

Whitepaper

Metrologische Bewertung von Normalen in der Rückführung

Abstract

Dieses Dokument beschreibt die Bewertung eingesetzter Messmittel bei der Rückführung von Messergebnissen und der Bestimmung der Messunsicherheit. Es wird nach individuellen Bewertungen unter Auswertung von Kalibrierscheinen und pauschalen Bewertungen unter Nutzung der Gerätespezifikationen unterschieden. Es wird aufgezeigt, welche Informationen in den jeweiligen Fällen zu berücksichtigen sind. Die Spezifikationsdarstellungen der Hersteller werden zudem ausführlich behandelt.

Auch sonstige Eigenschaften der Messmittel mit Relevanz für die Ermittlung der Messunsicherheit werden behandelt.

Das Whitepaper behandelt ausschließlich metrologische Eigenschaften der Messmittel. Sonstige Aspekte werden nicht angesprochen.¹

This document describes the evaluation of the measuring equipment used in the traceability of measurement results and the determination of measurement uncertainty. A distinction is made between individual assessments using evaluation of calibration certificates and general assessments using the device specifications. It shows which information needs to be taken into account in each case. The manufacturer's specifications are also discussed in detail. Other properties of the measuring equipment that are relevant to determining the measurement uncertainty are also discussed. The white paper exclusively deals with metrological properties of the measuring equipment. Other aspects are not addressed.

Intention

Es wird zunehmend schwieriger und komplexer, aus Herstellerinformationen zu Messmittel belastbare Aussagen zu den metrologischen Eigenschaften ableiten zu können. Zudem ist in vielen Fällen die Darstellung der Spezifikationen – auch namhafter Hersteller – alles andere als interpretationsfrei.

Für die Rückführung von Messergebnissen ist es aber unerlässlich, die Eigenschaften der eingesetzten Messmittel hinreichend genau zu kennen.

Das Laboratorium muss sicherstellen, dass die Einrichtungen die festgelegten Anforderungen erfüllen, bevor sie in Betrieb oder erneut in Betrieb genommen werden.

Zitat aus →  DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [1], Pkt. 6.4.4

Und nachfolgend unter 6.4.5:

Die für die Messungen genutzten Einrichtungen müssen geeignet sein, die zur Bereitstellung eines validen Ergebnisses erforderliche Messgenauigkeit und/oder Messunsicherheit zu erreichen.

Zitat aus →  DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [1], Pkt. 6.4.5

Normative Forderungen

Aus diversen Punkten der Norm „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“, DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [1] ergeben sich Forderungen, die Eigenschaften der bei Messungen und Prüfungen eingesetzten Messmittel verlässlich zu kennen und zu belegen. Beispielsweise steht unter Punkt 6.4.4 die Forderung, dass die Eigenschaften der Messmittel festgelegt sein müssen:

Zur Feststellung der Messmitteleignung müssen die Eigenschaften zweifelsfrei (aus den Spezifikationsangaben) bekannt sein, damit die Messunsicherheit² der Messergebnisse bestimmt werden kann.

Weiterhin folgt unter 6.4.6 die Forderungen nach regelmäßigen Kalibrierungen und Sicherstellung der Rückführung der Messgrößen.

¹ Die im Whitepaper benutzten Zahlenbeispiele stammen aus realen Spezifikationsangaben, die aus Gründen der Objektivität verallgemeinert wurden.

² **Messunsicherheit** ist nach dem Wörterbuch der Metrologie, VIM [9], Pkt. 2.2.6: „Nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der benutzten Informationen beigeordnet ist.“. Dies bedeutet, dass die Messunsicherheit der Messung als Vorgang und nicht einem Messmittel oder dem Kalibriergesamt zuzuordnen ist.

Die metrologischen Eigenschaften der Messmittel liefern elementare Beiträge bei der Ermittlung der Messunsicherheit eigener Messungen. Das diese vollumfänglich zu ermitteln sind, geht aus Punkt 7.6.1 hervor:

Laboratorien müssen die Beiträge zur Messunsicherheit ermitteln. Bei der Ermittlung der Messunsicherheit müssen alle Beiträge, die von Bedeutung sind, in Betracht gezogen werden (...). Angemessene Auswertungsverfahren sind zu verwenden.

Zitat aus → DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [1], Pkt. 7.6.1

Dies bedeutet, dass es nicht ausreichend ist, einfach die von Herstellern genannten Spezifikationen zu übernehmen. Gegebenenfalls sind zusätzliche Eigenschaften zumindest zu bewerten.

Schließlich fordert die für akkreditierte Laboratorien verbindliche Schrift der European Accreditation EA-4/02 M.2022:

Die Unsicherheitsanalyse einer Messung – häufig auch Messunsicherheitsbilanz genannt – sollte eine Liste aller Quellen für die Unsicherheit während der Messung zusammen mit den zugehörigen Standardmessunsicherheiten und eine Angabe enthalten, wie sie ermittelt wurden.

Zitat aus → EA-4/02 M.2022 [2], Pkt. 4.8

Hieraus ist zu folgern, dass alle Quellen der Unsicherheit, oder die Einflussgrößen zusammenzustellen und ihre Ermittlung beschreiben sind. Eine pauschale Auflistung ist nicht ausreichend. Dem entsprechend detailliert müssen Messmitteleigenschaften – beispielsweise aus den Spezifikationen – ermittelt werden.

Ansätze der Bewertung

Ausgangspunkt der Bewertung der metrologischen Eigenschaften von Messmitteln ist immer eine belastbare Statusfeststellung durch eine Kalibrierung oder Prüfung.

Dies gilt auch dann, wenn das Messmittel über Spezifikationen und nicht über die Ergebnisse der Kalibrierung bewertet werden sollen.

Prinzipiell kann man zwischen einem individuellen und einem pauschalen Ansatz wählen:

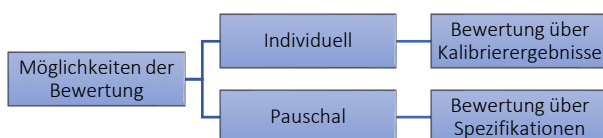


Abbildung 1: Möglichkeiten der Bewertung von Messmittel

Der individuelle Ansatz

Beim individuellen Ansatz werden nach jeder Kalibrierung der Messmittel die Kalibrierergebnisse ausgewertet. Somit erhält man ein individuelles und zeitlich aktuelles Bild zu jedem Messmittel. Mit einem derart beschriebenen Messmittel sind kleinere Unsicherheiten³ erzielbar, als wenn man die Spezifikationen der Hersteller zur Beschreibung der Eigenschaften pauschal heranzieht.

Zudem können und sollen nach Möglichkeit Anzeigeabweichungen und Abweichungen in der Realisierung von Messgrößen korrigiert werden, bevor diese auf ein Messergebnis einen Einfluss ausüben.⁴

Nachteilig ist der hohe Aufwand, der mit der regelmäßigen Auswertung aller Kalibrierergebnisse verbunden ist.⁵

Der pauschale Ansatz

Hingegen bietet der Ansatz, Herstellerspezifikationen oder eigene Spezifikationen zu nutzen, den Vorteil, dass man einmalig Grenzwerte für die Eigenschaften der Messmittel annehmen kann, die sich bei regelmäßiger metrologischer Bestätigung – sprich: Kalibrierung – nicht ändern werden. Somit betrachtet man die Eigenschaften der Messmittel einmalig und pauschalisiert im Rahmen der Inbetriebnahme der Messmittel. Anschließend bleiben diese Annahmen unverändert, solange kein Anlass für eine Neubetrachtung vorliegt.

Der pauschale Ansatz erlaubt keine so kleinen Messunsicherheiten, wie die individuelle Bewertung der Messmittel, weil die im Kalibrierschein beschriebene Abweichungen von den Nennwerten nicht korrigiert werden.

Die anzunehmenden Grenzen der Eigenschaften der Messmittel sind üblicherweise größer als die Herstellerspezifikationen oft suggerieren. Die einfache Übernahme der Herstellerspezifikationen ist regelmäßig nicht korrekt.

Die Gründe hierfür werden nachfolgend erläutert.

Bewertung über Ergebnisse von Kalibrierungen

Kalibrierungen sind Momentaufnahmen unter definierten Messbedingungen. Die im Rahmen der Kalibrierung festgestellten Eigenschaften der Messmittel haben entsprechend eng definierte Gültigkeit.

³ In diesem Dokument wird – der Einfachheit halber – pauschal von Messunsicherheit oder **Unsicherheit** gesprochen, auch wenn in der Praxis die **erweiterte Messunsicherheit** von primärem Interesse ist. Die sachgerechte Erweiterung der Angabe auf eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 2σ für metrologische Zwecke wird angenommen.

⁴ Das JCGM 100:2008, „GUM“ [10] oder EA-4/02 M.2022 [2] fordern die Korrektur systematischer Abweichungen, bevor die entsprechenden Einflussgrößen in die

Messunsicherheitsbilanzen eingebracht werden. In der Praxis ist es aber oftmals der Fall, dass Gründe, wie Zeitaufwand oder technische Einschränkungen dies nicht immer erlauben.

⁵ Der Autor hat die Hoffnung, dass sich mittelfristig mit der Einführung des Digitalen Kalibrierscheins (DCC) dieser Aufwand deutlich reduzieren lässt.

Kalibrierungen gelten ...	Nicht enthalten sind ...
... ausschließlich zum Zeitpunkt der Kalibrierung	... Informationen über das zukünftige Verhalten (Drift)
... nur an den explizit dargestellten Punkten	... eine Verallgemeinerung für Bereiche oder Kennlinien
... unter den vorgegebenen Messbedingungen	... Informationen zu geänderten Messbedingungen, wie die Umgebungstemperatur
... nur bei bestimmten Geräteeinstellungen	... Verhalten bei anderen Einstellungen
... nur bei Verwendung der Ausstattung, welche im Rahmen der Kalibrierung verwendet wurde	... Änderung von Ausstattung, wie Konnektoren, Kabel oder Adapter

Tabelle 1: Informationen und Gültigkeit von Kalibrierungen

Unsicherheit der Feststellung

Die bei der Kalibrierung des Messmittels ermittelte Unsicherheit ist in die eigenen Messunsicherheitsbilanzen zu übernehmen.

