 eine Eignungsprüfung für das Prüfgebiet Zugversuch Stahl an Rundproben bei Raumtemperatur (TTSR-2018-UM). Grundlage war die DIN EN ISO 6892-1 [2]. Das Teilnehmerfeld umfasste 117 Laboratorien, die in 20 Staaten beheimatet sind. 90 Teilnehmer gaben an, zum Zeitpunkt der Eignungsprüfung eine Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 zu besitzen. Im Rahmen der Eignungsprüfung wurden die Kennwerte Streckgrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , Bruchdehnung A , Bruch einschnürung Z bewertet. Die Bestimmung des „Elastizitätsmoduls“ aus dem Zugversuch wurde informativ dargestellt. Es ergaben sich für die einzelnen Prüfgrößen die in Tabelle 2 zusammengestellten Resultate.

Tabelle 2: Ergebnisse der Eignungsprüfung TTSR-2018-UM [3]

Kennwert	Anzahl TN	Erfolgreiche Ergebnisse
Streckgrenze $R_{p0,2}$	115	97 %
Zugfestigkeit R_m	117	96 %
Bruchdehnung A händisch	72	89 %
Bruchdehnung A Extensometer	111	95 %
Bruchhinschnürung Z	114	97 %

Berechnung der Messunsicherheit im Zugversuch nach CWA 15261-2 [4]

Die Messunsicherheit aller Prüfgröße lässt sich auf Basis des Workshop Agreement CWA 15261-2 [4] abschätzen. Beispielhaft soll hier das Modell zur Bestimmung der Messunsicherheit für den Parameter Zugfestigkeit U_{Rm} dargestellt werden (Gleichung (2)).

$$U_{Rm} = k * \sqrt{\left(\frac{1}{S_0}\right)^2 u_F^2 + \left(-\frac{F}{S_0^2}\right)^2 u_{S_0}^2} \quad (2)$$

mit

k Erweiterungsfaktor (z.B. $k = 2$ für eine Aussagesicherheit von 95%)

u_{S_0} Standardmessunsicherheit des Probenquerschnitts S_0

u_F Standardmessunsicherheit der Prüfkraft F

Für die Berechnung von U_{Rm} nach Gleichung (2) wird $k=2$ gesetzt, man erhält so eine Aussagesicherheit von ca. 95 % [4]. Zusätzlich wurde die Unsicherheit für jeden ermittelten Parameter von den Teilnehmern abgeschätzt. Bei einer Gegen-überstellung mit den vom Veranstalter berechneten Unsicherheiten liegen die Werte für den Kennwert U_{Rm} auf einem vergleichbaren Niveau. Die Schätzungen der Laboratorien liegen im Mittel bei 1,5 %. Die errechneten Messunsicherheiten reichen von 1,2 % bis 2,0 %. Der Median aller berechneten Messunsicherheiten, der ein Maß für die mittlere Messunsicherheit des Verfahrens zur Bestimmung der Zugfestigkeit R_m darstellt, beträgt 1,3 %. Die Ergebnisse sind in Bild 1 zusammen gefasst.

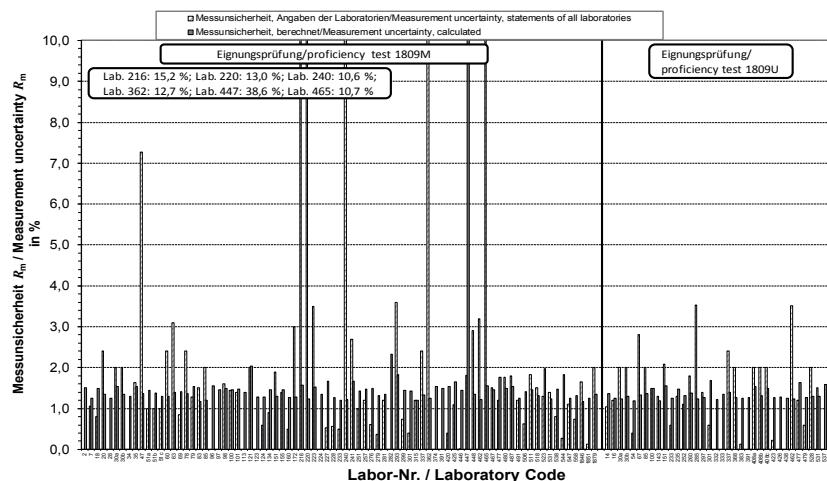


Bild 1: Messunsicherheit R_m , Gegenüberstellung Angaben der Teilnehmer / Berechnung durch den Veranstalter

3. Messunsicherheit in der Härteprüfung / Eignungsprüfung Vickers 2012

Mit der Veröffentlichung der Normenreihe zur Härteprüfung nach Vickers DIN EN ISO 6507 [5, 6] im März 2006, hat die Berechnung der Messunsicherheit bereits sehr früh nach Veröffentlichung der DIN EN ISO/IEC 17025 Einzug in die technischen Regelungen zu diesem Härteprüfverfahren genommen.

