

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD

**Richtlinie
DKD-R 3-3**

**Kalibrierung von
Kraftmessgeräten**

Ausgabe 03/2024, Revision 1

<https://doi.org/10.7795/550.20250130>



	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	2 / 45

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: 0531 592-8021

Internet: <https://www.ptb.de/cms/de/metrologische-dienstleistungen/dkd.html>

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	3 / 45

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-3 Kalibrierung von Kraftmessgeräten, Ausgabe 03/2024, Revision 1, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20250130

Das Werk einschließlich aller seiner Teile 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.



Autoren:

Müller, Heiko; VW, Wolfsburg
 Rehefeld, Jörg; VW, Wolfsburg
 Röske, Dirk; PTB, Braunschweig
 Schwind, Daniel; GTM, Bickenbach
 Stenner, Lioba; HBK, Darmstadt
 im Namen vieler weiterer, hier nicht genannter Kolleginnen und Kollegen.

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Kraft, Beschleunigung und Akustik* des DKD.

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	4 / 45

Vorwort

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente zu den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. In den Richtlinien werden technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe beschrieben, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien als Vorbild zur Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. DKD-Richtlinien können zum Bestandteil von Qualitätsmanagementhandbüchern der Kalibrierlaboratorien werden. Durch die Umsetzung der Richtlinien wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien gefördert und die Kontinuität und Überprüfbarkeit der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert.

Die DKD-Richtlinien sollen nicht die Weiterentwicklung von Kalibrierverfahren und -abläufen behindern. Abweichungen von Richtlinien und neue Verfahren sind im Einvernehmen mit der Akkreditierungsstelle zulässig, wenn fachliche Gründe dafür sprechen.

Kalibrierungen der akkreditierten Laboratorien geben dem Anwender Sicherheit für die Verlässlichkeit von Messergebnissen, erhöhen das Vertrauen der Kunden und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem nationalen und internationalen Markt und dienen als messtechnische Grundlage für die Mess- und Prüfmittelüberwachung im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Die vorliegende Richtlinie wurde im Rahmen des Fachausschusses *Kraft, Beschleunigung und Akustik* erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt.

Die vorliegende Ausgabe ersetzt alle bisherigen Ausgaben der DKD-R 3-3. Sie enthält gegenüber der vorherigen Ausgabe im Wesentlichen folgende Änderungen:

- Anpassung an die aktuelle Ausgabe der DIN EN ISO 376
- Neuer Anhang C zum Verfahren für die Ermittlung von a-priori Wissen
- Aktualisierung des Literaturverzeichnisses
- Redaktionelle Anpassungen zur Präzisierung und besseren Verständlichkeit

Am 30. Januar 2025 wurden auf den folgenden Seiten Druckfehler korrigiert (Revision 1):

1. Seite 7, Formelzeichen: X_i ersetzt durch X_j , X'_i ersetzt durch X'_j ,
2. Seite 21, Tabelle 5: Teiler für die Nullpunktabweichung δF_{zer} geändert in 1,
3. Seite 26, Tabelle 8: Teiler für die Nullpunktabweichung K_{zer} geändert in 1,
4. Seite 41: Korrektur der Gleichungen (17) und (18).

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck und Geltungsbereich	6
2	Symbole	7
3	Kalibriergegenstand	9
3.1	Bestandteile des Kraftmessgerätes	9
3.2	Kalibrierfähigkeit	9
3.3	Einspannteile, Einbauteile	10
3.4	Signalführende Komponenten in der Kraft-BNME	10
4	Umgebungsbedingungen	10
5	Durchführung der Kalibrierung	11
5.1	Ablauf A:	13
5.2	Ablauf B:	13
5.3	Ablauf C:	14
5.4	Ablauf D:	14
6	Auswertung	15
7	Messunsicherheit	16
7.1	Messunsicherheit für das Modell Anzeigeabweichung	17
7.1.1	Einflussgrößen	17
7.1.2	Modell der Auswertung (am Beispiel eines anzeigenden Kraftmessgerätes) ...	18
7.1.3	Unsicherheitsanalyse	19
7.1.4	Messunsicherheitsbilanz	22
7.2	Messunsicherheit für das Modell Übertragungskoeffizient	23
7.2.1	Einflussgrößen	23
7.2.2	Modell der Auswertung (am Beispiel eines Kraftaufnehmers)	23
7.2.3	Unsicherheitsanalyse	25
7.2.4	Messunsicherheitsbilanz	26
7.3	Messunsicherheitsbeiträge bei reduzierten Kalibrierabläufen	28
7.4	Visualisierung der Messunsicherheitsbilanz	30
7.5	Abweichungsspanne	31
7.6	Einwertangabe als Kalibrierergebnis	31
8	Angaben im Kalibrierschein	34
9	Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium	35
10	Konformität	35
11	Kalibriermarke	35
12	Literaturverzeichnis	36
Anhang A:	Ablaufplan für die Abschätzung der Messunsicherheit	37
Anhang B:	Messunsicherheitsbeiträge (Schätzwerte und Kenngrößen)	38
Anhang C:	Verfahren für die Ermittlung von a-priori Wissen	41

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	6 / 45

1 Zweck und Geltungsbereich

Diese Richtlinie gilt für statische Belastungsverläufe. Neben den üblichen Kalibrierabläufen mit drei Einbaustellungen werden auch vereinfachte Abläufe beschrieben, die den Aufwand auf ein messtechnisch vertretbares Mindestmaß und damit die Kosten reduzieren. Dazu sind bestimmte Voraussetzungen, wie die Anforderungen internationaler Regeln zur Bestimmung der Messunsicherheit, zu erfüllen. Über den in dieser Richtlinie beschriebenen Aufwand kann der Anwender hinausgehen, er darf ihn jedoch nicht unterschreiten. Die Richtlinie erlaubt, praxisingerechte Kalibrierabläufe und Auswertungen umzusetzen.

Grundsätzlich können vereinfachte Kalibrierabläufe nicht zu kleineren Messunsicherheiten führen als entsprechende Kalibrierungen desselben Kalibriergegenstandes nach aufwendigeren Verfahren (z. B. DIN EN ISO 376).

Bei der Anwendung verkürzter Kalibrierabläufe ist zu beachten, dass bei hochwertigen Kraftmessgeräten durch die erhöhte Messunsicherheit ggf. keine Konformität mit (Hersteller-) Spezifikationen festgestellt werden kann.

In dieser Richtlinie werden keine Klassifizierungen mehr beschrieben.

Diese Richtlinie gilt für alle Kraftmessgeräte, bei denen die Kraft über die elastische Verformung eines Körpers ermittelt wird. Sie kann auch für Kraftaufnehmer allein angewendet werden.

Diese Richtlinie darf nur für Kraftmessgeräte angewendet werden, die in zu- und abnehmender Belastung jeweils in mindestens 3 Kraftstufen kalibriert werden können.

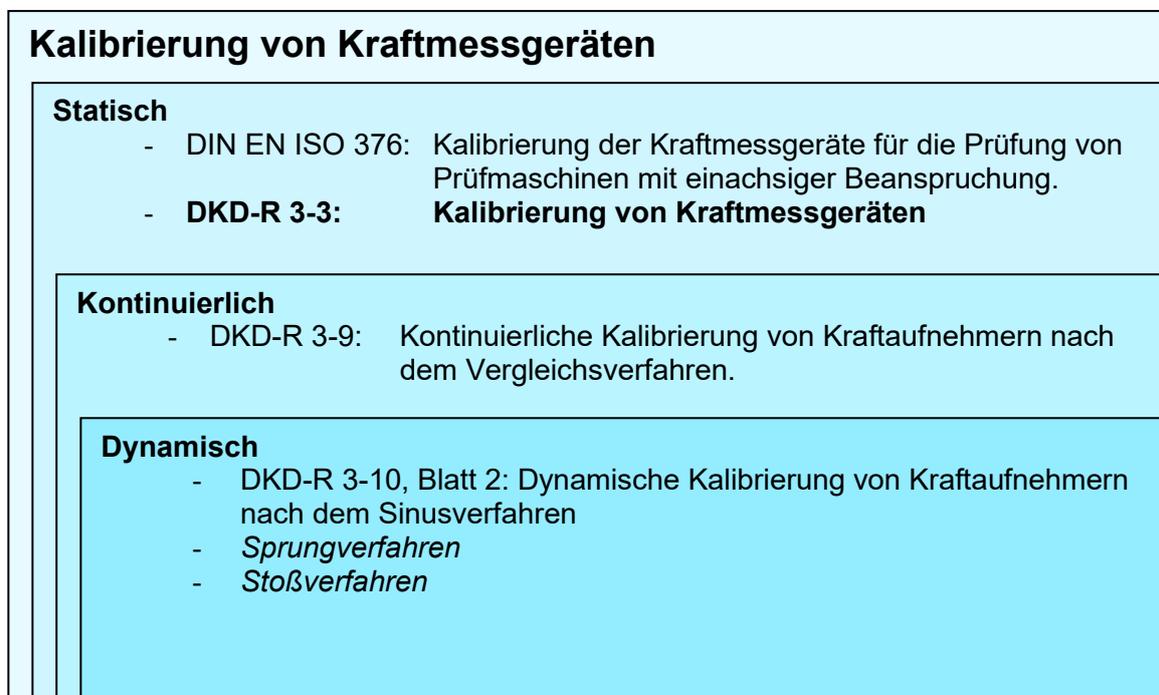


Abbildung 1: Einordnung der DKD-R 3-3 in bestehende Regelwerke zur Kraftkalibrierung. Für die kursiv dargestellten Anwendungen sind entsprechende Regelwerke zu erarbeiten.

2 Symbole

Die in dieser Richtlinie verwendeten Symbole und Benennungen entsprechen den Vorgaben der DIN EN ISO 376 und der Richtlinie VDI/VDE/DKD 2638. Zusätzliche Symbole und Benennungen sind nachfolgend aufgeführt. Die erstmals in Abschnitt 7 Messunsicherheit verwendeten Symbole werden dort gesondert aufgeführt.

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
F	N	Kraft
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturdifferenz
f_c	%	Relative Regressionsabweichung für die zunehmende Belastung
f'_c	%	Relative Regressionsabweichung für die abnehmende Belastung
f_0	%	Relative Nullpunktabweichung
	AE	AE = Anzeigeeinheit des Ausgangssignals (z. B. N, mV/V, V, LSB)
b	AE	Vergleichspräzision (bei zunehmender Belastung)
b_{ab}	AE	Vergleichspräzision (bei abnehmender Belastung)
b^*	AE	Vergleichspräzision (bei zu- und abnehmender Belastung)
b'	AE	Wiederholpräzision (bei zunehmender Belastung)
b'_{ab}	AE	Wiederholpräzision (bei abnehmender Belastung, Ablauf B)
b'^*	AE	Wiederholpräzision (bei zu- und abnehmender Belastung, Ablauf B)
v	AE	Umkehrspanne
X_A	AE	Wert der Regressionsfunktion
X_j	AE	Messwert bei zunehmender Kraft an der Stufe j
X'_j	AE	Messwert bei abnehmender Kraft an der Stufe j
W	%	Relative erweiterte Messunsicherheit
W'	%	Relative Abweichungsspanne
E	AE/N	Übertragungskoeffizient (Empfindlichkeit) eines Kraftaufnehmers
E_{app}	AE	(Mess-)Abweichung des Koeffizienten
\overline{X}_r	AE	Mittelwert des Verformungsmesswertes in verschiedenen Einbaustellungen (bei zunehmender Belastung, Ablauf A)

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	8 / 45

$\overline{X_{wr}}$	AE	Mittelwert des Verformungsmesswertes in gleicher Einbaustellung (bei zunehmender Belastung, Abläufe A und B)
$\overline{X'_r}$	AE	Mittelwert des Verformungsmesswertes in verschiedenen Einbaustellungen (bei abnehmender Belastung, Ablauf A)
$\overline{X'_{wr}}$	AE	Mittelwert des Verformungsmesswertes in gleicher Einbaustellung (bei abnehmender Belastung, Ablauf B)
$\overline{X_r^*}$	AE	Mittelwert des Verformungsmesswertes in verschiedenen Einbaustellungen (bei zu- und abnehmender Belastung, Ablauf A)
$\overline{X_{wr}^*}$	AE	Mittelwert des Verformungsmesswertes in gleicher Einbaustellung (bei Abläufen B und C aus zu- und abnehmender Belastung; bei Ablauf D aus den zwei zunehmenden Belastungsmessreihen)

Abkürzungen

Abkürzungen	Erläuterung
a.v.	actual value, Istwert
DAkkS	Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
f.s.	full scale, Endwert
K-BNME	Kraft-Bezugsnormal-Messeinrichtung
MU	Messunsicherheit

3 Kalibriergegenstand

3.1 Bestandteile des Kraftmessgerätes

Das Kraftmessgerät besteht aus Kraftaufnehmer, Anpasser (z. B. Verstärker) und einem Ausgeber (z. B. Anzeigeeinrichtung). Bei Kraftmessgeräten mit digitalem Ausgang kann anstelle der Geräteanzeige der Messwert auch über eine genormte Schnittstelle auf ein Datenendgerät – Drucker, Aufzeichnungsgerät oder Rechner – übertragen werden. Eine Anzeige der Messwerte während der Kalibrierung wird empfohlen. Es ist sicherzustellen, dass die eingelesenen Daten eindeutig interpretiert und verarbeitet werden.

Falls der Kalibriergegenstand nur aus dem Kraftaufnehmer besteht, muss mit rückführbar kalibrierten Komponenten der Kraft-Bezugsnormalmesseinrichtung (K-BNME) eine Messkette zusammengestellt werden. Es ergeben sich u. a. Unterschiede in der Messunsicherheitsbetrachtung.

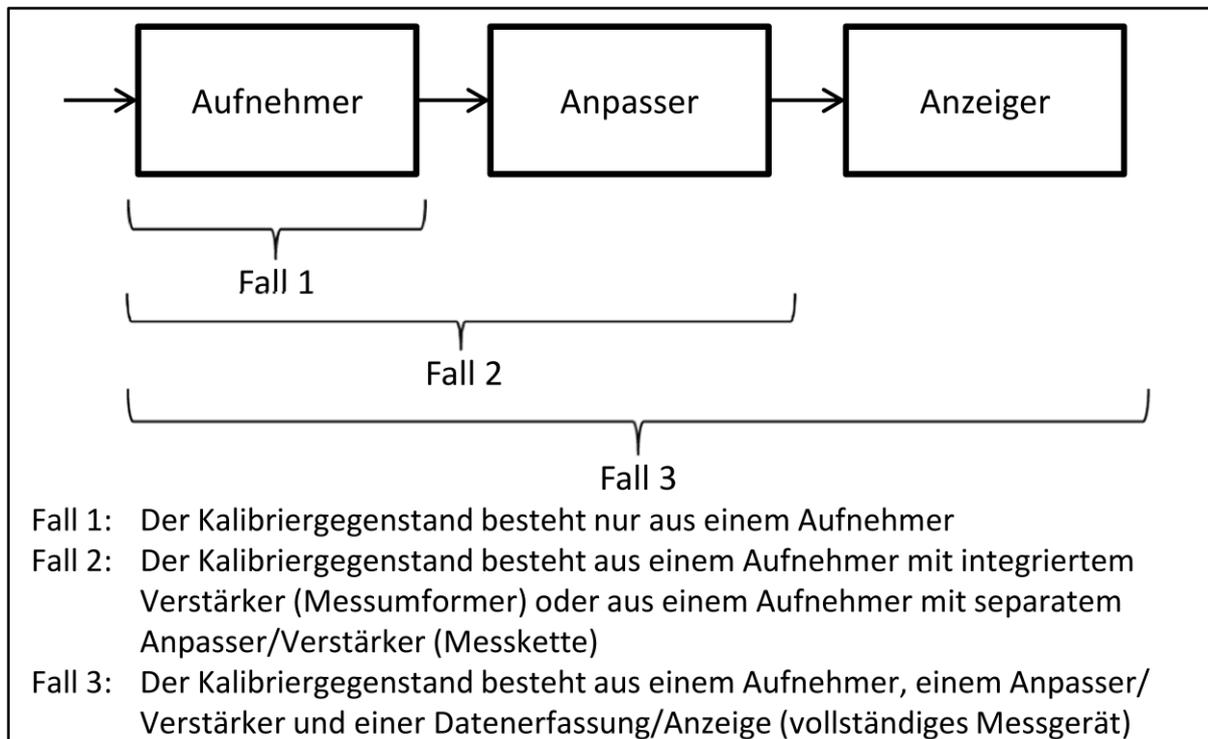


Abbildung 2: Fallunterscheidung Kalibriergegenstand

3.2 Kalibrierfähigkeit

Die Bearbeitung eines Kalibrierauftrages setzt die Kalibrierfähigkeit (Eignung) des Kalibriergegenstandes voraus, d. h. der momentane Zustand des Kalibriergegenstandes sollte den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen.