Relevanz für die Messunsicherheit: Sollte das Messmittel an Punkten eingesetzt werden, zu denen keine Kalibrierergebnisse vorliegen, sind zunächst die Unsicherheiten des nächstkleineren oder des nächstgrößeren Stützpunktes zu berücksichtigen. Ein zusätzlicher Beitrag ist für die Linearität der Kennlinie des Messmittels zu berücksichtigen⁶.

Die den Kalibrierergebnissen des Messmittels zugeordneten erweiterten Messunsicherheiten liegen üblicherweise mit Normalverteilung und einem Wahrscheinlichkeitsdichteniveau von annähernd 95 Prozent (2σ) vor⁷. Zur Anwendung in eigenen Messunsicherheitsbilanzen ist der auf 1σ normierte Beitrag zu berücksichtigen.

Bewertung über Spezifikationen

Sollten Messmittel über ihre Spezifikationen an Stelle der Kalibrierergebnisse bewertet werden, entbindet dies nicht von der regelmäßigen Bestätigung der Einhaltung der Spezifikationen.

Dies geschieht im Rahmen von regelmäßigen Kalibrierungen.

Was sind Spezifikation

Spezifikationen sind festgelegte Eigenschaften beliebiger Art. In der Metrologie legen Spezifikationsgrenzen den Spezifikationsbereich fest, innerhalb dessen sich die messtechnischen Eigenschaften eines Messmittels bewegen dürfen.

Prinzipiell kann jeder – gemäß seinen Anforderungen – Spezifikationen definieren. Berechtigtes Interesse an der Festlegung der Spezifikationen können beispielsweise haben:

- Gesetzgeber
- Normungsgremien und Überwachungsbehörden
- Hersteller

- Anwender
- Kunde

Wie werden Spezifikationen festgelegt

Die Festlegungen erfolgen aus unterschiedlichen Intentionen heraus.

Aus metrologisch/statistischer Betrachtung der Messmittel

Die Eigenschaften der Messmittel können durch Erprobungsmessungen ermittelt und statistisch ausgewertet werden. Man gelangt zu fundierten Kenntnissen, welche Messabweichungen und sonstige relevante Eigenschaften das Messmittel hat. Anschließend legt man ein „Vertrauensmaß“ fest, welches angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit angenommene Grenzen eingehalten werden. Je nach Firmenphilosophie liegt das Vertrauensniveau meistens zwischen 90 Prozent und 99 Prozent.

Für den Kunden bedeutet dies, dass bei Inverkehrbringung des Messmittels dieses mit der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit die zugesicherten Produktspezifikationen einhält. Nichtsdestotrotz erfüllen nicht alle Messmittel die festgelegten Spezifikationsgrenzen.

Rekursiv aus einem Anwendungsprofil heraus

Manchmal steht eine Anforderung aus einer Anwendung heraus am Beginn der Festlegung von Spezifikationen. Dann definiert man Grenzen rekursiv aus den Praxisanforderungen. Diese Anforderungen werden auf Messmittel angewendet, welche vermutlich in der Lage sind, den Spezifikationen zu genügen. Die Annahmen müssen nachträglich – wiederum durch Kalibrierungen – bestätigt werden.

Beispiel: Eine Flugzeugwiegeanlage misst an drei Auflagepunkten die Masse eines Flugzeugs, indem das Flugzeug über Stützen auf Kraftmessdosen aufgesetzt wird. Der Flugzeughersteller gibt vor, innerhalb welcher Spezifikationsgrenzen die Masse des Flugzeugs zu bestimmen ist. Die Messeinrichtungen werden nach diesen Anforderungen mit marktverfügbaren Kraftmessdosen aufgebaut. Über das Anforderungsprofil „Spezifikation des Flugzeugs“ in Verbindung mit einem vorgegebenen Messverfahren kann abgeleitet werden, welche minimalen Eigenschaften die Wiegeanlage zu erfüllen hat.

Aus marktpolitischen Gründen

Durch Marktbeobachtung weiß ein Messmittelhersteller, welche Eigenschaften die Geräte der Mitbewerber haben (sollen). Es wird vorgegeben, dass die eigenen Messmittel besser sind(!). Also werden manchmal realitätsferne Spezifikationen festgelegt. Diese können einerseits durch diverse Tricks, wie Fragmentierung⁸ der Eigenschaftsdarstellung, Änderung von Vertrauensniveaus⁹, relative Spezifikationen, oder ähnliche Verfahren ver-

⁶ → Linearität, Seite 9

⁷ Üblicherweise spricht man dann von einem Überdeckungsfaktor von $k = 2$.

⁸ → Fragmentierte Spezifikationen, die erst zusammengestellt werden müssen, Seite 7

⁹ → Spezifikationsangaben mit Verteilfunktion und Vertrauensniveau, Seite 7

schleiert werden.¹⁰ Alternativ lässt man auch Annahmen ohne realen Bezug, aber dem Vertrieb dienen, einfach stehen.

Beispiel: Der Markt für elektrische Standardmessmittel ist gut durch etablierte Firmen abgedeckt. Ein neuer Mitspieler aus Fernost möchte sich ein Stück von diesem Kuchen sichern. Es gilt die alte Weisheit der Betriebswirtschaft: ein neues Produkt muss mindestens zwanzig Prozent besser oder günstiger sein, als etablierte Produkte, um überhaupt wahrgenommen zu werden. Als kleine Firma funktioniert der Weg über den Preis nicht. Also muss er sein Produkt besser machen (oder als solches beschreiben).

Ohne konkreten metrologischen Hintergrund

Andere Gründe für Spezifikationsfestlegungen kommen manchmal aus ganz anderen Gründen zustande; wie beispielsweise pauschalisierte Forderungen der hausinternen Qualitätsmanager, welche Anforderungsprofile fordern.

Beispiel: Ein deutscher Automobilkonzern hatte die Absicht geäußert, von allen Zulieferern die Einhaltung von Spezifikationsgrenzen von ± 3 Prozent zu fordern. In vielen metrologischen Bereichen war dies kein Problem. Allerdings gibt es auch Messgrößen, die nicht mit entsprechend kleinen Messunsicherheiten bestimmt werden können. Die Vorgabe wurde schnell wieder verworfen.

Spezifikationen als Grundlage für Konformitätsentscheidungen

Für Konformitätsbewertungen zu vorgegebenen Spezifikationen müssen sich Auftraggeber und Dienstleister einigen, welche Spezifikationen zu Grunde gelegt werden. Zudem ist festzulegen, nach welchen Regeln die Konformität zu prüfen ist¹¹. Notwendig sind hierzu folgende Informationen:

Vorgaben	Festgelegte Spezifikationsgrenzen Gegebenenfalls Akzeptanzgrenzen und Rückweisungsgrenzen
Feststellungen	Ermittelte Messergebnisse Erweiterte Messunsicherheit Gegebenenfalls die Rahmenbedingungen der Messungen
Regeln	Vereinbarte Entscheidungsregeln Gegebenenfalls eine Verfahrenskonformität, sofern diese gesetzlich, normativ oder ähnlich gefordert wird

Tabelle 2: Notwendige Informationen für Konformitätsaussagen

¹⁰ Für dieses Verschleiern der wahren Messmitteleigenschaften gibt es in den USA einen spöttischen Begriff im Messwesen: *Specmanship* ist die Kunst, Spezifikationen soweit zu verschleiern, dass niemand mehr die realen Eigenschaften der Messmittel erfasst.

¹¹ Die Forderung nach einer gemeinsamen Festlegung ist in DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [1], Pkt. 7.1.3, festgelegt.

¹² Regeln, welche festlegen, auf welche Art und Weise die erweiterte Messunsicherheit bei der Konformitätsaussage zu berücksichtigen ist. Siehe hierzu auch → ILAC G8/2019 [8]

Die Feststellungen sind in den meisten Fällen – gerade bei akkreditierten Kalibrierlabore – valide. Auch die Entscheidungsregeln¹² sind üblicherweise gut definiert.

Aber die Spezifikationsgrenzen sind nicht immer eindeutig, auch wenn der Grenzwertbegriff dies suggeriert. Dabei sollten gerade die Spezifikationsgrenzen als zugesicherte Produkteigenschaften besonders belastbar sein. Diese Eigenschaften können justiziabel, also einklagbar, sind.

Messabweichung an den Stützpunkten

Der Betrag der möglichen (maximale) Messabweichung sollte vollumfänglich in den Spezifikationen enthalten sein. Dies sind Basiswerte, die um weiteren Bestandteile (nachfolgend) zu ergänzen sind.

In den meisten Fällen sind Spezifikationsgrenzen¹³ symmetrisch um den Sollwert: $S_- = -S_+$

Es sind verschiedene Darstellungsformen möglich:

Fester Größenwert für Messbereiche (absolute Spezifikationen)

Messbereich	Spezifikation
0 mA bis 100 mA	20 μ A
> 100 mA bis 1 A	60 μ A
> 1 A bis 10 A	100 μ A

Tabelle 3: Angabe von Spezifikationen als fester Größenwert

Feste Größenwerte können direkt als Spezifikationsgrenzen in den jeweiligen Messbereichen angenommen werden.

Relative Spezifikationen, bezogen auf den Messwert

Messbereich ¹⁴	Spezifikation
0 mA bis 100 mA	$60 \cdot 10^{-6} \cdot MW^{15}$
> 100 mA bis 1 A	$40 \cdot 10^{-6} \cdot MW$
...	...

Tabelle 4: Angabe von Spezifikationen als relativer Wert

¹³ S_- : Untere Spezifikationsgrenze, S_+ : Obere Spezifikationsgrenze

¹⁴ Bei der Darstellung der Messbereiche ist – sofern keine technischen Gründe entgegenstehen – auf Eindeutigkeit an den Bereichsgrenzen zu achten. Endet ein Messbereich beispielsweise bei 100 mA, beginnt der nachfolgende Bereich nicht bei 100 mA, sondern bei > 100 mA.

¹⁵ MW: Messwert. Im Englischen wird üblicherweise *o.R.* für *of Reading* verwendet.

Alternative Darstellung 1:

Messbereich ¹⁶	Spezifikation
0 mA bis 100 mA	$60 \cdot 10^{-6}$
> 100 mA bis 1 A	$40 \cdot 10^{-6}$
...	...

Tabelle 5: Angabe von Spezifikationen als relativer Wert ohne Darstellung des Messwertes als Multiplikator

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass einheitenlose Angaben relative Werte sind.

Relative Spezifikationen sind dimensionslos. Durch Multiplikation mit dem Messwert wird die Angabe zu einem physikalischen Größenwert.

In manchen Fällen findet man relative Angaben, die als Verhältnis eines Größenwertes zu einem Bezugswert dargestellt werden. Die für den jeweiligen Messwert geltenden Spezifikationsgrenzen müssen erst berechnet werden.

Alternative Darstellung 2:

Messbereich ¹⁷	Spezifikation
0 mA bis 100 mA	60 μ A/A
> 100 mA bis 1 A	40 μ A/A
...	...

Tabelle 6: Angabe von relativen Spezifikationen mit Einheiten, die sich wegekürzen lassen

Beispiel: Die Spezifikationsangabe in $\rightarrow$ Tabelle 6 ist dimensionslos, da sich die Einheiten Mikroampere (μ A) und Ampere (A) kürzen lassen. Es ist folgende Berechnung notwendig, falls die Spezifikationsgrenzen für einen Messwert von 200 mA ermittelt werden sollen:

$$|S| = \frac{40 \mu\text{A}}{1 \text{ A}} \cdot 200 \text{ mA} = \frac{40 \cdot 10^{-6} \text{ A}}{1 \text{ A}} \cdot 200 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

Gleichung 1: Bestimmung der Spezifikationsgrenze für 200 mA mit einer relativen Angabe

|S| Betrag der Spezifikationsgrenze

Relativer Wert bezogen auf den Messwert, zuzüglich eines festen Bestandteils

Messbereich	Spezifikation
0 A bis 1 A	$66 \cdot 10^{-9}$ of Reading + 20 nA
...	...

Tabelle 7: Angabe von Spezifikationen als Kombination einer relativen und einer absoluten Angabe

Beispiel: Hier sind die Grenzen des Spezifikationsbereichs (wiederum für einen Messwert von 200 mA) wie folgt zu bestimmen:

$$|S| = 66 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-3} \text{ A} + 20 \cdot 10^{-9} \text{ A} = 3,32 \cdot 10^{-8} \text{ A}$$

Gleichung 2: Bestimmung der Spezifikationsgrenze für 200 mA mit einer relativen und einer absoluten Angabe

Angaben von Genauigkeitsklassen als Spezifikationsgrenzen

Für Manometer werden oft Klassengrenzen als Spezifikationsgrenzen angegeben, welche sich auf den Messbereichsendwert in Prozent beziehen.¹⁸ Falls mechanische Manometer einen Zeigeranschlag haben (Nullpunkt), gelten die Klassengrenzen im Bereich von 10 Prozent bis 100 Prozent des Messbereichsendwertes.

Unsymmetrische Spezifikationsgrenzen

Üblicherweise werden Spezifikationen symmetrisch zum Messwert angegeben: $S_- = -S_+$. Diese Darstellung ist nicht zwingend. Es ist möglich, untere und obere Spezifikationsgrenzen unterschiedlich zu wählen.

Messbereich	Spezifikation
0 km/h bis 100 km/h	-0 km/h, +3 km/h
> 100 km/h	-0 %, +3 %

Tabelle 8: Angabe von unterschiedlichen unteren und oberen Spezifikationsgrenzen

Obige Darstellung gilt beispielsweise für Tachometeranzeigen in Kraftfahrzeugen. Der Tachometer darf nie zu wenig, aber bis zu 3 km/h für eine Geschwindigkeit bis 100 km/h und 3 Prozent darüber zu viel anzeigen.

Angaben für unsymmetrische Messbereiche

Beispiel: Thermometer für die Überwachung von Umgebungstemperaturen haben oft einen Messbereich von -40 °C bis +60 °C. Der Nullpunkt der Temperaturskala in Grad Celsius ist inkludiert. In den meisten Fällen werden die Spezifikationsangaben für Thermometer absolut angegeben.

¹⁶ Bei der Darstellung der Messbereiche ist – sofern keine technischen Gründe entgegenstehen – auf Eindeutigkeit an den Bereichsgrenzen zu achten. Endet ein Messbereich beispielsweise bei 100 mA, beginnt der nachfolgende Bereich nicht bei 100 mA, sondern bei > 100 mA.

¹⁷ Bei der Darstellung der Messbereiche ist – sofern keine technischen Gründe entgegenstehen – auf Eindeutigkeit an den Bereichsgrenzen zu achten. Endet ein

Messbereich beispielsweise bei 100 mA, beginnt der nachfolgende Bereich nicht bei 100 mA, sondern bei > 100 mA.

¹⁸ Festgelegt in EN 837

Beispiel: Aber gerade bei Absolutdruckmanometer findet man Spezifikationsgrenzen bezogen auf den Messbereichswert, wobei der Nullpunkt im Messbereich liegt. Die Angabe einer Klassengrenze ist üblich. Diese wird auf den Messbereichsendwert bezogen.

Der Messbereich eines Manometers kann beispielsweise bei -1000 mbar beginnen und bei +600 mbar enden. Der Nullpunkt liegt außermittig im Messbereich.

Die Angabe der Klassengrenze Klasse 1,6 bezieht sich auf den jeweiligen positiven und negativen Messbereichsendwert. Das Manometer wird betrachtet, als hätte es zwei Messbereiche, die getrennt zu bewerten sind.

Unterschiede zwischen Nennwert des Messbereichs und tatsächlichem Messbereichsendwert

Manche Hersteller benennen Messbereiche nicht exakt gleich dem Messbereichsendwert. Manchmal handelt es sich nur um einen geringen Unterschied, um Übergänge zum nächstgrößeren Messbereich abzudecken, ohne dass ein Messmittel ständig zwischen den Bereichen hin und herschalten muss.

Beispiel und Relevanz für die Messunsicherheit: Bei Digitalmultimeter reicht der 2-Volt-Messbereich oft bis 2,2 Volt. Es ist sorgfältig zu prüfen, wie der Hersteller die Messbereiche benannt und in den Spezifikationen dargestellt hat. Relative Angaben, wie $3 \cdot 10^{-4}$ of Range können sich auf den Nennwert 2 Volt oder auf 2,2 Volt beziehen. Im Zweifelsfalle ist der größere Wert zu wählen¹⁹.

Es gibt aber auch extreme Fälle, wo Benennungen des Bereichs und der tatsächliche Messbereichsendwert weit auseinander liegen.

Beispiel und Relevanz für die Messunsicherheit: Ein Hersteller von Digitalmultimeter benennt die Messbereiche dekadisch, wie 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V und 1 kV. In jedem Messbereich – mit Ausnahme des 1 kV Bereich – ist es möglich, bis zum doppelten Wert zu messen.

Hier ist noch sorgfältiger zu klären, ob sich relative Spezifikationen „of Range“ nun beispielsweise auf 1 Volt oder auf 2 Volt beziehen.

Zeitabhängige Angaben

Manche Hersteller geben Spezifikationen in Abhängigkeit von der Zeit seit der letzten Kalibrierung an. Dann findet man in den Angaben, Informationen wie:

Messbereich	Spezifikation			
	24 Stunden	90 Tage	1 Jahr	2 Jahre
0 Ω bis 1 Ω	1,0 μΩ	2,0 μΩ	4,5 μΩ	6,5 μΩ
...	...	...	...	...

Tabelle 9: Zeitabhängige Darstellung von Spezifikationen

¹⁹ Auch hier gilt, dass sich der Anwender seine Spezifikationsgrenzen selbst wählen kann. Dies ist aber zu dokumentieren und einem Kalibrierdienstleister mitzuteilen, wenn Konformitätsaussagen gefordert werden.

Derartige Angaben werden in verschiedenen Richtungen fehlerhaft interpretiert:

- Die Zuordnung von Spezifikationen zu Einsatzzeiten bedeutet nicht, dass beispielsweise nach → Tabelle 6 bei Wahl eines Kalibrierintervalls von einem Jahr Spezifikationsgrenzen von 4,5 Mikroohm zwingend anzunehmen sind.
- Es ist nicht gesichert anzunehmen, dass die „Jahresspezifikationen“ für die Dauer eines Jahres seit der Kalibrierung eingehalten werden.
- Es ist nicht gesichert, dass die „Jahresspezifikationen“ nach einem Jahr eingehalten werden, wenn das Messmittel zum Zeitpunkt der Kalibrierung mit 24-Stunden-Spezifikationen kalibriert wurde; auch wenn dies durch die Tabelle suggeriert wird.
- Aus den Tabelleneinträgen kann keine gesicherte Driftprognose für die eigenen Messmittel abgeleitet werden. Es ist lediglich eine Schätzung möglich. Die Drift eines Messmittels ist stark von den jeweiligen Einsatzbedingungen abhängig. Belastbare Daten müssen in der Praxis individuell bestätigt oder revidiert werden.

Temperaturabhängigkeit

In den Spezifikationen sind temperaturbedingte Abweichungen in einem vorgegebenen Bereich üblicherweise enthalten.

Messbereich	Spezifikation	
	$T_{cal} \pm 1 \text{ K}$	$23 \text{ °C} \pm 5 \text{ K}$
0 V bis 100 mV	2,7 μV	5,2 μV
...	...	...
Temperaturkoeffizient bei Überschreitung der Temperaturvorgabe im Bereich 10 °C bis 40 °C	1 μV K ⁻¹	

Tabelle 10: Temperaturabhängige Darstellung von Spezifikationen und Darstellung eines Temperaturkoeffizienten

Feste Bezüge beziehen sich üblicherweise auf typische Festlegungen von Umgebungsbedingungen oder auf Referenzbedingungen oder Einsatzbereiche.

Bei Überschreitung der genannten Bereiche sind Spezifikationszuschläge zu gewähren, welche mit Hilfe des angegebenen Temperaturkoeffizienten ermittelt werden können.

Beispiel: Die Gültigkeit des Temperaturkoeffizienten kann auf ein definiertes Intervall begrenzt sein, wie in obiger → Tabelle 10 auf den Bereich zwischen 10 °C und 40 °C. Dies entspricht üblicherweise dem zulässigen Einsatzbereich des Messmittels.

Temperaturbereiche, wie obige $\pm 5 \text{ Kelvin}$ sind im Laboralltag oft unkritisch, da der Einsatz üblicherweise unter kontrollierten und klimatisierten Bedingungen stattfindet. können aber bei vor Ort Kalibrierungen leicht überschritten werden.

Hingegen ist ein Einsatz im engeren Temperaturbereich, wie ± 1 Kelvin um die Temperatur bei der letzten Kalibrierung, T_{Cal} , in der Praxis nur dann realisierbar, wenn das Messmittel ortsunveränderlich in dem Labor betrieben wird, in dem es auch kalibriert wurde. Für einen externen Kunden ist diese Angabe üblicherweise irrelevant.

Zudem ist es in diesem Falle notwendig, die Temperatur bei der Kalibrierung möglichst genau zu kennen. Die Unsicherheit der Angabe sollte nicht größer als 200 Millikelvin sein. Die Temperaturmessung sollte zudem rückgeführt, also selbst auch mit Messunsicherheit bekannt sein. Weiterhin sollte die Temperatur beim Einsatz des Messmittels in seiner direkten Umgebung gemessen werden. Auch diese Temperatur sollte nicht mit größeren Unsicherheiten als 200 Millikelvin bestimmbar und rückgeführt sein. Aus diesen Forderungen ergeben sich – unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der Temperaturbestimmungen – dass die Einsatztemperatur sich um maximal 600 Millikelvin von der Kalibriertemperatur unterscheiden darf. Diese Anforderung ist für die Laborklimatisierung herausfordernd. Pauschale Angaben zum Laborklima, wie beispielsweise die üblichen ± 2 Kelvin sind nicht ausreichend.

Spezifikationsangaben mit Verteilfunktion und Vertrauensniveau

Einige Hersteller geben Spezifikationen nicht als Grenzwerte, sondern als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen mit Zuordnung eines Vertrauensniveaus einer Normalverteilung an²⁰.

Da die Normalverteilung keine Grenzen hat, kann es sein, dass Messmitteleigenschaften trotz vorgegebenen Vertrauensniveaus außerhalb dieser „Niveaugrenzen“ liegen. Dies wäre aus Sicht des Herstellers legitim, da er in diesem Falle lediglich für 95 Prozent oder 99 Prozent der Fälle zusichert, dass ein Messmittel die dargestellten Vertrauensniveaus einhält. Was ist nun mit den anderen 5 Prozent (oder 1 Prozent) der Fälle? Wer trägt hier das Risiko der Niveauüberschreitung? Ist die fehlende Schärfe einer Grenzwertdefinition justizabel, also auch einklagbar, wenn ein gekauftes Messmittel diese Grenzen überschreitet?

Mittlerweile findet man entsprechende Darstellung häufiger gerade im Bereich elektrischer Größen, wo hochkomplexe Messmittel eingesetzt werden. Dies kann eine Abbildung der realen Eigenschaften von Messmittel darstellen, welche sich aus vielen Komponenten mit individuellen Streuungen der Eigenschaften zusammensetzen. Jede Teilkomponente weist eigene Unsicherheiten auf. Die Kombination der Komponenten führt zu einer Kombination der Verteilungen, wie dies auch bei der Ermittlung der Messunsicherheit der Fall ist. Das Ergebnis ist oft – zumindest in der Näherung – eine Normalverteilung mit hohem Freiheitsgrad. Dies berechtigt die Angabe der Spezifikation mit Normalverteilung; insbesondere wenn diese auf Basis statistischer Auswertung einer größeren Anzahl von Messmittel mit gleichem Teilkennzeichen geschieht.

Mittlerweile stellt ein großer Hersteller²¹ offen dar, dass diese Darstellung auch und insbesondere zum Schutz des Herstellers geschieht, da es bei der Normalverteilung mit seinen Grenzen bei $-\infty$ und $+\infty$ keine reklamierbaren Spezifikationsüberschreitungen im eigentlichen Sinne geben kann und somit auch keine umfangreichen Nachbesserungen notwendig werden, sofern Grenzen vom Produkt nicht eingehalten werden. Für den Kunden ist dies unbefriedigend.

Berücksichtigung bei Konformitätsaussagen: Andererseits benötigt der Anwender für die verlässliche Anwendung des Messmittels eine belastbare Bestätigung von Spezifikationsgrenzen. Also müssen die produktspezifischen Grenzen durch anwendungsspezifische Grenzen ersetzt werden, zu denen im Rahmen einer Kalibrierung die Konformität bestätigt werden kann.

Aus diesem Grunde gibt Fluke Spezifikationen für hochpräzise und komplexe Messmittel zweimal an: einmal mit einer Verteilung mit $\pm 2 \sigma$ ²² für etwa 95 Prozent Wahrscheinlichkeit und andererseits für die metrologische Bestätigung mit $\pm 3 \sigma$ für etwa 99 Prozent Vertrauensniveau.

Werden diese Grenzen bei Kalibrierungen bestätigt, kann die vorgegebene Verteilung als mögliche Eigenschaft eines Messmittels bestätigt werden.

In anderen metrologischen Bereichen ist dies unüblich.

Fragmentierte Spezifikationen, die erst zusammengestellt werden müssen

In manchen Fällen werden von Herstellern mehr oder minder vollständige Spezifikationen fragmentiert angegeben. Spezifischen Eigenschaften werden nach Ursachen aufgeschlüsselt dargestellt.

Einerseits ist dies sinnvoll, weil eine konkrete Messmittelbewertung – bei Abweichung von Optimalbedingungen – getroffen werden kann. Andererseits ist nicht direkt ersichtlich, wie sich eine vollständige Spezifikationsangabe bestimmen lässt. Manchmal fehlt diese Information vollständig.

Durch Fragmentierungen lassen sich die tatsächlichen Spezifikationen nicht nur detailliert darstellen, sondern auch verschleiern!

²⁰ Derartige Darstellungen wurden erstmalig (nach meinem Kenntnisstand) von Fluke für hochpräzise Referenzmessmittel im Kalibrierwesen eingeführt, um die Darstellungen direkt in eine Software einpflegen zu können, mit der neben Messwerten auch zugleich die Unsicherheit ermittelt wird.

²¹ Fluke Corp.

²² σ ist das übliche Formelzeichen für die Standardabweichung; 2σ oder 3σ stehen für das Doppelte oder Dreifache der Standardabweichung

Beispiel: Für einen Trockenblockkalibrator nennt der Hersteller folgende Spezifikationen:

Funktion	Spezifikation
Arbeitsbereich	-40 °C bis 160 °C
Genauigkeit der Anzeige	± 0,1 K bei Messbereichsendwert ²³
Stabilität (30 min)	5 mK bei Messbereichsendwert
Axiale Homogenität (80 mm)	50 mK bei -40 °C
	40 mK bei 0 °C
	50 mK bei 160 °C
Radiale Homogenität	10 mK bei Messbereichsendwert
Beladungseffekt	80 mK
Hysterese	25 mK

Tabelle 11: Fragmentierte Spezifikationsangabe (Ausschnitt aus den Original-Herstellerspezifikationen)

Relevanz für die Messunsicherheit: Oft ist unklar, wie die einzelnen Komponenten zu kombinieren sind. Ist es legitim, die Angaben – wie im Rahmen der Bestimmung der Messunsicherheit üblich – geometrisch zu addieren, oder müssen die einzelnen Werte linear addiert werden?

$$|S| = \sqrt{100^2 + 5^2 + 50^2 + 10^2 + 80^2 + 25^2} \text{ mK} = 140 \text{ mK}$$

Gleichung 3: Geometrische Addition der Spezifikationsbestandteile

$$|S| = (100 + 5 + 50 + 10 + 80 + 25) \text{ mK} = 270 \text{ mK}$$

Gleichung 4: Lineare Addition der Spezifikationsbestandteile

$|S|$ Betrag der Spezifikationsgrenze

Darf man für die Anwendung nicht relevante Bestandteile der Spezifikationen vernachlässigen?

Beispiel: Ein Labor entscheidet, den in → Tabelle 11 angegebenen Beitrag der Hysterese und der axialen Homogenität zu vernachlässigen, weil Messwerte ausschließlich „von unten nach oben“ angefahren werden und die Eintauchtiefe von Thermometer im Trockenblock fest definiert ist. Das Vorgehen ist legitim, sofern das Verfahren in einer Arbeitsanweisung entsprechend festgeschrieben wurde.

Als dritter Weg ist es möglich, die Beiträge über eine Unterbilanz (Segmentbilanz) bei der Bestimmung einer Messunsicherheit zusammenzufassen.

Art der Konformitätsbewertung

Die – für den Kunden – sinnvollste Art der Konformitätsbewertung ist die „strenge Bewertung“.

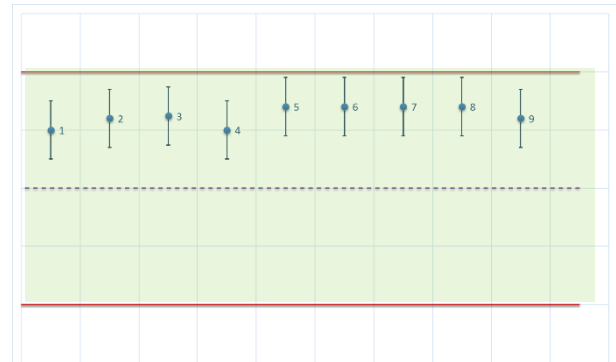


Abbildung 2: Lagebeziehung von Messergebnissen inklusive der erweiterten Messunsicherheit innerhalb von Spezifikationsgrenzen

Der grün markierte Bereich entspricht dem Spezifikationsbereich. Die rot eingetragenen Grenzen sind Akzeptanzgrenzen. In diesem Falle liegen sie auf den Spezifikationsgrenzen

Die Spezifikationsgrenzen können mit einer strengen Entscheidungsregel als bestätigt angenommen werden.²⁴

Nachfolgende Abbildung zeigt die gleichen Messpunkte, allerdings mit größeren Unsicherheiten. Diese überschreiten die Spezifikationsgrenzen.

Sofern für die Anwendung des Normals die gleiche statistische Sicherheit, wie für den Fall nach → Abbildung 2 erreicht werden soll, muss der Akzeptanzbereich größer als der Spezifikationsbereich sein, um die Unsicherheiten vollständig zu enthalten.

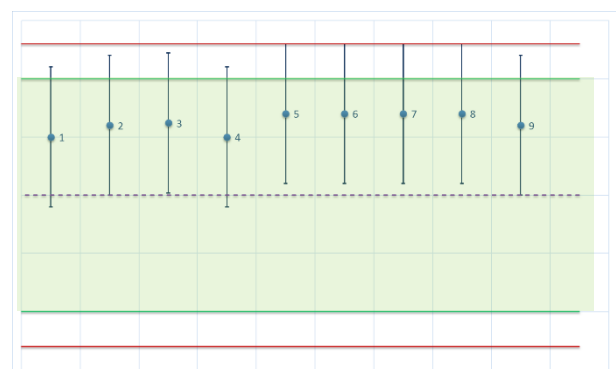


Abbildung 3: Lagebeziehung von Messergebnissen innerhalb der Spezifikationsgrenzen (grün), aber mit Überdeckung der Spezifikationsgrenzen durch die erweiterte Messunsicherheit. Die Akzeptanzgrenzen (rot) wurden deutlich weiter gefasst.²⁵

Sofern ein Kunde mit dem Kalibrierdienstleister eine Konformitätsaussage nach dem „Binary Statement“ oder „Simply Acceptance“ vereinbart hat, spricht man auch vom Shared Risk-Fall. Dies bedeutet, dass er das Risiko, trotz Lage der Messwerte inner-

²³ „Full Range“ in der originalen, englischsprachigen Dokumentation

²⁴ Beispielsweise nach ILAC G8:09/2019 [8], Pkt. 4.2.3 „Non-binary Statement with Guard Band“

²⁵ Bestätigung der Konformität nur beispielsweise nach ILAC G8:09/2019 [8], Pkt. 4.2.1 „Binary Statement for Simple Acceptance“

halb der Grenzen, ein begrenztes (geteiltes) Risiko zu übernehmen hat.

Relevanz für die Messunsicherheit: Es ist nicht ausreichend, die Spezifikationsgrenzen des Herstellers zu übernehmen. Es sind erweiterte Intervalle für diesen Messunsicherheitseinfluss in die Messunsicherheitsbilanz einzubringen. Der zusätzliche Messunsicherheitsbeitrag sollte mit Rechteckverteilung angenommen werden.

Unterschiede zwischen nominalen Messbereich und tatsächlichen Messbereich

Manche Messmittel haben tatsächliche Messbereichsgrenzen, welche nicht den nominalen Bezeichnungen entsprechen. Bei einem gängigen Referenzmultimeter unterscheiden sich die jeweiligen Grenzen um den Faktor zwei. Der nominale Messbereich hört bei 1er Schritten, wie 1 Volt, 10 Volt, 100 Volt, usw. auf. Tatsächlich werden die Bereiche bis 2 Volt, 20 Volt und 200 Volt benutzt. Bezieht sich eine Spezifikationsaussage auf den Messbereichsendwert, ist zu klären, welche Grenze exakt gemeint ist.

Beispiel: Angegeben wird eine Spezifikationsgrenze von $2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{MBE}^{26}$. Sind dies nun 20 Mikrovolt im 10 Volt Bereich oder 40 Mikrovolt?

Relevanz für die Messunsicherheit: Auch hier gilt, dass man die jeweils zu berücksichtigenden Grenzen für Konformitätsaussagen bei Kalibrierungen zwischen Dienstleister und Kunde vereinbart.

Anwendung von Klassengrenzen als Spezifikationsgrenzen

Zumeist bei physikalischen Messmitteln sind Klassengrenzen, welche beispielsweise normativ geregelt sind, gebräuchlich. In diesen Fällen sind die Normendefinitionen heranzuziehen.

Beispiel: In manchen Fällen sind die Definitionen einfach übertragbar, wie bei analogen Druckmessmittel. Eine Klassengrenze, wie „1,6“ bezieht sich in Prozent auf den Messbereichsendwert.

Beispiel: Bei Kraftmessmaschinen ist die Herleitung von Spezifikationsgrenzen aus Klassendefinitionen heraus nicht so einfach.

Tabelle 2 — Kenngrößen der Kraftmesseinrichtung

Klasse der Kraftanzeigebereiche der Prüfmachine	Maximal zulässiger Wert				
	%				
	Anzeigeabweichung q	Wiederholpräzision b	Umkehrspanne ^a v	Nullpunktabweichung f_0	Relative Auflösung a
0,5	±0,5	0,5	±0,75	±0,05	0,25
1	±1,0	1,0	±1,5	±0,1	0,5
2	±2,0	2,0	±3,0	±0,2	1,0
3	±3,0	3,0	±4,5	±0,3	1,5

^a Nach 6.4.8 wird die relative Umkehrspanne nur auf Anforderung bestimmt.

Abbildung 4: Klassengrenzen für Kraftmesseinrichtungen nach DIN EN ISO 7500-1:2018

Eine Kraftmesseinrichtung der Klasse 0,5 muss nicht zwingend Messabweichungen kleiner 0,5 Prozent haben, da weitere Unsicherheitsbeiträge nach → Tabelle 7 additiv zu berücksichtigen sein.

Relevanz für die Messunsicherheit: Die einzelnen Einflüsse sind zur Ermittlung der Spezifikationsgrenzen zu addieren. Dies entspricht der bereits vorgestellten Fragmentierung.²⁷

Eindeutigkeit herstellen

Um all den obigen Möglichkeiten zu Fehlinterpretationen zu entgehen, sollen Messmittelbetreiber und Kalibrierdienstleister Spezifikationsgrenzen (gemeinsam) festlegen.^{28 29} Letztendlich ist der Anwender für die Schätzung der Eigenschaften der eingesetzten Messmittel verantwortlich.

Zu den selbst definierten Spezifikationsgrenzen soll im Rahmen der Kalibrierung die Konformität geprüft werden. Dann sind die eigenen Annahmen belastbare Eigenschaften für die Anwendung.

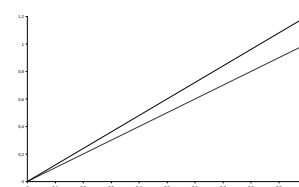
Sonstige Eigenschaften der Messmittel

Neben den in Spezifikationen beschriebenen, oder durch Kalibrierungen ermittelte, Eigenschaften haben Messmittel weitere Eigenschaften, welche die Messungen beeinflussen.

Linearität

Linearität ist gegeben, wenn der Differenzenquotient $\frac{\Delta \text{Anzeigewert}}{\Delta \text{Einganggröße}}$ eine konstante Größe ist.

Stetig wachsende Abweichung



Die Abweichung des Ablesewertes vom Sollwert wächst oder fällt kontinuierlich über den Messbereich. Die Abweichung ist durch Multiplikation der Ablesung mit einem konstanten Faktor zum Messwert zu großen Teilen korrigierbar.

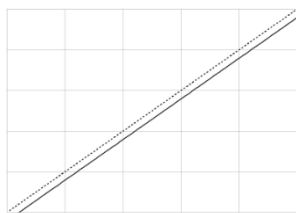
²⁶ MBE: Messbereichsendwert

²⁷ → Fragmentierte Spezifikationen, die erst zusammengestellt werden müssen, Seite 7

²⁸ → DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [1], Pkt. 7.1.3

²⁹ Die von Hersteller vorgegebene Grenzen können als Anhalt genommen werden.

Konstante Abweichung der Kennlinie



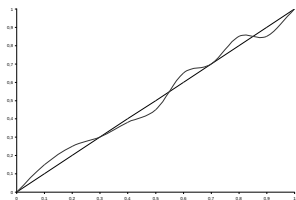
Die Festlegung des Nullpunktes der Maßskala hat Bedeutung für alle Ablesungen. Bei derartigen Abweichungen sollte zunächst versucht werden, diese zu korrigieren, bevor ein residualer Rest als Messunsicherheitseinfluss übernommen werden muss.³⁰

Relevanz für die Messunsicherheit: Bei Relativ-, Differenz-, Substitutionsmessungen und ähnlichen Verfahren ist die Nullpunkt-abweichung bedingt relevant. Bei Direktmessungen und ähnlichen Verfahren ist der Einfluss immer mit zu betrachten. Auch wenn sie nicht erkennbar ist, kann die Nullpunktdefinition im Bereich der Halbbreite des kleinstwertigen Digits einer Anzeige schwanken oder verschoben sein. Sie ist mit Rechteckverteilung zu berücksichtigen.

In vielen Fällen werden Nullpunkte einer Messmittell Kennlinie nicht individuell betrachtet, sondern im Zusammenhang mit der Linearität der Messmittell Kennlinie behandelt.

Bei manchen Messmitteln ist es normal, dass der Benutzer ein definiertes Null selbst setzen muss. Dies geschieht beispielsweise bei Waagen oder bei Widerstandsmessungen, um Taramassen oder Tarawiderstände der Leitungen zu kompensieren.

Scheinbar zufällige, aber reproduzierbare Abweichung



Diese scheinbar zufällige, aber reproduzierbare Abweichung von der Solllinie kommt vor, wenn sich verschiedene systematische Einflüsse überlagern. Die Maximalwerte der Abweichung können ermittelt werden.

Korrekturen sind schwierig über die gesamte Kennlinie hinweg zu quantifizieren und gelten in der Regel nur punktuell.

Relevanz für die Messunsicherheit: Sollte keine numerische Korrektur möglich sein, ist die maximale Abweichung mit Rechteckverteilung als Messunsicherheitseinfluss zu übernehmen.

Ermittlung der Linearität durch Kalibrierungen

Im Rahmen der Kalibrierung werden Spezifikationen ausschließlich an einigen wenigen Stützpunkten³¹ in den Messbereichen bestimmt.

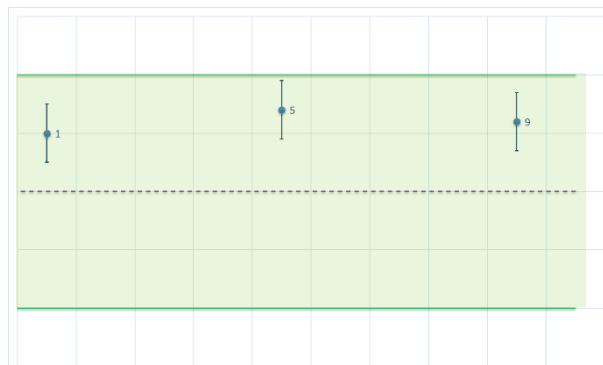


Abbildung 5: Lage dreier Messpunkte, die eine hinreichende Linearität der Messmittell Kennlinie suggerieren

Die Konformitätsaussage, die Basis von → Abbildung 5 getroffen wurde, kann ausschließlich für die drei eingezeichneten Messwerte getroffen werden. Eine Verallgemeinerung für den gesamten Messbereich ist nicht möglich.

Durch ein engeres Stützpunktraster kann – wie im nachfolgenden Beispiel gezeigt – erkennbar werden, wenn die Messmittell Kennlinie die Spezifikationsgrenzen überschreitet.

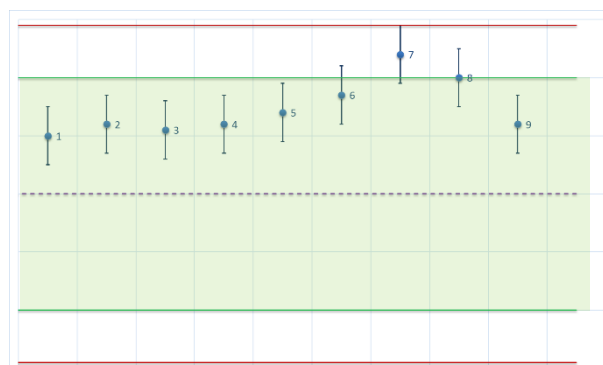


Abbildung 6: Ein engeres Stützpunktraster zeigt in diesem Beispiel eine lokale Überschreitung der Spezifikationsgrenzen

Die Kalibrierung und eine mögliche Konformitätsaussage gelten ausschließlich an diesen Punkten. Da Messmittel über den ganzen Messbereich hinweg einsatzfähig sein sollen, ist zu klären, inwieweit aus den Stützpunkten eine Linearitätsaussage für den Messbereich hergeleitet werden kann. Hierzu sind interne Systemkenntnisse wichtig.

Relevanz für die Messunsicherheit: Für die mögliche Abweichung von der idealen Messmittell Kennlinie ist immer dann ein zusätzlicher Beitrag anzunehmen, wenn das Messmittel abseits der Stützpunkte der Rückführung eingesetzt wird. Die Größenordnung des Messunsicherheitseinflusses „Linearität der Kennlinie“ ist von vielen Einflüssen abhängig, wie:

³⁰ Das GUM, JCGM 100 [10] sollte aus formalen und mathematischen Gründen ausschließlich auf statistische Einflüsse zur Bestimmung der Messunsicherheit angewendet werden. Eine Berücksichtigung systematischer Anteile ist eigentlich nicht möglich. Dennoch gibt es Fälle, die außerhalb des GUMs zu behandeln sind, um systematische Einflüsse zu berücksichtigen.

³¹ In diesem Dokument wird der Begriff *Stützpunkt* oder *Stützpunkt der Rückführung* für die Messpunkte benutzt, die im Rahmen der Kalibrierung des Normals realisiert wurden und zu denen vollständige Messergebnisse vorliegen.

- Anzahl der Stützpunkte und deren Abstand

***Beispiel:** Die meisten elektrischen Messmittel sind technisch oder mathematisch so weit linearisiert, dass der zusätzliche Beitrag der Linearität klein gegenüber dem Spezifikationsbereich ist und oft vernachlässigt wird. Die Gültigkeit einer Vernachlässigung ist zu belegen.*

- Prinzipielle Funktionsweise eines Messmittels

***Beispiel:** Bei vielen Sensoren, welche physikalische Größen in elektrische Signale wandeln, werden prinzipiell unlineare Kennlinien durch technische oder numerische Verfahren linearisiert. Diese Messmittel sind anfälliger gegen Linearitätsabweichungen.*

***Beispiel:** Mechanische Manometer mit Bourdon-Röhre als elastisches Glied können auf Grund der Geometrie der Röhre und der Umlenkung der Ausdehnung auf eine Zeigermechanik nicht linear sein. Besonders präzise Manometer (Klasse 0,1) werden mechanisch linearisiert.*

- „Anfälligkeit“ gegen Unlinearitäten

***Beispiel:** Bei Hochfrequenzsignalübertragungen treten gelegentlich Frequenz- oder Wellenlängenabhängige „Stehwellen“ auf. Diese Effekte treten lokal begrenzt im Frequenzspektrum auf.*

***Beispiel:** Mechanische Messmittel, wie Bügelmessschrauben können lokal begrenzte, mechanische Abweichungen aufweisen, die nur in einem sehr engen Stützpunktraster erkennbar werden.*

Es empfiehlt sich, die Linearisierung durch ein Modell zu beschreiben, bei dem in der Nähe der Stützpunkte der Messunsicherheitseinfluss Linearisierung Null ist und lediglich der Anteil der sonstigen Messunsicherheitseinflüsse wirkt. Mit zunehmenden Abstand von den Stützpunkten wächst die Unsicherheit auf Grund der geringeren Kenntnisse über die Kennlinie an.³²

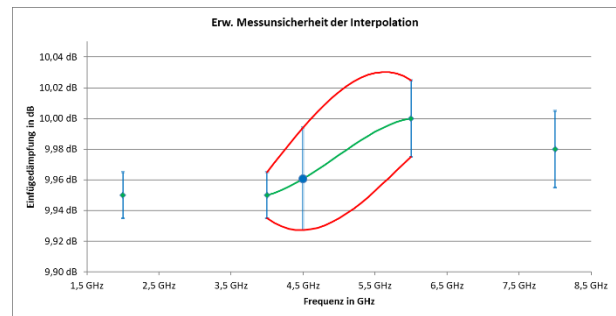


Abbildung 7: Interpolierte Kennlinie eines Einfügedämpfungsglied

Das Messmittel wurde an den Stützpunkten 2 GHz, 4 GHz, 6 GHz und 8 GHz kalibriert. Der Einsatz soll bei 4,5 GHz erfolgen. Die Grafik zeigt die Spline-Interpolation der Kennlinie (grün). Deutlich erkennbar ist die Aufweitung der Messunsicherheit zwischen den Stützpunkten 4 GHz und 6 GHz. An den Stützpunkten wurden die Unsicherheiten der Kalibrierung angenommen. Dazwischen wird ein zusätzlicher Anteil für die Linearität angenommen. Die Aufweitung der Unsicherheit erfolgt auf Basis eines Polynoms zweiter Ordnung.^{33 34}

Drift

Fast alle Messeigenschaftseigenschaften unterliegen einer Drift^{35 36}. Daher ist es einerseits wichtig, regelmäßig die Ist-Werte mittels Kalibrierungen neu zu ermitteln und andererseits die mögliche Drift verlässlich abzuschätzen.

Die Schätzung der Drift ist eine Prognose – eine Vorhersage. Diese kann nur einen Schätzwert auf Basis zurückliegender Erkenntnisse sein und ist nur bedingt zuverlässig. Oft ist nur eine verlässliche Aussage dahingehend möglich, dass die Größenordnung der Änderung seit der letzten Kalibrierung einen gewissen Grenzwert vermutlich nicht überschritten hat, oder im Kalibrierintervall nicht überschreiten wird. Die Zuordnung eines genauen Betrages der Drift ist nur mit besonders belastbaren Kenntnissen aus der Vergangenheit (Historie) und einem stabilen Messmittelverhalten möglich.

³² Das Modell für die Erweiterung des Messunsicherheitseinflusses könnte ein Polynom zweiten Grades sein, welches über die Stützpunkte der Kalibrierung und einem Formfaktor zu definieren ist, wie in → Abbildung 7 dargestellt.

³³ Die Darstellung basiert auf den Arbeiten des Autors mit Unterstützung von Dr. Rudy Frieling und wurde im Rahmen des DAkkS/PTB/BAM Seminars „Messunsicherheit“ im März 2012 in Berlin vorgestellt.

³⁴ Der Umgang mit Messmittelkennlinien wird in einem späteren Whitepaper ausführlich behandelt (in Vorbereitung).

³⁵ Wir unterscheiden die zeitlichen Eigenschaften der Messmittel in diesem Dokument wie folgt:

Die **Drift** ist eine Langlebigeigenschaft; man kann auch von Langzeitdrift sprechen. Die Drift ist zumeist gerichtet.

Aufwärmverhalten: Gerichtete Änderung von Messeigenschaftseigenschaften, bevor ein stabiler Betriebszustand erreicht ist.

Schwankung: Beobachtbare statistische Änderung der Anzeige während der Messungen; also kurzzeitig zu betrachten.

Kurzzeitdrift: Gerichtete Änderung von Messeigenschaftseigenschaften während des Messprozesses.

Rauschen: Sehr schnell ablaufende statistische Prozesse, die von einem Messmittel auf Grund der Trägheit des Messprinzips nicht aufgelöst werden kann. Ausnahme: die mittels Rauschen übertragene Energie wird im Rahmen der Messung mit berücksichtigt.

³⁶ Ausnahmen sind Messmittel, welche die Realisierung der Messgrößen auf Basis unveränderlicher physikalischer Effekte realisieren, wie ein Josephson-Normal, oder sich nachweislich immer wieder selbst korrigieren, wie ein GPS-diskriminierter Oszillator.

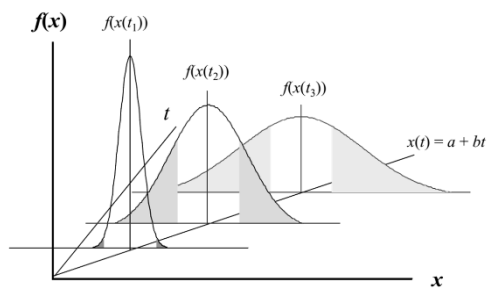


Abbildung 8: Darstellung einer möglichen Drift nach Wyatt und Castrup [3] [4]

Die Wahrscheinlichkeit, Spezifikationsgrenzen zu überschreiten (grau dargestellt), wächst mit der Zeit seit der letzten Kalibrierung. Neben der Drift macht sich bemerkbar, dass über die Zeit das Wissen um die Messmitteleigenschaften immer unschärfer wird.

Obige Abbildung zeigt den Wissensverlust über den Zustand einer Messmitteleigenschaft über die Zeit. Nach einem – im eigenen Risikomanagement (selbst) definierten – Kalibrierintervall erfolgt die nächste Kalibrierung.³⁷

Wie eine Drift zu bewerten ist, ist umstritten. Dies betrifft insbesondere neue Messmittel, die erstmalig in die Nutzung genommen werden und für die noch keine Erfahrungswerte vorliegen. In diesem Falle hilft nur der Erfahrungstransfer von bereits bekannten ähnlichen Messmittel.

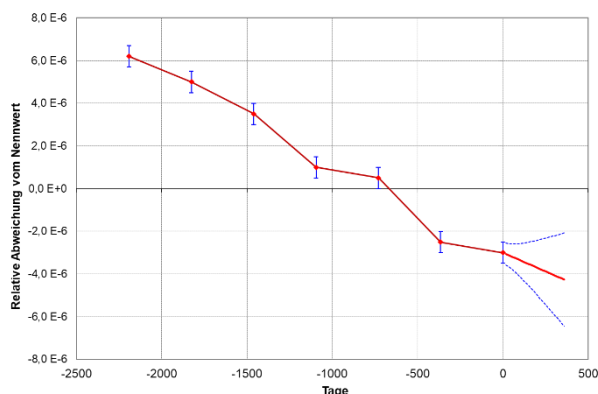


Abbildung 9: Sechs Jahre Historie und Driftprognose zu einem 1 Ω Gleichstromwiderstand

Zu beachten ist die trompetenförmige Aufweitung der Kenntnisse um das Normal für das kommende Nutzungsintervall. Dieser Anteil wird als Einflussgröße bei der Ermittlung der Messunsicherheit berücksichtigt.

Tipps für die Praxis: Die Driftannahme ist regelmäßig – am besten nach jeder Kalibrierung – anzupassen. Dies hat Auswirkungen für die Annahmen zur Einflussgröße bei der Ermittlung der Messunsicherheit eigener Messungen. Die Annahmen sind in der Einführungsphase eines Messmittels – welche mehrere Jahre

dauern kann – regelmäßig zu hinterfragen und gegebenenfalls anzupassen.

Auch später im Regelbetrieb sind die Annahmen zur Drift immer wieder zu prüfen. Driftinformationen sollten gewichtet werden. Je länger eine Erkenntnis zurückliegt, desto geringer ihre Gewichtung für eine Driftprognose. Es wird empfohlen, - rückwärts betrachtet – die letzten Driftinformationen zu gewichten.

Beispielsweise könnte man die Intervalle mit 1/1, 1/2, 1/3, usw. gewichten. Wir gewichten jedes einzelne Kalibrierergebnis allerdings mit:

$$G = \frac{1}{\sqrt{t_{Kal} - t_0}}$$

Gleichung 5: Gewichtung von zurückliegenden Informationen

Hierbei steht $t_{Kal} - t_0$ für das Intervall zwischen dem aktuellen Datum (t_0) und dem Datum der letzten Erkenntnis durch Kalibrierung (t_{Kal}).

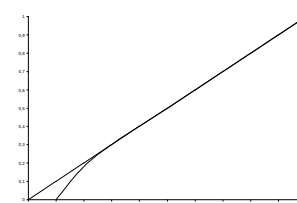
Eingriffe in das Messmittel, wie Reparaturen oder Justagen unterbrechen die Historien. Die Unterbrechungen können zu marginalen Folgen, bis hin zum kompletten Neustart einer Historie reichen.

Relevanz für die Messunsicherheit: Eine Annahme zur Drift eines Messmittels ist zwingend bei der Ermittlung der Messunsicherheit zu berücksichtigen; d.h. eine Messunsicherheitsbilanz ohne Anteil der Drift ist nicht vollständig.

Für neue Messmittel wird vorgeschlagen, mit zunächst 50 % der Herstellerspezifikationen für aktive Messmittel mit eigener Energiequelle und 25 % der Herstellerspezifikationen für passive Messmittel ohne Hilfsenergie für ein typisches Kalibrierintervall zu beginnen.

Diese Annahmen sind so bald wie möglich anzupassen und durch belegbare Schätzungen zu ersetzen. Dies kann durch ein zu Beginn engeres zeitliches Raster an Kalibrierungen oder hausinternen Stabilitätsmessungen realisiert werden. Schon nach dem zweiten Kalibrierergebnis oder der zweiten Stabilitätsmessung kann eine erste, vorsichtige Schätzung des Driftverhaltens vorgenommen werden.^{38 39}

Ansprechempfindlichkeit



Wenn die Empfindlichkeit der Messanordnung bei kleinen Werten nicht ausreichend ist, erfolgt zunächst eine verzögerte oder verringerte Reaktion des Messmittels auf ein Eingangssignal.

Der Bereich der Kennlinie bis zum Erreichen eines ausreichend linearen Bereichs sollte für Messungen nicht genutzt werden.

³⁷ Für die Festlegung von Kalibrierintervallen gibt es vom Autor ein eigenes Whitepaper unter <https://pesch-consult.de/Downloads.html>. Zudem wird der Sachverhalt in Pesch: „Management von Kalibrier- und Prüflaboratorien“ [7] ausführlich beschrieben.

³⁸ Es ist ein gängiges Vorgehen, dass je nach Erkenntnisstand die zugeordnete Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion angepasst wird.

³⁹ Ein Whitepaper zur Beschreibung der Drift und zur Abschätzung des Driftverhaltens ist in Vorbereitung.

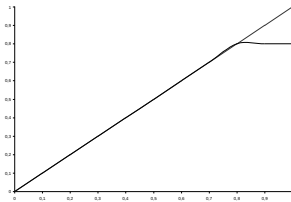
Beispiel: Dieses Verhalten beobachtet man oft bei analogen Zeigerinstrumenten.

Beispiel: Messsysteme mit Dehnungsmessstreifen sind im unteren Bereich der Kennlinie oft unlinear. Üblicherweise beginnt der nutzbare Messbereich bei 20 Prozent des Messbereichsendwertes (in selteneren Fällen schon bei 10 Prozent). Hierdurch klammert man den Bereich mit verzögerter Ansprechempfindlichkeit aus.

Beispiel: Manometer mit Burdonröhre benötigen einen Minimaldruck, bevor das elastische Element die Druckbeaufschlagung korrekt umsetzt. Man kennzeichnet in diesen Fällen die Anzeige entweder durch einen schwarzen Balken zu Beginn der Skala oder indem die Messskala nicht bei Null beginnt.

Relevanz für die Messunsicherheit: Messungen im Bereich der Ansprechempfindlichkeit sind fehlerhafte Messungen und zu verwerfen. Die Ansprechempfindlichkeit ist daher nicht als Messunsicherheitseinfluss zu betrachten.

Sättigung



Was die Ansprechempfindlichkeit zu Beginn des Messbereichs ist, ist im gleichen Sinne die Sättigung am oberen Ende eines Messbereichs. In der Regel werden die Messbereiche begrenzt, bevor die

Sättigung erreicht wird.

Beispiel: Frequenzmischer stellen aus zwei Einflussignalen Mischprodukte her. Weisen diese Signale zu hohe Pegel auf, entstehen bis zu einem bestimmten Grade zwar weiterhin die gewünschten Mischprodukte, aber da der Mischer nicht mehr im Linearbereich betrieben wird, auch verzerrte Signalanteile, die sich in Form von Oberwellen zu den Grund- und/oder Mischprodukten bemerkbar machen.

Relevanz für die Messunsicherheit: Messungen im Bereich der Ansprechempfindlichkeit sind fehlerhafte Messungen und zu verwerfen. Die Ansprechempfindlichkeit ist daher nicht als Messunsicherheitseinfluss zu betrachten.

Hysterese | Umkehrspanne

Hysteresen treten oft dort auf, wo elastische Eigenschaften von Materialien einer Änderung eines Zustandes entgegenstehen.

Aber auch in anderen Bereichen, wie dem Magnetismus beobachtet man entsprechende Beharrungseffekte, wie bei der Ermittlung von Remanenzkurven magnetischer Materialien.



Bei aufsteigender Belastung weist ein Messmittel eine andere Kennlinie als bei abfallender Belastung auf. Die beiden Belastungskurven sind prinzipiell reproduzierbar, je-

doch können sie abhängig von vielen anderen Einflüssen, wie der Temperatur oder der Aktivierung eines elastischen Elements quantitativ unterschiedlich ausfallen.

Der Umgang mit der Hysterese und deren Darstellung ist oft in Normen oder Richtlinien geregelt, um eine Vergleichbarkeit zwischen Messergebnissen herstellen zu können.

Die Hysterese, oder Umkehrspanne, ist ein besonderer systematischer Einfluss. Die Größen sind punktweise (an jedem Messpunkt) zu bestimmen und gelten nicht für den gesamten Messbereich. Üblicherweise ist der Betrag der Hysterese an den Messbereichsgrenzen geringer als in der Mitte des Bereichs.

Die Kennlinienäste sollten als eigenständige Messgröße (mit Messunsicherheit) ermittelt werden.⁴⁰ Die Zusammenfassung von Auf- und Abwärtsgang zu einer gemittelten Kennlinie bildet eine neue Messgröße, da die Messbedingungen anders definiert sind.

Tritt die Hysterese bei einem Normalmessmittel auf, sollte der Einfluss nach Möglichkeit korrigiert werden. In der Praxis ist dies oft nicht möglich, weil Hysterese-Einflüsse je nach Einsatzbedingung stark schwanken können.

Beispiel: Messuhren und Bügelmessschrauben weisen im Getriebe oder den Gewinden ein geringes Spiel auf. Dieses kann zu Hysteresen führen. Im Rahmen der Ablesungen wird empfohlen, die unterschiedlichen Messbedingungen nicht zusammenzufassen, sondern getrennt anzugeben (Messung im Aufwärtsgang; Messung im Abwärtsgang). Sollte dies nicht möglich sein und der Mittelwert der Ablesungen zu einer Messgröße kombiniert werden, muss die halbe Differenz zwischen den beiden Messrichtungen als systematischer Messunsicherheitseinfluss berücksichtigt werden.

Variationen in der Anwendung

Jede Änderung der Messbedingungen führt zu zusätzlichen Messunsicherheitseinflüssen. Inwieweit diese relevant sind, ist von Fall zu Fall individuell zu prüfen. Neben der bereits besprochenen Temperaturabhängigkeit, sind diverse weitere Eigenschaften zu prüfen, wie beispielsweise:

- Lastabhängigkeit
- Filtereinstellungen
- Messzeiten

Relevanz für die Messunsicherheit: Für jede Abweichung von den vorgegebenen Messbedingungen sollte jeweils ein Messunsicherheitseinfluss betrachtet werden.

Funktion zur Beschreibung eines Messbereichs

Es ist möglich, als Messergebnis bei einer Kalibrierung nicht die Stützpunkte, sondern die Messmittelkennlinie als Funktion zu definieren.

⁴⁰ Diverse Richtlinien des DKD, beispielsweise für Manometer, Klimakammern, Kraftmessanlagen, usw., Sie gehen auf diese Problematik ein, indem jeweils

mehrere Messabläufe mit Aufwärts- und Abwärtsgang getrennt ausgewertet werden und Messgrößen entsprechend aufgeschlüsselt werden.

Linearisierung

Bei der Annahme einer linearen Funktion ...

$$y = a_1 \cdot x + a_0$$

Gleichung 6: Lineare Funktion

... wären a_1 und a_0 zusammen eine mehrdimensionale Messgröße, die auch als Vektor $\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix}$ geschrieben werden kann.

Relevanz für die Messunsicherheit: Zu bedenken ist, dass zu a_1 und a_0 jeweils eine Messunsicherheit zu ermitteln ist. Diese wäre dann auch mehrdimensional^{41 42}: $\begin{pmatrix} U_{a_0} \\ U_{a_1} \end{pmatrix}$

Nutzung von Polynomen an Stelle von linearen Gleichungen

Bei unlinearen Kennlinien können höhergradige Polynome oder sonstige Funktionen zur Beschreibung von Kennlinien eingesetzt werden, beispielsweise ein Polynom dritter Ordnung:

$$y = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x^1 + a_0$$

Gleichung 7: Polynom dritter Ordnung zur Beschreibung einer Messmittelkennlinie

Die Polynomparameter müssen aus den einzelnen Ablesungen an den Stützpunkten ermittelt werden. Der Lösungsvektor ist vierdimensional. Entsprechend viele Messpunkte sind mindestens zu wählen. Eine Überbestimmung des Systems ist sinnvoll, um dann mittels Regression das bestmögliche Interpolationspolynom bestimmen zu können.

Beispiel: Die internationale Temperaturskala wird technisch an Stützpunkten, wie Tripelpunkten oder Schmelzpunkten realisiert. Diese Punkte liegen teilweise weit auseinander und selbst die technisch besten Sensoren, wie Platin-Widerstandssensoren sind nicht ganz linear im Anwendungsfall. Ihre Kennlinien werden für präzise Anwendungen als Polynom beschrieben.

Beispiel: Auch Widerstandsnormale sind in der Darstellung der Messgröße „Ohmscher Widerstand“ temperaturabhängig. Die Widerstandsdarstellung wird in Abhängig der Temperatur als Polynom beschrieben.

Die Beschreibung einer Kennlinie durch eine Regressionsgerade oder ein Regressionspolynom ist immer eine Approximation an die physikalische Realität, die nie exakt nachgebildet werden kann.

Aus wirtschaftlicher und metrologischer Sicht ist die Polynomdarstellung sinnvoll, weil sie programmtechnisch in der Messsoftware hinterlegt werden kann. Andere funktionale Darstellungen, wie Logarithmen oder Exponentialfunktionen sind in Bereichen denkbar, aber unüblich.

Relevanz für die Messunsicherheit: Zu derartigen multivariablen Ausgangsgrößen können die Messunsicherheiten der einzelnen Komponenten mittels Matrizen bestimmt werden. Auch dies wird in JCGM 102 [5] beschrieben.

In Messunsicherheitsbilanzen zu betrachtende Einflussgrößen für Normale

Auch wenn nicht alle zuvor angesprochenen Einflussgrößen einen maßgeblichen Beitrag zur Messunsicherheit liefern, sollten – sofern vorliegend – die nachfolgenden Einflüsse im Rahmen der Messunsicherheitsanalyse angesprochen werden:

Zu diskutierende Messunsicherheitseinflüsse des Normals	
Individuelle Bewertung	Pauschale Bewertung
(Messabweichung) ⁴³	Spezifikationsgrenzen ⁴⁴
Messunsicherheit der Feststellung der Messabweichung	Erweiterung der Spezifikationsgrenzen je nach Entscheidungsregel der Konformitätsbestätigung
Verhalten bei geänderten Messbedingungen und geänderten Einstellungen	
Linearität der Kennlinie	
Mögliche Drift seit der letzten Kalibrierung	
Auflösung von Anzeigen oder Einstellbarkeit	
Hysterese, sofern in der Messgröße enthalten	
Wiederhol- und/oder Vergleichspräzision ⁴⁵	

Tabelle 12: Zu diskutierende Messunsicherheitseinflüsse

⁴¹ Auch hierzu gibt es ein eigenes JCGM-Papier: JCGM 102:2011 [5]

⁴² Das große U ist das üblicherweise verwendete Formelzeichen für die erweiterte Messunsicherheit in Einheiten der Messgröße

⁴³ Soweit nicht vor der Bestimmung der Messunsicherheit korrigiert

⁴⁴ Sofern im Rahmen von Kalibrierungen mit einer Konformitätsaussage bestätigt

⁴⁵ Die Wiederhol- und Vergleichspräzision sind keine Eigenschaften, die einem Messmittel zugeordnet werden können. Es sind Eigenschaften der Messung als Ganzes. Die Punkte werden hier der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Impressum



Pesch Consult ist ein Beratungsbüro für Metrologie aus Zülpich. Der Schwerpunkt der Dienstleistungen liegt im Bereich Vor-Ort-Beratung, Training und Seminare rund um die Ermittlung der Messunsicherheit und das Labormanagement nach DIN EN ISO/IEC 17025 [1].

Die Optimierung von Messprozessen in Hinblick auf Unsicherheiten, Zeitmanagement, Automatisierungsgrad und Sicherheit bildet das zweite Standbein.

Des Weiteren begleiten wir Firmen auf dem Weg der Akkreditierung als Kalibrier- oder Prüflabor nach DIN EN ISO/IEC 17025.

Diverse messtechnische Publikationen und die Mitarbeit im Fachausschuss „Messunsicherheit“ des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) und internationalen Gremien sind Teil der technisch-wissenschaftlichen Arbeit.



Dieses Whitepaper ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons

Nutzerlizenz CC by-nc-nd 3.0

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>).

In diesem Zusammenhang bedeutet „nicht-kommerziell“ (NC), dass das Werk nicht zum Zwecke der Einnahmenerzielung verbreitet oder öffentlich zugänglich gemacht werden darf. Eine Nutzung seiner Inhalte für die gewerbliche Verwendung in Laboratorien ist ausdrücklich erlaubt.

Der Autor ist zu nennen. Das Dokument darf inhaltlich nicht verändert werden.

Änderungshistorie

Ausgabe	Datum	Revisionsgrund
1.0	27. Dez. 2023	Erstausgabe
1.1	19. Jan 2024	Konkretisierung Driftverhalten

Tabelle 13: Änderungshistorie

Haftungsausschluss

Der vorliegende Text wurde nach bestem Wissen sorgfältig erstellt. Für die technische Korrektheit dieser Informationen kann keine Gewähr übernommen werden.

Auch sind Fehler auf der Basis unzureichender Informationen, Fehlinterpretationen oder Rechenfehler nie ganz auszuschließen. Hieraus können keine Schadenersatzansprüche abgeleitet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), „DIN EN ISO IEC 17025:2018 - Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC DIS 17025:2016),“ Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- [2] European Accreditation, „EA-4/02 M:2022 Evaluation of the Uncertainty In Calibration,“ 2022.
- [3] D. W. Wyatt und H. T. P. Castrup, „Managing Calibration Intervals,“ in *NCSL 1991 Annual Workshop & Symposium*, Albuquerque, NM, USA, 1991.
- [4] National Conference Standard Laboratories - International, Recommended Practice 1 (RP-1) - Establishment and Adjustment of Calibration Intervals, Boulder, CO (USA): NCSL International, 2010.
- [5] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), „JCGM 102 - Evaluation of measurement data | Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Models with any number of output quantities,“ BIPM, Paris, 2011.
- [6] National Air & Space Administration (NASA), „NASA Reference Publication 1342: Metrology - Calibration and Measurement Guidelines,“ Pasadena, USA, 1994.
- [7] B. Pesch, Management von Kalibrier- und Prüflaboratorien, Norderstedt: Bod - Books on Demand, 2021.
- [8] International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), „ILAC-G8:09/2019 - Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity,“ Silverwater, Australia, 2019.
- [9] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), „JCGM 200 - International vocabulary of metrology JCGM200:2012,“ JCGM, Paris, 2012.
- [10] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), „JCGM 100 - Evaluation of measurement data | Guide to the expression of uncertainty in measurement,“ BIPM, Paris, 2008.