Im Zuge der Revision der einschlägigen Normen zur Härteprüfung ab 2015 wurden weitere Modelle zur Berechnung der Messunsicherheit eingeführt. Diese werden allerdings von den entsprechenden Fachabteilungen der Physikalisch-technischen Bundesanstalt (PTB) sowie der Materialprüfungsanstalt NRW (MPA NRW) aus fachlicher Siecht abgelehnt und deshalb hier nicht weiter betrachtet.

Auf der Basis der vom Institut für Eignungsprüfung organisierten Eignungsprüfung Vickers HV 10 / HV 30-2012 (1201b) steht eine Datenvielzahl zur Anwendung der akzeptierten MU-Modelle zur Verfügung. Das internationale Teilnehmerfeld dieser Eignungsprüfung umfasste 159 Laboratorien, von denen 131 Teilnehmer angaben, zum Zeitpunkt der Prüfung eine Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 zu besitzen. Die Teilnehmer erhielten eine Härtevergleichsplatte (ca. 450 HV 10 / HV 30) sowie eine Materialprobe, um anschließend die Messunsicherheit zu berechnen. Als Bewertungsparameter wurden die Grenzabweichung E und Wiederholpräzision r gemäß den Grenzen aus der DIN EN ISO 6506-2 [6] für das Härteneiveau herangezogen [4]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle1: Ergebnisse der Eignungsprüfung Vickers HV 10 / HV 30-2012 [7]

	Ergebnisse	Erfolgreiche Ergebnisse
Grenzabweichung HV 10	162	83 %
Wiederholpräzision HV 10	162	92 %
Grenzabweichung HV 30	139	83 %
Wiederholpräzision HV 30	139	97 %

Messunsicherheit Methode 1, DIN ISO 6507-1:2006 [5]

Um die Unsicherheit einer Messung gemäß Methode 1 der DIN EN ISO 6507-1 zu berechnen, sind von den Teilnehmern fünf Messungen auf einer Härtevergleichsplatte und fünf Messungen auf unpräpariertem Probenmaterial durchgeführt worden. Unsicherheiten durch das Probenmaterial und durch das Präparationsverfahren gehen damit in die Unsicherheitsbetrachtung ein. Die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit U erfolgt nach Gleichung (1).

$$U = k * \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_{\bar{H}}^2 + u_x^2 + u_{ms}^2} \quad (1)$$

mit

k Erweiterungsfaktor (z.B. $k = 2$ für eine Aussagesicherheit von 95%)

u_E Standardmessunsicherheit aus der Grenzabweichung (1σ) der Härteprüfmaschine

u_{CRM} Standardmessunsicherheit der Härtevergleichsplatte

$u_{\bar{H}}$ Standardmessunsicherheit der Härteprüfmaschine bei Messung auf der Härtevergleichsplatte

u_x Standardmessunsicherheit bei der Prüfung eines Probematerials

u_{ms} Standardmessunsicherheit der Härteprüfmaschine aufgrund des kleinsten Messschrittes

Auf Basis der Eignungsprüfungsdaten wurde die erweiterte Messunsicherheit mit $k = 2$ (Aussagesicherheit annähernd 95 %) für jedes teilnehmende Labor berechnet, vorausgesetzt, es machte Angaben zum kleinsten Messschritt. Der Median der berechneten erweiterten Messunsicherheiten beträgt 2,4 % (Verfahren HV 10).

Der minimale Betrag der erweiterten Messunsicherheit wird durch die Summe der unveränderlichen Faktoren u_E , u_{CRM} und u_{ms} gebildet und liegt bei 2,3 %. Der maximale Betrag beträgt 3,8 % [7]. In Bild 2 sind die Ergebnisse der Messunsicherheitsberechnung aufgezeigt.