Vor Beginn der Kalibrierung sind Beschaffenheits- und Funktionsprüfungen vorzunehmen, um sicherzustellen, dass ein ungestörter Kalibrierablauf gewährleistet ist.

Beschaffenheitsprüfungen umfassen z. B.:

- Sichtprüfung auf Beschädigungen
- Sichtprüfungen hinsichtlich Beschriftung/Lesbarkeit des Typenschildes
- Prüfung, ob die zur Kalibrierung erforderlichen Unterlagen (Technische Daten, Bedienungsanleitungen) vorliegen.

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	10 / 45

Funktionsprüfungen umfassen z. B.:

- Elektrische Funktionsfähigkeit
- Messsignalrichtung
- Isolationswiderstand
- Nullsignal

3.3 Einspannteile, Einbauteile

Die Einbauteile sind als Bestandteil des Kalibriergegenstandes anzusehen. Die Bereitstellung der Einbauteile ist zwischen Auftraggeber und Kalibrierlaboratorium abzustimmen. Einbauteile sind bevorzugt nach DIN EN ISO 376 – Anhang A – auszulegen. Sofern Einbauteile nach Norm nicht angewendet werden können, sollten sie die Verhältnisse im praktischen Einsatz nachbilden. Dabei ist zu beachten, dass bei der Kopplung zwischen Kalibriergegenstand und Referenz-Kraftaufnehmer keine unzulässigen Störkomponenten entstehen (Vermeidung von Biegemomenten, Verspannungen oder Verformungen).

Hinweis:

Die Dimensionierung der Einspannteile muss so ausgelegt sein, dass die Kalibriereinrichtung nicht durch einen Bruch der Einspannteile beschädigt wird. Die Toleranzen der Abmessungen für Einspannteile sollten an die Toleranzen aus den technischen Zeichnungen des Kraftaufnehmers angepasst werden.

3.4 Signalführende Komponenten in der Kraft-BNME

Unter den signalführenden Komponenten werden die Messverstärker und die Anzeiger im Messkanal für den Kalibriergegenstand (siehe Abbildung 2, Fall 1) verstanden.

Die Auswahl und die Einstellungen der signalführenden Komponenten obliegen dem Kalibrierlaboratorium (ggf. in Absprache mit dem Kunden). Das Übertragungsverhalten der Komponenten muss bekannt sein und in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

Erfassbare systematische Abweichungen können durch Korrektur im Kalibrierergebnis berücksichtigt werden.

4 Umgebungsbedingungen

Die relevanten Umgebungsbedingungen (Umgebungstemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte) sollten überwacht und im Kalibrierschein dokumentiert werden; ggf. sind sie in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Während der Kalibrierung muss sich der Messaufbau im thermischen Gleichgewicht befinden. Die Kalibrierung ist bei einer auf ± 1 K stabilen Temperatur vorzunehmen und diese muss entsprechend DIN EN ISO 376 [1] im Bereich von 18 °C bis 28 °C liegen. In Deutschland wird eine Bezugstemperatur zwischen 19 °C und 23 °C und am Ort des Kalibriergegenstandes eine maximale Schwankungsbreite von 1 K während der Kalibrierung empfohlen.

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	11 / 45

5 Durchführung der Kalibrierung

Vor der Kalibrierung des Kraftaufnehmers bzw. des Kraftmessgerätes ist das Temperaturgleichgewicht mit der Umgebung abzuwarten; eine mögliche Erwärmung des Aufnehmers durch die Speisespannung ist dabei zu berücksichtigen. Bei Kraftaufnehmern, z. B. mit Dehnungsmessstreifen (DMS), ist die komplette Messkette vor der Kalibrierung bis zur Stabilisierung des Messgerätes elektrisch in Betrieb zu nehmen. Danach ist das Nullsignal als Ausgangssignal des unbelasteten Kraftaufnehmers ohne Einbauteile in definierter Lage (in Bezug zum Erdschwerefeld) zu messen und im Kalibrierschein anzugeben. Der Vergleich des aktuell gemessenen Nullsignals mit früher gemessenen kann Aufschluss über Veränderungen des Kraftaufnehmers geben, z. B. durch Überlastung.

Wird der Kraftaufnehmer mit einem Anzeigegerät des Kalibrierlaboratoriums kalibriert, so ist dies im Kalibrierschein anzugeben. Im Allgemeinen ist die Austauschbarkeit auf Geräte gleicher Bauart beschränkt.

Hinweis:

Sofern der Kunde sein Anzeigegerät nicht zur Kalibrierung mitschickt, muss der Kunde die Überprüfung der Austauschbarkeit des Anzeigegerätes selbst (z. B. mit Hilfe einer externen Kalibrierung) sicherstellen.

Soll der Kraftaufnehmer in Zug- und Druckkrafttrichtung kalibriert werden, so sind nacheinander in den Krafrichtungen getrennte Kalibrierungen und Auswertungen auszuführen.

Als Vorbelastung ist der Kraftaufnehmer nach jedem Einbau oder jeder Umkehrung der Krafrichtung mit der Höchstkraft zu belasten, die dem jeweiligen Kalibrierbereichsendwert entsprechen muss. Ist der Kalibriergegenstand bauartbedingt für die Belastung in Richtung Zug- und Druckkraft geeignet, muss vor der Kalibrierung eine dreimalige Vorbelastung erfolgen. Ist der Kalibriergegenstand bauartbedingt nur für die Belastung in Richtung Zug- oder Druckkraft geeignet oder kann der Kunde die Richtung der letzten nutzungsbedingten Belastung angeben, so ist vor der Kalibrierung eine zweimalige Vorbelastung ausreichend. In jeder neuen Einbaustellung muss eine weitere Vorbelastung erfolgen.

Die Vorbelastungszeit soll mindestens 1 Minute betragen. Die Nullpunktablesung erfolgt ca. 30 Sekunden nach der vollständigen Entlastung des Kraftaufnehmers. Die Kraftstufen sind möglichst gleichmäßig über den Kalibrierbereich zu verteilen. Jede Messreihe enthält die gleichen Kraftstufen. Für die Kraftstufenänderung einer Messreihe gilt, dass die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Belastungsschritten gleich sein soll und 30 Sekunden nicht unterschreiten darf, sowie dass die Ablesung frühestens 30 Sekunden nach Beginn des Kraftwechsels erfolgen darf.

Für jede Messreihe ist das Messsignal des unbelasteten Kraftaufnehmers (inkl. Kraft-einleitungsteilen) vor und nach der Belastung zu registrieren.

Die Mindestanzahl an Kalibrierstufen für jede Messreihe beträgt 3 Messpunkte (ohne den Nullpunkt).

Soll eine Regressionsgleichung 3. Grades angegeben werden, so müssen mindestens 5 Messpunkte je Messreihe realisiert werden, die gleichmäßig über den Kalibrierbereich verteilt sein müssen, d. h. bei 20 %, 40 %, 60 %, 80 % und 100 %. Bei mehr Messpunkten kann die Messreihe z. B. um einen zusätzlichen Messpunkt bei 10 % erweitert werden.

In dieser Richtlinie werden nach Aufwand abgestuft vier Kalibrierabläufe (A bis D) beschrieben. Dabei müssen die Kenngrößen (Vergleichspräzision, Wiederholpräzision, Umkehrspanne), die nicht mehr aus den Messwerten bestimmt werden können, aus a-priori-Wissen ergänzt werden. Dieses Wissen kann aus statistischen Verfahren (siehe [7] und Anhang C), Kalibrierscheinen von früheren Kalibrierungen (z. B. nach DIN EN ISO 376) oder aus Datenblättern stammen.

Hinweis 1:

In den folgenden Darstellungen der Kalibrierabläufe A bis D werden Symbole und Benennungen nach DIN EN ISO 376 verwendet.

Hinweis 2:

Datenblattangaben, die sich nach Regelwerken wie der VDI/VDE/DKD 2638 richten, unterstützen die Anwendung verkürzter Abläufe, da die Begriffe und ihre Definitionen festgelegt sind. Über die verwendete Datenquelle und die eingesetzten Werte sind im Kalibrierlaboratorium mit Zuordnung zum Auftrag Aufzeichnungen aufzubewahren.

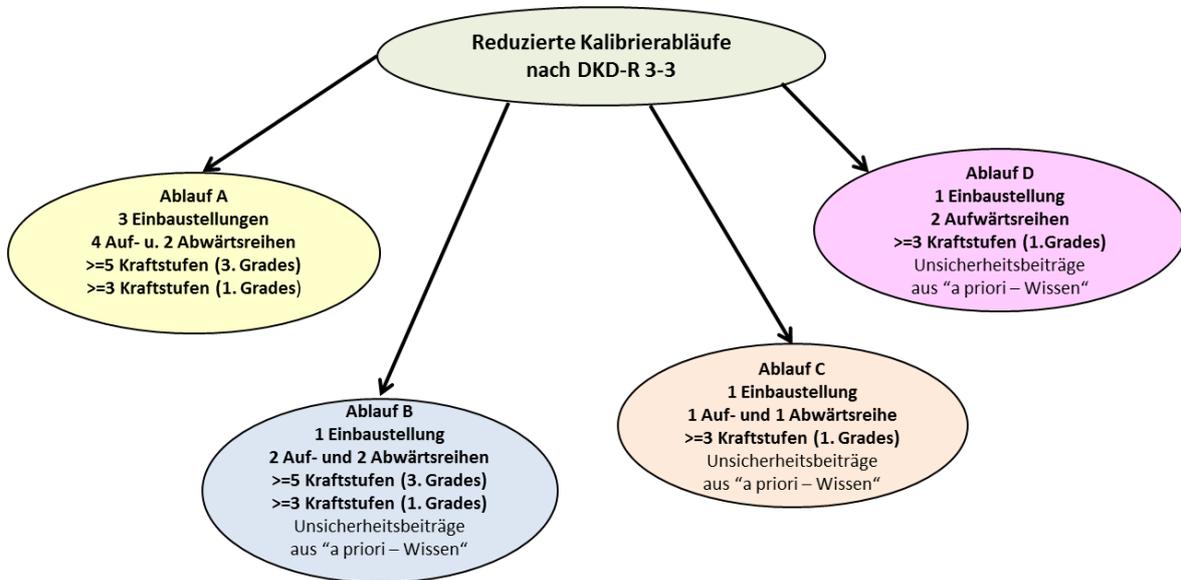


Abbildung 3: Kalibrierabläufe der DKD-R 3-3 mit Angabe der Anzahl der Einbaustellungen, Kraftstufen und dem üblichen Grad der Regressionsfunktion

Tabelle 1: Parameter der Kalibrierabläufe

Kalibrierablauf	Anzahl der Vorbelastungen	Anzahl der Einbaustellungen	Anzahl der Messreihen		Mindestanzahl der Messpunkte für eine Regressionsfunktion <small>ohne Null, jeweils zu- bzw. abnehmende Belastung</small>		Kraftstufen <small>(in % vom Kalibrierbereichsendwert)</small> z. B.
			aufwärts	abwärts	1. Grades	3. Grades	
A	2 ... 3	3	4	2	≥ 3	≥ 5	20, 40, 60, 80, 100 oder 20, 60, 100
B	2 ... 3	1	2	2	≥ 3	≥ 5	
C	2 ... 3	1	1	1	≥ 3	≥ 5	
D	2 ... 3	1	2	0	≥ 3	≥ 5	

5.1 Ablauf A:

Ausgehend vom Kalibrierablauf DIN EN ISO 376 wird bei Kalibrierablauf A (siehe Abbildung 4) lediglich die Anzahl der Kraftstufen reduziert. Dabei können alle zur Ermittlung der Messunsicherheit benötigten Kenngrößen (Vergleichspräzision, Wiederholpräzision, Umkehrspanne, Nullpunktabweichung) aus den Messwerten bestimmt werden.

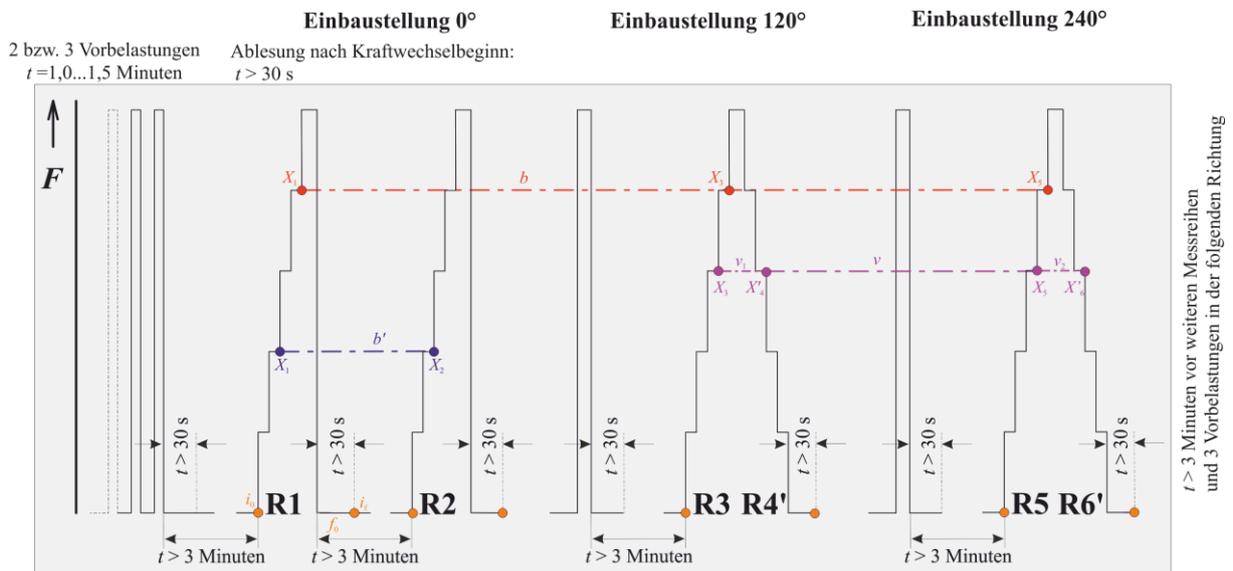


Abbildung 4: Beispiel Kalibrierablauf A; drei Einbaustellungen, fünf Kraftstufen

5.2 Ablauf B:

Bei Ablauf B wird in nur einer Einbaustellung in zwei Messreihen mit zu- und abnehmender Belastung kalibriert (siehe Abbildung 5). Dabei kann die Vergleichspräzision nur aus a priori-Wissen stammen.

2 bzw. 3 Vorbelastungen Ablesung nach Kraftwechselbeginn:
 $t = 1,0 \dots 1,5$ Minuten $t > 30$ s

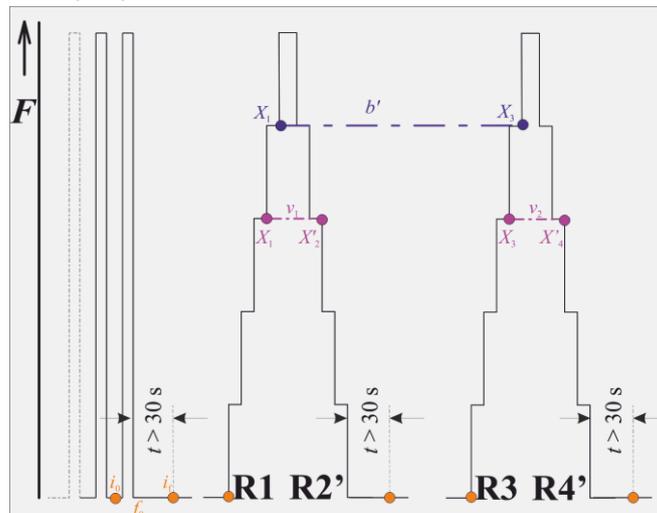


Abbildung 5: Beispiel Kalibrierablauf B; eine Einbaustellung, fünf Kraftstufen

5.3 Ablauf C:

Bei Ablauf C wird in nur einer Einbaustellung in einer Messreihe mit zu- und abnehmender Belastung kalibriert (siehe Abbildung 6). Dabei können die Wiederhol- und Vergleichspräzision nur aus a priori-Wissen stammen.

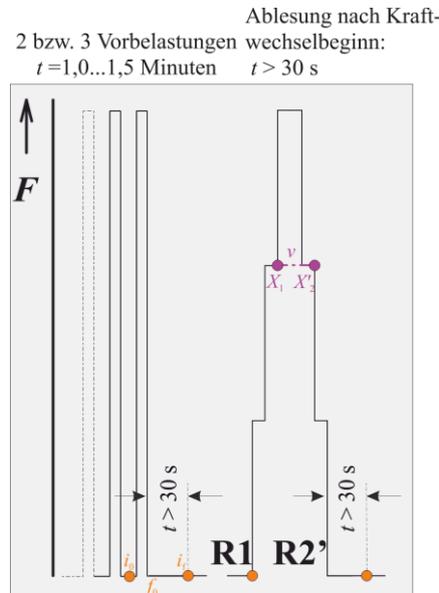


Abbildung 6: Beispiel Kalibrierablauf C; eine Einbaustellung, eine Messreihe, zu- und abnehmende Belastung, drei Kraftstufen

5.4 Ablauf D:

Bei Ablauf D wird in nur einer Einbaustellung in zwei Messreihen mit zunehmender Belastung kalibriert (siehe Abbildung 7). Dabei können die Vergleichspräzision und die Umkehrspanne nur aus a priori-Wissen stammen.

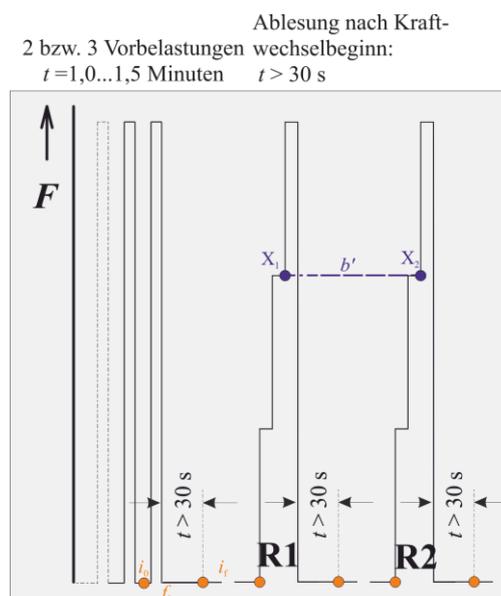


Abbildung 7: Beispiel Kalibrierablauf D; eine Einbaustellung, zwei Messreihen, zwei zunehmende Belastungen, drei Kraftstufen

6 Auswertung

Die Auswertung muss die für Kalibrierscheine notwendigen Informationen liefern, wie den am Normal eingestellten Wert und den vom Kalibriergegenstand angezeigten Wert mit begeordneter Messunsicherheit. Bei Aufnahme mehrerer Messreihen werden üblicherweise Mittelwerte und Ausgleichspolynome gebildet und weitergegeben.

In den bisherigen Regelwerken werden zur Bildung von Mittelwerten und Ausgleichsfunktionen nur die Messwerte bei zunehmender Belastung berücksichtigt (vgl. z. B. DIN EN ISO 376). In Ergänzung dazu, können je nach Anwendungsfall und Kundenwunsch auch die Messwerte bei abnehmender Belastung oder die Mittelwerte aus zu- und abnehmender Belastung verwendet werden (siehe Abbildung 8).

Beispielsweise sollte eine gemeinsame Auswertung von Auf- und Abwärtsreihen (Auswertung durch die Mittelwerte) gewählt werden, wenn in der Anwendung Schwellbelastungen auftreten.

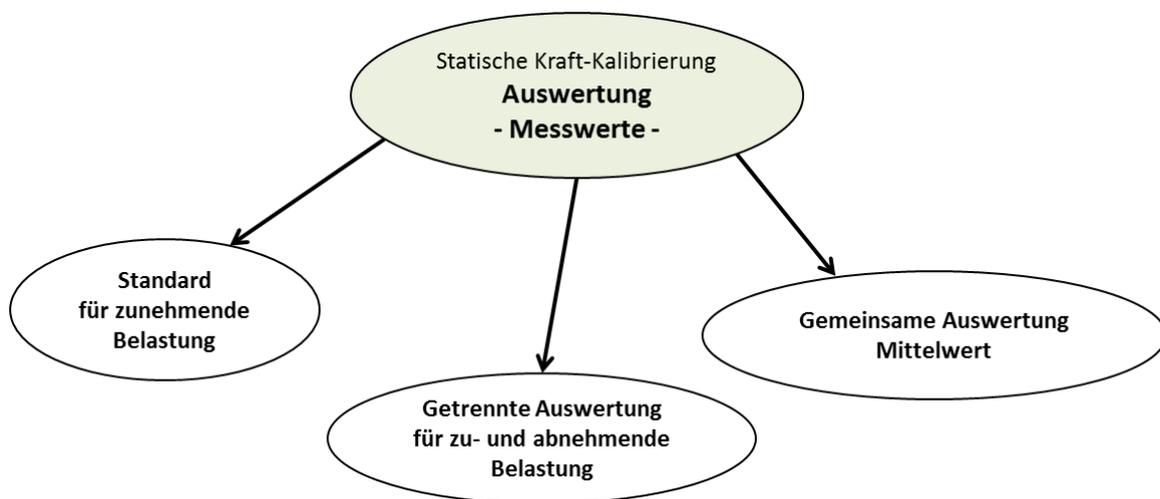


Abbildung 8: Mögliche Auswertungsarten

Die Ausgleichsrechnung soll so erfolgen, dass die Summe der Quadrate der absoluten Abweichungen ein Minimum ergibt und das Ausgleichspolynom kein konstantes Glied enthält. Als Ausgleichsfunktion wird ein Polynom 3. oder 1. Grades empfohlen (siehe Tabelle 1).

Angaben zur Bestimmung der besten Schätzwerte und der Messunsicherheitsbeiträge sind im Anhang B zu finden.

7 Messunsicherheit

Die Ermittlung der Messunsicherheit ersetzt nicht die Qualifikation und Erfahrung des Messtechnikers, z. B. bei der

- Auswahl des geeigneten Messverfahrens
- Gestaltung des Messaufbaus
- Durchführung der Messungen
- Auswertung der Messungen.

Tabelle 2: Quellen von Messabweichungen und Messunsicherheiten

Quelle	Ursache
Messgeräte	<ul style="list-style-type: none"> – interne und externe Abgleiche – Auflösung – Rauschen – Driften – Schutzschirmtechnik – Langzeit-Instabilität
Umgebungsbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> – Umgebungstemperatur – Luftdruck – relative Luftfeuchte – Vibration – Stöße – umgebendes Medium
Schaltungs-/Versuchsaufbau	<ul style="list-style-type: none"> – Impedanzen – Leitungen – Thermospannungen – Versorgungsspannungen – mechanische Adaptionen – Einbauorte – Einbaulagen – Massen – Fallbeschleunigung
Messtechniker	<ul style="list-style-type: none"> – Schreibfehler – Ablesefehler – Anwesenheit des Messtechnikers
Programmierung	<ul style="list-style-type: none"> – fehlerhafte Dateizugriffe – falsche Konstanten – falsche Parameterübergabe

Eine Messunsicherheit wird grundsätzlich einem Messwert beigeordnet. Dabei ist zuerst sicherzustellen, dass alle systematischen Abweichungen erkannt und hierfür die Korrekturen angebracht werden. Die verbleibenden unbekanntes Messabweichungen sind in Form von abgeschätzten Messunsicherheitsbeiträgen in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Für das Aufstellen des Modells der Auswertung wird empfohlen, die Einflussgrößen aufzulisten und grafisch darzustellen. Geeignet ist hierfür z. B. das Fischgräten-Diagramm (Ishikawa-Diagramm).

In Abhängigkeit von der Art des Kalibriergegenstandes (s. Abbildung 2) liefert die Kalibrierung unterschiedliche Ergebnisgrößen, d. h. es werden unterschiedliche Modelle der Auswertung mit unterschiedlichen Messunsicherheitsbeiträgen verwendet.

Im Folgenden werden beispielhaft das Modell und die Messunsicherheitsbilanz

- der Kalibrierung von anzeigenden Kraftmessgeräten Modell „Anzeigeabweichung“ in der Einheit N siehe Abbildung 2, Fall 3,
- der Kalibrierung von Kraftaufnehmern Modell „Übertragungskoeffizient“ in der Einheit (mV/V)/N siehe Abbildung 2, Fall 1

dargestellt.

Die Beispiele beinhalten Einflussgrößen aus Abbildung 9 bzw. Abbildung 10 ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Messunsicherheitsanteile werden aus den Messwerten gemäß DIN EN ISO 376 [1] bestimmt. Ist dies nicht möglich (z. B. bei den verkürzten Abläufen), werden die Messunsicherheitsanteile aus a-priori-Wissen abgeschätzt.

Es ist zu beachten, dass Modelle und Bilanzen nur für einzelne Messwerte gelten. Wenn Bereichsangaben gewünscht werden, dann kann wie in Kapitel 7.6 beschrieben verfahren werden.

7.1 Messunsicherheit für das Modell Anzeigeabweichung

Die Kalibrierung von anzeigenden Kraftmessgeräten liefert als Ergebnisgröße die Anzeigeabweichung als Differenz zwischen dem angezeigten und dem durch das Normal, d. h. die K-BNME, dar- bzw. eingestellten Wert.

7.1.1 Einflussgrößen

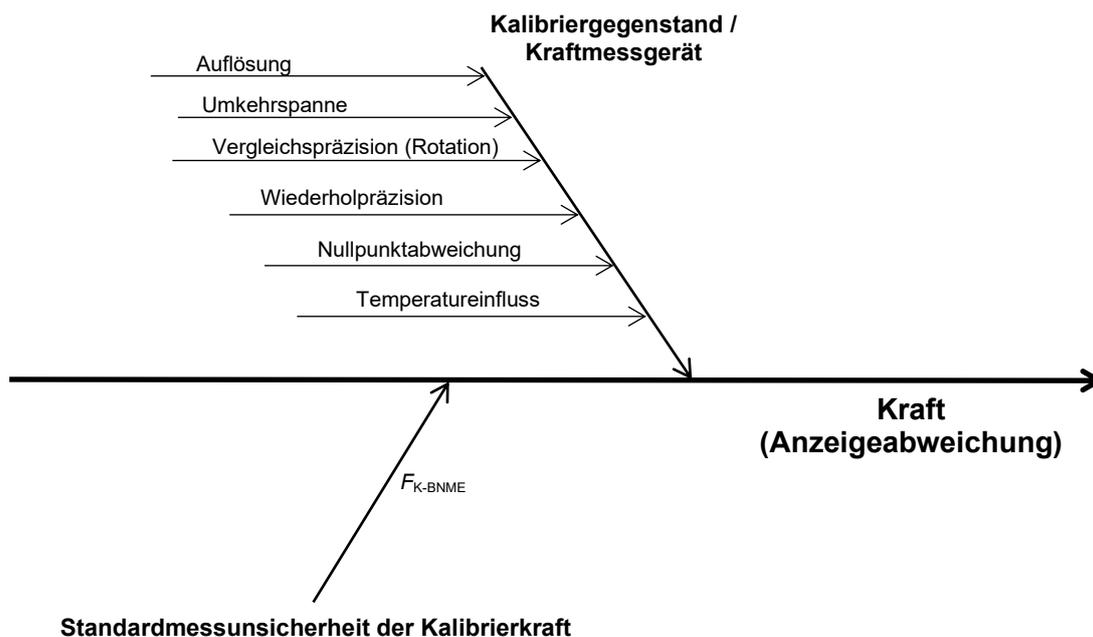


Abbildung 9: Einflussgrößen bei der Ermittlung der den Messwerten eines anzeigenden Kraftmessgerätes beigeordneten Messunsicherheiten

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	18 / 45

7.1.2 Modell der Auswertung (am Beispiel eines anzeigenden Kraftmessgerätes)

Das Modell der Auswertung ist als Summen-/Differenzmodell unter Verwendung von Messunsicherheiten in der Einheit der Messgröße formuliert.

In allgemeiner Darstellung gilt für die Messfunktion:

Größen:

$$Y = \sum_{i=1}^N p_i X_i; \quad p_i := \{+1, -1\} \quad (1)$$

Schätzwerte:

$$y = \sum_{i=1}^N p_i x_i; \quad p_i := \{+1, -1\} \quad (2)$$

In der detaillierten Darstellung – Bestimmungsgleichung der Anzeigeabweichung eines Kraftmessgerätes für einzelne Kraftwerte mit besten Schätzwerten – wird daraus der Ausdruck:

$$\Delta F_j = \bar{F}_j - F_{K-BNME,j} + \sum_{i=1}^N \delta F_{i,j} \quad (3)$$

mit \bar{F}_j als Mittelwert der nullpunktkorrigierten Anzeigewerte des Messgeräts bei jeder Kraftstufe j sowie k als Index für die unterschiedlichen Messreihen:

$$\bar{F}_j = \bar{F}_{MG,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (F_{ind,j,k} - F_{ind,0,k}) \quad (4)$$

und

$$\sum_{i=1}^5 \delta F_{i,j} = \delta F_{zer} + \delta F_{rep,j} + \delta F_{rot,j} + \delta F_{tmp,j} + \delta F_{rev,j} \quad (5)$$

mit i : Index der Messabweichungen.

Der Index „MG“ in $\bar{F}_{MG,j}$ soll verdeutlichen, dass hier das vollständige Messgerät betrachtet wird – bestehend aus Aufnehmer, Anpasser und Anzeiger (ggf. mit Versorgung).

Nachfolgend wird für eine bessere Übersichtlichkeit der Laufindex j für die Belastungsstufe weggelassen.

Tabelle 3: Messabweichungen bei der Ermittlung der den Messwerten eines anzeigenden Kraftmessgerätes beigeordneten Messunsicherheiten

ΔF	Ergebnisgröße; Anzeigeabweichung des Kraftmessgerätes	1	
$F_{\text{ind}}; F_{\text{ind},0}$	Anzeige des Kraftmessgerätes bei der Belastungsstufe und vor der Belastung	2	
$F_{\text{K-BNME}}$	durch die K-BNME eingestellter Kraftwert		
δF_{zer}	systematische Messabweichung aufgrund der Nullpunktabweichung	3	4
δF_{rep}	systematische Messabweichung aufgrund der Wiederholpräzision		
δF_{rot}	systematische Messabweichung aufgrund der Vergleichspräzision		
δF_{tmp}	systematische Messabweichung aufgrund des Temperatureinflusses		
δF_{rev}	systematische Messabweichung aufgrund der Umkehrspanne		

δF_i Messabweichung(en)

$E[\delta F_i] = 0$ Erwartungswert

7.1.3 Unsicherheitsanalyse

Aufgrund des linearen Summen-/Differenz-Modells mit den Faktoren $p_i := \{+1, -1\}$ sind die Empfindlichkeitskoeffizienten stets gleich 1 ($c_i = \pm 1$).

Damit entsprechen die Beiträge $u_i(y)$ zur Unsicherheit der Ergebnisgröße den Unsicherheiten der Eingangsgrößen $u(x_i)$. Es folgt für die dem Ergebnis beigeordnete Standardmessunsicherheit:

$$u(\Delta F) = \tag{6}$$

$$\sqrt{u_{\text{ind}}^2(\Delta F) + u_{\text{ind},0}^2(\Delta F) + u_{\text{K-BNME}}^2(\Delta F) + u_{\text{zer}}^2(\Delta F) + u_{\text{rep}}^2(\Delta F) + u_{\text{rot}}^2(\Delta F) + u_{\text{tmp}}^2(\Delta F) + u_{\text{rev}}^2(\Delta F)}$$

und für die erweiterte Messunsicherheit:

$$U(\Delta F) = k \cdot u(\Delta F). \tag{7}$$

Die erweiterte Messunsicherheit berechnet sich aus der Standardmessunsicherheit multipliziert mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$, so dass die Überdeckungswahrscheinlichkeit ca. 95 % beträgt.

Als Unsicherheit für die Bestimmung („Ablesung“) der angezeigten Werte wird die Auflösung oder die halbe Schwankungsbreite eingesetzt. Als Auflösung r wird, wie in der DIN EN ISO 376 beschrieben, der letzte Ziffernschritt verwendet (d. h. die volle Weite $2 a_{\text{res}} = r$). Schwankt die Anzeige, so wird anstelle der Auflösung die halbe Schwankungsbreite verwendet. Da die angezeigten Kräfte immer Differenzwerte sind (siehe Gl. (4)), wird die Auflösung (rechteckverteilt) doppelt berücksichtigt⁴.

Die Berechnung der Nullpunktabweichung erfolgt anhand der vor und nach jeder Messreihe gemessenen Nullsignale. Deren Differenz, geteilt durch den Messwert (Anzeigewert) bei

¹ Ergebnisgröße (VIM 2.51: output quantity)
² N' Eingangsgrößen zur Bestimmung der Ergebnisgröße $N' < N$ (VIM 2.50: input quantity)
³ N Größen zur Ermittlung der Messunsicherheit $N = N' + N''$
⁴ Daraus resultiert die Berücksichtigung von r mit dem Teiler Wurzel (6) in DIN EN ISO 376 [1]

maximaler Kalibrierkraft, ergibt die Nullpunktabweichung nach DIN EN ISO 376. Bei den vereinfachten Abläufen B, C und D ist zusätzlich die Nullpunktabweichung der letzten Vorbelastung zu berücksichtigen. Die maximal ermittelte Nullpunktabweichung ist zu verwenden.

Wiederhol- und Vergleichspräzision sowie Umkehrspanne können beim Kalibrierablauf A, wie in DIN EN ISO 376 beschrieben, direkt aus den Messwerten bestimmt werden. Bei den Kalibrierabläufen B, C und D müssen ein oder zwei dieser Kenngrößen aus a-priori Wissen abgeleitet werden.

Empfehlung: Grundsätzlich sollte bei einer Kalibrierung eines Messgerätes nach DKD-R 3-3 eine Regression durch die zunehmenden Werte durchgeführt werden; die Messunsicherheit sollte unter Berücksichtigung der **vollen Umkehrspanne** berechnet werden (Fall 1 in Tabelle 4). Ein auf diese Art kalibrierter Aufnehmer ist in der Anwendung universell einsetzbar – sowohl für zunehmende als auch für abnehmende Kräfte.

Auf Anforderung des Auftraggebers und in Absprache mit dem Auftraggeber, kann die Umkehrspanne bei der Berechnung der Messunsicherheit auch anders berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass das Messgerät dann möglicherweise nur eingeschränkt einsetzbar ist (Fall 3 und 4). Dieses ist auf dem Kalibrierschein anzugeben.

Abhängig vom späteren Einsatz des Messgerätes in der Anwendung und vom Verfahren der Auswertung wird der Unsicherheitsanteil für die Umkehrspanne folgendermaßen berechnet:

Tabelle 4: Unsicherheitsanteil in Abhängigkeit von Einsatz und Auswerteverfahren

	Einsatz des Messgerätes	Auswerteverfahren	Unsicherheitsanteil (rev)
1	Einsatz für zu- und abnehmende Kräfte	Regression durch zunehmende Werte (Standard)	volle Umkehrspanne (Standard)
2	Einsatz für zu- und abnehmende Kräfte	Regression durch Mittelwerte	1/2 der Umkehrspanne
3	Einsatz nur für zunehmende Kräfte	Regression durch zunehmende Werte	1/3 der Umkehrspanne
4	Einsatz nur für abnehmende Kräfte	Regression durch abnehmende Werte	1/3 der Umkehrspanne

Im Rahmen der DKD-R 3-3 wird kein Kriechtest durchgeführt. Für den Fall 3 „Regression durch zunehmende Werte“ und „Einsatz nur für zunehmende Kräfte“ (sinngemäß auch bei Fall 4) wird der Unsicherheitsanteil für das Kriechen gemäß DIN EN ISO 376 aus 1/3 der Umkehrspanne abgeleitet und durch den Unsicherheitsanteil für die Umkehrspanne δF_{rev} berücksichtigt.

Der Temperatureinfluss kann vernachlässigt werden, wenn die in Abschnitt 4 (Umgebungsbedingungen) für Deutschland empfohlenen Temperaturgrenzen und die Temperaturstabilität von 1 K eingehalten werden; andernfalls ist er wie in DIN EN ISO 376 oder EURAMET cg-4 beschrieben, zu berücksichtigen.

Tabelle 5: Unsicherheitsanalyse für das Modell „Anzeigeabweichung“

lfd. Nr.	Größe X_i	Beste Schätzwert x_i	Halbweite der Verteilung a	Teiler	Standardmessunsicherheit $u(x_i)$	Empfindlichkeitskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$	Varianz $u_i^2(y)$
1	F_{ind}	x_1 N	$a_{res} = r/2$	$\sqrt{3}$	$u(F_{ind})$	1	$u_{ind}(\Delta F)$	$u_{ind}^2(\Delta F)$
2	$F_{ind,0}$	$x_{1,0}$ N	$a_{res} = r/2$	$\sqrt{3}$	$u(F_{ind,0})$	1	$u_{ind,0}(\Delta F)$	$u_{ind,0}^2(\Delta F)$
3	F_{K-BNME}	x_2 N	$U(F_{K-BNME})$	2	$u(F_{K-BNME})$	-1	$u_{K-BNME}(\Delta F)$	$u_{K-BNME}^2(\Delta F)$
4	δF_{zer}	0 N	$a_{zer} = f_0 \cdot F_{K-BNME}$	1	$u(\delta F_{zer})$	1	$u_{zer}(\Delta F)$	$u_{zer}^2(\Delta F)$
5	δF_{rep}	0 N	$a_{rep} = b' \cdot F_{K-BNME}$	$\sqrt{3}$	$u(\delta F_{rep})$	1	$u_{rep}(\Delta F)$	$u_{rep}^2(\Delta F)$
6	δF_{rot}	0 N	$u(\delta F_{rot}) = \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{k=1,3,5} (F_k - \bar{F})^2}$	1	$u(\delta F_{rot})$	1	$u_{rot}(\Delta F)$	$u_{rot}^2(\Delta F)$
7	δF_{tmp}	0 N	a_{tmp}	$\sqrt{3}$	$u(\delta F_{tmp})$	1	$u_{tmp}(\Delta F)$	$u_{tmp}^2(\Delta F)$
8	δF_{rev}	0 N	$a_{rev} = v \cdot F_{K-BNME}$ oder $a_{rev} = \frac{v \cdot F_{K-BNME}}{2}$ oder $a_{rev} = \frac{v \cdot F_{K-BNME}}{3}$	$\sqrt{3}$	$u(\delta F_{rev})$	1	$u_{rev}(\Delta F)$	$u_{rev}^2(\Delta F)$
	ΔF	y N	Standardmessunsicherheit u			$u(\Delta F) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(\Delta F)}$		
	ΔF	y N	erweiterte Messunsicherheit U			$U(\Delta F) = k \cdot u(\Delta F)$		
Angabe des vollständigen Messergebnisses						$\Delta F = y \pm U(\Delta F)$		

7.1.4 Messunsicherheitsbilanz

Die Ermittlung der Messunsicherheit hat für jeden Kalibrierwert, d. h. für jedes angegebene Belastungsniveau, zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung dient folgende Messunsicherheitsbilanz (Tabelle 6).

Tabelle 6: Messunsicherheitsbilanz für das Modell „Anzeigeabweichung“ (alle Belastungsstufen im Bereich)

Kraft	Anzeigeabweichung	Standardmessunsicherheit $u_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete Messunsicherheitsbeiträge)						
		Anzeigeauflösung	Erweiterte MU der Kalibrierkraft	Nullpunktabweichung	Wiederholpräzision	Vergleichpräzision	Umkehrspanne	Temperatur
N	N				N			

F_{\min}								
...								
F_{\max}								

Kraft	Anzeigeabweichung	Standardmessunsicherheit $u(y)$	erweiterte Messunsicherheit $U(y) (k=2)$
N	N		N

F_{\min}			
...			
F_{\max}			

7.2 Messunsicherheit für das Modell Übertragungskoeffizient

Die Kalibrierung von Kraftaufnehmern allein liefert als Ergebnisgröße den Übertragungskoeffizienten als Quotient aus Ausgangsgröße (mV/V) und Eingangsgröße (durch die K-BNME eingestellter Kraftwert in N).

7.2.1 Einflussgrößen

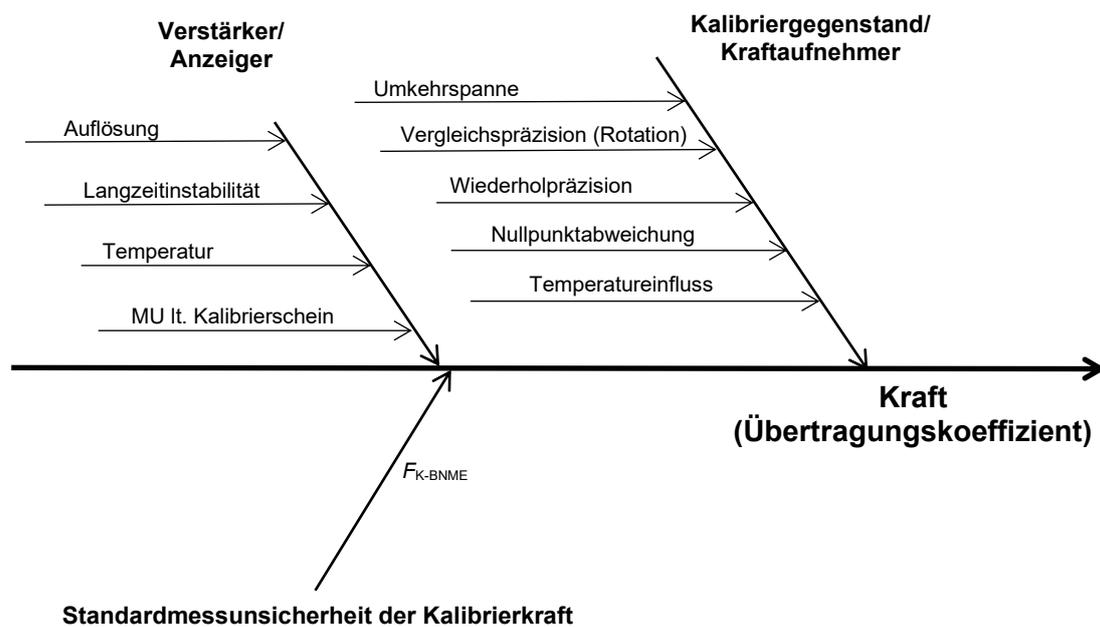


Abbildung 10: Einflussgrößen bei der Ermittlung der den Übertragungskoeffizienten eines Kraftaufnehmers beigeordneten Messunsicherheiten

7.2.2 Modell der Auswertung (am Beispiel eines Kraftaufnehmers)

Das Modell der Auswertung von Kraftaufnehmerkalibrierungen ist als lineares Produkt-/ Quotient-Modell unter Verwendung von relativen Messunsicherheiten formuliert.

In allgemeiner Darstellung gilt für die Messfunktion:

Größen:

$$Y = q \cdot \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}; p_i := \{+1, -1\} \quad (8)$$

Schätzwerte:

$$y = q \cdot \prod_{i=1}^N x_i^{p_i}; p_i := \{+1, -1\} \quad (9)$$

In der detaillierten Darstellung – Bestimmungsgleichung des Übertragungskoeffizienten eines Kraftaufnehmers für einzelne Kraftwerte mit besten Schätzwerten – wird daraus der Ausdruck:

$$E_j \xrightarrow{\text{hier}} E_{KA,j} = \frac{\bar{S}_{KA,j}}{F_{K-BNME,j}} \cdot \prod_{i=1}^N K_{i,j} = \frac{\bar{S}_{MG,j}}{F_{K-BNME,j} \cdot R_{KG} \cdot G_{KG}} \cdot \prod_{i=1}^N K_{i,j} \quad (10)$$

mit $\bar{S}_{MG,j}$ als Mittelwert der nullpunktkorrigierten Anzeigewerte des Messgeräts bei jeder Kraftstufe j sowie k als Index für die unterschiedlichen Messreihen:

$$\bar{S}_{MG,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (S_{\text{ind},j,k} - S_{\text{ind},0,k}) \quad (11)$$

und

$$\prod_{i=1}^6 K_{i,j} = K_{\text{zer}} \cdot K_{\text{rep},j} \cdot K_{\text{rot},j} \cdot K_{\text{tmp}} \cdot K_{\text{rev},j} \quad (12)$$

mit i : Index der Korrekturfaktoren.

Der Index „MG“ in $\bar{S}_{MG,j}$ soll verdeutlichen, dass hier das vollständige Messgerät betrachtet wird – bestehend aus Aufnehmer mit beigestelltem Anpasser und Anzeiger (ggf. mit Versorgung).

Nachfolgend wird für eine bessere Übersichtlichkeit der Laufindex j für die Belastungsstufe weggelassen.

Tabelle 7: Einflussgrößen bei der Ermittlung der den Übertragungskoeffizienten eines Kraftaufnehmers beigeordneten Messunsicherheiten

E	Ergebnisgröße; Übertragungskoeffizient (Empfindlichkeit) des Kraftaufnehmers	5	
$S_{\text{ind}}; S_{\text{ind},0}$	Ausgangssignal des Kraftmessgerätes bzw. Anzeigers bei der Belastungsstufe und vor der Belastung	6	
F_{K-BNME}	durch die K-BNME eingestellter Kraftwert		
R_{KG}	Übertragungskoeffizient des Anzeigers		
G_{KG}	Übertragungskoeffizient des Anpassers		
K_{zer}	Korrekturfaktor rel. Nullpunktabweichung		7
K_{rep}	Korrekturfaktor rel. Wiederholpräzision		
K_{rot}	Korrekturfaktor rel. Vergleichspräzision		
K_{tmp}	Korrekturfaktor rel. Temperaturabweichung		
K_{rev}	Korrekturfaktor rel. Umkehrspanne		

Korrekturfaktoren:

$$K_i = \left(1 + \frac{\delta x_i}{|x_i|} \right) \quad (13)$$

mit

δx_i Messabweichungen und

$E[\delta x_i] = 0 ; E[K_i] = 1$ Erwartungswert

⁵ Ergebnisgröße

⁶ N' Eingangsgrößen zur Bestimmung der Ergebnisgröße

⁷ N Größen zur Ermittlung der Messunsicherheit

$N' < N$

$N = N' + N''$

(VIM 2.51: output quantity)

(VIM 2.50: input quantity)

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	25 / 45

7.2.3 Unsicherheitsanalyse

Aufgrund des gewählten, linearen Produkt-/Quotient-Modells und der Anwendung von relativen Messunsicherheiten sind die Empfindlichkeitskoeffizienten⁸ stets gleich 1 ($c_i^* = \pm 1$).

Damit entsprechen die Beiträge $w_i(y)$ zur Unsicherheit der Ergebnisgröße den Unsicherheiten der Eingangsgrößen $w(x_i)$. Daraus folgt für die dem Ergebnis beigeordnete rel. Standardmessunsicherheit:

$$w(E) = \quad (14)$$

$$\sqrt{w_{S_{\text{ind}}}^2(E) + w_{S_{\text{ind},0}}^2(E) + w_{K\text{-BNME}}^2(E) + w_R^2(E) + w_G^2(E) + w_{\text{zer}}^2(E) + w_{\text{rep}}^2(E) + w_{\text{rot}}^2(E) + w_{\text{tmp}}^2(E) + w_{\text{rev}}^2(E)}$$

Und für die relative erweiterte Messunsicherheit:

$$W(E) = k \cdot w(E) \quad (15)$$

Es gelten die gleichen Hinweise zu den verschiedenen Unsicherheitsanteilen wie in Abs. 7.1.3.

Bei Kalibrierung des Kraftaufnehmers allein muss vom Kalibrierlabor ein Anzeiger und/oder Anpasser beigelegt werden. Für das Übertragungsverhalten dieser Messkettenelemente müssen entsprechende Messunsicherheitsanteile berücksichtigt werden. Diese können durch Unterbilanzen bestimmt werden, in denen z. B. die Messunsicherheit laut Kalibrierschein, die Langzeitinstabilität, ggf. ein Temperatureinfluss und andere wirkende Einflüsse eingehen.

Die Regressionsabweichung kann unterschiedlich berücksichtigt werden. Insbesondere bei Kalibrierung von qualitativ schlechteren Kraftmessgeräten mit erhöhten Regressionsabweichungen, ist es sinnvoll, die Regressionsabweichung über die Bestimmung einer Abweichungsspanne (siehe Abs. 7.5) in eine im Rahmen der Kalibrierung bestimmten Spezifikationsgrenze einfließen zu lassen. Erhöhte Regressionsabweichung heißt hier, dass sie deutlich größer ist als die kombinierte Messunsicherheit, bestimmt aus den anderen wirkenden Einflüssen.

Diese Richtlinie (auch Ablauf A) ist im Normalfall nicht für die Kalibrierung von Transfer- und Referenzkraftmessgeräten gedacht. Sollen dennoch höherwertige Kraftmessgeräte nach dieser Richtlinie kalibriert werden, so ist die Messunsicherheit gemäß DIN EN ISO 376, Anhang C [1] zu bestimmen. Höherwertige Kraftmessgeräte heißt hier: Die Regressionsabweichung liegt in der gleichen Größenordnung wie die kombinierte Messunsicherheit, bestimmt aus den anderen, wirkenden Einflüssen.

Wird bei der Auswertung ein Polynom 3. Grades verwendet, so wird die Regressionsabweichung als zufällige Abweichung angesehen und als Messunsicherheitsanteil berücksichtigt. Wird bei der Auswertung ein Polynom 1. Grades verwendet, so wird die Regressionsabweichung als systematische Abweichung angesehen und kann, sofern sie nicht korrigiert wird, in eine im Rahmen der Kalibrierung bestimmte Spezifikationsgrenze einfließen.

⁸ Der Empfindlichkeits-(Sensitivitäts-)koeffizient c_i^* ist der Faktor, mit dem die relative Unsicherheit $w(x_i)$ in den relativen Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$ umgerechnet wird. Er hängt mit dem Empfindlichkeitskoeffizienten c_i folgendermaßen zusammen: $c_i^* = \frac{x_i}{y} \cdot c_i$

Tabelle 8: Unsicherheitsanalyse für das Modell „Übertragungskoeffizient“

lfd. Nr.	Größe X_i	Beste Schätzwert x_i	Halbweite der Verteilung a	Teiler	Standardmessunsicherheit $w(X_i)$	Empfindlichkeitskoeffizient c_i^*	Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$	Varianz $w_i^2(y)$
1	S_{ind}	x_1 LSB	$a_{res} = r/2$	$\sqrt{3}$	$w(S_{ind})$	1	$w_{S_{ind}}(E)$	$w_{S_{ind}}^2(E)$
2	$S_{ind,0}$	$x_{1,0}$ LSB	$a_{res} = r/2$	$\sqrt{3}$	$w(S_{ind,0})$	1	$w_{S_{ind,0}}(E)$	$w_{S_{ind,0}}^2(E)$
3	F_{K-BNME}	x_2 N	$W(F_{K-BNME})$	2	$w(F_{K-BNME})$	-1	$w_{K-BNME}(E)$	$w_{K-BNME}^2(E)$
4	R_{KG}	x_3 LSB/V	$W(R_{KG})$	2	$w(R_{KG})$	-1	$w_R(E)$	$w_R^2(E)$
5	G_{KG}	x_4 V/(mV/V)	$W(G_{KG})$	2	$w(G_{KG})$	-1	$w_G(E)$	$w_G^2(E)$
6	K_{zer}	1	$a_{zer} = f_0$	1	$w(K_{zer})$	1	$w_{zer}(E)$	$w_{zer}^2(E)$
7	K_{rep}	1	$a_{rep} = b'$	$\sqrt{3}$	$w(K_{rep})$	1	$w_{rep}(E)$	$w_{rep}^2(E)$
8	K_{rot}	1	$w(K_{rot}) = \frac{1}{\bar{s}} \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \sum_{k=1,3,5} (s_k - \bar{s})^2$	1	$w(K_{rot})$	1	$w_{rot}(E)$	$w_{rot}^2(E)$
9	K_{tmp}	1	a_{tmp}	$\sqrt{3}$	$w(K_{tmp})$	1	$w_{tmp}(E)$	$w_{tmp}^2(E)$
10	K_{rev}	1	$a_{rev} = v$ oder $a_{rev} = \frac{v}{2}$ oder $a_{rev} = \frac{v}{3}$	$\sqrt{3}$	$w(K_{rev})$	1	$w_{rev}(E)$	$w_{rev}^2(E)$
	E	$y \frac{mV/V}{N}$	rel. Standardmessunsicherheit w			$w(E) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(E)}$		
	E	$y \frac{mV/V}{N}$	rel. erweiterte Messunsicherheit W			$W(E) = k \cdot w(E)$		
Angabe des vollständigen Messergebnisses						$E = y(1 \pm W(E)) \frac{mV/V}{N}$		

7.2.4 Messunsicherheitsbilanz

Die Ermittlung der Messunsicherheit hat jedoch für jeden Kalibrierwert, d. h. für jedes angegebene Belastungsniveau, zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung dient folgende Messunsicherheitsbilanz (Tabelle 9).

7.3 Messunsicherheitsbeiträge bei reduzierten Kalibrierabläufen

Während bei dem vollständigen Kalibrierablauf A alle relevanten Messunsicherheitsbeiträge entsprechend dem Dokument DIN EN ISO 376 [1] bestimmt werden können, müssen bei den reduzierten Kalibrierabläufen B, C und D diese Informationen in zunehmender Zahl auf andere Art und Weise beschafft werden. Hierfür sind folgende Quellen denkbar:

- Statistische Ermittlung von a-priori-Wissen
- zuvor ausgeführte vollständige Kalibrierung des Kalibriergegenstandes
- Datenblattangabe

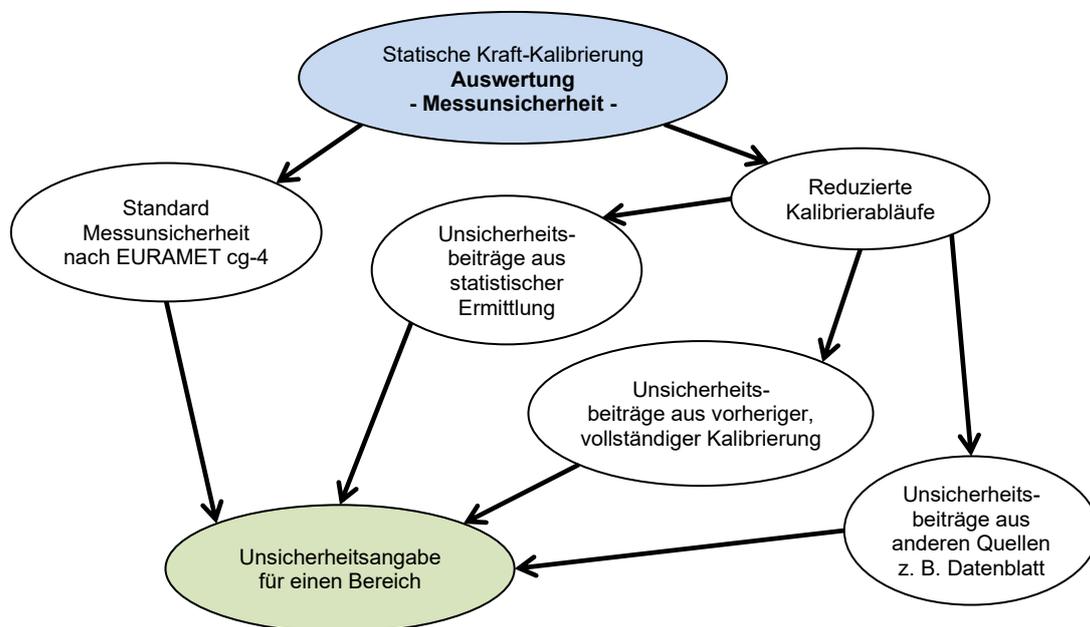


Abbildung 11: Messunsicherheitsangaben

Die so ermittelten Werte der Messunsicherheitsbeiträge sind vor der Verwendung mit einem Faktor zu multiplizieren. Ergänzend sind zur Absicherung dieser Vorgehensweise weitere Merkmale des Kraftaufnehmers, z. B. das Nullsignal und die Empfindlichkeit, aus vorangegangenen Kalibrierungen (Prüfmittelüberwachung, Historie) zu bewerten.

Die Größe des Faktors kann von der Herkunft oder der Vertrauenswürdigkeit der Informationen abhängig gemacht werden.

Tabelle 10: Faktoren für Messunsicherheitsbeiträge aus unterschiedlichen Quellen

I.	In eigener K-BNME ausgeführte Kalibrierung von Kraftmessgeräten gleicher Bauart (Ermittlung aus a-priori-Wissen, siehe [7])	t-Faktor ⁹ 2 ... 4,3
II.	Vorhergehende Kalibrierung desselben Kalibriergegenstandes nach DIN EN ISO 376 oder Ablauf A in der eigenen oder einer vergleichbaren K-BNME ¹⁰	Faktor 2
III.	Zu ergänzende Werte als messwertbezogene Datenblattangaben (als Obergrenzen) nach Definitionen der VDI/VDE/DKD 2638	Faktor 2
IV.	Andere messwertbezogene Datenblattangaben (als Obergrenzen)	Faktor 3
V.	Andere messwertbezogene Datenblattangaben (als typische Angaben)	Faktor 5

Hinweis 1:

Endwertbezogene Angaben müssen auf messwertbezogene Angaben umgerechnet werden.

Hinweis 2:

Falls kleinere Faktoren verwendet werden, ist die Vorgehensweise bei der Festlegung der Faktoren innerhalb des Qualitätsmanagementsystems zu dokumentieren.

Hinweis 3:

Der Messunsicherheitsanteil für die Vergleichspräzision wird in dieser Version der DKD-R 3-3 gemäß DIN EN ISO 376 [1] bestimmt, und damit anders als in der Fassung aus 2007. Er ist jetzt geringfügig kleiner. Aus diesem Grund können die schon vorhandenen Bestandsdaten für die a-priori Werte der Vergleichspräzision und die daraus bestimmten Messunsicherheitsanteile für die Vergleichspräzision, bestimmt nach der vorhergehenden Fassung der DKD-R 3-3 (Teiler $\sqrt{2}$), weiterverwendet werden.

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Ermittlung der Messunsicherheit für reduzierte Kalibrierabläufe ist dem Diagramm in Anhang A zu entnehmen.

Anhang C stellt ein ausführliches Beispiel für das Vorgehen nach Fall I dar.

⁹ Faktor abhängig von der Anzahl der untersuchten Exemplare; es wird die Student-Verteilung verwendet. Damit liegt der Faktor zwischen dem Wert **2** bei > 50 Exemplaren und dem Wert **4,3** bei 3 Exemplaren (für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 %)

¹⁰ Soll a-priori-Wissen aus der Kalibrierung auf einer anderen K-BNME abgeleitet werden, so kann der entsprechende MU-Beitrag zu klein abgeschätzt werden, wenn die andere Einrichtung deutlich besser ist als die eigene.

7.4 Visualisierung der Messunsicherheitsbilanz

Visualisiert man die Unsicherheitsbeiträge (Varianzen) in einem Säulendiagramm, wobei die Beiträge in absteigender Reihenfolge sortiert werden, so erkennt man in eindrucksvoller Weise, bei welchen Einflussgrößen Maßnahmen ergriffen werden müssen, wenn die Messunsicherheit verringert werden soll.

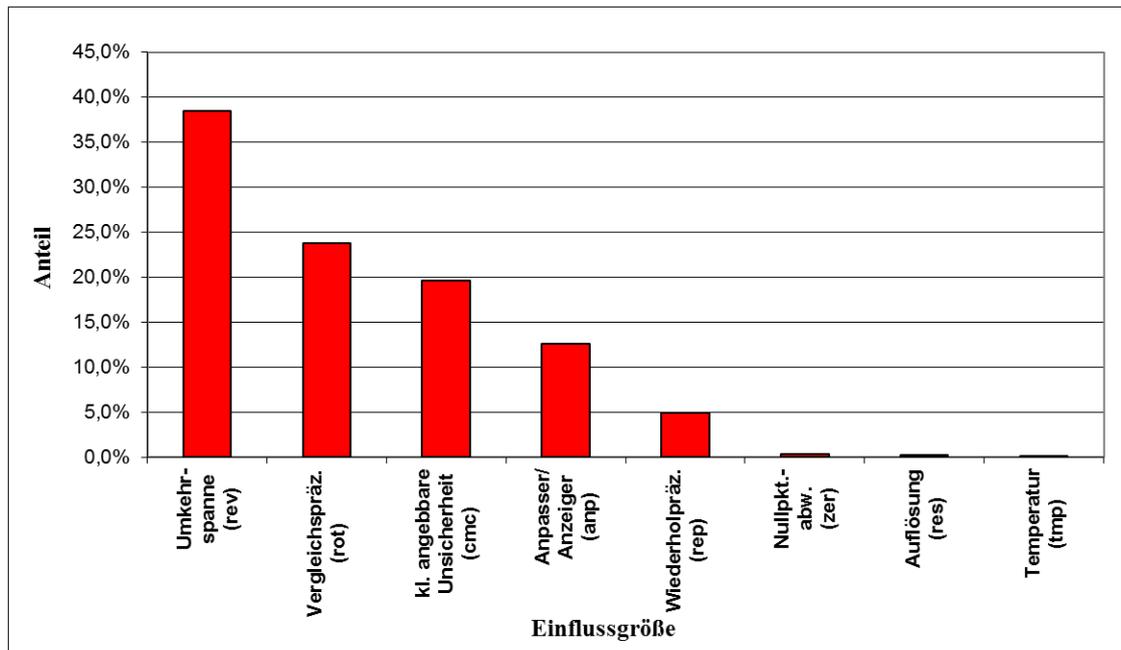


Abbildung 12: Beispiel zur Darstellung der Varianzanteile (Quadrat der Unsicherheitsbeiträge) an der Gesamtvarianz (Quadrat der Standardmessunsicherheit) in absteigender Sortierung

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	31 / 45

7.5 Abweichungsspanne

Nach den Regeln des GUM sind systematische Abweichungen zu korrigieren und die kombinierte Standard-Messunsicherheit durch die Wurzel aus der Summe der quadrierten, einzelnen Standard-Unsicherheitsbeiträge zu bestimmen. In mancher Anwendung kann die (systematische) Messabweichung allerdings nicht korrigiert werden. Ist die Messabweichung im Vergleich zu den anderen Einflüssen dominierend, ist es sinnvoll, eine aus den Kalibrierergebnissen bestimmte Spezifikationsgrenze auf Basis der sogenannten Abweichungsspanne anzugeben.

Die relative Abweichungsspanne W' setzt sich additiv aus dem Betrag der systematischen Messabweichung und der relativen erweiterten Messunsicherheit ($k = 2$) zusammen. Aufgrund des systematischen Anteils wird für die Abweichungsspanne als Wahrscheinlichkeitsverteilungsform eine Rechteckverteilung angenommen. Beim Modell Übertragungskoeffizient ist die Regressionsabweichung zur Ausgleichsfunktion 1. Grades eine solche systematische Messabweichung (siehe Einwertangabe):

$$W' = \left| \frac{\Delta E_{\text{app}}}{E} \right| + W \quad (16)$$

7.6 Einwertangabe als Kalibrierergebnis

Eine Messunsicherheit wird grundsätzlich einem Messwert beigeordnet. Bei Kalibrierungen mit verschiedenen und in der Regel äquidistant verteilten Werten innerhalb eines Bereiches, erhält man somit Ergebnistabellen (z. B. Tabelle 9). Der Anwender des Kalibriergegenstandes arbeitet dagegen häufig nur mit einem Wert für den gesamten Gültigkeitsbereich der Kalibrierung, der sog. Einwertangabe. Diese Einwertangabe ist z. B. der Übertragungskoeffizient (Empfindlichkeit) eines Messgrößenaufnehmers für den Messbereich. Für diese Einwertangabe ist es aber schwierig, nach den Regeln des GUM eine Messunsicherheit anzugeben; an ihre Stelle kann daher eine Konformitätsaussage treten.

Hierfür ist das Bestimmen von Spezifikationsgrenzen unter Berücksichtigung der systematischen Messabweichung (der Einzelwerte von der Einwertangabe) und der (den Einzelwerten) beigeordneten erweiterten Messunsicherheit notwendig (Abweichungsspanne).

Dabei werden die obere und untere Spezifikationsgrenze an die größte Abweichungsspanne (Summe aus systematischer Messabweichung und erweiterter Messunsicherheit) angenähert; vorzugsweise mit einem kleinen Sicherheitsabstand, so dass sich glatte Zahlenwerte ergeben. Die so ermittelten Spezifikationsgrenzen sind als Messunsicherheitsbeitrag in der Messunsicherheitsbilanz der Anwendung zu berücksichtigen. Aufgrund des systematischen Anteils in der Abweichungsspanne wird eine Rechteckverteilung angenommen.

Die Übertragungskoeffizienten und die beigeordneten erweiterten Messunsicherheiten werden im Vergleich zu den Spezifikationsgrenzen nach Herstellerangabe bzw. zu den im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Spezifikationsgrenzen dargestellt.

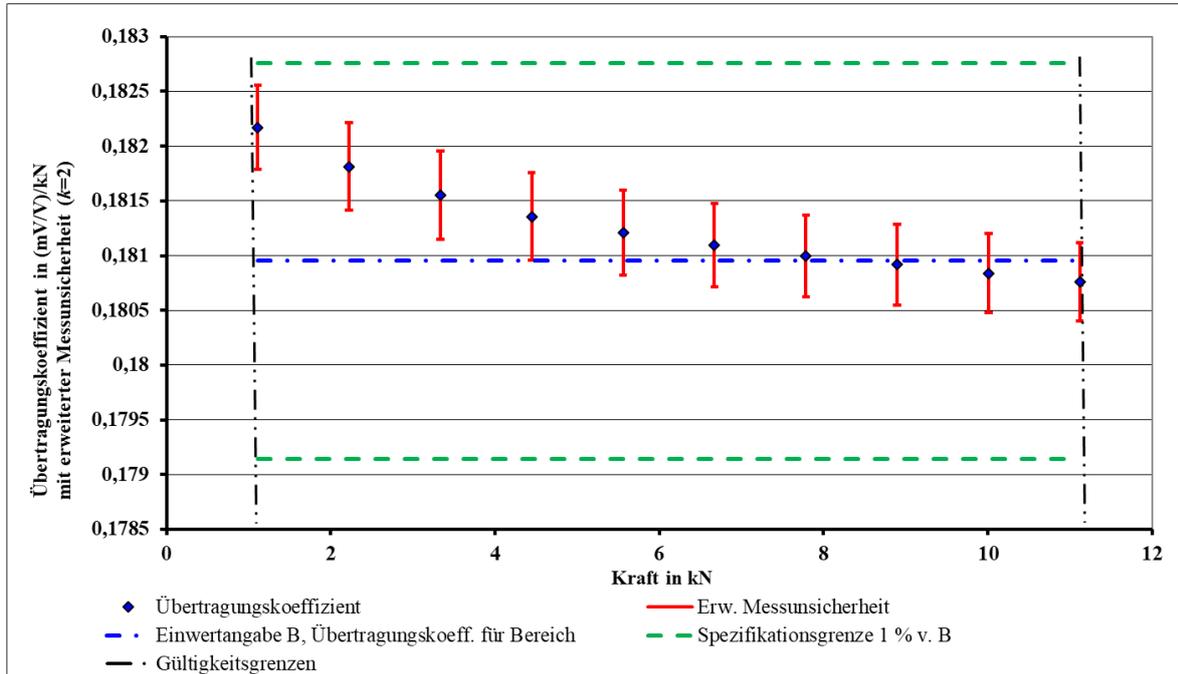


Abbildung 13: Übertragungskoeffizienten mit erweiterter Messunsicherheit, Einwertangabe (Übertragungskoeffizient für den Bereich) und Spezifikationsgrenze

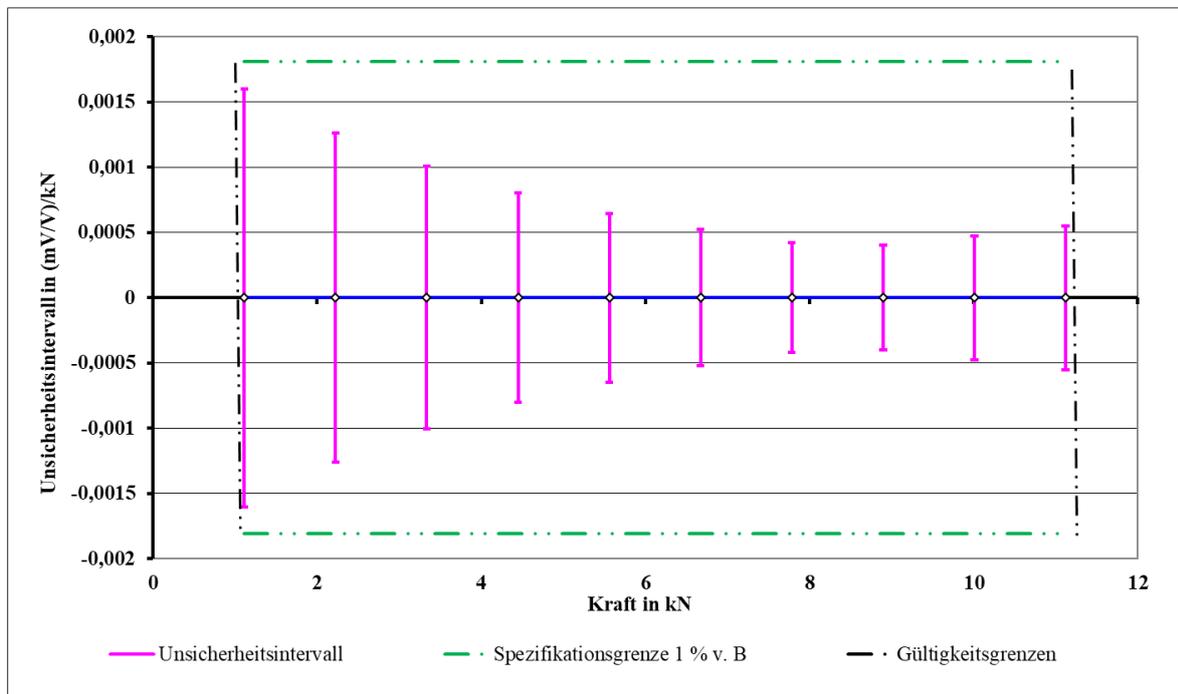


Abbildung 14: Abweichungsspanne und Spezifikationsgrenze

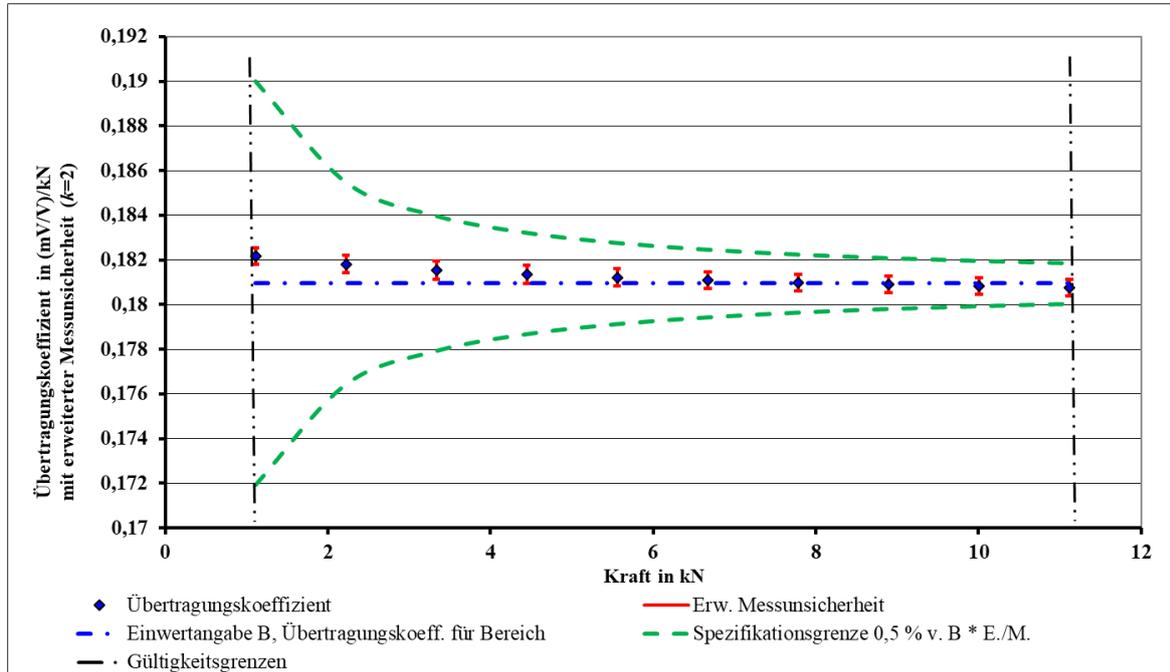


Abbildung 15: wie Abbildung 13, jedoch mit hyperbelartiger Spezifikationsgrenze (B = Einwertangabe; E. = Kalibrierbereichsendwert; M. = Eingestellter Wert)

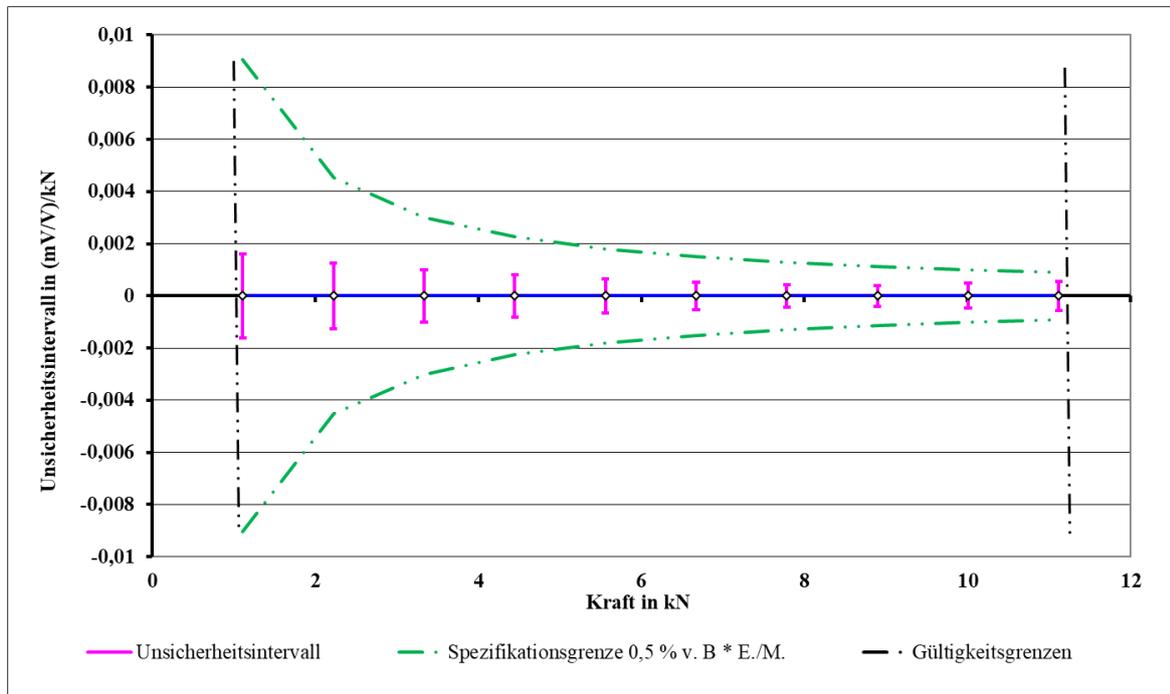


Abbildung 16: wie Abbildung 14, jedoch mit hyperbelartiger Spezifikationsgrenze

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	34 / 45

8 Angaben im Kalibrierschein

Grundsätzlich gelten die Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 zum Thema „Allgemeine Anforderungen an Berichte“ und „Besondere Anforderungen an Kalibrierscheine“ [6]:

- Identität des Kraftaufnehmers bzw. der Kraftmesskette
- Kalibrierverfahren (mit verwendetem Ablauf und Herkunft derjenigen Messunsicherheitsbeiträge, die nicht aus den Messwerten zu bestimmen sind, d. h. aus der Ermittlung von a-priori-Wissen, aus vorheriger Kalibrierung oder aus Datenblattangaben)
- Bezeichnung und Anschlussmessunsicherheit der verwendeten K-BNME
- Kalibrierbedingungen
 - Umgebungstemperatur und ggf. Temperatur des Kraftaufnehmers
 - Luftdruck und rel. Luftfeuchte, soweit erforderlich
- Beschreibung der benutzten Krafteinleitungsteile
- Angabe der Krafrichtung
- Angaben über Speisespannung, verwendete Anschlusstechnik (4- oder 6-Leiter), Kabellänge
- Messwerte
- Berechnete Werte in Abhängigkeit vom Kalibrierablauf und Auswerteverfahren nach Anhang A
- Nullsignal des unbelasteten Kraftaufnehmers ohne Einbauteile
- Das Kalibrierergebnis (incl. begeordneter Messunsicherheit) ist
 - die Anzeigeabweichung
oder
 - der Übertragungskoeffizient als Steigung einer Ausgleichsgeraden durch den Koordinatenursprung (Einwertangabe)

Anmerkung 1:

Die Herkunft der Messwerte, die der Ausgleichsrechnung zugrunde liegen, ist anzugeben (z. B. Messwerte in Richtung zunehmender Belastung oder Mittelwerte aus Messwerten in zu-/abnehmender Belastung)

Anmerkung 2:

Die Berechnungsmethode ist zu nennen, vgl. Kapitel 7.1.3.
und ggf.
- die im Rahmen der Kalibrierung bestimmten Spezifikationsgrenzen und zugehörige Gültigkeitsgrenzen

Anmerkung 1: Der Nutzer des Kalibriergegenstandes kann die im Rahmen der Kalibrierung bestimmte Spezifikationsgrenze als Eingangsgröße in seiner Messunsicherheitsbilanz unter der Annahme einer Rechteckverteilung berücksichtigen.

Anmerkung 2: Eine Visualisierung der Ergebnisse wird, wie in Kapitel 7.1.3 beschrieben empfohlen.
- Koeffizienten der Regressionsfunktion

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	35 / 45

- Angaben zum Messverstärker
 - Trägerfrequenz oder Gleichspannung
 - Filter und Filtercharakteristik

Hinweis:

Handelt es sich bei dem Kalibriergegenstand um einen Kraftaufnehmer, der ohne den zugehörigen Messverstärker kalibriert wurde, so ist zu beachten, dass nur bei der Verwendung von baugleichen Messverstärkern die Angaben aus dem Kalibrierschein direkt verwendet werden dürfen.

- Auf Kundenwunsch: Beiträge (und deren Herkunft) zur Messunsicherheit, falls gegenüber DIN EN ISO 376 oder Ablauf A verkürzte Kalibrierabläufe vorliegen.
- Bei Konformitätsaussagen ist die verwendete Regel sowie die Herkunft der Grenzen anzugeben.

9 Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium

Im Kalibrierlaboratorium sind Aufzeichnungen zum Kalibrieraufbau mit Zuordnung zum Auftrag zu führen und aufzubewahren, z. B.:

- Softwareversion bei rechnergestütztem Betrieb
- Beschreibung der Einbaulage des KG, z. B. durch Richtung des Kabelabgangs
- Steckplätze der Messverstärker bei Mehrkanalsystemen, falls diese einen Einfluss auf die Messergebnisse haben
- Beiträge (und deren Herkunft) zur Messunsicherheit, falls gegenüber DIN EN ISO 376 oder Ablauf A verkürzte Kalibrierabläufe vorliegen (und diese nicht im Kalibrierschein aufgeführt werden)

10 Konformität

Wird eine Konformitätsbewertung durchgeführt, so kann eine Entscheidungsregel nach ILAC-G8 [5] angewendet werden. Die gewählte Entscheidungsregel sowie die Herkunft der Spezifikationsgrenzen sind auf dem Kalibrierschein anzugeben, z. B. herstellerspezifische Angaben laut Datenblatt oder Kundenforderung. Sofern es sich um Spezifikationsgrenzen, bestimmt aus den aktuellen Kalibrierdaten handelt, ist dies kenntlich zu machen.

11 Kalibriermarke

Das Anbringen einer Kalibriermarke erfolgt nach den Vorgaben der Akkreditierungsstelle. Bei Kalibriergegenständen, die aus mehreren trennbaren Komponenten bestehen, erhält jede Komponente eine gleichlautende Marke. Falls der Kalibriergegenstand zum Schutz in einem Behältnis gelagert wird, kann die Zuordnung zum leichteren Auffinden ebenfalls durch eine gleichlautende Marke hergestellt werden.

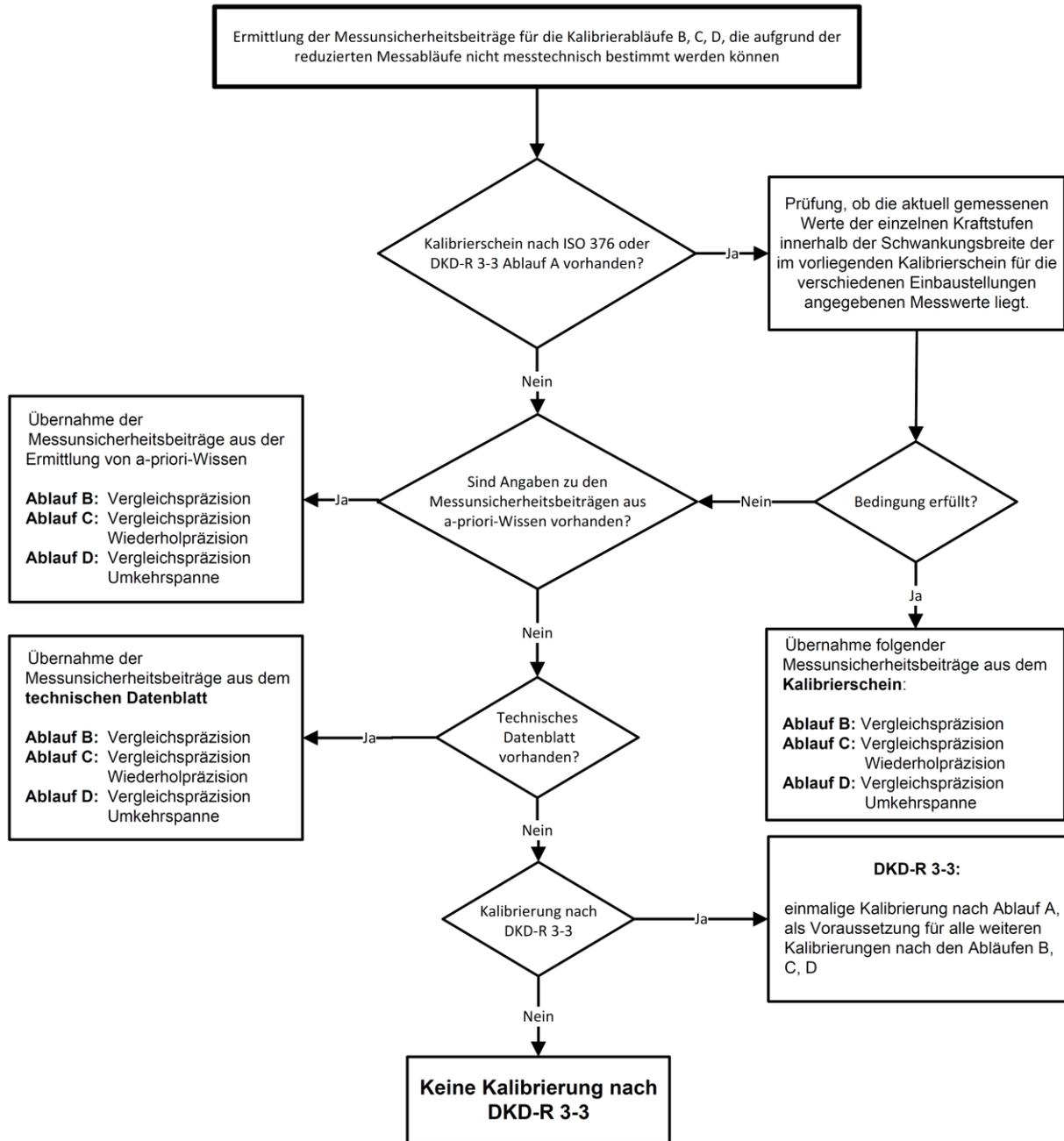
	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	36 / 45

12 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 376:2011, Metallische Werkstoffe – Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung
- [2] EURAMET cg-4:2022, Uncertainty of Force Measurements – Calibration Guide, EURAMET e.V., 3rd edition February 2022
- [3] EA-4/02 M: 2022, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration, European Accreditation, rev.03, 04. Apr 2022;
EA-4/02 M: 2022, Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (deutsche Übersetzung vom 31.08.2022), DAkkS
- [4] Burghart Brinkmann: Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM); Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007, Beuth-Verlag Berlin, 2012. ISBN 978-3-410-22473-0
- [5] ILAC-G8:09/2019, Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity, ILAC, September 2019.
ILAC-G8:09/2019, Leitlinien zu Entscheidungsregeln und Konformitätsaussagen (deutsche Übersetzung vom 19.02.2021), DAkkS
- [6] DIN EN ISO/EC 17025:2018-03 Allgemeine Anforderung an die-Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien; Beuth-Verlag Berlin, März 2018
- [7] L. Stenner: Messunsicherheit bei vereinfachten Kalibrierabläufen der Messgrößen Kraft und Drehmoment unter Anwendung statistischer Verfahren; VDI-Berichte 2365 Messunsicherheit 2019, VDI-Verlag Düsseldorf, Seite 207 - 216.
DOI: <https://doi.org/10.51202/9783181023655-207>

Anhang A: Ablaufplan für die Ermittlung der Messunsicherheit

Ablaufplan für die Ermittlung der Messunsicherheiten bei reduzierten Kalibrierabläufen



Anhang B: Messunsicherheitsbeiträge (Schätzwerte und Kenngrößen)

Ablauf	Auswertung	Bester Schätzwert	Merkmale für die Bestimmung der Messunsicherheitsbeiträge ¹¹								
			Rel. Nullpunkt- Abweichung ¹²		Rel. Wiederhol- präzision		Rel. Vergleich- Präzision ¹³		Rel. Umkehrspanne ¹⁴		Rel. Regressionsabw. ¹⁵
A	Standard (wie DIN EN ISO 376)	$\overline{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}$ $\overline{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$	$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N}$ ☺	$b' = \left \frac{X_2 - X_1}{\overline{X}_{wr}} \right $ ☺	$b = \left \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\overline{X}_r} \right $ ☺			$v_1 = \left \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \right $	$f_c = \frac{\overline{X}_r - X_a}{X_a}$ ☺		☺
	Zu- oder Abnehmende Belastung	$\overline{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}$ $\overline{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$ $\overline{X}'_r = \frac{X'_4 + X'_6}{2}$	$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N}$ ☺	$b' = \left \frac{X_2 - X_1}{\overline{X}_{wr}} \right $ ☺	$b = \left \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\overline{X}_r} \right $ ☺			$v_2 = \left \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \right $ ☺	$f_c = \frac{\overline{X}_r - X_a}{X_a}$		☺
	Mittel- wert	$\overline{X}_r^* = \frac{\overline{X}_r + \overline{X}'_r}{2}$	$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N}$ ☺	$b' = \left \frac{X_2 - X_1}{\overline{X}_{wr}} \right $ ☺				$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$	$f'_c = \frac{\overline{X}'_r - X_a}{X_a}$		☺
									$f_c = \frac{\overline{X}_r^* - X_a}{X_a}$		☺

¹¹ ☺ bedeutet, dass die Kenngrößen aus den Messwerten bestimmt werden können, ☹ bedeutet, dass die Werte aus a priori-Wissen abgeleitet werden

¹² In der Unsicherheitsbilanz wird die jeweils max. Nullpunktabweichung verwendet

¹³ Der Messunsicherheitsbeitrag für die Vergleichspräzision wird über die Standardabweichung aus den 3 Werten der zunehmenden Reihen bestimmt

¹⁴ Zur Berücksichtigung der Umkehrspanne bei der Berechnung der Messunsicherheit siehe Kapitel 7.1.3 Unsicherheitsanalyse. Bei der Standardauswertung ist die volle Umkehrspanne in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Wenn mit dem Aufnehmer im späteren Einsatz nur zunehmende (nur abnehmende) Kräfte gemessen werden sollen, so ist bei Auswertung über die zu- oder abnehmenden Messwerte 1/3 der Umkehrspanne als Halbweite zu berücksichtigen; bei Auswertung über die Mittelwerte wird die halbe Umkehrspanne als Halbweite berücksichtigt.

¹⁵ Wird bei der Auswertung ein Polynom 3. Grades verwendet, so wird die Regressionsabweichung als zufällige Abw. angesehen und als Messunsicherheitsanteil berücksichtigt. Wird bei der Auswertung ein Polynom 1. Grades verwendet, so wird die Regressionsabweichung als systematische Abw. angesehen und kann, sofern sie nicht korrigiert wird, in eine im Rahmen der Kalibrierung ermittelte Spezifikationsgrenze einfließen.

Ablauf	Auswertung	Bestער Schätzwert	Merkmale für die Bestimmung der Messunsicherheitsbeiträge					
			Rel. Nullpkt-Abweichung	Rel. Wiederhol- präzision	Rel. Vergleich- Präzision	Rel. Umkehrspanne ¹⁶	Rel. Regressionsabw.	
B	Zu- oder Ab- nehmende Belastung	$\overline{X_{wr}} = \frac{X_1 + X_3}{2}$ $\overline{X'_{wr}} = \frac{X'_2 + X'_4}{2}$	$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N}$ 	$b' = \left \frac{X_3 - X_1}{\overline{X_{wr}}} \right $ $b'_{ab} = \left \frac{X'_4 - X'_2}{\overline{X'_{wr}}} \right $ 	Faktor Fall I: 2...4,3 Fall II: 2 Fall III: 2 Fall IV: 3 Fall V: 5		$v_1 = \left \frac{X'_2 - X_1}{X_2} \right $ $v_2 = \left \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \right $ 	$f_c = \frac{\overline{X_{wr}} - X_a}{X_a}$ $f'_c = \frac{\overline{X'_{wr}} - X_a}{X_a}$ 
	Mittelwert	$\overline{X_{wr}^*} = \frac{\overline{X_{wr}} + \overline{X'_{wr}}}{2}$	$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N}$ 	$b'^* = \frac{b' + b'_{ab}}{2}$ 	Faktor Fall I: 2...4,3 Fall II: 2 Fall III: 2 Fall IV: 3 Fall V: 5		$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$	$f_c = \frac{\overline{X_{wr}^*} - X_a}{X_a}$ 

¹⁶ Zur Berücksichtigung der Umkehrspanne bei der Berechnung der Messunsicherheit siehe Kapitel 7.1.3 Unsicherheitsanalyse.

Ablauf	Auswertung	Bestער Schätzwert	Merkmale für die Bestimmung der Messunsicherheitsbeiträge					
			Rel. Nullpkt-Abweichung	Rel. Wiederhol- präzision	Rel. Vergleich- Präzision	Rel. Umkehrspanne ¹⁷	Rel. Regressionsabw.	
C	Zu- oder Ab- nehmende Belastung	$X_1; X'_2$	$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N}$ ☺	Faktor Fall I: 2...4,3 Fall II: 2 Fall III: 2 Fall IV: 3 Fall V: 5 ☹	Faktor Fall I: 2...4,3 Fall II: 2 Fall III: 2 Fall IV: 3 Fall V: 5 ☹	$v = \left \frac{X'_2 - X_1}{X_1} \right $ ☺	$f_c = \frac{X_1 - X_a}{X_a}$ ☺ $f'_c = \frac{X'_2 - X_a}{X_a}$ ☺	
	Mittelwert	$\overline{X_{wr}^*} = \frac{X_1 + X'_2}{2}$	$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N}$ ☺	Faktor Fall I: 2...4,3 Fall II: 2 Fall III: 2 Fall IV: 3 Fall V: 5 ☹	Faktor Fall I: 2...4,3 Fall II: 2 Fall III: 2 Fall IV: 3 Fall V: 5 ☹		$f_c = \frac{\overline{X_{wr}^*} - X_a}{X_a}$ ☺	
D	Zunehmende Belastung	$\overline{X_{wr}^*} = \frac{X_1 + X_2}{2}$	$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N}$ ☺	$b' = \left \frac{X_2 - X_1}{\overline{X_{wr}^*}} \right $ ☺	Faktor Fall I: 2...4,3 Fall II: 2 Fall III: 2 Fall IV: 3 Fall V: 5 ☹	Faktor Fall I: 2...4,3 Fall II: 2 Fall III: 2 Fall IV: 3 Fall V: 5 ☹	$f_c = \frac{\overline{X_{wr}^*} - X_a}{X_a}$ ☺	

¹⁷ Zur Berücksichtigung der Umkehrspanne bei der Berechnung der Messunsicherheit siehe Kapitel 7.1.3 Unsicherheitsanalyse.

Bei Ablauf D wird davon ausgegangen, dass das Kraftmessgerät im Einsatz nur bei zunehmender Belastung eingesetzt wird; daher wird 1/3 der Umkehrspanne als Halbweite in der Unsicherheitsbilanz berücksichtigt

	Kalibrierung von Kraftmessgeräten https://doi.org/10.7795/550.20250130	DKD-R 3-3	
		Ausgabe:	03/2024
		Revision:	1
		Seite:	41 / 45

Anhang C: Verfahren für die Ermittlung von a-priori Wissen

In diesem Anhang wird ein mögliches Vorgehen gezeigt das in [7] beschriebene Verfahren umzusetzen. Das Ergebnis ist ein Wert, welcher auf die Kalibrierstufen skaliert wird. Dieses Beispiel ist nur eine einfache Umsetzung des in [7] beschriebenen Verfahrens, bei Verwendung einer Datenbank sind effizientere Lösungen möglich.

Dieses Verfahren stellt eine systematische Methode dar, mit welcher ein für einen Typ von Aufnehmern repräsentativer Wert für einen MU-Beitrag bestimmt werden kann. Da diese Ermittlung an einer Stichprobe von Aufnehmern gleichen Typs durchgeführt wird, kann bei Berücksichtigung eines Student-Faktors (*t*-Faktor) auf das Verhalten der Grundgesamtheit (alle Aufnehmer des gleichen Typs) geschlossen werden. Bei der Auswahl der Stichprobe ist darauf zu achten, dass die Exemplare möglichst aus unterschiedlichen Chargen stammen. Grundsätzlich sollten die Aufnehmer ein ähnliches Verhalten zeigen (ausreißerfrei).

Zur Ermittlung einer korrekten und aussagekräftigen Messunsicherheit ist bei der Auswahl der Daten für die Typprüfung zusätzlich auf diese Kriterien zu achten:

- Die Typbezeichnung eines Herstellers kann unterschiedliche Messkörper-Designs für verschiedene Nennkräfte enthalten, diese sind getrennt zu betrachten
- Kalibrierung auf identischen Kraft-BNME
- Übereinstimmung der Belastungsrichtung (Zug- und Druckkalibrierungen getrennt auswerten)
- identische Belastungsstufen: idealerweise erfolgt die Auswertung für jede Kalibrierstufe getrennt (für die bestmögliche Messunsicherheit)
- Teilbereichskalibrierungen getrennt auswerten
- eine ausreichende Auflösung

Der Begriff „a-priori“ verdeutlicht, dass dieser MU-Beitrag nicht aus den Messwerten der aktuellen Kalibrierung gewonnen wird, sondern aus „Vorwissen“ stammt.

Verfahren 1:

Tabelle 11 zeigt ein Beispiel der Berechnung eines für einen Typ von Aufnehmern repräsentativen MU-Beitrags für die Vergleichspräzision. Eingangsdaten sind die in Kalibrierungen nach DKD-R 3-3 Ablauf A oder nach DIN EN ISO 376 [1] bestimmten MU-Beiträge für die Vergleichspräzision. Diese sind nach Gleichung C8 der DIN EN ISO 376 [1] zu berechnen.

$$w_{\text{rot}} = \frac{1}{|\bar{X}_r|} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1,3,5} (X_k - \bar{X}_r)^2}}{\sqrt{3}}; \quad k: \text{Laufindex der Messreihen} \quad (17)$$

Der bei den verkürzten Abläufen zu verwendende MU-Beitrag (a-priori) ergibt sich aus dem Maximum der MU-Beiträge über alle Kraftstufen, multipliziert mit dem für die Anzahl der gemessenen Exemplare gültigen *t*-Faktor der Student-Verteilung nach Gleichung (18).

$$w_{\text{rot}} = \max(w_{\text{rot},n,j}) \cdot t \quad (18)$$

mit *n* : Laufindex für die verschiedenen Exemplare
 und *j* : Laufindex für die verschiedenen Kraftstufen

Bezeichnung: Kraftaufnehmer
 Hersteller: Musterfirma
 Typ: Mustertyp
 Messrichtung: Zug

Tabelle 11: Berechnung des MU-Beitrags für die Vergleichspräzision

Kraft F kN	Rel. Standardunsicherheit (Vergleichspräzision) X_1, X_3, X_5 $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ w_{rot}						Max v. MW	t -Faktor für: $n = 6$ $f = 5$ 2-seitig 95 %	Obere Grenze (MW-Bezug) v. MW
	Seriennummer								
	10356	10357	10358	10359	10365	02054			
0	-	-	-	-	-	-	0,860 %	2,571	2,211 %
5	0,16%	0,79%	0,65%	0,73%	0,21%	0,22%			
10	0,14%	0,86%	0,54%	0,66%	0,18%	0,20%			
20	0,05%	0,51%	0,34%	0,53%	0,13%	0,17%			
30	0,02%	0,29%	0,20%	0,39%	0,10%	0,15%			
40	0,03%	0,20%	0,13%	0,60%	0,08%	0,14%			
50	0,05%	0,23%	0,11%	0,31%	0,07%	0,14%			
MU-Beitrag	Rel. Standardunsicherheit w_{rot} (a-priori)						2,21	%	(vom Messwert)

Die in der Tabelle aufgeführten Zahlenwerte sind beliebig gewählt und sollen nur die Systematik veranschaulichen.

Tabelle 12: t -Faktor

Anzahl Freiheitsgrade f	P für zweiseitigen Vertrauensbereich 0,95
	P für einseitigen Vertrauensbereich 0,975
5	2,571
6	2,447
7	2,365
8	2,306
9	2,262
10	2,228

Bei der Ermittlung des a-priori-Wissens wird bewusst **nicht** der Mittelwert mit dem t -Faktor multipliziert, sondern das Maximum! Dieses Vorgehen erzeugt einen vergrößerten Sicherheitsabstand und ist dem geringen Stichprobenumfang sowie dem eingeschränkten Wissen um das Verhalten der einzelnen Exemplare geschuldet.

Der in dieser Form bestimmte MU-Beitrag kann für den gesamten Kalibrierbereich eingesetzt werden. In einem messwertbezogenen Diagramm erscheint dieser MU-Beitrag dann als konstante Linie.

Verfahren 2:

Alternativ kann aus den messwertbezogenen Daten ein MU-Beitrag mit Endwertbezug berechnet werden. Dazu ist es zweckdienlich zunächst die relativen, messwertbezogenen Eingangswerte in Werte in Einheit des Normals umzurechnen. Der MU-Beitrag (a-priori) ergibt sich aus dem Maximum der MU-Beiträge über alle Kraftstufen, multipliziert mit dem für die Anzahl der gemessenen Exemplare gültigen t -Faktor der Student-Verteilung. Das Beispiel in Tabelle 13 zeigt dieses Vorgehen. Tabelle 14 zeigt die Berechnung des MU-Beitrags mit Endwertbezug aus einer Tabelle mit messwertbezogenen Eingangsdaten.

Auch bei diesem Verfahren wird nur ein Wert ermittelt, dieser ist repräsentativ für einen bestimmten Typ von Aufnehmern. Die unterschiedlichen Werte der „Oberen Grenze“ entstehen durch die Skalierung auf die jeweilige Kraftstufe. In Abbildung 17 sind die resultierenden Grenzen eingezeichnet.

Tabelle 13: Berechnung des MU-Beitrags für die Vergleichspräzision (Endwertbezug)

Kraft F kN	Rel. Standardunsicherheit (Vergleichspräzision) X_1, X_3, X_5 $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ u_{rot} kN						Max kN	t -Faktor für: $n = 6$ $f = 5$ 2-seitig 95 %	Obere Grenze v. EW	Obere Grenze (EW-Bezug) v. MW
	Seriennummer									
	10356	10357	10358	10359	10365	02054				
0	-	-	-	-	-	-	0,240	2,571	0,617 kN entspricht 1,234% v. EW	-
5	0,0081	0,0395	0,0325	0,0365	0,0103	0,0110				12,34%
10	0,0135	0,0860	0,0540	0,0660	0,0176	0,0197				6,17%
20	0,0106	0,1012	0,0680	0,1065	0,0258	0,0343				3,09%
30	0,0057	0,0883	0,0600	0,1174	0,0298	0,0459				2,06%
40	0,0138	0,0806	0,0520	0,2400	0,0316	0,0567				1,54%
50	0,0246	0,1131	0,0550	0,1554	0,0340	0,0687				1,23%
MU-Beitrag	Standardunsicherheit u_{rot} (a-priori)						0,62	kN		
MU-Beitrag	Rel. Standardunsicherheit w_{rot} (a-priori)						1,23	%	(vom Endwert)	

Tabelle 14: Berechnung des MU-Beitrags für die Vergleichspräzision (Endwertbezug) aus messwertbezogenen Eingangsdaten

	A	B	C...G	H	I	J	K	L
Kraft	F kN	Rel. Standard. X ₁ , X ₃ , X ₅ 0°, 120°, 240° w _{rot}	Seriennummer 10356 ...	Max (der Stufe)	Max (der Stufe)	Max	t-Faktor für: n = 6 f = 5 2-seitig 95%	Obere Grenze (EW-Bezug) v. MW
				v. MW	v. EW	v. EW		
1	0	-	-	-	-			-
2	5	0,16%	...	=Max(B2:G2)	=H2*(A2/A7)			=J1*K1*(A7/A2)
3	10	0,14%	...	=Max(B3:G3)	=H3*(A3/A7)			=J1*K1*(A7/A3)
4	20	0,05%	...	0,53%	0,213%	=Max(I2:I7)	2,571	3,1%
5	30	0,02%	...	0,39%	0,235%	=0,480%		2,1%
6	40	0,03%	...	0,60%	0,480%			1,5%
7	50	0,05%	...	0,31%	0,311%			1,2%
	MU-Beitrag	Rel. Standardunsicherheit w _{rot} (a-priori)		=J1*K1		%	(vom Endwert)	
	MU-Beitrag	Standardunsicherheit u _{rot} (a-priori)		=J1*K1*A7		kN		

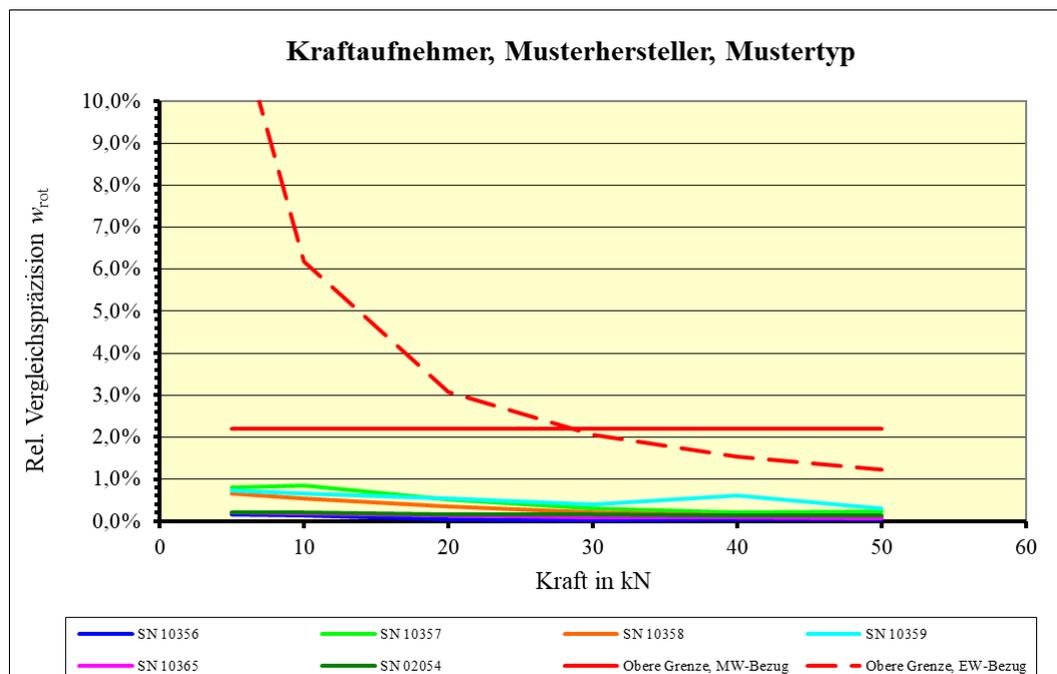


Abbildung 17: Visualisierung des MU-Beitrags der Vergleichspräzision



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de