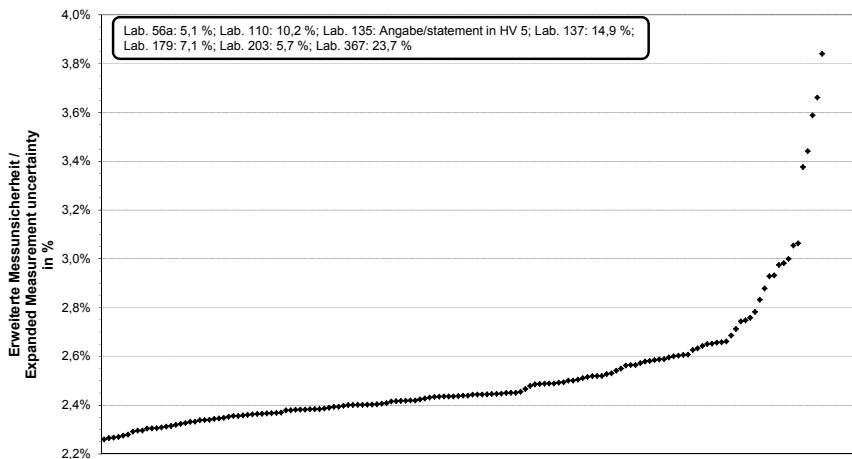


Bild 2: HV 10: Unsicherheit ($k=2$), Berechnet durch den Veranstalter [7]

Zeitgleich wurden die Teilnehmer nach ihrer Einschätzung der erweiterten Messunsicherheit gefragt, die Angaben konnten geschätzt werden oder auf Berechnungen basieren. Bild 3 stellt die Ergebnisse dar. Während der Median der Angaben auf einem vergleichbaren Niveau liegt, unter- und überschätzen ein Teil der Teilnehmer die Höhe der erweiterten Messunsicherheit.

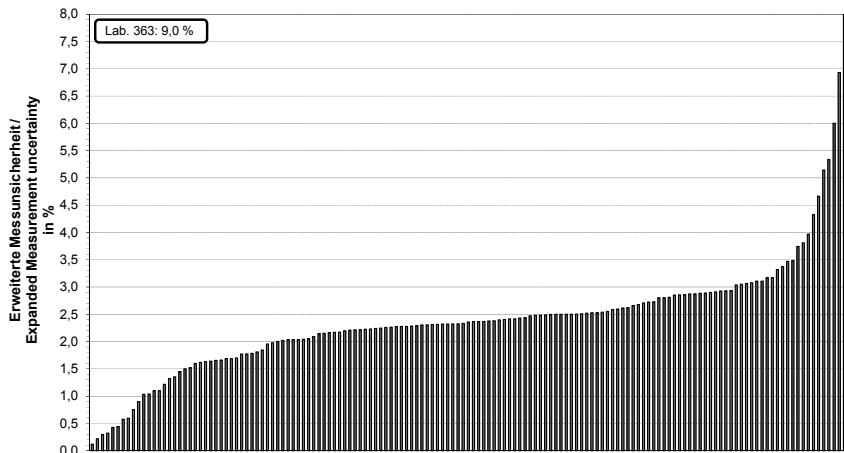


Bild 3: HV 10: Unsicherheit ($k=2$), Angaben der Teilnehmer [7]

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Messunsicherheitsbetrachtung gewinnt zunehmend an Bedeutung im Bereich der mechanisch-technologischen Werkstoffprüfung. Mit der Veröffentlichung von revidierten Prüfnormen haben Modelle zur Berechnung der Messunsicherheit ihren Platz im standardisierten Regelwerk gefunden. Daten aus Eignungsprüfungen helfen bei der Validierung dieser Modelle und geben dem Anwender, dem Prüflabor, die Möglichkeit, einen Überblick über Relevanz und Gewichtung der berechneten Unsicherheiten zu erlangen. Zukünftig können Eignungsprüfungen dazu dienen, den Laboratorien kontinuierlich ihre erreichbare Messunsicherheit zu verifizieren.

5. Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO/IEC 17025:2000, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. Beuth Verlag, Berlin, März 2000 (zurückgezogen)
- [2] DIN EN ISO 6892-1:2017, Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2016. Beuth Verlag, Berlin, Februar 2017
- [3] Eignungsprüfung: Zugversuch Stahl Rundproben – TTSR-2018-UM, Abschlussbericht. Institut für Eignungsprüfung IfEP GmbH, Marl 2019
- [4] CWA 15261-2:2005: Measurement uncertainties in mechanical tests on metallic materials - Part 2: The evaluation of uncertainties in tensile testing, BSI British Standards, London, 2005
- [5] DIN EN ISO 6507-1:2006, Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers Teil 1: Prüfverfahren. Beuth Verlag, Berlin, März 2006 (zurückgezogen)
- [6] DIN EN ISO 6506-2:2006, Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers Teil 2: Prüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen. Beuth Verlag, Berlin, März 2006 (zurückgezogen)
- [7] Eignungsprüfung: Härteprüfung nach Vickers – HV 10 / HV 30-2012, Abschlussbericht. Institut für Eignungsprüfung IfEP GmbH, Marl 2012



Mess- und
Automatisierungstechnik



ISBN 978-3-18-092365-9

Bildquelle: © Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH