

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD


**Richtlinie
DKD-R 3-9**

**Kontinuierliche Kalibrierung von
Kraftaufnehmern nach dem Ver-
gleichsverfahren**

Ausgabe 09/2018

<https://doi.org/10.7795/550.20180823J>



| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 2 / 65 |


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: (05 31) 5 92-8021
 Internet: www.dkd.eu

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 3 / 65 |

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-9 Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180823J>

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:


Mitglieder des Fachausschusses *Mechanische Größen* (später *Kraft und Beschleunigung*) des DKD in der Zeit von 2005 bis 2009.

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

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Vorwort | 6 |
| 2 | Zweck und Geltungsbereich | 6 |
| 3 | Symbole und Benennungen | 7 |
| 4 | Kalibriergegenstand | 8 |
| 4.1 | Kalibrierfähigkeit | 8 |
| 4.2 | Einspannteile, Einbauteile | 9 |
| 4.3 | Signalführende Komponenten in der K-BNME | 9 |
| 5 | Umgebungsbedingungen | 9 |
| 6 | Durchführung der Kalibrierung | 10 |
| 6.1 | Vorbereitungen zur Kalibrierung | 10 |
| 6.1.1 | Bestimmen von bauartspezifischen Messunsicherheitsbeiträgen | 10 |
| 6.1.2 | Temperaturausgleich | 10 |
| 6.2 | Kalibrierablauf | 10 |
| 6.2.1 | Vorbelastungen | 10 |
| 6.2.2 | Zeitmanagement in Anlehnung an DIN EN ISO 376 | 10 |
| 6.2.3 | Zeitmanagement bei verkürzten Kalibrierabläufen | 11 |
| 6.2.4 | Erfassung der Messwerte | 12 |
| 7 | Auswertung | 12 |
| 8 | Messunsicherheit | 15 |
| 8.1 | Einflussgrößen | 15 |
| 8.2 | Modell der Auswertung | 17 |
| 8.2.1 | Modell „Übertragungskoeffizient“ | 17 |
| 8.2.2 | Modell „Kraft“ (Polynomkoeffizienten eines Ausgleichs 3.Grades, DIN EN ISO 376) | 22 |
| 8.3 | Visualisierung des Messunsicherheitsbudgets | 26 |
| 8.4 | Unsicherheitsintervall | 26 |
| 8.5 | Einwertangabe als Kalibrierergebnis | 26 |
| 8.6 | Visualisierung des Kalibrierergebnisses | 28 |
| 8.6.1 | Abweichung und Messunsicherheit | 29 |
| 8.6.2 | Einwertangabe | 30 |
| 9 | Angaben im Kalibrierschein | 32 |
| 10 | Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium | 33 |
| 11 | Konformität | 33 |
| 12 | Kalibriermarke | 33 |
| 13 | Schrifttum | 34 |
| 13.1 | Technische Regeln | 34 |
| 13.2 | Literatur | 35 |

| | |
|--|----|
| Anhang A | 37 |
| A.1 Rückführung der Kraft-BNME | 37 |
| A.1.1 Allgemeines | 37 |
| A.2 Anforderungen an Referenz- und Transfer-Kraftaufnehmer | 40 |
| A.3 Eignungsnachweis der Transfernormale vor der erstmalige Anwendung des kontinuierlichen Betriebs (Vorschlag) | 41 |
| A.3.1 Ermittlung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Messwerte | 41 |
| A.3.2 Ermittlung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Umkehrspanne | 42 |
| A.3.3 Prüfung des Kriechverhaltens | 43 |
| A.3.4 Ermittlung des Einflusses der Krafteinleitungsteile | 44 |
| A.3.5 Ermittlung des Einflusses der Temperatur | 44 |
| A.3.6 Empfohlene Grenzwerte für zeitabhängige Parameter und Temperaturverhalten | 45 |
| A.3.7 Überwachung des kontinuierlichen Betriebes | 45 |
| A.4 Ermittlung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit einer K-BNME mit Referenz-Kraftaufnehmersystem bei kontinuierlichem Betrieb (Vorschlag) | 45 |
| A.4.1 Einflussgrößen | 45 |
| A.4.2 Modell | 46 |
| A.4.2.1 Unsicherheitsanalyse | 49 |
| A.4.2.2 Messunsicherheitsbudget | 50 |
| A.4.3 Korrektionsfaktor $K_{\text{Anschluss,stat}}$ der statischen Anschlussmessung mit Transfer-Kraftaufnehmern | 51 |
| A.4.3.1 Unsicherheitsanalyse | 53 |
| A.4.3.2 Messunsicherheitsbudget | 54 |
| A.4.4 Korrektionsfaktor K_{ver} der Verifizierung des kontinuierlichen Verfahrens | 55 |
| A.4.4.1 Unsicherheitsanalyse | 57 |
| Anhang B | 59 |
| B.1 Bestimmung eines optimalen Polynomgrades zur Reduzierung des Einflusses von zufälligen Abweichungen | 59 |
| B.2 Beispiel für die Wirkung der Approximation mit Polynomen | 61 |
| Anhang C | 64 |
| C.1 Anzeigeabweichung | 64 |

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 6 / 65 |

1 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.

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Kraft und Beschleunigung* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 2005 erstellt.

Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum.

Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 3-9 (Ausgabe 2010). Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 3-9 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 02/2005, veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
2. Neuauflage: 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 1. Neuauflage

2 Zweck und Geltungsbereich


Die vorliegende Richtlinie dient dazu, Mindestanforderungen an das Kalibrierverfahren und an die Abschätzung der Messunsicherheit bei der kontinuierlichen Kalibrierung von Messgrößenaufnehmern für mechanische Größen festzulegen. Sie gilt für Kalibriergegenstände, die durch einen vom Kalibrierlaboratorium beigestellten Anpasser zu einer vollständigen Messkette ergänzt werden müssen. Der Anpasser ist Teil der Kalibriereinrichtung. Damit wird die Anwendung der Richtlinie grundsätzlich auf den Messgrößenaufnehmer ohne Anpasser als Kalibriergegenstand eingeschränkt.¹

Die Anwendung der Richtlinie setzt voraus, dass die nach dem Vergleichsverfahren arbeitenden Kraft-BNME in der Lage ist, sowohl einen stufenförmigen als auch einen kontinuierlichen Belastungsverlauf zu realisieren.

Unter kontinuierlichen Kalibrierabläufen wird hier eine stetige Messgrößenänderung verstanden, deren Zeitverhalten z.B. rampenförmig oder \sin^2 -förmig („haversine“-förmig; $\text{hav}(x) = \sin^2(x/2)$) verläuft. Der Ablauf ist aber als quasistatisch zu betrachten (im Gegensatz zur dynamischen Belastung mit beispielsweise sinus- oder stoßförmigem Zeitverlauf). Es wird von einer Dauer der Belastungszeit von Null bis zum Kalibrierbereichsendwert von minimal 1 min ausgegangen, z.B. bei DMS-Messtechnik.

Die zeitkritischen Parameter des kontinuierlichen Kalibrierablaufs und der Komponenten wie z.B. Anstiegsgeschwindigkeit der Belastung, zeitgleiche Datenerfassung, Filtercharakteristiken usw. beeinflussen das Kalibrierergebnis in stärkerem Maße als bei stufenweisem Ablauf.

¹ Anmerkung: Sofern zukünftig Kalibriergegenstände mit integrierter Signalanpassung zu kalibrieren sind, kann diese Richtlinie auch angewendet werden, wenn sichergestellt ist, dass die in dieser Richtlinie beschriebenen Kriterien z.B. bezüglich der Synchronisation und der gleichen Signalanpassung in Normal- und Kalibriergegenstandskanal eingehalten werden.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 7 / 65 |

Sofern die Kalibriereinrichtung und die messtechnische Ausrüstung einen schnelleren Kalibrierablauf zulassen, müssen die Beiträge zur Messunsicherheit im Einzelfall nachgewiesen und quantifiziert werden, z.B. bei piezoelektrischer Messtechnik. Die Einflüsse müssen zum Zwecke der Vergleichbarkeit benannt und angegeben werden.

Die Abläufe und Festlegungen in dieser Ausgabe der Richtlinie sind vorläufig auf das nachweisliche Erreichen einer kleinsten angebbaren Messunsicherheit $W_{bmc} \geq 1 \cdot 10^{-3}$ v.M. ausgelegt.

Besonderheiten, die durch die Kalibriereinrichtung vorgegeben sind, müssen vom Kalibrierlaboratorium bestimmt und bei der Abschätzung der Messunsicherheit berücksichtigt werden.

Hinweis:

Die Richtlinie beschreibt erstmalig Kalibrierabläufe, für die es in der bisherigen Praxis keine Vorgaben gibt. Sie schließt deshalb metrologische Vorgaben und Maßnahmen für den Anschluss an die nationalen Normale, den Transfer der Einheit zum Kalibrierlaboratorium sowie die dort einzuhaltenden Abläufe ein. Die Kraft-BNME muss bzgl. des Anlauf- und Regelverhaltens geeignet sein.

3 Symbole und Benennungen

Die in dieser Richtlinie verwendeten Symbole und Benennungen entsprechen den Vorgaben der DIN EN ISO 376 und VDI/VDE-Richtlinie 2638. Zusätzliche Symbole und Benennungen, die sich aus der Besonderheit des kontinuierlichen Ablaufs ergeben, sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die erstmals in Abschnitt Messunsicherheit verwendeten Symbole werden dort extra aufgeführt.

| Symbol | Benennung |
|--------------|---|
| K-NME | Kraft-Normalmesseinrichtung |
| K-BNME | Kraft-Bezugsnormalmesseinrichtung |
| KA_{ref} | Referenz-Kraftaufnehmer (Bestandteil der K-BNME) |
| KA_{tsd} | Transfer-Kraftaufnehmer (Bestandteil der Rückführungsmesskette) |
| KG | Kalibriergegenstand; auch als Index verwendet |
| NMI | Nationale Metrologie-Institute |
| F_i | Kraft |
| S_i | Messsignal |
| Index - stat | betrifft die stufenweise Verfahrensweise der Messgröße |
| Index – kont | betrifft die kontinuierliche Verfahrensweise der Messgröße |
| Index - jump | betrifft die sprungförmige Messgrößenänderung |
| t_B | Bewertungszeit |
| t_F | Kraftänderungszeit |
| t_L | Belastungszeit beim stufenweisen Ablauf; Zeit zwischen Belastungsbeginn und Messwertaufnahme |
| $t_{L,kont}$ | Belastungszeit beim kontinuierlichen Ablauf |
| t_W | Wartezeit |
| T | Aufnehmertemperatur |
| v_{an} | Anstiegsgeschwindigkeit |
| f_G | Grundresonanzfrequenz des Aufnehmers |
| $S_{jump,i}$ | Nullsignal-korrigierter Messwert bei schneller Be- u. Entlastung |
| $S_{stat,i}$ | Nullsignal-korrigierter Messwert bei statischer Be- u. Entlastung nach DIN EN ISO 376 |

| | |
|--------------------|---|
| $\Delta S_{rel,i}$ | rel. Messwertdifferenz = $\Delta S_{rel,i} = \frac{\Delta S_i}{S_{stat,i}} = \frac{S_{jump,i} - S_{stat,i}}{S_{stat,i}}$ zwischen schneller und statischer Belastung |
| $d_{cr,E}$ | Entlastungskriechen |
| $d_{0,R}$ | Vorkraftsignalrest; Differenz der Ausgangssignale vor der Belastung und nach der Entlastung und nach Abwarten der Bewertungszeit t_B ; t_B ist anzugeben |
| d_{Mo} | Störeinflüsse durch Biegemomente, wie exzentrische Kräfteinleitung, Querkräfte usw. |
| TK_C | Temperaturkoeffizient des Kennwertes pro 10 K |
| TK_0 | Temperaturkoeffizient des Nullsignals pro 10 K |
| $u_{jump,i}$ | rel. Umkehrspanne bei schneller Be- u. Entlastung |
| $u_{stat,i}$ | rel. Umkehrspanne bei statischer Be- u. Entlastung nach DIN EN ISO 376 |
| Δu_i | rel. Umkehrspannendifferenz [$\Delta u_i = u_{jump,i} - u_{stat,i}$] zwischen schneller und statischer Belastung |
| W_{ref} | rel. erweiterte Messunsicherheit der Messwerte des Referenzaufnehmers |
| W_{tsd} | rel. erweiterte Messunsicherheit der Messwerte des Transferaufnehmers |
| W_{bmc} | kleinste angebbare Messunsicherheit bei statischer Kalibrierung |
| $W_{bmc,kont}$ | kleinste angebbare Messunsicherheit bei kontinuierlicher Kalibrierung |
| W' | Unsicherheitsintervall |
| D_{inp} | Interpolationsabweichung |

Tabelle 1: Symbole und Benennungen

4 Kalibriergegenstand

Als Kalibriergegenstand können nur solche Kraftaufnehmer kontinuierlich kalibriert werden, die bezüglich der elektrischen Anschlussdaten mit dem Messverstärker-/Messdatenerfassungssystem der Kalibriereinrichtung arbeiten können. Die Kalibrierdaten haben nur Gültigkeit, wenn im praktischen Einsatz des Kalibriergegenstandes vergleichbare Anschlussparameter (Versorgungsspannung, Trägerfrequenz oder Gleichspannung) gelten. Ansonsten sind die Einflussfaktoren vom Anwender zu bestimmen und in seinem Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen.


4.1 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, sowie den speziellen Voraussetzungen für einen kontinuierlichen Kalibrierablauf 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,

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 9 / 65 |

Bedienungsanleitungen) vorliegen

Funktionsprüfungen umfassen z.B.:

- Elektrische Funktionsfähigkeit
- Messsignalrichtung
- Isolationswiderstand
- Nullsignal, z. B. im nicht eingebauten Zustand

4.2 Einspannteile, Einbauteile

Die Einbauteile sind als Bestandteil des Kalibriergegenstandes anzusehen. Die Bereitstellung der Einbauteile ist zwischen Auftraggeber und Kalibrierlaboratorium abzustimmen.

Zug- oder Druckkraft:

- a) Referenz-Kraftaufnehmer: Anschluss in Anlehnung an DIN EN ISO 376 zwecks Rückführung im DAkkS-Kalibrierlaboratorium
- b) Kalibriergegenstand: möglichst weitgehend Verhältnisse wie im praktischen Einsatz vorsehen

Kopplung zwischen a) u. b) über nicht messwertverfälschende, störkomponentenarme Adapter (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.

4.3 Signalführende Komponenten in der K-BNME

Unter den Signalführenden Komponenten werden die Messverstärker und die Anzeiger im Messkanal für Referenzaufnehmer sowie Kalibriergegenstand verstanden.

Die Auswahl und die Einstellungen der Signalführenden Komponenten obliegen dem Kalibrierlaboratorium. Das Übertragungsverhalten der Komponenten muss bekannt sein und im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden. Ebenso müssen gleiche Filterparameter gewährleistet sein.

Grundsätzlich wird eine Synchronisierung und gemeinsame Triggerung der Signalführenden Komponenten für die Messkanäle des Referenzaufnehmers der K-BNME und für den Kalibriergegenstand empfohlen.


Erfassbare systematische Abweichungen können durch Korrektur im Kalibrierergebnis berücksichtigt werden.

Hinweis:

Die Übertragungseigenschaften von Anpassern werden z. Z. nur für diskrete Eingangswerte auf nationale Normale rückführbar bestimmt, z. B. das Spannungsverhältnis mV/V. Dies erfolgt sowohl für Trägerfrequenzsysteme als auch für Gleichspannungssysteme mittels so genannter Brückennormale.

5 Umgebungsbedingungen

Die relevanten Umgebungsbedingungen (Umgebungstemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte) müssen überwacht und im Kalibrierschein dokumentiert werden und sind gegebenenfalls im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen. Der zugelassene Temperaturbereich erstreckt sich in Anlehnung an DIN EN ISO 376 von 18 °C bis 28 °C. In Deutschland gilt gemäß nationalem Anhang in DIN EN ISO 376 als Bezugstemperatur 21°C ± 2 K. Während der Kalibrierung muss sich der Messaufbau im thermischen Gleichgewicht befinden und die Umgebungstemperatur auf ±1 K stabil gehalten werden können.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 10 / 65 |

6 Durchführung der Kalibrierung

Grundsätzlich erfolgt der Kalibrierablauf in Anlehnung an die DIN EN ISO 376, d.h. die Vorbelastungen und die Einbaustellungen werden wie in der Norm beschrieben ausgeführt (vgl. Abbildung 1). Unter bestimmten Voraussetzungen (siehe 6.1.1) können diese Abläufe verkürzt werden.

6.1 Vorbereitungen zur Kalibrierung

6.1.1 Bestimmen von bauartspezifischen Messunsicherheitsbeiträgen

Sollen beim Kalibrierablauf weniger Einbaustellungen und Messreihen als in DIN EN ISO 376 beschrieben ausgeführt werden, müssen die für eine Messunsicherheitsabschätzung erforderlichen Einflussgrößen, wie Wiederhol- und Vergleichspräzision sowie Umkehrspanne, vorher im Rahmen einer Bauartprüfung an einer ausreichenden Anzahl typgleicher Kalibriergegenstände ermittelt werden.

Hinweise:

- Vorliegen von Kennwerten aus vergleichbaren früheren Kalibrierungen und unter Verwendung baugleicher/ähnlicher Adaptionen
- Vergleich des aktuellen Kennwertes mit den/m früheren aus dem Prüfmittelüberwachungssystem, um z.B. die Langzeitinstabilität zu beobachten und ggf. zwischenzeitlich eingetretene Schäden (Überlastungen) zu erkennen

6.1.2 Temperatenausgleich

Um die Zeitvorteile der kontinuierlichen Kalibrierung nutzen zu können, wird empfohlen, die Aufwärmzeit der Kalibriergegenstände durch Anlegen einer Hilfsspeisespannung vor Einbau in die K-BNME parallel zu einer laufenden Kalibrierung ablaufen zu lassen. Die von den Herstellern angegebenen Warmlaufzeiten sind dabei einzuhalten.

6.2 Kalibrierablauf

Die Parameter der Kalibrierabläufe (Belastungsgeschwindigkeit, Abtastraten, Regelungseinstellungen der K-BNME, usw.) müssen in der QM-Dokumentation des Kalibrierlaboratoriums beschrieben sein und zusammen mit dem Kalibrierschein auf Anfrage zur Verfügung stehen. In Absprache mit dem Kunden kann ein informativer Zusatz zum Kalibrierschein erstellt werden, der den Ablauf und die Belastungsgeschwindigkeiten und ggf. Wartezeiten enthält. Zweckmäßig ist eine grafische Darstellung, z.B. gemäß Abbildung 1.

6.2.1 Vorbelastungen

Die 1. Vorbelastung dient zur Konditionierung, z.B. für Setzvorgänge in der Adaption oder zum Unterdrücken der Vorgeschichte. Werden weitere Vorbelastungen ausgeführt, können diese zur Beurteilung der Kalibrierfähigkeit dienen, z.B. durch Beobachtung der Reproduzierbarkeit der Messwerte. Dies ist insbesondere möglich, sofern die Vorlastreihen mit gleichen Parametern des Kalibrierablaufs wie die Messreihen gefahren werden. Durch die Vorbelastung muss der zu kalibrierende Kraftmessbereich abgedeckt werden. Verfahrensbedingt kann der Kalibrierbereichsendwert um ca. 3 % überschritten werden.

6.2.2 Zeitmanagement in Anlehnung an DIN EN ISO 376

Abbildung 1 zeigt einen kontinuierlichen Kalibrierablauf, wie er in Anlehnung an die DIN EN ISO 376, ausgeführt werden kann. Dabei muss die zeitliche Abhängigkeit der Kraftzu- bzw. Kraftabnahme nicht linear, wie dargestellt, verlaufen, sondern kann beispielsweise auch einen \sin^2 -förmigen Verlauf annehmen. Auch kann die Anzahl und der zeitliche Verlauf der Vorbelastungen unterschiedlich ausgeführt werden.

6.2.3 Zeitmanagement bei verkürzten Kalibrierabläufen

Unter bestimmten Voraussetzungen (Abs. 6.1.1) kann der Ablauf verkürzt werden auf beispielsweise **eine** Vorbelastung und **eine** Messreihe mit zu- **und** abnehmender Belastung oder auch mit zu- **oder** abnehmender Belastung.

Abbildung 2a zeigt einen Ablauf mit einer Vorbelastung und einer Auf- und Abwärtsreihe; Abbildung 2b zeigt den einfachsten Fall, in dem der Ablauf auf eine Vorbelastung und eine Aufwärtsreihe verkürzt wird. Zu beachten ist dabei, dass mit fortschreitender Verkürzung die Anzahl der in einer Bauartprüfung zu bestimmenden Messunsicherheitsanteile zunimmt, da diese nicht mehr direkt aus den Messwerten eines verkürzten Ablaufes bestimmt werden können, wie Wiederholpräzision, Vergleichspräzision und Umkehrspanne. Die Bauartprüfungen können z.B. nach DIN EN ISO 376 ausgeführt werden.

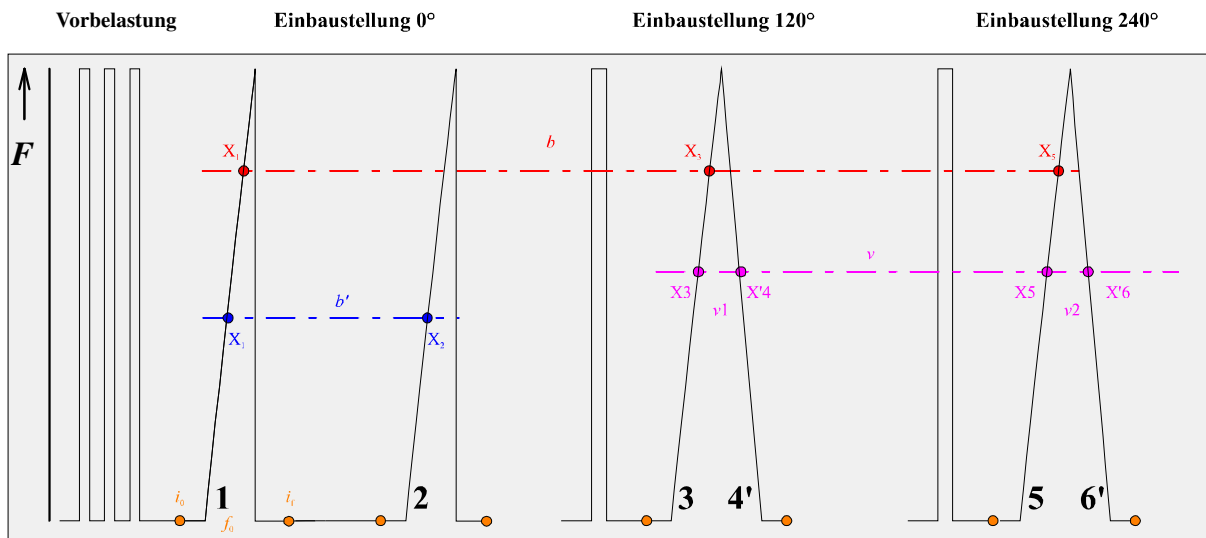


Abbildung 1: Kontinuierlicher Kalibrierablauf in Anlehnung an DIN EN ISO 376

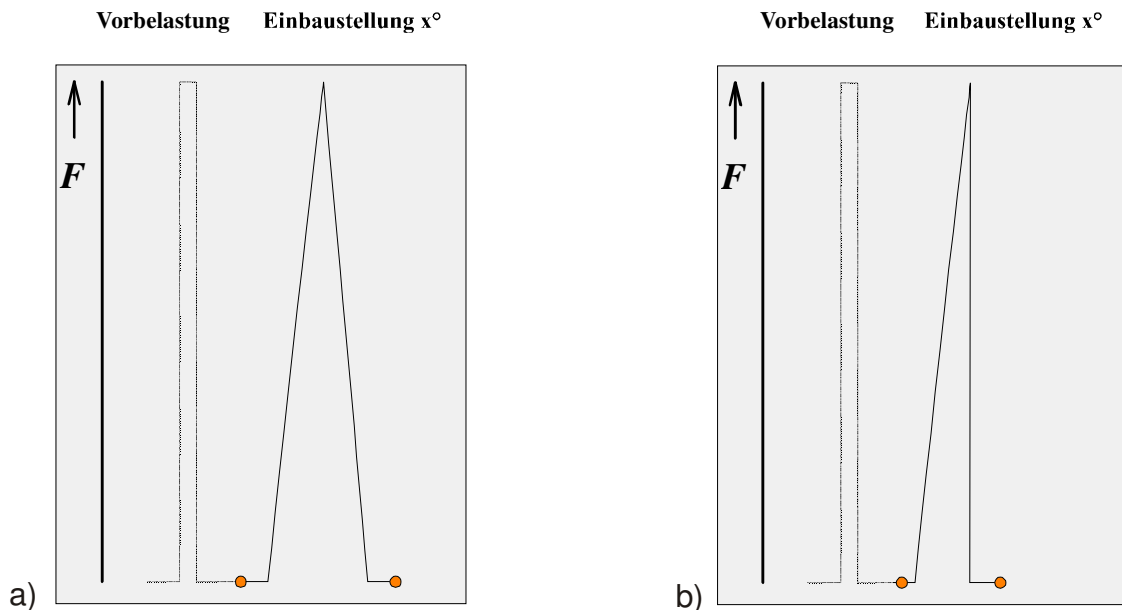



Abbildung 2: Kontinuierlicher Kalibrierablauf
a) mit einer Auf- und einer Abwärtsreihe

b) mit einer Aufwärtsreihe

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 12 / 65 |

6.2.4 Erfassung der Messwerte


Die Erfassung der Wertepaare, bestehend aus der Kraft $F_{\text{ref,kont}}$ und dem zugehörigen Ausgangssignal $S_{\text{KG,kont}}$ des Kalibriergegenstandes kann zeitdiskret oder wertdiskret erfolgen. Die zeitdiskrete Erfassung erfolgt mit vorgegebener Abtastfrequenz (typischerweise $N = 10\,000$ bis $100\,000$ Wertepaare). Bei der wertdiskreten Messwerterfassung werden zu festgelegten Belastungen (Messschranken) Wertepaare (typischerweise $N = 100$ bis 500) aufgenommen. Um ein Aliasing zu verhindern, müssen geeignete Filtereinstellungen gewählt werden.

7 Auswertung

Der Umfang der Auswertung ist davon abhängig, welcher Kalibrierablauf gewählt wurde (vgl. Abs. 6). Bei Ablauf in Anlehnung an DIN EN ISO 376 werden die Messwerte so aufbereitet, dass alle für die Auswertung und die Abschätzung der Messunsicherheit benötigten Informationen aus den Wertepaaren der aktuellen Kalibrierung gewonnen werden können. Bei verkürzten Kalibrierabläufen werden für die Abschätzung der Messunsicherheit Informationen aus früheren Kalibrierungen des Kalibriergegenstandes und/oder Bauartprüfungen benötigt. Abweichend zur Auswertung nach DIN EN ISO 376, bei der die Ausgleichsfunktion nur durch Messwerte bei zunehmender Belastung berechnet wird, können je nach Anwendungsfall und Kundenwunsch auch die Messwerte bei abnehmender Belastung oder die Mittelwerte aus beiden Belastungsrichtungen verwendet werden.

Die Auswertung beinhaltet folgende Schritte (vgl. Abbildung 3):

1. Ausgangssignal S_{KG} des Kalibriergegenstandes an gewünschten Stützstellen $F_{\text{ref},i}$ bestimmen, entweder:
 - a) Bestimmung durch lineare Interpolation benachbarter Messwertpaare ($S_{\text{KG,kont}}, F_{\text{ref,kont}}$) oder
 - b) Bestimmung unter Verwendung von Ausgleichsfunktionen (höheren Grades) über alle Messwertpaare, getrennt für Messwertpaare in Richtung zunehmender und abnehmender Belastung für jede Einbaustellung (weitere Informationen zur Bestimmung dieser Ausgleichsfunktionen, falls zufällige Abweichungen reduziert werden müssen, siehe Anhang B)
2. Beistellung von Messunsicherheitsbeiträgen (z.B. Wiederholpräzision, Vergleichspräzision, Umkehrspanne) aus Bauartprüfungen. Bei Ausführung mehrerer Messreihen: Ermittlung von Mittelwerten und Messunsicherheitsbeiträgen in Analogie zur DIN EN ISO 376, soweit diese aus den Messwertpaaren bestimmbar sind.
3. Bestimmung des Übertragungskoeffizienten aus den Wertepaaren an den Stützstellen der Aufwärts- und/oder Abwärtsreihe, welche unter Punkt 1 berechnet wurden, vorzugsweise als Steigung einer Ausgleichsfunktion 1. Grades durch Null nach der (Gaußschen) Methode der kleinsten Abweichungsquadrate (andere Verfahren siehe Abs. 8.5). In Anlehnung an DIN EN ISO 376 ist auch ein Ausgleich höheren Grades möglich.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 13 / 65 |

Bei Verwendung eines Ausgleichs 1. Grades:

4. Aufstellen einer Wertetabelle mit den Wertpaaren an den Stützstellen (welche unter Punkt 1 berechnet wurden), den diesen beizuordnenden erweiterten Messunsicherheiten W , den Interpolationsabweichungen D_{inp} und den Unsicherheitsintervallen W' . Die Unsicherheitsintervalle für den Übertragungskoeffizienten (Steigung der Ausgleichsfunktion 1. Grades, Einwertangabe) ergeben sich durch Addition von erweiterter Messunsicherheit und Interpolationsabweichung an den Stützstellen.
5. Darstellung des Übertragungskoeffizienten (Einwertangabe) mit Unsicherheitsintervallen und Spezifikationsgrenze(n) im Kalibrierbereich. Dem Übertragungskoeffizienten (der Einwertangabe) können eine oder mehrere selbstbestimmte Spezifikationsgrenzen zugeordnet werden. Dabei muss der Kraftbereich, für den die Spezifikationsgrenzen gültig sind, angegeben werden.
6. Angabe des vollständigen Messergebnisses bestehend aus Übertragungskoeffizient (Einwertangabe) und Spezifikationsgrenze(n) (diese ist größer als das Unsicherheitsintervall; siehe Abs. 8.5)

Das Ausgangssignal des Kalibriergegenstandes in Abhängigkeit von der auf ihn einwirkenden Kraft kann alternativ durch eine Tabelle von Wertepaaren, z.B. in Analogie zu DIN EN ISO 376 beschrieben werden. Die Wertepaare gestatten es, anstelle der Einwertangabe Ausgleichsfunktionen höheren Grades zu verwenden.

Um die Wirkung der Polynombildung nach Schritt 1b zu veranschaulichen, ist im Anhang B ein Vergleich von Ergebnissen dargestellt, die sich ergeben, wenn ein Übertragungskoeffizient (Einwertangabe) direkt aus den aufgenommenen Wertepaaren ($F_{\text{ref, kont}}$; $S_{\text{KG, kont}}$) und nach Reduzierung von zufälligen Abweichungen durch Verwendung eines nach Anhang B gebildeten Polynoms bestimmt wird.

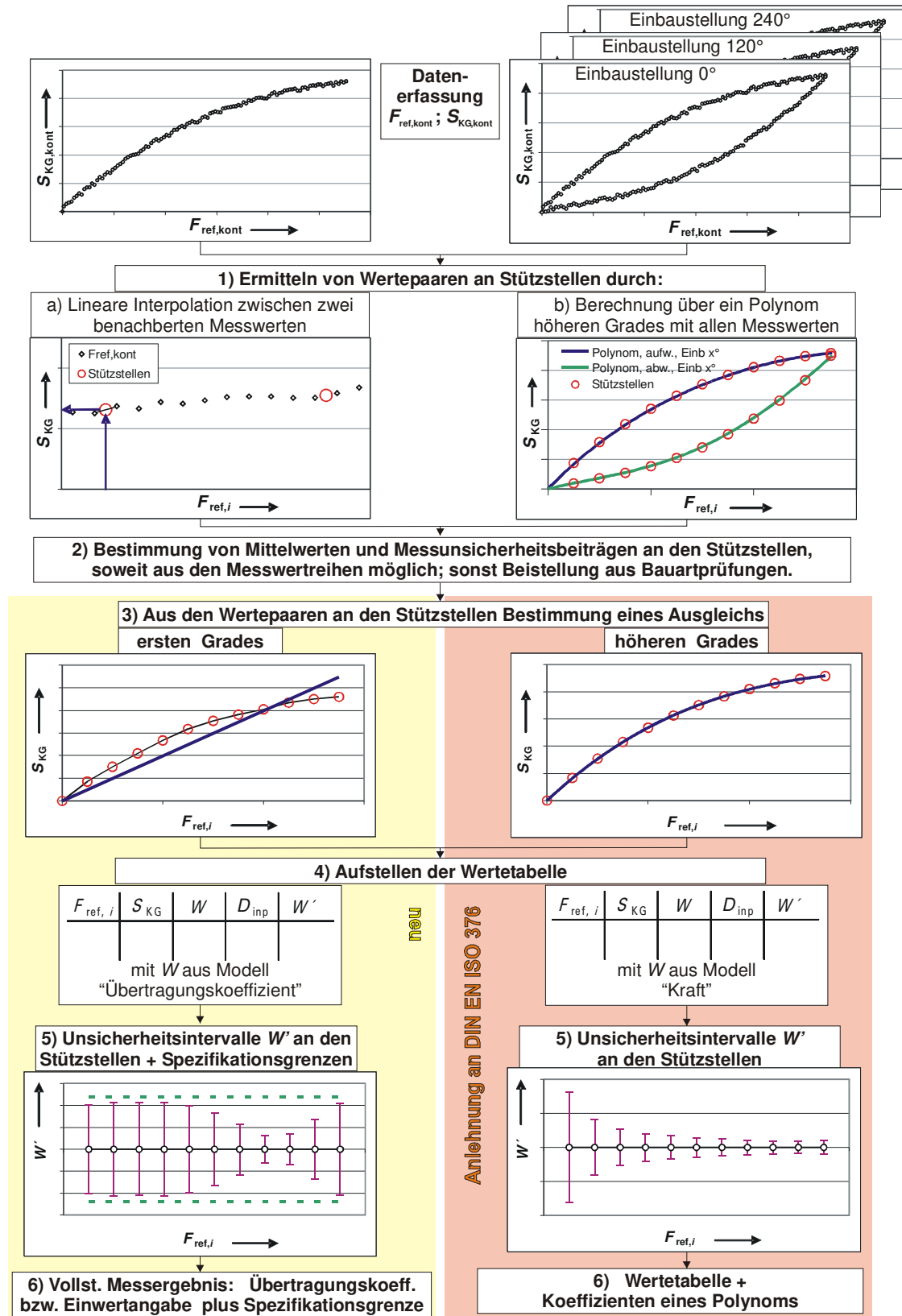



Abbildung 3: Ablauf einer Auswertung

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 15 / 65 |

8 Messunsicherheit

8.1 Einflussgrößen

Für das Aufstellen des Modells der Auswertung wird empfohlen, die Einflussgrößen aufzulisten und grafisch darzustellen. Geeignet ist hierfür das Ursache-Wirkung-Diagramm; es visualisiert den Zusammenhang zwischen der Ursache (Anregungsgröße) und der Wirkung (Ergebnisgröße, Messergebnis) unter dem Einfluss von Störgrößen.

Hinweis:

Die kleinste angebbare Messunsicherheit wird zuvor unter Verwendung von Transfer-Kraftaufnehmern bestimmt (s.

Anhang A).

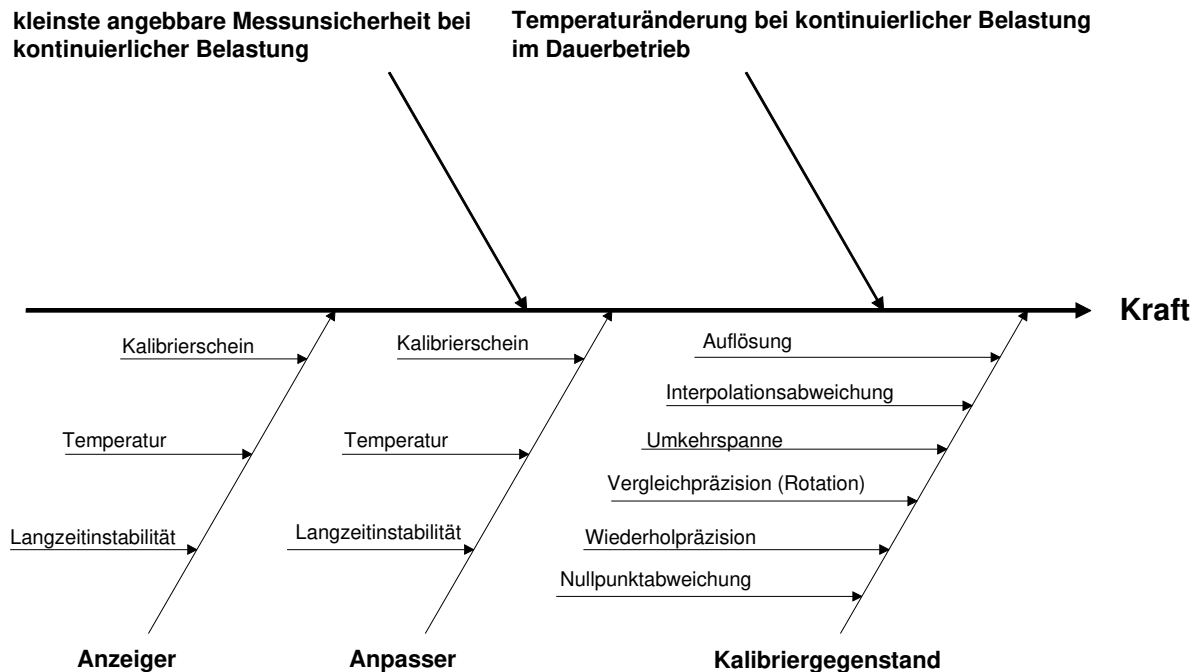


Abbildung 4: Einflussgrößen bei der Ermittlung der den Messwerten des Kalibriergegenstandes beigeordneten Messunsicherheiten

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

Weitere Quellen von Messabweichungen sind in folgender Tabelle 2 beschrieben:

| Quelle | Ursache |
|----------------------------|--|
| Messgeräte | Kalibrierintervall abgelaufen, interne und externe Abgleiche, Auflösung, Rauschen, Driften, Schutzschirmtechnik |
| Umgebungsbedingungen | Umgebungstemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte, Vibration, Stöße, umgebendes Medium |
| Schaltungs-/Versuchsaufbau | Impedanzen, Leitungen, Thermospannungen, Versorgungsspannungen, mechanische Adaptionen, Einbauorte, -lagen, Massen, Fallbeschleunigung |
| Beobachter | Schreib-, Ablesefehler, Anwesenheit des Beobachters |
| Programmierung | fehlerhafte Dateizugriffe, falsche Konstanten, falsche Parameterübergabe |

Tabelle 2: Quellen von Messabweichungen und Messunsicherheiten [19]

Grundsätzlich ist zuerst sicherzustellen, dass alle systematischen Abweichungen erkannt und hierfür die Korrekturen angebracht werden. Die verbleibenden unbekanntes Messabweichungen sind in Form von abgeschätzten Messunsicherheitsbeiträgen im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen.

Hinweise:

1. Bei fortlaufendem kontinuierlichem Betrieb kann bedingt durch sich ständig wiederholende elastische Verformung der Messfeder eine Erwärmung des KA_{ref} auftreten, die zu Kennwertänderungen führen kann. Um diesen Einfluss abzuschätzen, können Vergleichsmessungen mit einem Transferkraftaufnehmer vor und nach einer genügend großen Anzahl von Belastungszyklen (Kalibrierabläufen) ausgeführt werden.
2. Sofern sich die Temperatur des KA_{ref} im Kalibrierbetrieb um mehr als ± 1 K im Vergleich zu der Referenztemperatur ändert, kann eine Korrektur am Messergebnis vorgenommen werden. Die Berücksichtigung des Temperatureinflusses im Messunsicherheitsbudget reduziert sich dann auf die Unsicherheit bei der Bestimmung der Aufnehmertemperatur.

8.2 Modell der Auswertung

Die Modelle der Auswertung von Kraft-Kalibrierungen sind als lineare Produktmodelle unter Verwendung von relativen Messunsicherheiten formuliert.

In allgemeiner Darstellung gilt:

Größen:
$$Y = q \cdot \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}; \quad p_i := \pm 1 \tag{8.1}$$

Schätzwerte:
$$y = q \cdot \prod_i x_i^{p_i}; \quad p_i = \pm 1 \tag{8.2}$$

8.2.1 Modell „Übertragungskoeffizient“

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

$$E_{\text{KG}} = \frac{V_{\text{Anz}}}{F_{\text{bmc,kont}} \cdot (G \cdot V_{\text{Sp}})} \cdot \prod_{i=1}^5 K_i \quad (8.3)$$

mit $\prod_{i=1}^5 K_i = K_T \cdot K_{\text{zer}} \cdot K_{\text{rep}} \cdot K_{\text{rot}} \cdot K_{\text{rev}}$

| | | | |
|-----------------------|---|---|---|
| E_{KG} | Ergebnisgröße; Übertragungskoeffizient (Empfindlichkeit) des KG | 2 | |
| V_{Anz} | Spannungsanzeige des Ausgebers | 3 | 4 |
| G | Verstärkungskoeffizient des KG-Verstärkers | | |
| V_{Sp} | Speisespannung für den KG | | |
| $F_{\text{bmc,kont}}$ | durch die K-BNME eingestellter Kraftwert im kontinuierlichen Betrieb | | |
| K_T | Korrektionsfaktor rel. Temperaturänderung bei kontinuierlicher Belastung im Dauerbetrieb | | |
| K_{zer} | Korrektionsfaktor rel. Nullpunktabweichung | | |
| K_{rep} | Korrektionsfaktor rel. Wiederholpräzision | | |
| K_{rot} | Korrektionsfaktor rel. Vergleichpräzision | | |
| K_{rev} | Korrektionsfaktor rel. Umkehrspanne | | |

Hinweis:

Die Messunsicherheitsbeiträge der Einflussgrößen Ausgeber, Verstärker und Speisespannung können im allgemeinen Fall den Kalibrierscheinen der Geräte entnommen werden. In der Richtlinie VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Kalibrierung von Messmitteln für elektrische Größen im Blatt 3 Digitalmultimeter und im Blatt 20 Gleichspannungs-Messverstärker sind hierzu Hinweise enthalten.

Korrektionsfaktoren:

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

δx_i unbekannte Messabweichungen und

$E[\delta x_i] = 0$ Erwartungswert

8.2.1.1 Messunsicherheitsbeiträge

Aufgrund des gewählten, linearen Produkt-Modells und der Anwendung von relativen Messunsicherheiten sind die Sensitivitätskoeffizienten stets gleich 1 ($c_i^* = \pm 1$)⁵.

² Ergebnisgröße

³ N' Eingangsgrößen zur Bestimmung der Ergebnisgröße $N' < N$

⁴ N Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit $N' < N$

⁵ Der Sensitivitätskoeffizient 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 Sensitivitätskoeffizienten c_i (s.

Gl. 4.3 in DAkkS-DKD-3) folgendermaßen zusammen: $c_i^* = \frac{x_i}{y} \cdot c_i$

Damit entsprechen die Beiträge $w_i(y)$ zur Unsicherheit der Ergebnisgröße den Unsicherheiten der Eingangsgrößen $w(x_i)$:

$$w(E_{KG}) = \sqrt{w^2(V_{Anz}) + w^2(G) + w^2(V_{Sp}) + w^2(F_{bmc,kont}) + w^2(K_T) + w^2(K_{zer}) + w^2(K_{rep}) + w^2(K_{rot}) + w^2(K_{rev})} \quad (8.4)$$

Die zugehörigen Verteilungsfunktionen und rel. Varianzen sind der nachfolgenden Tabelle 3 zu entnehmen:

| Zufallsvariable | Wahrscheinlichkeitsverteilung | rel. Varianz $w^2(x_i)$ |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| V_{Anz} | Normal | $w^2(V_{Anz})$ |
| G | Normal | $w^2(G)$ |
| V_{Sp} | Normal | $w^2(V_{Sp})$ |
| $F_{bmc,kont}$ | Normal | $w^2(F_{bmc,kont})$ |
| K_T | Rechteck | $w^2(K_T) = \frac{a_T^2}{3}$ |
| K_{zer} | Rechteck | $w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3}$ |
| K_{rep} | Rechteck | $w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3}$ |
| K_{rot} | U-förmig | $w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{2}$ |
| K_{rev} | Rechteck | $w^2(K_{rev}) = \frac{a_{rev}^2}{3}$ |

Tabelle 3: Verteilungsfunktionen und Varianzen der Einflussgrößen

8.2.1.2 Unsicherheitsanalyse

Die Kenntnisse über die Eingangsgrößen werden vorzugsweise in einer Tabelle (Tabelle 4) zusammengefasst.

| lfd. Nr. | Größe | Schätzwert | Halbbreite der Verteilung | Teiler | Unsicherheit | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag | Varianz |
|---|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------|---|--|---|---|
| | X_i | x_i | a | | $w(x_i)$ | c_i^* | $w_i(y)$ | $w_i^2(y)$ |
| 1 | V_{Anz} | x_1 V | | 2 | $w(V_{\text{Anz}})$ | 1 | $w_{V_{\text{Anz}}}(E_{\text{KG}})$ | $w_{V_{\text{Anz}}}^2(E_{\text{KG}})$ |
| 2 | G | x_2 / | | 2 | $w(G)$ | -1 | $w_G(E_{\text{KG}})$ | $w_G^2(E_{\text{KG}})$ |
| 3 | V_{Sp} | x_3 V | | 2 | $w(V_{\text{Sp}})$ | -1 | $w_{V_{\text{Sp}}}(E_{\text{KG}})$ | $w_{V_{\text{Sp}}}^2(E_{\text{KG}})$ |
| 4 | $F_{\text{bmc, kont}}$ | x_4 kN | | 2 | $w(F_{\text{bmc, kont}})$ | -1 | $w_{F_{\text{bmc, kont}}}(E_{\text{KG}})$ | $w_{F_{\text{bmc, kont}}}^2(E_{\text{KG}})$ |
| 5 | K_T | 1 | a_T | $\sqrt{3}$ | $w(K_T)$ | 1 | $w_T(E_{\text{KG}})$ | $w_T^2(E_{\text{KG}})$ |
| 6 | K_{zer} | 1 | a_{zer} | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{zer}})$ | 1 | $w_{\text{zer}}(E_{\text{KG}})$ | $w_{\text{zer}}^2(E_{\text{KG}})$ |
| 7 | K_{rep} | 1 | a_{rep} | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{rep}})$ | 1 | $w_{\text{rep}}(E_{\text{KG}})$ | $w_{\text{rep}}^2(E_{\text{KG}})$ |
| 8 | K_{rot} | 1 | a_{rot} | $\sqrt{2}$ | $w(K_{\text{rot}})$ | 1 | $w_{\text{rot}}(E_{\text{KG}})$ | $w_{\text{rot}}^2(E_{\text{KG}})$ |
| 9 | K_{rev} | 1 | a_{rev} | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{rev}})$ | 1 | $w_{\text{rev}}(E_{\text{KG}})$ | $w_{\text{rev}}^2(E_{\text{KG}})$ |
| | E_{KG} | $y \frac{\text{mV/V}}{\text{kN}}$ | rel. Standardmessunsicherheit w | | $w(E_{\text{KG}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(E_{\text{KG}})}$ | | | |
| | E_{KG} | $y \frac{\text{mV/V}}{\text{kN}}$ | rel. erweit. Messunsicherheit W | | $W(E_{\text{KG}}) = k * w(E_{\text{KG}})$ | | | |
| Angabe des vollständigen Messergebnisses | | | | | | $E_{\text{KG}} = y \frac{\text{mV/V}}{\text{kN}} \pm W(E_{\text{KG}})$ | | |

Tabelle 4: Unsicherheitsanalyse für das Modell Übertragungskoeffizient

Die Abschätzung der Messunsicherheit hat jedoch für jeden Kalibrierwert, d.h. für jedes angegebene Belastungsniveau, zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung dient folgendes Messunsicherheitsbudget (Tabelle 5):



**Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern
nach dem Vergleichsverfahren**
<https://doi.org/10.7795/550.20180823J>

DKD-R 3-9

| | |
|-----------|-------|
| Ausgabe: | 1 |
| Revision: | 0 |
| Seite: | 21/65 |

8.2.1.3 Messunsicherheitsbudget

| Kraft | Übertragungs- koeffizient | Rel. Standardmessunsicherheit $w_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete Messunsicherheitsbeiträge) | | | | | | | | |
|---------------|------------------------------|---|------------|-----------------|------------------------|--|--|----------------|---------------|--------------------------|
| | | Anz V | Anp G | Anp V_{Sp} | bmc $F_{bmc, kont}$ | Temp.-änd. (kont. Bel., Dauerbe- trieb) $\#$ | Nullpunkt- abwei- chung f_0 | Spanne b' | Spanne b | Umkehr- spanne v |
| kN | (mV/V)/kN | | | | | | | | | |
| für F_{min} | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | |
| für F_{max} | | | | | | | | | | |

| Kraft | Übertragungskoeffi- zient | Rel. Standardmessunsicherheit $w_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete kombinierte Messunsicherheitsbeiträge) | | | Rel. Standard- messunsicherheit $w(y)$ Gesamt | Rel. erweiterte Messunsicherheit $W(y)$ ($k=2$) |
|---------------|------------------------------|--|-----------|--------------------------------------|--|---|
| | | kleinste angebbare Messunsicherheit $F_{bmc, kont}$ | Verfahren | Kalibrier- gegenstand $\#$ | | |
| kN | (mV/V)/kN | | | | | |
| für F_{min} | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| für F_{max} | | | | | | |

Tabelle 5: Messunsicherheitsbudget für das Modell Übertragungskoeffizient (alle Stützstellen im Bereich)

8.2.2 Modell „Kraft“ (Polynomkoeffizienten eines Ausgleichs 3.Grades, DIN EN ISO 376)
 In der detaillierten Darstellung des linearen Produktmodells - Bestimmungsgleichung mit den „besten“ Schätzwerten - wird daraus der Ausdruck:

$$F_{KG} = F_{bmc, kont} \cdot \prod_{i=1}^8 K_i \quad (8.5)$$

$$\text{mit } \prod_{i=1}^8 K_i = K_T \cdot K_{anp} \cdot K_{anz} \cdot K_{zer} \cdot K_{rep} \cdot K_{rot} \cdot K_{inp} \cdot K_{rev}$$

| | | | |
|-----------------|---|---|---|
| F_{KG} | Ergebnisgröße; auf einen KG einwirkende Kraft | 6 | |
| $F_{bmc, kont}$ | durch die K-BNME eingestellter Kraftwert bei kontinuierlichem Betrieb | 7 | 8 |
| K_T | Korrektionsfaktor rel. Temperaturänderung bei kontinuierlicher Belastung im Dauerbetrieb | | |
| K_{anp} | Korrektionsfaktor Anpasser | | |
| K_{anz} | Korrektionsfaktor Anzeiger | | |
| K_{zer} | Korrektionsfaktor rel. Nullpunktabweichung | | |
| K_{rep} | Korrektionsfaktor rel. Wiederholpräzision | | |
| K_{rot} | Korrektionsfaktor rel. Vergleichpräzision | | |
| K_{inp} | Korrektionsfaktor rel. Interpolationsabweichung | | |
| K_{rev} | Korrektionsfaktor rel. Umkehrspanne | | |

Korrektionsfaktoren:

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

δx_i unbekannte Messabweichungen und

$E[\delta x_i] = 0$ Erwartungswert

⁶ Ergebnisgröße

⁷ N' Eingangsgrößen zur Bestimmung der Ergebnisgröße

$N' < N$

⁸ N Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit

$N' < N$

8.2.2.1 Messunsicherheitsbeiträge

Aufgrund des gewählten linearen Produkt-Modells und der Betrachtung von relativen Messunsicherheiten sind die Sensitivitätskoeffizienten stets gleich 1 ($c_i^* = \pm 1$).

Damit entsprechen die Beiträge $w_i(y)$ zur Unsicherheit der Ergebnisgröße den Unsicherheiten der Eingangsgrößen $w(x_i)$:

$$w(F_{KG}) = \sqrt{w^2(F_{bmc,kont}) + w^2(K_{anp}) + w^2(K_{anz}) + w^2(K_{zer}) + w^2(K_{rep}) + w^2(K_{rot}) + w^2(K_{inp}) + w^2(K_{rev}) + w^2(K_T)} \quad (8.6)$$

Die zugehörigen Verteilungsfunktionen und rel. Varianzen sind der nachfolgenden Tabelle 6 zu entnehmen:

| Zufallsvariable | Wahrscheinlichkeitsverteilung | rel. Varianz $w^2(x_i)$ |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| $F_{bmc,kont}$ | Normal | $w^2(F_{bmc,kont})$ |
| K_T | Rechteck | $w^2(K_T) = \frac{a_T^2}{3}$ |
| K_{anp} | Normal | $w^2(K_{anp})$ |
| K_{anz} | Normal | $w^2(K_{anz})$ |
| K_{zer} | Rechteck | $w^2(K_{zer}) = \frac{a_{zer}^2}{3}$ |
| K_{rep} | Rechteck | $w^2(K_{rep}) = \frac{a_{rep}^2}{3}$ |
| K_{rot} | U-förmig | $w^2(K_{rot}) = \frac{a_{rot}^2}{2}$ |
| K_{inp} | Dreieck | $w^2(K_{inp}) = \frac{a_{inp}^2}{6}$ |
| K_{rev} | Rechteck | $w^2(K_{rev}) = \frac{a_{rev}^2}{3}$ |

Tabelle 6: Verteilungsfunktionen und Varianzen der Einflussgrößen

8.2.2.2 Unsicherheitsanalyse

| lfd. Nr. | Größe | Schätzwert | Halbbreite der Verteilung | Teiler | Unsicherheit | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag | Varianz |
|--|-----------------------|------------|--------------------------------------|------------|--|--|--------------------------------------|--|
| | X_i | x_i | a | | $w(x_i)$ | c_i^* | $w_i(y)$ | $w_i^2(y)$ |
| 1 | $F_{\text{bmc.kont}}$ | x | | 2 | $w(F_{\text{bmc.kont}})$ | 1 | $w_{\text{bmc.kont}}(F_{\text{KG}})$ | $w_{\text{bmc.kont}}^2(F_{\text{KG}})$ |
| 2 | K_T | 1 | a_T | $\sqrt{3}$ | $w(K_T)$ | 1 | $w_T(E_{\text{KG}})$ | $w_T^2(E_{\text{KG}})$ |
| 3 | K_{anp} | 1 | | 2 | $w(K_{\text{anp}})$ | 1 | $w_{\text{anp}}(F_{\text{KG}})$ | $w_{\text{anp}}^2(F_{\text{KG}})$ |
| 4 | K_{anz} | 1 | | 2 | $w(K_{\text{anz}})$ | 1 | $w_{\text{anz}}(F_{\text{KG}})$ | $w_{\text{anz}}^2(F_{\text{KG}})$ |
| 5 | K_{zer} | 1 | a_{zer} | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{zer}})$ | 1 | $w_{\text{zer}}(F_{\text{KG}})$ | $w_{\text{zer}}^2(F_{\text{KG}})$ |
| 6 | K_{rep} | 1 | a_{rep} | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{rep}})$ | 1 | $w_{\text{rep}}(F_{\text{KG}})$ | $w_{\text{rep}}^2(F_{\text{KG}})$ |
| 7 | K_{rot} | 1 | a_{rot} | $\sqrt{2}$ | $w(K_{\text{rot}})$ | 1 | $w_{\text{rot}}(F_{\text{KG}})$ | $w_{\text{rot}}^2(F_{\text{KG}})$ |
| 8 | K_{inp} | 1 | a_{inp} | $\sqrt{6}$ | $w(K_{\text{inp}})$ | 1 | $w_{\text{inp}}(F_{\text{KG}})$ | $w_{\text{inp}}^2(F_{\text{KG}})$ |
| 9 | K_{rev} | 1 | a_{rev} | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{rev}})$ | 1 | $w_{\text{rev}}(F_{\text{KG}})$ | $w_{\text{rev}}^2(F_{\text{KG}})$ |
| | F_{KG} | y | rel. Standardmessunsicherheit w | | $w(F_{\text{KG}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2}$ | | | |
| | F_{KG} | y | rel. erweit. Messunsicherheit W | | $W(F_{\text{KG}}) = k * w(F_{\text{KG}})$ | | | |
| Angabe des vollständigen Messergebnisses | | | | | | $F_{\text{KG}} = y \pm W(F_{\text{KG}})$ | | |

Tabelle 7: Unsicherheitsanalyse für das Modell Kraft
(Polynomkoeffizienten einer Ausgleichsfunktion 3. Grades)

Die Abschätzung der Messunsicherheit hat jedoch für jeden Kalibrierwert, d.h. für jedes angegebene Belastungsniveau, zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung dient folgendes Messunsicherheitsbudget (Tabelle 8):

8.2.2.3 Messunsicherheitsbudget

| Kraft | Rel. Standardmessunsicherheit $w_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete Messunsicherheitsbeiträge) | | | | | | | | |
|-------|---|---|----------|----------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------|
| | bmc, kont | Temp.-änd. (kont. Bel., Dauerbetrieb) | Anpasser | Anzeiger | Nullpunkt- abweichung # | Spanne (rep) | Spanne (rot) | Interpolati- ons-abwei- chung | Umkehr- spanne |
| kN | | | | | | | | | |
| min. | | | | | | | | | |
| max. | | | | | | | | | |

| Kraft | rel. Standardmessunsicherheit $w_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete kombinierte Messunsicherheitsbeiträge) | | | rel. Standardmessunsi- cherheit $w(y)$ Gesamt | rel. erweiterte Messunsi- cherheit $W(y)$ ($k=2$) |
|-------|---|-----------|-------------------------------|--|---|
| | kleinste angebbare Messunsicherheit (bmc, kont) | Verfahren | Kalibrier- gegenstand # | | |
| kN | | | | | |
| min. | | | | | |
| max. | | | | | |

Tabelle 8: Messunsicherheitsbudget für das Modell Polynomkoeffizienten

8.3 Visualisierung des Messunsicherheitsbudgets

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.

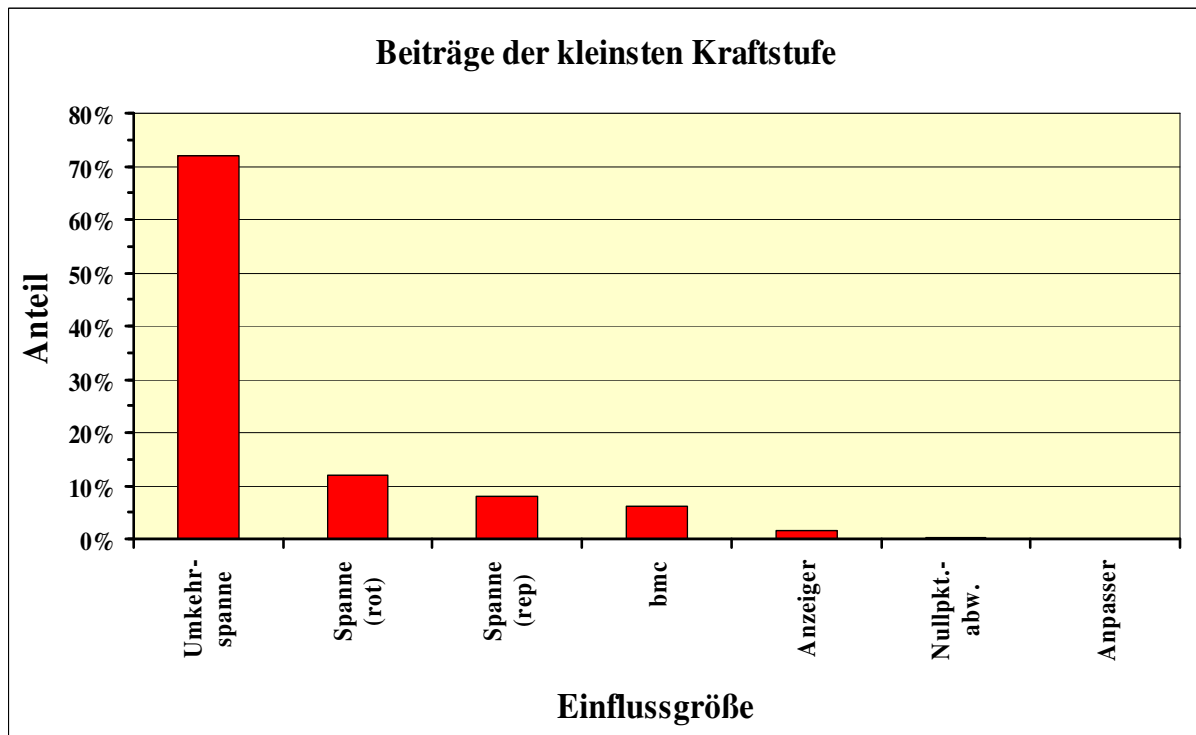


Abbildung 5: Darstellung der Varianzanteile (Quadrat der Unsicherheitsbeiträge) an der Gesamtvarianz (Quadrat der Standardmessunsicherheit) in absteigender Sortierung.


8.4 Unsicherheitsintervall

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

$$W' = \left| \frac{\Delta S_{\text{inp}}}{S} \right| + W \quad (8.7)$$

8.5 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 5.). 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

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 27 / 65 |

(Empfindlichkeit) eines Messgrößenaufnehmers für den Messbereich. Für die Einwertangabe kann aber nach den Regeln des GUM keine Messunsicherheit angegeben werden; an ihre Stelle tritt eine *Konformitätsaussage*.

Hierfür ist das Bestimmen von *Spezifikationsgrenzen* unter Berücksichtigung

- der *systematischen Messabweichung* (des Einzelwertes von der Einwertangabe) und
- der (dem Einzelwert) beigeordneten *erweiterten Messunsicherheit* notwendig.

Dabei werden die obere und untere Spezifikationsgrenze an das größte *Unsicherheitsintervall* (Summe aus systematischer Messabweichung und erweiterter Messunsicherheit) angenähert; vorzugsweise mit einem kleinen Sicherheitsabstand, so dass sich glatte Zahlenwerte ergeben. Die so ermittelten *selbstbestimmten Spezifikationsgrenzen* sind als Messunsicherheitsbeitrag im Messunsicherheitsbudget der Anwendung zu berücksichtigen. Aufgrund des systematischen Anteils des Unsicherheitsintervalls wird dem Beitrag eine Rechteckverteilung zugewiesen.

Bei Kalibriergegenständen mit vom Hersteller abgeglichenem Nennkennwert (z.B. bei resistiven Aufnehmern) können die Spezifikationsgrenzen alternativ auch aus der zugeordneten Kennwerttoleranz ermittelt werden.

Z. Zt. sind unterschiedliche Methoden verbreitet, das Übertragungsverhalten des kalibrierten Aufnehmers, charakterisiert durch eine Anzahl von ermittelten Übertragungskoeffizienten, durch einen einzigen Wert zu beschreiben:

1. Die Berechnung und Verwendung des Mittelwertes der ermittelten Übertragungskoeffizienten als Einwertangabe.
2. Die Bestimmung einer Ausgleichsgeraden aus den ermittelten Messwertpaaren (Anzeige des Kalibriergegenstandes und eingestellter Wert der Messgröße) mit Verwendung des Anstieges der Geraden als Einwertangabe. Die Ausgleichsrechnung kann dabei unterschiedlichen Kriterien unterliegen:
 - Die Ausgleichsgerade wird so gewählt, dass der Anfangs- und der Endpunkt der gemessenen Kennlinie mit der Ausgleichsgeraden übereinstimmt (in der Literatur als **Festpunktmethode** oder Grenzpunkteinstellung bezeichnet).
 - Die Ausgleichsgerade wird so gewählt, dass der Anfangspunkt der gemessenen Kennlinie mit dem Anfangspunkt der Ausgleichsgeraden übereinstimmt (in der Literatur als **Minimummethode** oder Anfangspunkteinstellung bezeichnet). Die Steigung der Geraden wird anschließend so gewählt, dass die Abweichungen zur gemessenen Kennlinie ein bestimmtes Minimalprinzip erfüllen. Als Minimalprinzip kann z.B. die Bedingung eingesetzt werden, dass
 - der maximale Abweichungsbetrag minimal wird (Tschebyscheff-Approximation; wird auch als „best straight line“ bezeichnet, vgl. ANSI/ISA S37.1 [20]) oder
 - die Summe der Abweichungsquadrate minimal wird (nach Gauß)
 - Die Ausgleichsgerade wird insgesamt so gewählt, dass die Abweichungen zur gemessenen Kennlinie ein Minimalprinzip erfüllen. (In der Literatur auch als **Toleranzbandmethode** bezeichnet.)

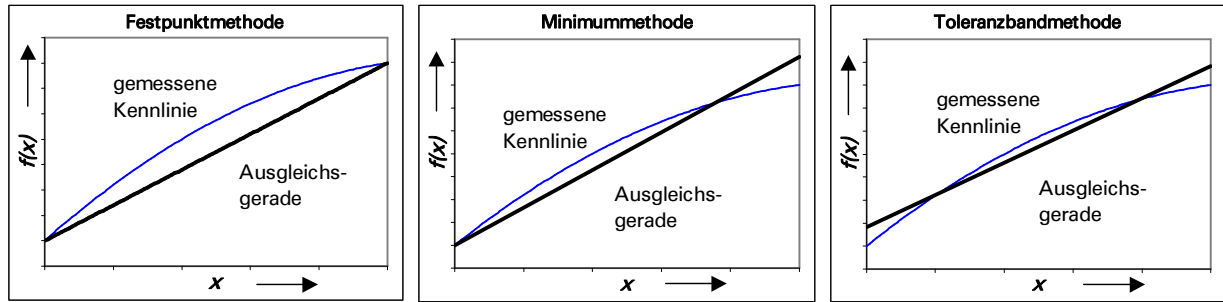


Abbildung 6: Verschiedene Methoden zur Gewinnung einer Einwertangabe

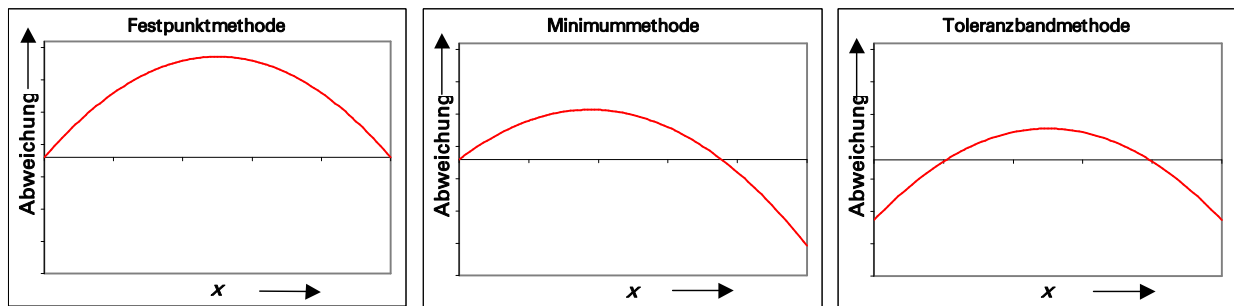


Abbildung 7: Vergleich der dabei entstehenden Abweichungen zwischen der gemessenen Kennlinie und der Ausgleichsgeraden bei Bezug auf den Endwert der Ausgleichsgeraden

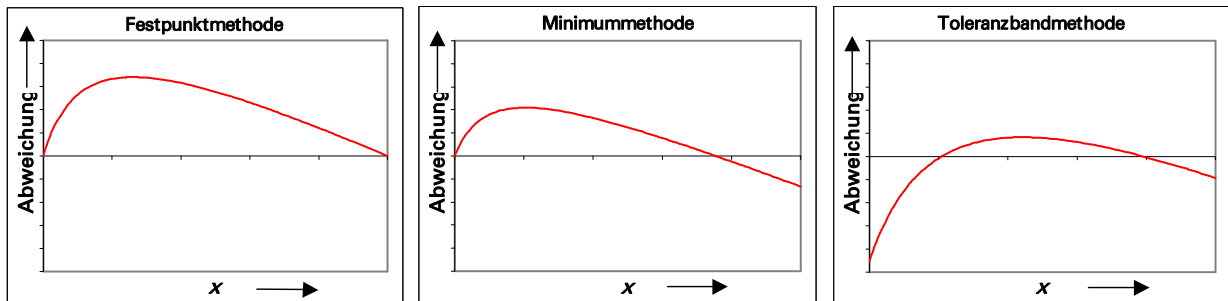


Abbildung 8: Vergleich der dabei entstehenden Abweichungen zwischen der gemessenen Kennlinie und der Ausgleichsgeraden bei Bezug auf den (jeweiligen) Wert der Ausgleichsgeraden

Die unterschiedlichen Methoden führen zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Daher wird empfohlen, die Einwertangabe als Steigung einer Geraden durch Null anzugeben, deren Koeffizienten durch den linearen Ausgleich nach der (Gaußschen) Methode der kleinsten Abweichungssumme berechnet werden (Minimummethode).

Um eine Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse sicherzustellen, muss die Methode, nach der die Einwertangabe bestimmt wird, im Kalibrierschein angegeben werden.

8.6 Visualisierung des Kalibrierergebnisses

Ergänzend zur tabellarischen Darstellung kann zur Veranschaulichung eine weitergehende Visualisierung der Kalibrierergebnisse erfolgen.

8.6.1 Abweichung und Messunsicherheit

Die Angabe von Messwerten wird durch ein Abweichungsdiagramm (hier: Interpolationsabweichung) mit auf den Messwert bezogenen Daten (v. M.) ergänzt. Sofern Spezifikationsgrenzen (hier: Klassengrenzen) bekannt sind, gestattet das Diagramm mit einem Blick eine Entscheidung darüber, ob der Kalibriergegenstand die Spezifikationsgrenzen einhält.

Dargestellt werden:

- Kalibrierbereich
- rel. Interpolationsabweichungen v. M.
- rel. erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) an jeder Stützstelle
- Spezifikationsgrenzen
- Grenzen der Gültigkeit

Außerdem werden die „maximale relative Abweichung v. M.“ und für Vergleichszwecke mit Datenblattangaben, die sich i. d. R. auf den Endwert beziehen, auch die „maximale relative Abweichung bezogen auf den Endwert (v. E.)“ (häufig als Linearität bezeichnet, vgl. ANSI/ISA S37.1 [20]) angegeben.

Hinweis:

Die Angaben sind notwendig, um dem Anwender des Kalibriergegenstandes die Berechnung seiner Messunsicherheit bei der Anwendung zu ermöglichen. Das Abweichungsdiagramm ist in seinem Inhalt und Aufbau unabhängig von der Kalibrierung eines anzeigenden Kalibriergegenstandes oder eines Kalibriergegenstandes mit unbenannter Skala.

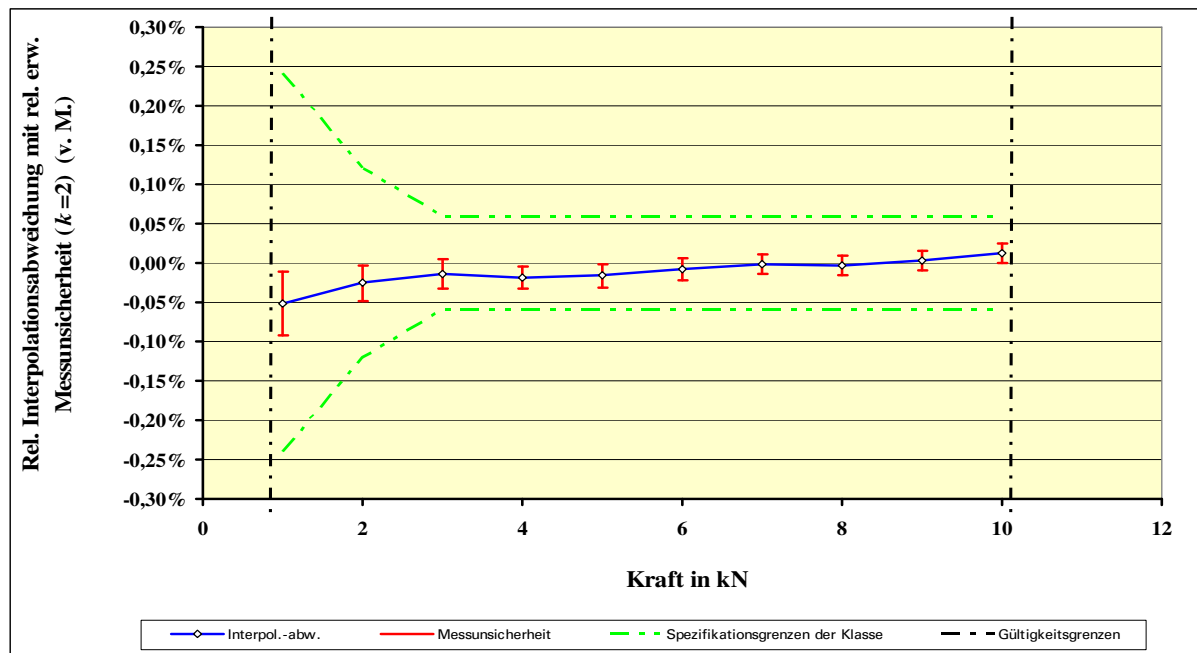


Abbildung 9: Abweichungsdiagramm mit Spezifikations- und Gültigkeitsgrenzen, bezogen auf den Messwert

Anmerkung:

Die untere Grenze des Gültigkeitsbereiches ist in diesem Beispiel willkürlich auf 10 % des Kalibrierbereiches gesetzt worden.

8.6.2 Einwertangabe

Die Übertragungskoeffizienten und die beigeordneten erweiterten Messunsicherheiten werden im Vergleich zu den Spezifikationsgrenzen nach Herstellerangabe bzw. zu den selbstbestimmten Spezifikationsgrenzen dargestellt.

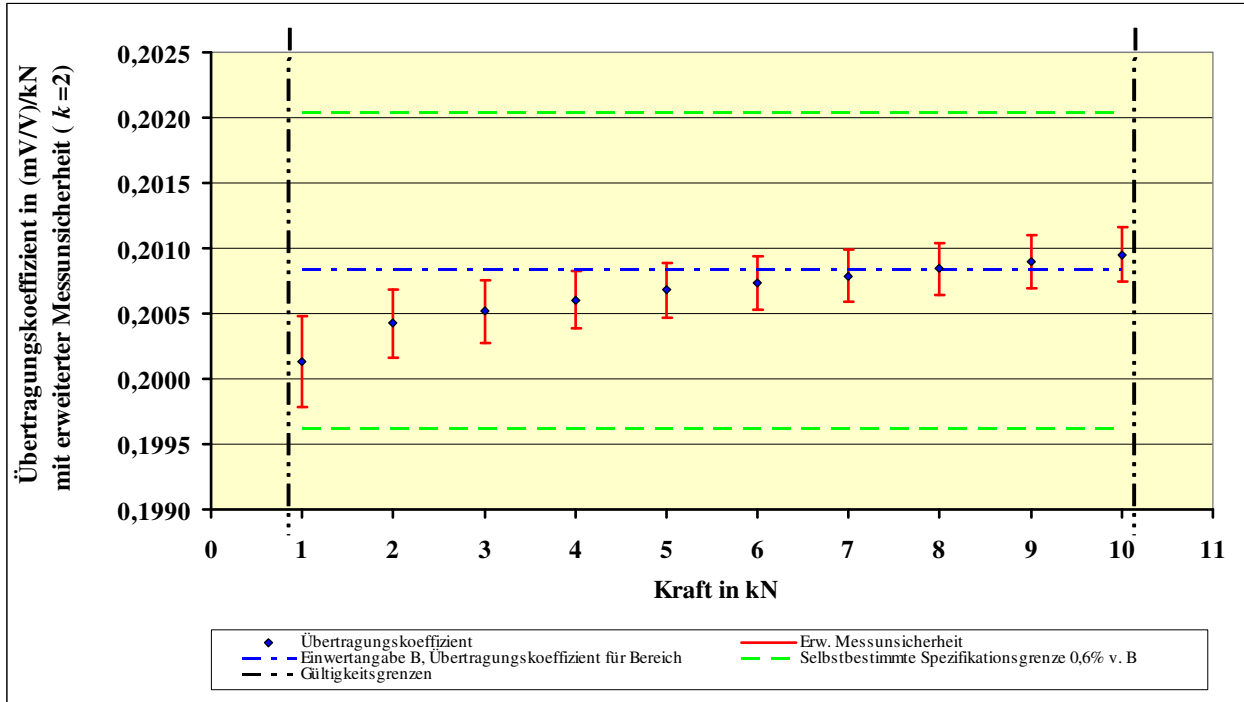


Abbildung 10: Übertragungskoeffizienten mit erw. Messunsicherheit, Einwertangabe (Übertragungskoeffizient für den Bereich) und selbstbestimmte Spezifikationsgrenze.

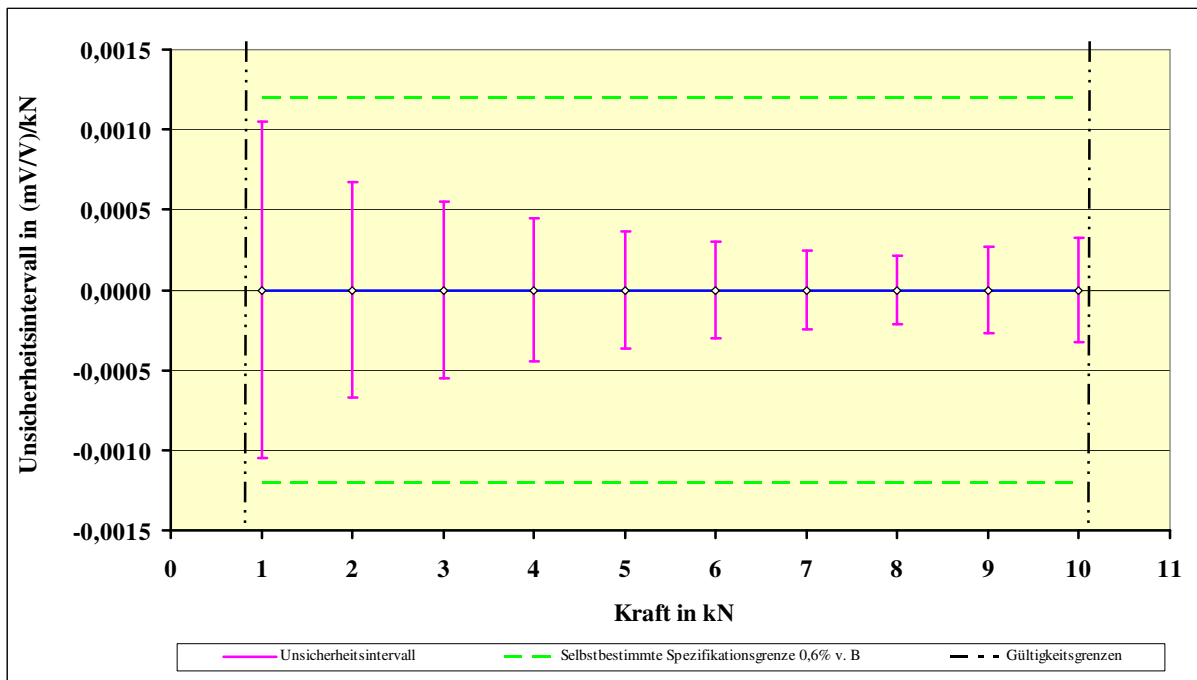


Abbildung 11: Unsicherheitsintervall und selbstbestimmte Spezifikationsgrenze

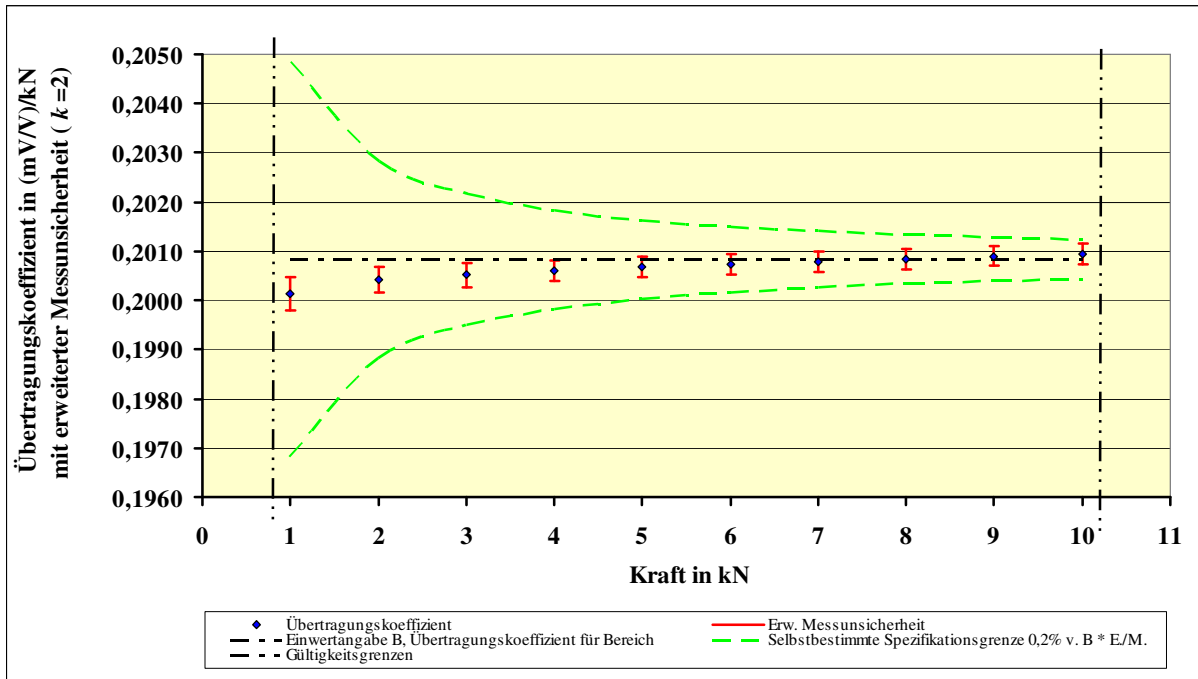


Abbildung 12: wie Abbildung 10, jedoch mit hyperbelartiger, selbstbestimmter Spezifikationsgrenze

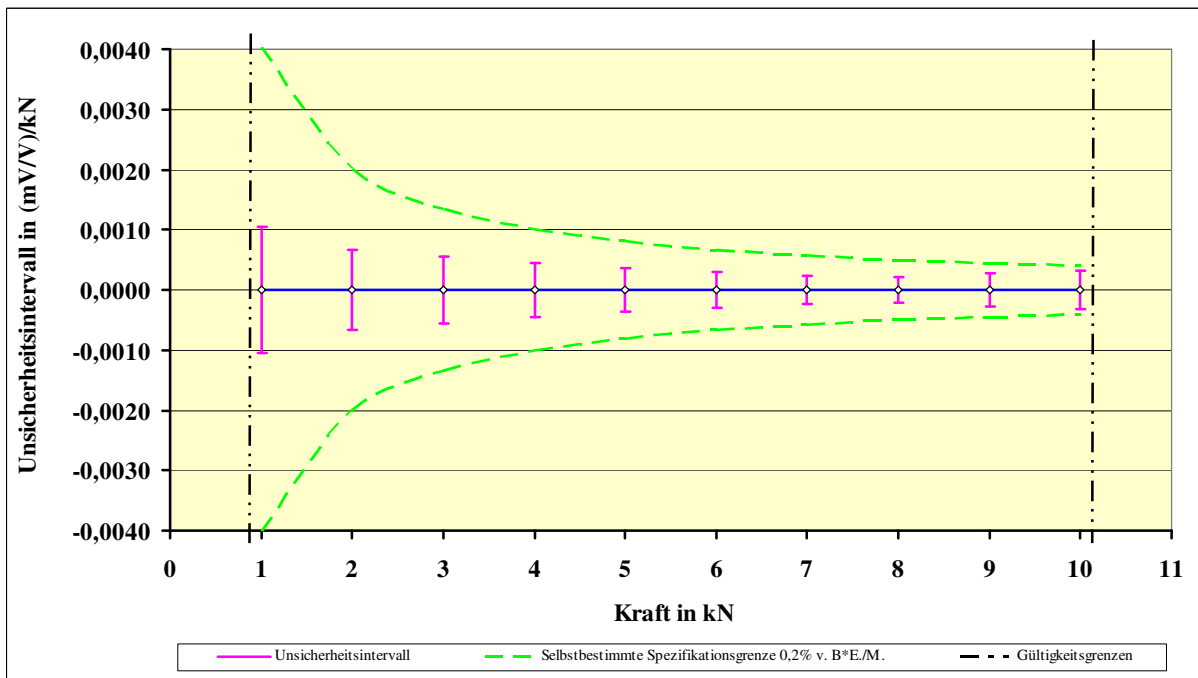



Abbildung 13: wie Abbildung 11, jedoch mit hyperbelartiger, selbstbestimmter Spezifikationsgrenze

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 32 / 65 |

9 Angaben im Kalibrierschein

Grundsätzlich ist DAkkS-DKD-5 „Anleitung zum Erstellen eines DAkkS-Kalibrierscheines“ zu beachten. Darüber hinaus sind Angaben erforderlich, die den kontinuierlichen Ablauf charakterisieren.

Deutlicher Hinweis auf den kontinuierlichen Kalibrierablauf nach DKD-R 3-9 mit z.B.:

- Anstiegsgeschwindigkeit oder Anstiegsdauer der Kraft je Belastung
- Beschreibung der Datenerfassung
- Anzahl der Wertepaare, die für die Auswertung herangezogen werden
- falls der Kalibrierablauf nicht DIN EN ISO 376 entspricht, sind Angaben zu Vorbelastungen, Anzahl der Messreihen, Einbaustellungen usw. zu machen, ggf. mit Visualisierung gemäß Abbildung 1 oder Abbildung 2; insbesondere bei Abläufen nach Kundenwunsch

Angaben zum Anpasser/Messverstärker:

- Übertragungskoeffizienten/Verstärkungen
- Versorgungsspannung (mit/ohne Spannungsrückführung), Trägerfrequenz oder Gleichspannung;
- Filter und Filtercharakteristik
- Hinweis, dass nur bei Einsatz von bauartgleichen Anpassern eine direkte Verwendung der Kalibrierscheinangaben möglich ist.

Kabel:

- Typ, z.B. hochisolierend, Art der Schirmung
- bei Aufnehmern in Brückenschaltung, z.B. 4- oder 6-Leiterschaltung; bei piezoelektrischen Aufnehmern, z.B. Kabelkapazität
- Länge

Einbauteile


Umgebungsbedingungen

Nullsignal ohne Krafeinleitungsteile bei Nennspeisespannung

Typspezifische Beiträge zur Messunsicherheit, falls gegenüber DIN EN ISO 376 verkürzte Kalibrierabläufe vorliegen.

Als Kalibrierergebnis sind anzugeben

- vorzugsweise 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. Abs. 8.5
- selbstbestimmte Spezifikationsgrenze(n) und zugehörige Gültigkeitsgrenzen
 Anmerkung 1: Der Nutzer des Kalibriergegenstandes kann die selbstbestimmte Spezifikationsgrenze als Eingangsgröße in seinem Messunsicherheits-Budget unter der Annahme einer Rechteckverteilung berücksichtigen
 Anmerkung 2: Eine Visualisierung der Ergebnisse wird wie in Abs. 8.6 beschrieben empfohlen.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 33 / 65 |

10 Aufzeichnungen im Kalibrierlaboratorium

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

- Zusätzliche für die Rückführung relevante Informationen, z.B. verwendete K-BNME und verwendeter Referenz-Kraftaufnehmer
- Temperatur des Referenz-Kraftaufnehmers während der Kalibrierung
- Softwareversion bei rechnergestütztem Betrieb
- Beschreibung der Einbaulage für $K_{A_{ref}}$ und KG, z.B. durch Richtung des Kabelabgangs
- Angaben zum Bediener
- Steckplätze der Messverstärker bei Mehrkanalsystemen

11 Konformität

Liegen das Unsicherheitsintervall bzw. die Übertragungskoeffizienten mit beigeordneter erweiterter Messunsicherheit innerhalb von geforderten Spezifikationsgrenzen, dann kann die Konformität nach DAkkS-DKD-5 bestätigt werden. Dabei ist deren Gültigkeitsbereich (Kraftbereich) anzugeben.

Bei der Beurteilung auf Einhaltung der geforderten Spezifikationsgrenzen ist deren Herkunft anzugeben, z.B. Klassengrenzen nach DIN EN ISO 376, herstellerspezifische (hausinterne) Angaben laut Datenblatt. Sofern es sich um selbstbestimmte Spezifikationsgrenzen aus den aktuellen Daten handelt, ist dies kenntlich zu machen.

12 Kalibriermarke

Der Kalibriergegenstand erhält eine Kalibriermarke. Bei Kalibriergegenständen, die aus mehreren trennbaren Komponenten bestehen, erhält jede Komponente eine gleichlautende Marke. Falls der Kalibriergegenstand zum Schutz in einem Behältnis gelagert wird, muss die Zuordnung zum leichteren Auffinden ebenfalls durch eine gleichlautende Marke hergestellt werden.

Falls die Abmessungen des Kalibriergegenstandes das Anbringen einer Kalibriermarke nicht zulassen, ist ein entsprechender Hinweis im Kalibrierschein aufzunehmen.

13 Schrifttum

13.1 Technische Regeln

Kraft


1. DIN EN ISO 376: Metallische Werkstoffe – Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung, Beuth Verlag Berlin, Ausgabe 2003
2. VDI / VDE 2638: Kenngrößen für Kraftaufnehmer, Begriffe und Definitionen, April 1989
3. DKD-R 3-3: Kalibrierung von Kraftmessgeräten, PTB, Braunschweig, 2. Neuaufgabe 2018

Drehmoment

4. DIN 51309: Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente, 1998
5. EA-10/14: EA Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices European co-operation for Accreditation, rev.00, June 2000, pp 20; ersetzt durch EURAMET cg-14 Version 2.0 (03/2011), <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/>
6. DKD-R 3-5: Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente, PTB, Braunschweig, 3. Neuaufgabe 2018
7. DKD-R 3-7: Statische Kalibrierung von anzeigenden Drehmomentschlüsseln, PTB, Braunschweig, 2. Neuaufgabe 2018
8. DKD-R 3-8: Statische Kalibrierung von Kalibriereinrichtungen für Drehmoment-schraubwerkzeuge, PTB, Braunschweig, 2. Neuaufgabe 2018

Messunsicherheit, allgemein:

9. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) First Edition 1993, ISO, Geneva CH, ISBN 92-67-10188-9
10. DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth Verlag Berlin, 1995, ISBN 3-410-13405-0 (Deutsche Übersetzung des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“); EA-4/02 (früher EAL-R2): Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration – including supplement 1 and 2, European co-operation for Accreditation, December 1999, 79 p., <http://www.european-accreditation.org>
11. EURACHEM / CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement Second Edition, 2000, pp. 120, <http://www.european-accreditation.org>
12. DAkkS-DKD-3: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02: „Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration “), Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS, Braunschweig, Neuaufgabe 2010
13. DAkkS-DKD-3-E1: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, Ergänzung 1, Beispiele (Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S1: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Supplement 1 -Examples), Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS, Braunschweig, Neuaufgabe 2010
14. DAkkS-DKD-3-E2: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, Ergänzung 2 – Zusätzliche Beispiele- (Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S2: Expression

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 35 / 65 |

of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Supplement 2 -Examples), Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS, Braunschweig, Neuauflage 2010

15. DIN 1319-3: Grundlagen der Messtechnik Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit, Beuth Verlag Berlin, 1996
16. DIN 1319-4: Grundlagen der Messtechnik Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit, Beuth Verlag Berlin, 1999
17. VDI/VDE 2620: Unsichere Messungen und ihre Wirkung auf das Messergebnis Beuth Verlag Berlin, Entwurf Dezember 1998

Messgröße Geometrische Größen

18. VDI/VDE/DGQ/DKD 2618: Prüfmittelüberwachung Anweisungen zur Überwachung von Messmitteln für geometrische Größen, Blatt 1.2: Messunsicherheit, Beuth Verlag Berlin, Dezember 2003

Messgröße Elektrische Größen

19. VDI/VDE/DGQ/DKD 2622: Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen, Blatt 2: Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit, Beuth Verlag Berlin, Mai 2003
20. ANSI/ISA-S37.1-1975 (R1982): Electrical Transducer Nomenclature and Terminology Instrument Society of America (ISA), Research Triangle Park, North Carolina

Messgröße Kraft und Drehmoment:

21. EA-10/04 (früher EAL-G22): Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements, European co-operation for Accreditation, August 1996, pp 16, ersetzt durch EURAMET cg-4 Version 2.0 (03/2011), <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/>

13.2 Literatur


Aufnehmereigenschaften, insbesondere Kriechen:

Kraft


22. Paetow, J.: The effect of time response of force transducers on their transfer properties in force comparisons, IMEKO, Amsterdam 1986
23. Bethe, K.: After-effects in load cells, IMEKO, Turin 1994
24. Peters, M.: Known and unknown influences on the uncertainty in force measurement in Basic Metrology and Applications, Libreria Editrice Universitaria Levrette & Bella, Torino 1994, pp. 88-94
25. Kumme, R.: Untersuchung eines direkten Verfahrens zur dynamischen Kalibrierung von Kraftmessgeräten – ein Beitrag zur Verringerung der Messunsicherheit (Dissertation), Auszug aus PTB-Bericht MA-48, Braunschweig, August 1996
26. Bartel, Th. W.; Yaniv, S. L.: Creep and Creep Recovery Response of Load Cells Tested According to U.S. and International Evaluation Procedures, J. Res. Natl Inst. Stnd. Techn. 102, 349 (1997)
27. Saffar, J.; Camarano, D.; Ferreira Marques, E.: Behaviour of elastic force-measurement instruments under different loading regimes, IMEKO, Tampere 1997

Drehmoment

28. Röske, D.; Peschel, D.: Investigations into the alternating torque calibration of torque transducers, IMEKO, Tampere 1997

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 36 / 65 |

29. Peschel, D.; Brüge, A.: Calibration of torque measuring devices – step-by-step or continuous procedure, IMEKO, Korea 1998
30. Peschel, D.; Röske, D.: Determination of creep value using short-term creep, IMEKO, Osaka 1999
- Eigenschaften piezoelektrischer Aufnehmer:**
31. Mack, O.; Kumme, R.: Quasistatische Untersuchungen piezoelektrischer Kraftmess-einrichtungen, PTB Braunschweig, Jahresberichte 1998, S. 171-172
32. Kumme, R.; Mack, O.; Bill, B.; Haab, H. R.; Gossweiler, C.: Investigation of Piezoelectric Force Measuring Devices in Force Calibration and Force Standard Machines, IMEKO TC3, September 2001, Istanbul, S. 92-103
33. Mack, O.: New Procedures to Characterise Drift and Non-Linear Effects of Piezoelectric Force Sensors, IMEKO TC3, September 2001, Istanbul, S. 141-148
34. Kumme, R.; Mack, O.; Bill, B.; Gossweiler, Ch.; Haab, H. R.: Dynamic Properties and Investigations of Piezoelectric Force Measuring Devices, IMEKO Celle, 2002, VDI-Berichte Nr. 1685, S. 161-171
35. Mack, O.: Investigations of the Influence of Disturbing Components on a Piezoelectric Force Transducer, IMEKO Celle, 2002, VDI-Berichte Nr. 1685, S. 417-424
36. Gossweiler, C.: Ein Vorschlag zur Qualifizierung der kontinuierlichen Kalibrierung von Kraftsensoren durch Vergleich mit der stufenweisen Kalibrierung nach EN 10002-3, Kistler Instrumente AG, Februar 2003, 17 S.
- Messunsicherheit, allgemein:**
37. Weise, K. u. Wöger, W.: Eine Bayessche Theorie der Messunsicherheit, Bericht PTB-N-11 PTB, Braunschweig und Berlin, August 1992
38. Weise, K. u. Wöger, W.: Messunsicherheit und Messdatenauswertung, VCH Weinheim, 1999, ISBN 3-527-29610-7
39. Wöger, W.; Kessel, W.; Sommer, K.-D.; Siebert, B.R.L.; Kind, D.: Themenschwerpunkt Messunsicherheit, Sonderdruck aus Heft 3 und Heft 4 der PTB-Mitteilungen 111 (2001)
40. Adunka, F.: Messunsicherheiten – Theorie und Praxis, Vulkan-Verlag Essen, 2000, ISBN 3-8027-2194-2
- Messunsicherheit, Kraft und Drehmoment:**
41. Sawla, A.: Uncertainty of measurement in the verification and calibration of the force-measuring systems of testing machines, Proceedings of the Asia-Pacific Symposium on Measurement of Force, Mass and Torque (APMF 2000), Tsukuba, Japan, November 2000, P. 7 - 14
42. Sawla, A.: Uncertainty Scope of the Force Calibration Machines, Proceedings (Volume III, P. 253-258) of the XVI IMEKO World Congress (IMEKO 2000) Vienna, Austria, September, 2000
43. Peschel, D.: Bestimmung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit von Drehmomenten mit einer Drehmoment-Bezugsnormaleinrichtung, Entwurf, Arbeitspapier FL 1.13, Mai 2000

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 37 / 65 |

Anhang A

A.1 Rückführung der Kraft-BNME

A.1.1 Allgemeines

Die Rückführung der Kraft-Bezugsnormalmesseinrichtung (K-BNME) stützt sich auf die Kraft-Normalmesseinrichtungen (K-NME) der Nationalen Metrologie-Institute (NMI) (siehe Abbildung 14 u. 15). Da es z. Zt. kein nationales Normal für die Kalibrierung von Kraftaufnehmern bei zeitlich kontinuierlich ansteigendem oder abfallendem Belastungsverlauf gibt, erfolgt die Rückführung unter Verwendung von Transfer-Kraftaufnehmern KA_{tsd} wie bei statischer Belastung.

Zusätzlich zu diesen stufenweisen Kalibrierabläufen muss durch weitere Messungen die **Eignung von Referenz- und Transfer-Kraftaufnehmern** nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 15 und Abs. A.3). Dazu gehören die Bestimmung des Entlastungskriechens und des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Messwerte bzw. den Kennwert und ggf. die Umkehrspanne.

Wie bei der Kalibrierung nach DIN EN ISO 376 oder vergleichbaren Abläufen muss nach den Messungen in der kalibrierhierarchisch höhergestellten K-BNME oder der K-NME eine Anschlussmessung für statische Belastungen in der K-BNME ausgeführt werden.

Die weiteren Untersuchungen betreffen den **Eignungsnachweis des kontinuierlichen Kalibrierverfahrens**. Zuerst ist der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bis zur minimalen Belastungszeit bei kontinuierlichem Ablauf zu bestimmen. Danach werden ein oder mehrere Transfer-Kraftaufnehmer mit der anzuschließenden K-BNME kontinuierlich kalibriert und die Resultate mit den Resultaten einer Kalibrierung der KA_{tsd} auf einer kalibrierhierarchisch höhergestellten K-BNME oder einer K-NME verglichen. Falls die Resultate der kontinuierlichen Kalibrierung innerhalb der für das Verfahren bestimmten Messunsicherheit liegen, ist der Eignungsnachweis erbracht.

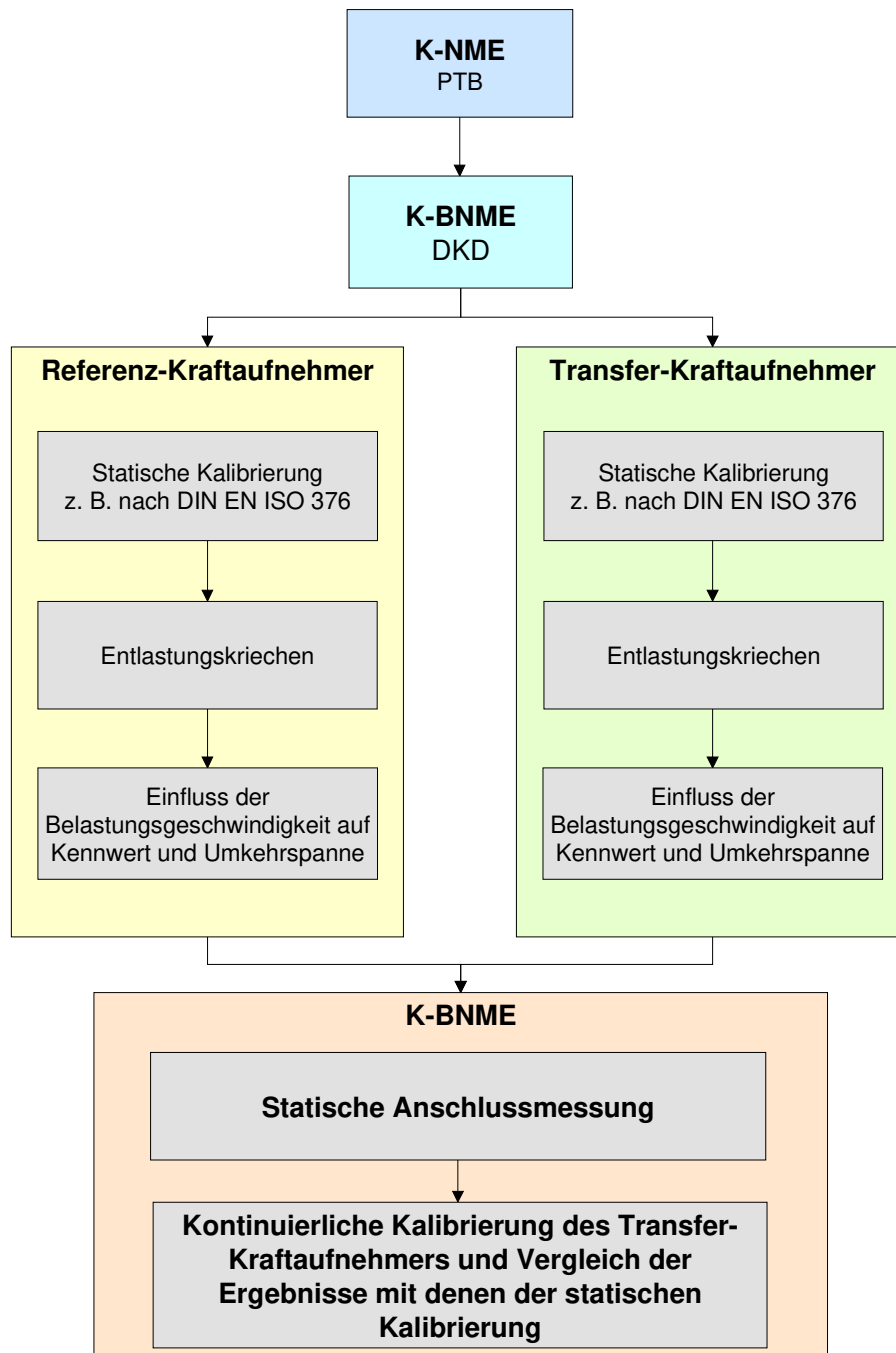


Abbildung 14: Rückführung für den kontinuierlichen Kalibrierablauf

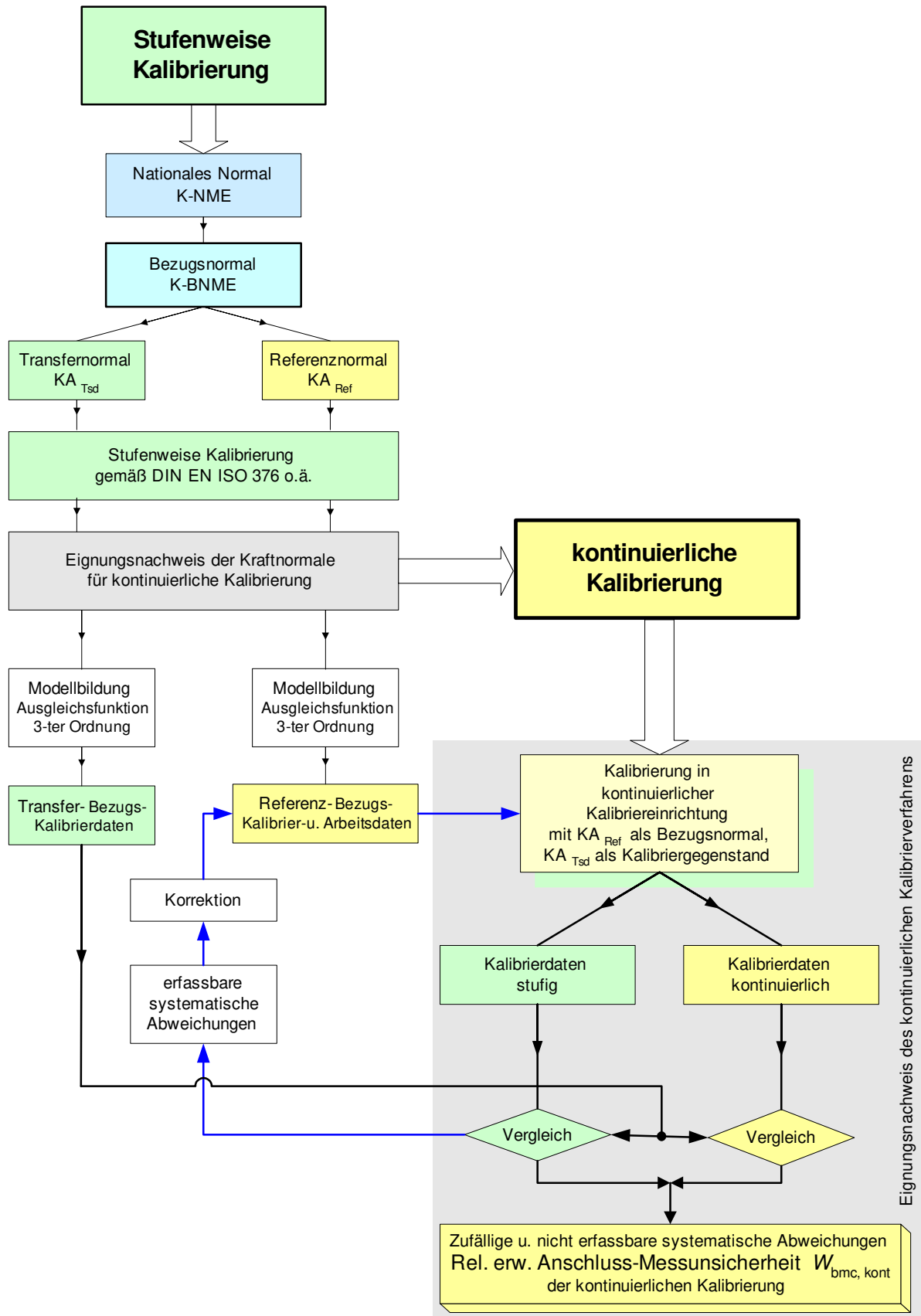


Abbildung 15:

Eignungsnachweis für den kontinuierlichen Kalibrierablauf

A.2 Anforderungen an Referenz- und Transfer-Kraftaufnehmer

Für Referenz- und Transfer-Kraftaufnehmer wird die Erfüllung folgender Anforderungen empfohlen:

| Typ | $W_{bmc, kont}$ | Referenz-Kraftaufnehmer der K-BNME | | Transfer-Kraftaufnehmer W_{tsd}^{10} |
|-----|-------------------------------|--|------------------|---|
| | | Mindest-Klassifikation nach DIN EN ISO 376 | W_{ref}^9 | |
| A | $0,10 \% \leq W \leq 0,25 \%$ | 00 | $W \leq 0,06 \%$ | $W \leq 0,04 \%$ |
| B | $0,25 \% < W \leq 0,5 \%$ | 0,5 | $W \leq 0,12 \%$ | $W \leq 0,08 \%$ |
| C | $0,5 \% < W$ | 1 | $W \leq 0,24 \%$ | $W \leq 0,16 \%$ |

Tabelle 9: Empfehlungen zu Referenz- und Transfer-Kraftaufnehmer

Weiterhin ist auf nachfolgende Eigenschaften zu achten:

- Stabiles, zeitunkritisches Messverhalten (Kennwert, Umkehrspanne, Vorkraftsignalrest)
- geringes Kriechen
- geringer adiabatischer Einfluss (thermoelastisches Kriechen)
- momentenfreie Kraftereinleitung und –ausleitung
- geringes Biegemoment–Störverhalten, möglichst rotationssymmetrisches Messverhalten
- Temperaturkompensation des Kennwertes TK_C und des Nullsignals TK_0

Für Kalibrierungen in Zug- **und** Druckkraftfrichtung mit Nulldurchgang, also in einer Einbausituation, sind sowohl als Referenz- als auch als Transfer-Kraftaufnehmer für Zug- und Druckrichtung geeignete Kraftaufnehmer einzusetzen. Der Durchlaufsinne der Belastung muss bei allen Kalibrierungen und Rückführungsmessungen gleich sein.

⁹ Grenzen der relativen erweiterten Messunsicherheit für verschiedene Klassen nach EA-10/04 (ehemals EAL-G22), Tab.9.2. Die Beiträge zur Abschätzung der Messunsicherheit sind abhängig von der Bauart des Referenz- oder Transfer-Kraftaufnehmers

¹⁰ Für Anschlussmessungen mittels Transfer-Kraftaufnehmern gelten die gleichen Grenzen der relativen erweiterten Messunsicherheit wie unter Fußnote 1, jedoch vermindert um den Beitrag der Umkehrspanne

A.3 Eignungsnachweis der Transfornormale vor der erstmalige Anwendung des kontinuierlichen Betriebs (Vorschlag)

Die Eignung muss zusätzlich zur bisherigen statischen Kalibrierprozedur mit Zusatzprüfungen in der kalibrierhierarchisch höhergestellten K-BNME oder der K-NME nachgewiesen werden.

A.3.1 Ermittlung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Messwerte

Für die Ermittlung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Messwerte sind zwei Messreihen nach a) und b) in gleicher Einbaulage erforderlich:

- a) schnelle Belastungen in Stufen von 20 ... 25 % bis zum Messbereichsendwert mit jeweiliger Zwischenentlastung nach jeder Stufe (s. Abbildung 16).

Die Messwertermittlung $S_{\text{jump},i}$ wird nach einer kurzen Wartezeit t_w (z.B. 2 s, maschinenabhängig) nach erfolgter Belastung durchgeführt. Voraussetzung ist, dass Einschwingvorgänge abgeklungen sind. Dabei soll die Summe der Belastungszeiten aller Stufen nicht größer als das 2fache der im kontinuierlichen Betrieb angestrebten Belastungszeit $t_{w,\text{kont}}$ sein:

$$\sum_{i=1}^N t_{w,i} \leq 2 \cdot t_{w,\text{kont}}$$

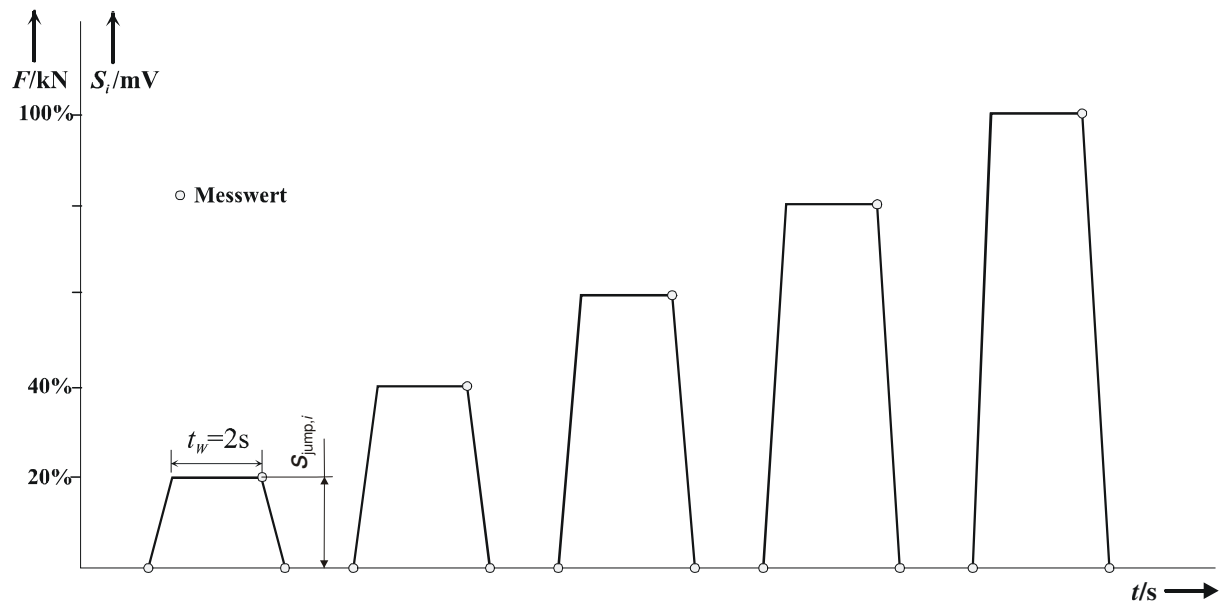


Abbildung 16: Ablauf zur Ermittlung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Messwerte

- b) stufige Belastungsprozedur und Messwertermittlung $S_{\text{stat},i}$ nach Vorgaben der DIN EN ISO 376 an den gleichen Laststufen wie bei a).

Aus den Ergebnissen der Messreihen a) und b) wird die rel. Messwertdifferenz ermittelt:

$$\Delta S_{\text{rel},i} = \frac{\Delta S_i}{S_{\text{stat},i}} = \frac{S_{\text{jump},i} - S_{\text{stat},i}}{S_{\text{stat},i}} \quad (\text{A.8})$$

Diese Werte werden zur Quantifizierung des Einflusses „Belastungsgeschwindigkeit auf die Messwerte“ im nachfolgenden Messunsicherheitsbudget berücksichtigt.

A.3.2 Ermittlung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Umkehrspanne

Für die Ermittlung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Umkehrspanne sind zwei Messreihen in gleicher Einbaulage erforderlich. Diese Messung ist nur dann notwendig, wenn in den Kalibrierablauf die Umkehrspanne eingeschlossen ist.

- a) stufiger Belastungszyklus nach S.41 a), jedoch be- und entlastend. Die Summe der Belastungszeiten aller Stufen sollte nicht größer als das 4fache der im kontinuierlichen Betrieb angestrebten Belastungszeit $t_{W,kont}$ sein:

$$\sum_{i=1}^N t_{W,i} \leq 4 \cdot t_{W,kont}$$

Die rel. Umkehrspanne für jede Stufe ergibt sich aus:

$$u_{jump,i} = \frac{S_{jump,ab,i} - S_{jump,auf,i}}{S_{jump,auf,i}} \quad (A.9)$$

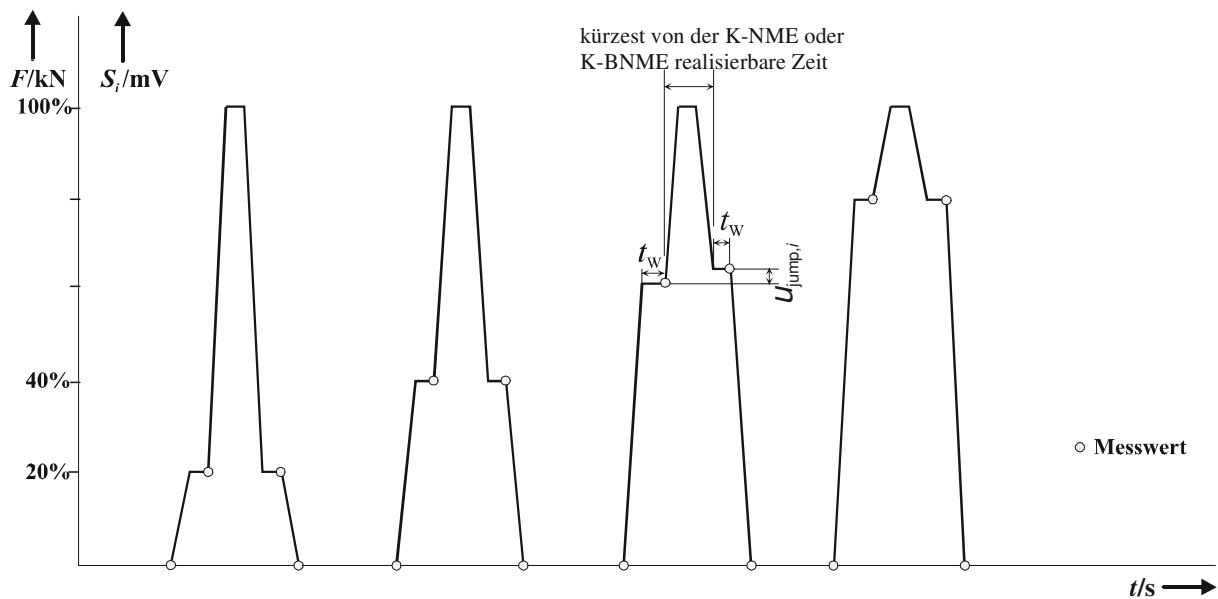


Abbildung 17: Ablauf zur Ermittlung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Umkehrspanne

Anmerkung:

Abbildung 16 und Abbildung 17 dienen nur zur prinzipiellen Darstellung des Belastungsverlaufs. Der reale Ablauf ist von dem möglichen Zeitmanagement der Kraft-Kalibriereinrichtung abhängig.

- b) Belastungszyklus in Anlehnung an DIN EN ISO 376 mit gleicher Stufung wie auf S.41 unter a) (20 %... 25 % bis zum Messbereichsendwert), jedoch be- und entlastend. Die rel. Umkehrspanne für jede Stufe ergibt sich aus:

$$u_{stat,i} = \frac{S_{stat,ab,i} - S_{stat,auf,i}}{S_{stat,auf,i}} \quad (A.10)$$

Aus den Ergebnissen der Messreihen a) und b) wird der rel. Einfluss als Umkehrspannendifferenz ermittelt:

$$\Delta u_i = u_{\text{jump},i} - u_{\text{stat},i} \quad (\text{A.11})$$

Diese Werte werden zur Quantifizierung des Einflusses „Belastungsgeschwindigkeit auf die Umkehrspanne“ im nachfolgenden Messunsicherheitsbudget berücksichtigt.

A.3.3 Prüfung des Kriechverhaltens

Grundsätzlich wird zwischen Be- und Entlastungskriechen unterschieden (s. Abbildung 18). Beide Effekte liefern unter Berücksichtigung der hier angestrebten Messunsicherheit annähernd gleiche Kriechwerte. Daher ist es meist ausreichend, wenn nur das Entlastungskriechen gemessen wird. Das Entlastungskriechen kann auf jeder K-BNME - auch im Vergleichsverfahren - ermittelt werden. Dagegen setzt die exakte Bestimmung des Belastungskriechens eine Direktbelastungseinrichtung voraus¹¹.

Hinweise:

1. Das Entlastungskriechen kann aus dem Vorbelastungskriechen näherungsweise abgeschätzt werden (vgl. [30]).
2. Damit die Belastungsvorgeschichte des Kraftaufnehmers keinen Einfluss auf das Kriechverhalten hat, ist der Aufnehmer mindestens einmal bis zur Nennkraft zu belasten. Anschließend ist eine Zeitspanne von 10 min bis zum Beginn der Kriechmessung zu warten.

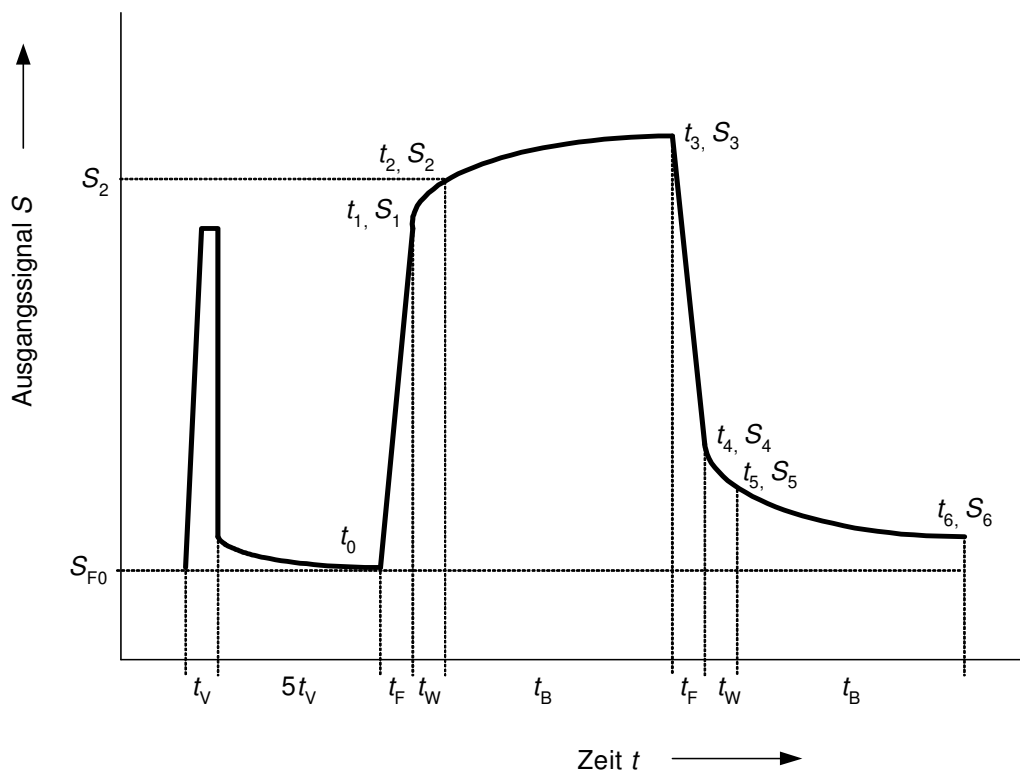



Abbildung 18: Kriechverhalten eines Kraftaufnehmers (asymptotisch einlaufende Kriechfunktion), aus VDI/VDE 2638, Bild 3, Abs. 3.4.3.1

¹¹ Durch die Bestimmung von Be- und Entlastungskriechen kann die Abschätzung der Messunsicherheit präzisiert werden.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 44 / 65 |

| | |
|---------------|--|
| t_0, S_{F0} | Zeitpunkt zu Beginn der Kraftänderung mit zugehörigem Vorkraftsignal S_{F0} (Ausgangssignal vor der Belastung zum Zeitpunkt t_0) |
| t_2, S_2 | Zeitpunkt zu Beginn der Bewertungszeit des Belastungskriechens mit zugehörigem Ausgangssignal S_2 (Ausgangssignal nach der Belastung zum Zeitpunkt t_2) |
| t_5, S_5 | Zeitpunkt zur Bewertung der Belastungsnulldrift und Beginn der Bewertungszeit des Entlastungskriechens mit zugehörigem Ausgangssignal S_5 (Ausgangssignal nach t_W , zum Zeitpunkt t_5) |
| t_6, S_6 | Zeitpunkt t_6 des Endes der Bewertungszeit des Entlastungskriechens mit zugehörigem Ausgangssignal S_6 |

Typische Zeiten für Kräfte bis 100 kN sind:

Kraftänderungszeit: t_F z.B. 2 s bis 3 s

Wartezeit: t_W z.B. 2 s

Bewertungszeit: t_B z.B. 10 min

Für größere Kräfte sind die Zeiten von den Belastungseinrichtungen abhängig.

Zu ermitteln sind (s. Abbildung 18):

$$\text{Entlastungskriechen:} \quad d_{\text{cr,E}} = \frac{S_5 - S_6}{C_{\text{nom}}} \quad (\text{A.12})$$

$$\text{Vorkraftsignalrest:} \quad d_{0,\text{R}} = \frac{S_6 - S_{F0}}{C_{\text{nom}}} \quad (\text{A.13})$$

mit C_{nom} als Nennkennwert

A.3.4 Ermittlung des Einflusses der Krafteinleitungsteile

Sofern bei der Anschlussmessung andere Krafteinleitungsteile als bei der Kalibrierung der Transfer-Kraftaufnehmer in der kalibrierhierarchisch höhergestellten K-BNME oder der K-NME verwendet werden, ist deren Einfluss auf den KA_{tsd} gesondert zu untersuchen und ein Anteil im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen.

A.3.5 Ermittlung des Einflusses der Temperatur

Die Temperaturkoeffizienten TK_0 und TK_C der verwendeten Referenz- und Transfer-Kraftaufnehmer sollten die in Tabelle 10 genannten Grenzwerte einhalten. Sofern keine eigenen Messungen bei verschiedenen Temperaturen möglich sind, ist von den Datenblattangaben der Hersteller auszugehen.

A.3.6 Empfohlene Grenzwerte für zeitabhängige Parameter und Temperaturverhalten

| Kriterium | | $W_{bmc, kont}$ Typ | Referenz-Kraft- aufnehmer bzw. K-BNME | Transfer-Kraft- aufnehmer |
|---|--------------------|------------------------|---|------------------------------|
| Stabiles, zeitunkritisches Messverhalten | $\Delta S_{rel,i}$ | A | $\leq 0,3 \% W_{Ref}$ | $\leq 0,3 \% W_{Tsd}$ |
| | | B/C | | |
| Kriecheinfluss | $d_{cr,E}$ | A | $\leq 0,015 \%$ | $\leq 0,010 \%$ |
| | | B/C | $\leq 0,020 \%$ | $\leq 0,015 \%$ |
| Vorkraftsignalrest | $d_{0,R}$ | A | $\leq 0,012 \%$ | $\leq 0,008 \%$ |
| | | B/C | $\leq 0,025 \%$ | $\leq 0,016 \%$ |
| Umkehrspannen- einfluss | Δu_i | A | $\leq 0,025 \%$ | $\leq 0,015 \%$ |
| | | B/C | $\leq 0,050 \%$ | $\leq 0,025 \%$ |
| Temperaturverhalten | TK_0 | A | $\leq 0,0010 \% / K$ | $\leq 0,0008 \% / K$ |
| | | B/C | $\leq 0,0020 \% / K$ | $\leq 0,0012 \% / K$ |
| | TK_C | A | $\leq 0,0015 \% / K$ | $\leq 0,0010 \% / K$ |
| | | B/C | $\leq 0,0030 \% / K$ | $\leq 0,0015 \% / K$ |

Tabelle 10: Grenzwerte für zeitabhängige Parameter und Temperaturverhalten der KA_{ref} und KA_{tsd}

A.3.7 Überwachung des kontinuierlichen Betriebes

Zur Überwachung des kontinuierlichen Betriebs sind insbesondere folgende Maßnahmen bezüglich des Referenz-Kraftaufnehmers notwendig:

- Überwachung des Vorkraftsignalrestes
- Überwachung der Aufnehmertemperatur
- Selbstüberwachung: Messungen mit Transfer-Kraftaufnehmern nach Maßgabe des QMH

A.4 Ermittlung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit einer K-BNME mit Referenz-Kraftaufnehmersystem bei kontinuierlichem Betrieb (Vorschlag)

Die Methode zur Ermittlung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit bei kontinuierlichem Betrieb basiert auf derjenigen für den statischen Betrieb [42].

A.4.1 Einflussgrößen

Beim kontinuierlichen Betrieb sind zusätzlich zu den in oben genannter Veröffentlichung aufgelisteten mindestens die nachfolgend aufgeführten Einflussgrößen zu berücksichtigen. Diese sind im Ursache-Wirkung-Diagramm in Abbildung 19 dargestellt.

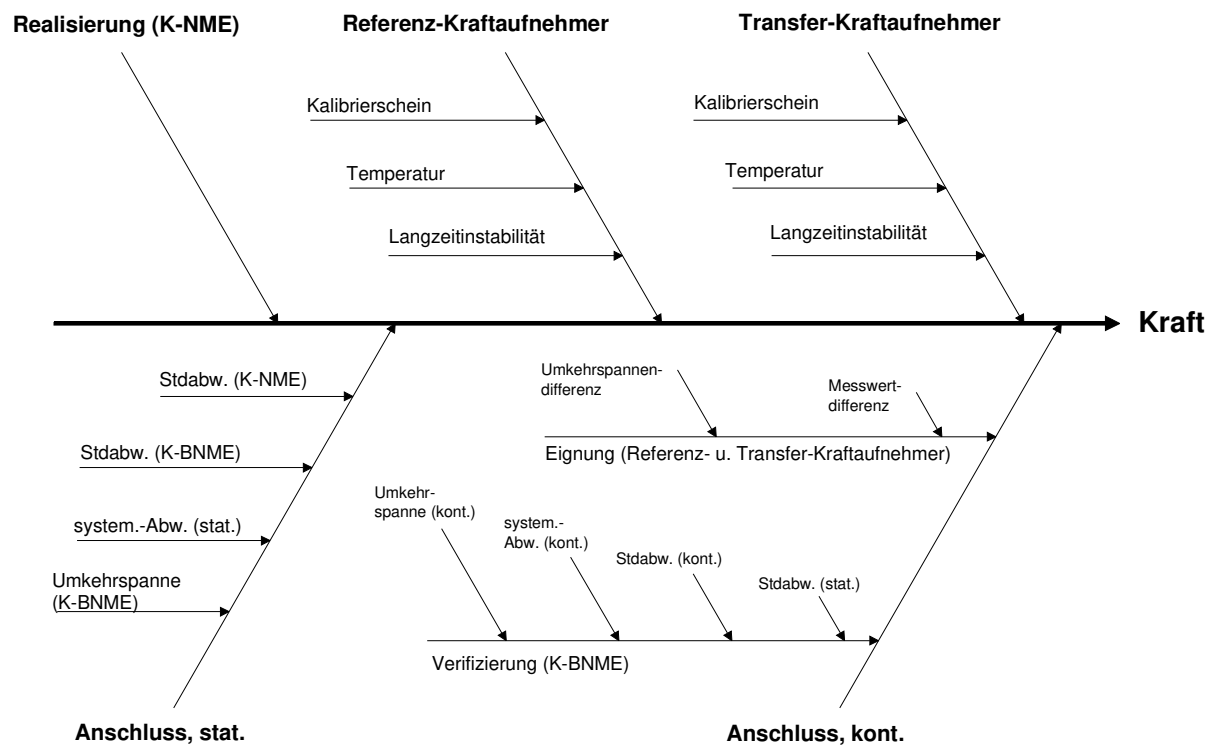


Abbildung 19: Einflussgrößen bei der Ermittlung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit bei kontinuierlichem Betrieb

A.4.2 Modell

Das Modell der Krafterzeugung durch eine K-BNME mit einem Referenz-Kraftaufnehmersystem ist als lineares Produktmodell unter Verwendung von relativen Messunsicherheiten formuliert.

In allgemeiner Darstellung gilt:

$$\text{Größen:} \quad Y = q \cdot \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}; \quad p_i := \pm 1 \quad (\text{A.14})$$

$$\text{Schätzwerte:} \quad y = q \cdot \prod_{i=1}^N x_i^{p_i}; \quad p_i = \pm 1 \quad (\text{A.15})$$

In der detaillierten Darstellung - Bestimmungsgleichung mit den „besten“ Schätzwerten - wird daraus der Ausdruck:

$$F_{\text{bmc,kont}} = F_{\text{Ref}} \cdot \prod_{i=1}^3 K_{i,\text{stat}} \cdot \prod_{i=1}^3 K_{i,\text{kont}} \quad (\text{A.16})$$

$$\text{mit } \prod_{i=1}^3 K_{i,\text{stat}} = K_{\text{Drift_Ref}} \cdot K_{\varnothing} \cdot K_{\text{Anschluss,stat}} \quad \text{und} \quad \prod_{i=1}^3 K_{i,\text{kont}} = K_{\Delta S} \cdot K_{\Delta u} \cdot K_{\text{ver}}$$

| | | | |
|-----------------------------|---|----|----|
| $F_{\text{bmc,kont}}$ | Ergebnisgröße; auf einen Kalibriergegenstand einwirkende Kraft bei kontinuierlichem Betrieb | 12 | |
| F_{Ref} | Eingestellte Kraft (Referenzkraftaufnehmer) | 13 | 14 |
| $K_{\text{Drift,Ref}}$ | Korrektionsfaktor rel. Langzeitdrift des Referenzkraftaufnehmers | | |
| K_{ϑ} | Korrektionsfaktor rel. Änderung der Umgebungstemperatur | | |
| $K_{\text{Anschluss,stat}}$ | Korrektionsfaktor Anschlussmessung mit Transferaufnehmern | | |
| $K_{\Delta S}$ | Korrektionsfaktor rel. Messwertdifferenz (in K-NME) | | |
| $K_{\Delta u}$ | Korrektionsfaktor rel. Umkehrspannungsdifferenz (in K-NME) | | |
| K_{ver} | Korrektionsfaktor Verifizierung der kontinuierlichen Kalibrierung | | |

Korrektionsfaktoren:

$$K_i = \left(1 + \frac{\delta F_i}{|F_i|} \right) \quad (\text{A.17})$$

mit

δF_i unbekannte Messabweichungen und

$E[\delta F_i] = 0$ Erwartungswert

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

Ausgehend von der Ermittlung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit bei statischem Betrieb müssen bei kontinuierlichem Kalibrierablauf zusätzliche Beiträge berücksichtigt werden, die zum Abschätzen der kleinsten angebbaren Messunsicherheit bei kontinuierlichem Betrieb notwendig sind.

Damit ergibt sich für die Standardmessunsicherheit:

$$w(F_{\text{bmc,kont}}) = \sqrt{w^2(F_{\text{Ref}}) + w^2(K_{\text{Drift,Ref}}) + w^2(K_{\vartheta}) + w^2(K_{\text{Anschluss,stat}}) + w^2(K_{\Delta S}) + w^2(K_{\Delta u}) + w^2(K_{\text{ver}})} \quad (\text{A.18})$$

¹² Ergebnisgröße

¹³ N' Eingangsgrößen zur Bestimmung der Ergebnisgröße

$N' < N$

¹⁴ N Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit

$N' < N$

Die zugehörigen Verteilungsfunktionen und rel. Varianzen sind der Tabelle 11 zu entnehmen:

| Zufallsvariable | Wahrscheinlichkeitsverteilung | rel. Varianz $w^2(x_i)$ |
|-----------------------------|-------------------------------|--|
| F_{Ref} | Normal | $w^2(F_{\text{Ref}})$ |
| $K_{\text{Drift_Ref}}$ | Rechteck | $w^2(K_{\text{Drift_Ref}}) = \frac{a_{\text{Drift_Ref}}^2}{3}$ |
| K_{ϑ} | Rechteck | $w^2(K_{\vartheta}) = \frac{a_{\vartheta}^2}{3}$ |
| $K_{\text{Anschluss,stat}}$ | Rechteck | $w^2(K_{\text{Anschluss,stat}}) = \frac{\left(\frac{U'_{\Delta F, \text{stat}}}{F_{\text{KNME}}} \right)^2}{3}$ |
| $K_{\Delta S}$ | Rechteck | $w^2(K_{\Delta S}) = \frac{a_{\Delta S}^2}{3}$ |
| $K_{\Delta u}$ | Rechteck | $w^2(K_{\Delta u}) = \frac{a_{\Delta u}^2}{3}$ |
| K_{ver} | Rechteck | $w^2(K_{\text{ver}}) = \frac{a_{\text{ver}}^2}{3}$ |

Tabelle 11: Verteilungsfunktionen und Varianzen bei kontinuierlicher Belastung für das Modell für $F_{\text{bmc, kont}}$

A.4.2.1 Unsicherheitsanalyse

Die Kenntnisse über die Eingangsgrößen werden vorzugsweise in einer Tabelle (Tabelle 12) zusammengefasst.

| lfd. Nr. | Größe | Schätzwert | Halbbreite der Verteilung | Teiler | Unsicherheit | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag | Varianz |
|---|-----------------------------|------------|--------------------------------------|------------|--------------------------------|---|--|--|
| | X_i | x_i | a | | $w(x_i)$ | c_i^* | $w_i(y)$ | $w_i^2(y)$ |
| 1 | F_{Ref} | λ | | 2 | $w(F_{\text{Ref}})$ | 1 | $w_{F_{\text{Ref}}}(F_{\text{bmc,kont}})$ | $w_{F_{\text{Ref}}}^2(F_{\text{bmc,kont}})$ |
| 2 | $K_{\text{Drift_Ref}}$ | 1 | $a_{\text{Drift_Ref}}$ | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{Drift_Ref}})$ | 1 | $w_{\text{Drift_Ref}}(F_{\text{bmc,kont}})$ | $w_{\text{Drift_Ref}}^2(F_{\text{bmc,kont}})$ |
| 3 | K_{ϑ} | 1 | a_{ϑ} | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\vartheta})$ | 1 | $w_{\vartheta}(F_{\text{bmc,kont}})$ | $w_{\vartheta}^2(F_{\text{bmc,kont}})$ |
| 4 | $K_{\text{Anschluss,stat}}$ | 1 | $a_{\text{Anschluss,stat}}$ | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{Anschluss,stat}})$ | 1 | $w_{\text{An...stat}}(F_{\text{bmc,kont}})$ | $w_{\text{An...stat}}^2(F_{\text{bmc,kont}})$ |
| 5 | $K_{\Delta S}$ | 1 | $a_{\Delta S}$ | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\Delta S})$ | 1 | $w_{\Delta S}(F_{\text{bmc,kont}})$ | $w_{\Delta S}^2(F_{\text{bmc,kont}})$ |
| 6 | $K_{\Delta u}$ | 1 | $a_{\Delta u}$ | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\Delta u})$ | 1 | $w_{\Delta u}(F_{\text{bmc,kont}})$ | $w_{\Delta u}^2(F_{\text{bmc,kont}})$ |
| 7 | K_{ver} | 1 | a_{ver} | $\sqrt{3}$ | $w(K_{\text{ver}})$ | 1 | $w_{\text{ver}}(F_{\text{bmc,kont}})$ | $w_{\text{ver}}^2(F_{\text{bmc,kont}})$ |
| | $F_{\text{bmc,kont}}$ | y | rel. Standardmessunsicherheit w | | | $w(F_{\text{bmc,kont}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(F_{\text{bmc,kont}})}$ | | |
| | $F_{\text{bmc,kont}}$ | y | rel. erweiterte Messunsicherheit W | | | $W(F_{\text{bmc,kont}}) = k * w(F_{\text{bmc,kont}})$ | | |
| Angabe des vollständigen Messergebnisses | | | | | | $F_{\text{bmc,kont}} = y \pm W(F_{\text{bmc,kont}})$ | | |

Tabelle 12: Unsicherheitsanalyse für das Modell für $F_{\text{bmc,kont}}$

Die Abschätzung der Messunsicherheit hat jedoch für jeden Kalibrierwert, d.h. für jedes angegebene Belastungsniveau, zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung dient folgendes Messunsicherheitsbudget (Tabelle 13):

A.4.2.2: Messunsicherheitsbudget

| Kraft kN | Rel. Standardmessunsicherheit $w_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete Messunsicherheitsbeiträge) | | | | | | Verifizierung kontinuierliche Kalibrierung |
|-----------------|---|-------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------------|--|
| | Referenzaufnehmer | Ref.-Aufnehmer Drift | Umgebungs-temperatur | Anschluss, statisch # | Messwertdifferenz | Umkehrspannungsdifferenz | |
| min. | | | | | | | |
| max. | | | | | | | |

| Kraft kN | rel. Standardmessunsicherheit $w_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete kombinierte Messunsicherheitsbeiträge) | | | rel. Standardmessunsicherheit $w(y)$ Gesamt | rel. erweiterte Messunsicherheit $W(y)$ ($k=2$) |
|-----------------|---|--------------------|-----------------------------------|---|--|
| | Referenzaufnehmer | Statischer Betrieb | Kontinuierlicher Betrieb # | | |
| min. | | | | | |
| max. | | | | | |

Tabelle 13: Messunsicherheitsbudget für die Ermittlung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit im kontinuierlichen Betrieb

A.4.3 Korrektionsfaktor $K_{\text{Anschluss,stat}}$ der statischen Anschlussmessung mit Transfer-Kraftaufnehmern

Modell Messabweichung :

Der Einfluss aufgrund der statischen Anschlussmessung mit Transfer-Kraftaufnehmern kann in allgemeiner Darstellung als Summe-/Differenzmodell formuliert werden:

Größen:
$$Y = \sum_{i=1}^N p_i \cdot X_i ; \quad p_i = \pm 1 \quad (\text{A.19})$$

Schätzwerte:
$$y = \sum_{i=1}^N p_i \cdot x_i ; \quad p_i = \pm 1 \quad (\text{A.20})$$

In der detaillierten Darstellung - Bestimmungsgleichung für die Messabweichung mit den „besten“ Schätzwerten - wird daraus der Ausdruck:

$$\Delta F_{\text{stat}} = \bar{F}_{\text{KBNME}} - \bar{F}_{\text{KNME}} + \sum_{i=1}^3 \delta F_{i,\text{stat}} \quad (\text{A.21})$$

mit
$$\sum_{i=1}^3 \delta F_{i,\text{stat}} = \delta F_{\text{Realisierung}} + \delta F_{\text{Drift_Tsd}} + \delta F_{\text{HysKBNME}}$$

| | | | |
|----------------------------------|---|----|----|
| ΔF_{stat} | Ergebnisgröße; Abweichung der Kraftmittelwerte bei statischer Belastung | 15 | |
| \bar{F}_{KBNME} | Kraftanzeige-Mittelwert des Transfer-Kraftaufnehmers in der K-BNME | 16 | 17 |
| \bar{F}_{KNME} | Kraftanzeige-Mittelwert des Transfer-Kraftaufnehmers in der K-NME | | |
| $\delta F_{\text{Realisierung}}$ | unbekannte Messabweichung Kraftdarstellung im NMI (bei der Realisierung) | | |
| $\delta F_{\text{Drift_Tsd}}$ | unbekannte Messabweichung Langzeitdrift des Transfer-Kraftaufnehmers | | |
| $\delta F_{\text{HysKBNME}}$ | unbekannte Messabweichung Umkehrspanne (Hysterese) der K-BNME, ermittelt unter Berücksichtigung der Umkehrspanne des Transfer-Kraftaufnehmers in der K-NME | | |

¹⁵ Ergebnisgröße

¹⁶ N' Eingangsgrößen zur Bestimmung der Ergebnisgröße

$N' < N$

¹⁷ N Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit

$N' < N$

Unbekannte Messabweichungen:

$\delta F_{i,\text{stat}}$ unbekannte Messabweichungen und

$E[\delta F_{i,\text{stat}}] = 0$ Erwartungswert

Aufgrund des gewählten Summe-/Differenzmodells mit den Koeffizienten gleich 1, sind die Sensitivitätskoeffizienten stets gleich ± 1 ($c_i = \pm 1$).

$$u(\Delta F_{\text{stat}}) = \sqrt{u^2(\bar{F}_{\text{KBNME}}) + u^2(\bar{F}_{\text{KNME}}) + u^2(\delta F_{\text{Realisierung}}) + u^2(\delta F_{\text{Drift_Tsd}}) + u^2(\delta F_{\text{HysKBNME}})} \quad (\text{A.22})$$

Die zugehörigen Verteilungsfunktionen und Varianzen sind der Tabelle 14 zu entnehmen:

| Zufallsvariable | Wahrscheinlichkeitsverteilung | Varianz $u^2(x_i)$ |
|----------------------------------|-------------------------------|---|
| \bar{F}_{KBNME} | Normal | $u^2(\bar{F}_{\text{KBNME}}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{\text{KBNME}})^2}{(n-1) \cdot n}$ |
| \bar{F}_{KNME} | Normal | $u^2(\bar{F}_{\text{KNME}}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{\text{KNME}})^2}{(n-1) \cdot n}$ |
| $\delta F_{\text{Realisierung}}$ | Normal | $u^2(\delta F_{\text{Realisierung}})$ |
| $\delta F_{\text{Drift_Tsd}}$ | Rechteck | $u^2(\delta F_{\text{Drift_Tsd}}) = \frac{a_{\text{Drift_Tsd}}^2}{3}$ |
| $\delta F_{\text{HysKBNME}}$ | Rechteck | $u^2(\delta F_{\text{HysKBNME}}) = \frac{a_{\text{HysKBNME}}^2}{3}$ |

Tabelle 14: Verteilungsfunktionen und Varianzen zum Modell Messabweichung (statische Anschlussmessung)

A.4.3.1 Unsicherheitsanalyse

Die Kenntnisse über die Eingangsgrößen werden vorzugsweise in einer Tabelle (Tabelle 15) zusammengefasst.

| lfd. Nr. | Größe | Schätzwert | Halbbreite der Verteilung | Teiler | Unsicherheit | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag | Varianz |
|---|----------------------------------|------------|---------------------------------|------------|---|--|--|--|
| | X_i | x_i | a | | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | $u_i^2(y)$ |
| 1 | \bar{F}_{KBNME} | x_1 | | 2 | $\frac{s}{\sqrt{n}}$ | 1 | $u_{\bar{F}_{\text{KBNME}}}(\Delta F_{\text{stat}})$ | $u_{\bar{F}_{\text{KBNME}}}^2(\Delta F_{\text{stat}})$ |
| 2 | \bar{F}_{KNME} | x_2 | | 2 | $\frac{s}{\sqrt{n}}$ | -1 | $u_{\bar{F}_{\text{KNME}}}(\Delta F_{\text{stat}})$ | $u_{\bar{F}_{\text{KNME}}}^2(\Delta F_{\text{stat}})$ |
| 3 | $\delta F_{\text{Realisierung}}$ | 0 | | 2 | $u(\text{Realisierung})$ | 1 | $u_{\text{Realisierung}}(\Delta F_{\text{stat}})$ | $u_{\text{Realisierung}}^2(\Delta F_{\text{stat}})$ |
| 4 | $\delta F_{\text{Drift_Tsd}}$ | 0 | $a_{\text{Drift_Tsd}}$ | $\sqrt{3}$ | $u(\text{Drift_Tsd})$ | 1 | $u_{\text{Drift_Tsd}}(\Delta F_{\text{stat}})$ | $u_{\text{Drift_Tsd}}^2(\Delta F_{\text{stat}})$ |
| 5 | $\delta F_{\text{HysKBNME}}$ | 0 | a_{HysKBNME} | $\sqrt{3}$ | $u(\text{HysKBNME})$ | 1 | $u_{\text{HysKBNME}}(\Delta F_{\text{stat}})$ | $u_{\text{HysKBNME}}^2(\Delta F_{\text{stat}})$ |
| | ΔF_{stat} | y | Standardmessunsicherheit u | | $u(\Delta F_{\text{stat}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(\Delta F_{\text{stat}})}$ | | | |
| | ΔF_{stat} | y | Erweiterte Messunsicherheit U | | $U(\Delta F_{\text{stat}}) = k * u(\Delta F_{\text{stat}})$ | | | |
| Angabe des vollständigen Messergebnisses | | | | | | $\Delta F_{\text{stat}} = y \pm U(\Delta F_{\text{stat}})$ | | |


Tabelle 15: Unsicherheitsanalyse zum Modell Messabweichung (statische Anschlussmessung)

Die Abschätzung der Messunsicherheit hat jedoch für jeden Kalibrierwert, d.h. für jedes angegebene Belastungsniveau, zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung dient folgendes Messunsicherheitsbudget (Tabelle 16):

A.4.3.2 Messunsicherheitsbudget

| Kraft | Standardmessunsicherheit $u_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete Messunsicherheitsbeiträge) | | | | | Standard- messunsicher- heit $u(y)$ | Erweiterte Messunsicher- heit $U(y) (k=2)$ |
|-------|--|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--|---|
| | \bar{F}_{KBNME} | \bar{F}_{KNME} | $\delta F_{\text{Realisierung}}$ | $\delta F_{\text{Drift_Tsd}}$ | $\delta F_{\text{HysKBNME}}$ | | |
| kN | | | | # | | | |
| min. | | | | | | | |
| max. | | | | | | | |

Tabelle 16: Messunsicherheitsbudget für die statische Messabweichung (statische Anschlussmessung mit Transfer-Kraftaufnehmern)

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 55 / 65 |

Die ermittelte Abweichung der Kraftmittelwerte ist als Korrektur anzubringen. Dies wird jedoch in der Praxis nicht durchgeführt; die Abweichung ΔF_{stat} und die beigeordnete erweiterte Messunsicherheit $U(\Delta F_{\text{stat}})$ werden zum Unsicherheitsintervall $U'_{\Delta F_{\text{stat}}}$ zusammengefasst. Dem Unsicherheitsintervall wird eine Rechteckverteilung zugewiesen. Für die Verwendung im übergeordneten Modell ist dieses Unsicherheitsintervall auf den Kraftmittelwert \bar{F}_{KNME} zu beziehen.

$$U'_{\Delta F_{\text{stat}}} = |\Delta F_{\text{stat}}| + U(\Delta F_{\text{stat}}) \quad (\text{A.23})$$

$$K_{\text{Anschluss,stat}} = \left(1 - \frac{U'_{\Delta F_{\text{stat}}}}{|\bar{F}_{\text{KNME}}|} \right) \quad (\text{A.24})$$

A.4.4 Korrektionsfaktor K_{ver} der Verifizierung des kontinuierlichen Verfahrens (statische und kontinuierliche Messung mit Transfer-Kraftaufnehmern)

Modell Messabweichung

Der Einfluss des kontinuierlichen Verfahrens, quantifiziert durch statische und kontinuierliche Messung mit Transfer-Kraftaufnehmern in der K-BNME, kann in allgemeiner Darstellung als Summe-/Differenzmodell formuliert werden:

$$\text{Größen:} \quad Y = \sum_{i=1}^N p_i \cdot X_i \quad ; \quad p_i = \pm 1 \quad (\text{A.25})$$

$$\text{Schätzwerte:} \quad y = \sum_{i=1}^N p_i \cdot x_i \quad ; \quad p_i = \pm 1 \quad (\text{A.26})$$

In der detaillierten Darstellung - Bestimmungsgleichung für die Messabweichung mit den „besten“ Schätzwerten - wird daraus der Ausdruck:

$$\Delta F_{\text{ver}} = \bar{F}_{\text{kont}} - \bar{F}_{\text{stat}} + \delta F_{\text{Hys,kont}} \quad (\text{A.27})$$

| | | | |
|------------------------------|---|----|----|
| ΔF_{ver} | Ergebnisgröße; Abweichung der Kraftmittelwerte zwischen kontinuierlicher und statischer Belastung | 18 | |
| \bar{F}_{kont} | Kraftanzeige-Mittelwert des Transfer-Kraftaufnehmers bei kontinuierlicher Belastung | 19 | 20 |
| \bar{F}_{stat} | Kraftanzeige-Mittelwert des Transfer-Kraftaufnehmers bei statischer Belastung | | |
| $\delta F_{\text{Hys,kont}}$ | unbekannte Messabweichung Umkehrspanne (Hysterese) bei kontinuierlicher Belastung, ermittelt unter Berücksichtigung der Umkehrspanne des Transfer-Kraftaufnehmers bei statischer Belastung | | |

¹⁸ Ergebnisgröße

¹⁹ N' Eingangsgrößen zur Bestimmung der Ergebnisgröße

$N' < N$

²⁰ N Eingangsgrößen zur Ermittlung der Messunsicherheit

$N < N$

Unbekannte Messabweichungen:

$\delta F_{i,\text{kont}}$ unbekannte Messabweichungen und
 $E[\delta F_{i,\text{kont}}] = 0$ Erwartungswert

Aufgrund des gewählten Summe-/Differenzmodells mit den Koeffizienten gleich 1, sind die Sensitivitätskoeffizienten stets gleich ± 1 ($c_i = \pm 1$).

$$u(\Delta F_{\text{ver}}) = \sqrt{u^2(\overline{F}_{\text{kont}}) + u^2(\overline{F}_{\text{stat}}) + u^2(\delta F_{\text{Hys,kont}})} \quad (\text{A.28})$$

Die zugehörigen Verteilungsfunktionen und Varianzen sind der Tabelle 14 zu entnehmen:

| Zufallsvariable | Wahrscheinlichkeitsverteilung | Varianz $u^2(x_i)$ |
|------------------------------|-------------------------------|---|
| $\overline{F}_{\text{kont}}$ | Normal | $u^2(\overline{F}_{\text{kont}}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \overline{x}_{\text{kont}})^2}{(n-1) \cdot n}$ |
| $\overline{F}_{\text{stat}}$ | Normal | $u^2(\overline{F}_{\text{stat}}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \overline{x}_{\text{stat}})^2}{(n-1) \cdot n}$ |
| $\delta F_{\text{Hys,kont}}$ | Rechteck | $u^2(\delta F_{\text{Hys,kont}}) = \frac{a_{\text{Hys,kont}}^2}{3}$ |

Tabelle 17: Verteilungsfunktionen und Varianzen zum Modell Messabweichung (Verifizierung des kontinuierlichen Verfahrens)

A.4.4.1 Unsicherheitsanalyse

Die Kenntnisse über die Eingangsgrößen werden vorzugsweise in einer Tabelle (Tabelle 15) zusammengefasst.


| lfd. Nr. | Größe | Schätzwert | Halbbreite der Verteilung | Teiler | Unsicherheit | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag | Varianz |
|---|------------------------------|------------|---------------------------------|------------|---|--|---|---|
| | X_i | x_i | a | | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | $u_i^2(y)$ |
| 1 | $\overline{F}_{\text{kont}}$ | x_1 | | 2 | $\frac{s}{\sqrt{n}}$ | 1 | $u_{\overline{F}_{\text{kont}}}(\Delta F_{\text{ver}})$ | $u_{\overline{F}_{\text{kont}}}^2(\Delta F_{\text{ver}})$ |
| 2 | $\overline{F}_{\text{stat}}$ | x_2 | | 2 | $\frac{s}{\sqrt{n}}$ | -1 | $u_{\overline{F}_{\text{stat}}}(\Delta F_{\text{ver}})$ | $u_{\overline{F}_{\text{stat}}}^2(\Delta F_{\text{ver}})$ |
| 5 | $\delta F_{\text{Hys,kont}}$ | 0 | $a_{\text{Hys,kont}}$ | $\sqrt{3}$ | $u(\text{Hys,kont})$ | 1 | $u_{\text{Hys,kont}}(\Delta F_{\text{ver}})$ | $u_{\text{Hys,kont}}^2(\Delta F_{\text{ver}})$ |
| | ΔF_{ver} | y | Standardmessunsicherheit u | | $u(\Delta F_{\text{ver}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(\Delta F_{\text{ver}})}$ | | | |
| | ΔF_{ver} | y | Erweiterte Messunsicherheit U | | $U(\Delta F_{\text{ver}}) = k * u(\Delta F_{\text{ver}})$ | | | |
| Angabe des vollständigen Messergebnisses | | | | | | $\Delta F_{\text{ver}} = y \pm U(\Delta F_{\text{ver}})$ | | |

Tabelle 18: Unsicherheitsanalyse zum Modell Messabweichung (Verifizierung des kontinuierlichen Verfahrens)

Die Abschätzung der Messunsicherheit hat jedoch für jeden Kalibrierwert, d.h. für jedes angegebene Belastungsniveau, zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung dient folgendes Messunsicherheitsbudget (Tabelle 19):

| Kraft | Standardmessunsicherheit $u_i(y)$ (dem Ergebnis aufgrund von Einflussgrößen beigeordnete Messunsicherheitsbeiträge) | | | Standardmessunsi- cherheit | Erweiterte Messunsicherheit |
|--------------|---|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--|
| | $\overline{F}_{\text{kont}}$ | $\overline{F}_{\text{stat}}$ | $\delta F_{\text{Hys, kont}}$ | $u(y)$ | $U(y) (k=2)$ |
| kN | | | # | | |
| min. | | | | | |
| max. | | | | | |

Tabelle 19: Messunsicherheitsbudget für die Messabweichung (Verifizierung des kontinuierlichen Verfahrens, Messungen mit Transfer-Kraftaufnehmern)

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 59 / 65 |

Die ermittelte Abweichung der Kraftmittelwerte ist als Korrektur anzubringen. Dies wird jedoch in der Praxis nicht durchgeführt; die Abweichung ΔF_{ver} und die beigeordnete erweiterte Messunsicherheit $U(\Delta F_{\text{ver}})$ werden zum Unsicherheitsintervall $U'_{\Delta F_{\text{ver}}}$ zusammengefasst. Dem Unsicherheitsintervall wird eine Rechteckverteilung zugewiesen. Für die Verwendung im übergeordneten Modell ist dieses Unsicherheitsintervall auf den Kraftmittelwert $\overline{F_{\text{stat}}}$ zu beziehen.

$$U'_{\Delta F_{\text{ver}}} = |\Delta F_{\text{ver}}| + U(\Delta F_{\text{ver}}) \quad (\text{A.29})$$

$$K_{\text{ver}} = \left(1 - \frac{U'_{\Delta F_{\text{ver}}}}{\overline{F_{\text{stat}}}} \right) \quad (\text{A.30})$$

Anhang B

B.1 Bestimmung eines optimalen Polynomgrades zur Reduzierung des Einflusses von zufälligen Abweichungen

Bei der kontinuierlichen Kalibrierung kann der Einfluss der zufälligen Abweichungen nicht durch Mittelung der Messwerte reduziert werden, wie dies bei der stufenweisen Kalibrierung üblich ist. Deshalb müssen, wenn notwendig, andere Verfahren eingesetzt werden, wie beispielsweise digitale Filterung oder Ausgleichsfunktionen (modellgestützte Rekonstruktion).

Die nachfolgenden Ausführungen gehen auf die Bestimmung von Ausgleichsfunktionen und deren optimalen Grad n ein. Diese stützen sich auf systemtechnische Betrachtungsweisen am Beispiel eines piezoelektrischen Aufnehmers.

Zur modellgestützten Rekonstruktion des Kalibriergegenstand-Ausgangssignals müssen das Kalibriermodell f aufgestellt und dessen Parameter geschätzt werden. Dies erfolgt für die zu- und abnehmenden Belastungsreihen getrennt.

Allgemein gilt für das Kalibriermodell: $S_{\text{KG}} = f(F_{\text{Ref}})$

Dabei ist S_{KG} das Ausgangssignal des Kalibriergegenstandes, welches mit Hilfe des Kalibriermodells rekonstruiert wird.

Als analytische Form des Modells werden üblicherweise Polynome des Grades n verwendet:

$$S_{\text{KG}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot F_{\text{Ref}}^i \quad (\text{B.1})$$

Die Schätzung der Parameter α_i erfolgt mit der (Gaußschen) Methode der kleinsten Abweichungsquadrate. Dabei wird die Kraft $F_{\text{ref,kont}}$ des Referenz-Kraftaufnehmers als unabhängige und das Ausgangssignal $S_{\text{KG,kont}}$ des Kalibriergegenstandes als abhängige Variable betrachtet.

Bei der Wahl des Polynomgrades n ist zu beachten, dass eine genügend große Anzahl von Freiheitsgraden n_{F} vorhanden ist: $n_{\text{F}} = N - n$. Dabei ist N die Anzahl der Messwerte der Datenreihe. Diese sollte nach Möglichkeit 100 oder mehr Werte pro Belastungsreihe und Richtung aufweisen, um eine fundierte statistische Auswertung der Daten im Hinblick auf Zufälligkeit, Ausreißerfreiheit und Normalverteilung zu gewährleisten.

Ist die Anzahl der Freiheitsgrade zu gering, wird die Modellfunktion durch zufällige Abweichungen beeinflusst, weil die Konfidenzintervalle der geschätzten Parameter zu groß werden. Polynome mit Graden im Bereich $3 \leq n \leq 6$ sind meist ausreichend, um das systematische

Verhalten des Aufnehmers im Modell abzubilden. Zur Verifizierung der Methode ist eine Prüfung des Modells wichtig. Dazu werden zuerst unterschiedliche Grade des Modellpolynoms beurteilt, indem die zugehörigen Summen der Abweichungsquadrate miteinander verglichen werden. Falls die Summe der Abweichungsquadrate bei Erhöhung des Grades n nicht mehr signifikant abnimmt, ist eine Erhöhung von n nicht mehr sinnvoll. Für das gezeigte Beispiel ist ein Polynom 5. Grades optimal.

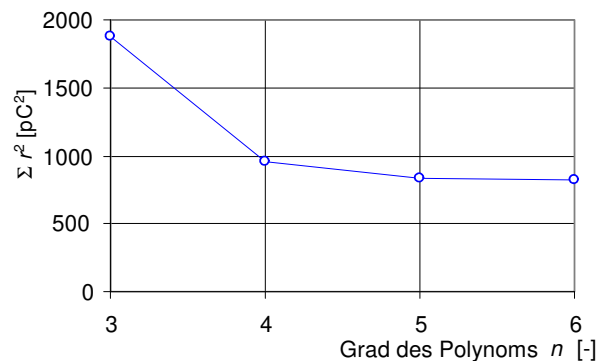


Abbildung 20: Darstellung der Summe der Abweichungsquadrate als Funktion des Polynomgrades.

Da die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate durch Ausreißer stark beeinflusst wird und deshalb nicht sehr robust ist, müssen Ausreißer erkannt und eliminiert werden. Zur Erkennung der Ausreißer können verschiedene Methoden eingesetzt werden. Bei der Prüfung auf Normalverteilung mittels Quantile-Quantile-Plot sind Ausreißer als weit von der Geraden entfernte Punkte sichtbar. Bei größeren Datensätzen ist die einfachste Methode Wertepaare, welche zu große Residuen ergeben, als Ausreißer auszuschließen. Als Ausschlusskriterium wird häufig $-3s_r > r > 3s_r$ gesetzt. Nach Ausschluss von Wertepaaren, die zu Ausreißern geführt haben, müssen die Koeffizienten des Polynoms neu berechnet werden, ggf. wird eine iterative Prüfung auf Ausreißerfreiheit notwendig.

Das optimal angepasste Modellpolynom kann einer weitergehenden Prüfung unterzogen werden. Da die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate nur bei normalverteilten Abweichungen (Residuen r) zwischen Modell und Daten optimal ist, werden die Residuen auf Normalverteilung geprüft. Dies erfolgt vorzugsweise mittels „Normalverteilungspapier“ oder dem so genannten Quantile-Quantile-Plot (Q-Q-Plot). Falls die Residuen weitgehend auf einer Geraden liegen, sind die Residuen zufällig verteilt, und damit ist das Modell optimal gewählt (Abbildung 21).

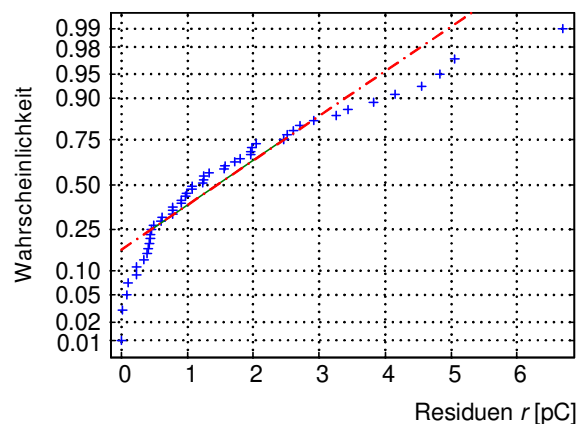


Abbildung 21: Visuelle Prüfung der Residuen auf Normalverteilung mit Hilfe des Quantile-Quantile-Plots.

Mit Hilfe des optimierten und geprüften Kalibriermodells können nun die Ausgangssignale S_{KG} des Kalibriergegenstandes rekonstruiert werden. Die Standardabweichung der Residuen s_r des optimalen Modells wird als zufällige Abweichung betrachtet und liefert somit einen Beitrag zur Messunsicherheit.

B.2 Beispiel für die Wirkung der Approximation mit Polynomen

In den folgenden Abbildungen wird die Wirkung der Approximation direkt aufgenommener Wertepaare durch Polynome dargestellt. Zur Veranschaulichung werden Abweichungsdiagramme gezeigt, bei welchen der Übertragungskoeffizient als Steigung einer Geraden durch Null als Ergebnis der Kalibrierung verwendet wurde. Die Gerade wurde durch Minimierung der absoluten Abweichungsbeträge (Minimummethode mit Tschebyscheff-Approximation) bestimmt. Die Abweichungen wurden dabei für jedes aufgenommene Wertepaar ($F_{ref,kont}$; $S_{KG,kont}$) aus einem Datensatz mit jeweils 90 Messpunkten für den aufsteigenden und absteigenden Lastzyklus bis 60 kN bestimmt.

Abbildung 22 zeigt das Abweichungsdiagramm, welches sich bei der Auswertung unter Verwendung **direkt aufgenommener Wertepaare** ($F_{ref,kont}$; $S_{KG,kont}$) ergibt.

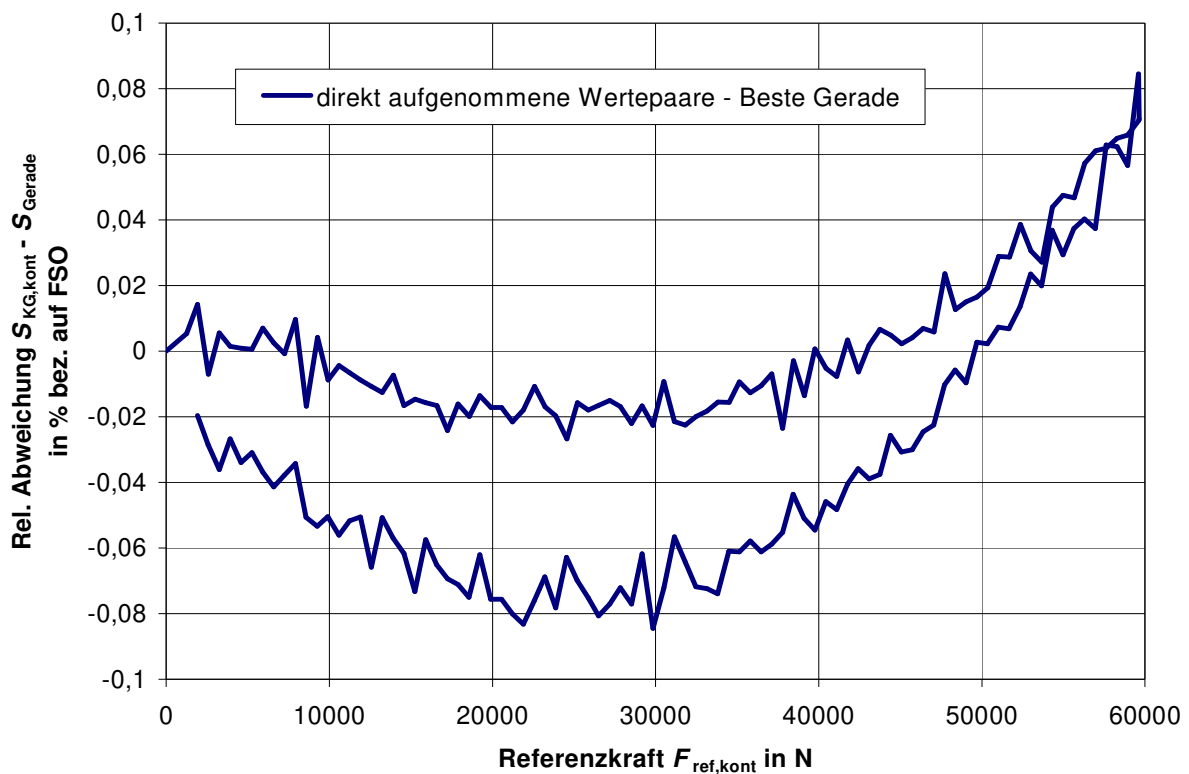


Abbildung 22: Abweichungsdiagramm bei der Auswertung direkt aufgenommener Wertepaare $F_{ref,kont}$ und $S_{KG,kont}$

Es ist zu erkennen, dass die direkt aufgenommenen Wertepaare zufällige Abweichungen in der Größenordnung von ± 100 ppm enthalten, die auf Signalstörungen wie z.B. Rauschen zurückzuführen sind. Wird die lineare Interpolation (nach Abs. 7, Verfahren 1a) verwendet, übertragen sich diese zufälligen Abweichungen in die Wertepaare an den gewünschten Stützstellen F_{ref} und S_{KG} . Zur Reduktion der zufälligen Abweichungen kann nach Abs. 7, Verfahren 1b eine Ausgleichsfunktion höheren Grades über die direkt aufgenommenen Wertepaare gelegt werden, wobei hier der aufsteigende und absteigende Lastzyklus getrennt behandelt wurden. Mit

der Ausgleichsfunktion werden die Wertepaare (F_{ref} ; S_{KG}) an den gewünschten Stützstellen als rekonstruiertes Ausgangssignal des Kalibriergegenstandes ermittelt. Zur Auswertung per Polynombildung wird das rekonstruierte Ausgangssignal an den Stützstellen herangezogen, um die Gerade nach der Minimummethode mit Tschebyscheff-Approximation zu bestimmen. Die relative Abweichung zwischen den rekonstruierten Wertepaaren und der besten Geraden ist in Abbildung 23 dargestellt. Der grundsätzliche Abweichungsverlauf zwischen den Wertepaaren und der Besten Geraden hat sich über den Kalibrierbereich von 60 kN nicht verändert.

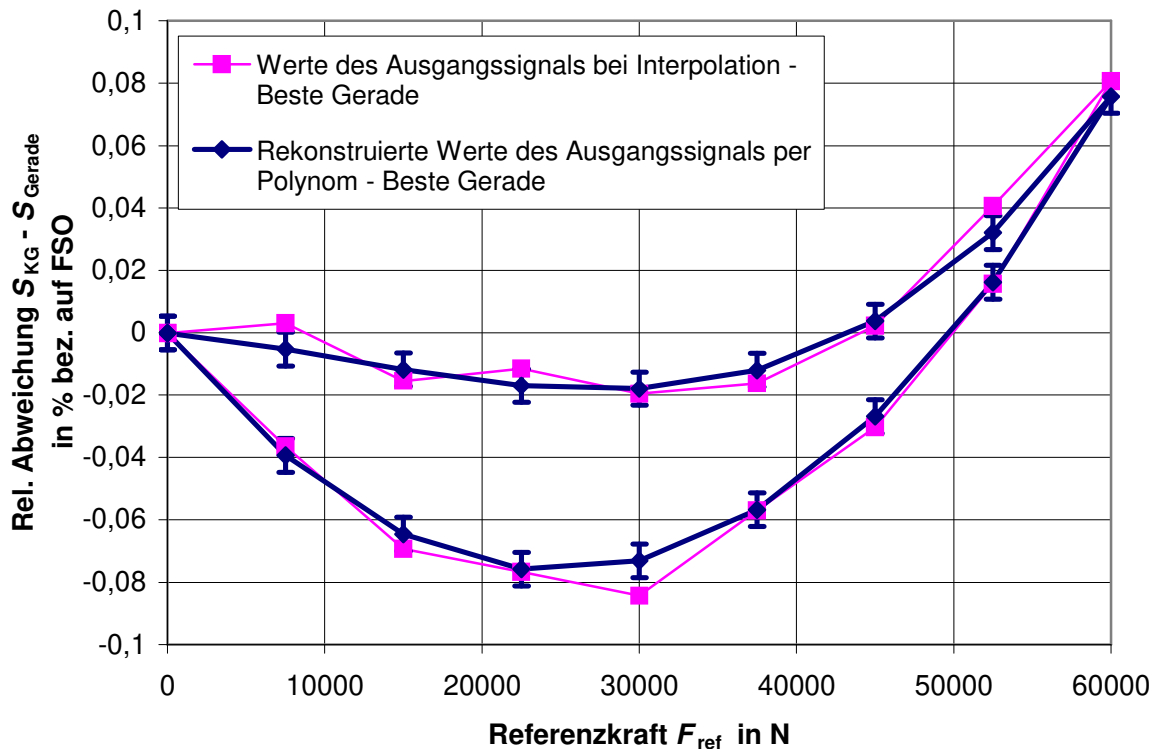



Abbildung 23: Abweichungsdiagramm bei der Auswertung per Polynombildung bestimmter Wertepaare an den Stützstellen F_{ref} und S_{KG}


Die zufälligen Abweichungen zwischen der Ausgleichsfunktion und den direkt aufgenommenen Wertepaaren werden als Reststandardabweichung s_r zu einem Ergebnis der Approximation und gehen als Beitrag in die Abschätzung der Messunsicherheit ein. Sie wirken sich nicht mehr direkt auf die Wertepaare an den gewünschten Stützstellen F_{ref} und S_{KG} aus. Zum Vergleich wurden die Reststandardabweichungen mit $s_r = \pm 56$ ppm an jeder Stützstelle als Streubereich in der Abbildung 23 eingetragen. Zudem ist das Ausgangssignal an den gewünschten Stützstellen abgebildet, das sich durch eine lineare Interpolation zwischen den direkt aufgenommenen Wertepaaren nach dem Verfahren 1a ergibt. Es wird deutlich, dass dieses Ausgangssignal von den zufälligen Schwankungen der Messwerterfassung abhängt.

Nomenklatur

| | | |
|------------------------|------|--|
| $F_{\text{Ref, kont}}$ | [N] | beim kontinuierlichen Verfahren direkt aufgenommenen Kraftmesswerte |
| F_{Ref} | [N] | Kraft an einer Stützstelle |
| $S_{\text{KG, kont}}$ | [pC] | beim kontinuierlichen Verfahren direkt aufgenommenen Ausgangssignale des Kalibriergegenstandes |
| S_{KG} | [pC] | rekonstruierter Wert des KG-Ausgangssignals |
| s_r | [pC] | Standardabweichung der Residuen des Kalibriermodells |

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 63 / 65 |

| | | |
|------------|-----|---------------------------------|
| N | [-] | Anzahl Messwerte der Datenreihe |
| α_i | [-] | Parameter der Modellfunktion |
| n_F | [-] | Anzahl der Freiheitsgrade |
| n | [-] | Grad eines Polynoms |

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren https://doi.org/10.7795/550.20180823J | DKD-R 3-9 | |
| | | Ausgabe: | 09/2018 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 64 / 65 |

Anhang C

C.1 Anzeigeabweichung

Alternativ kann zu den beschriebenen Modellen der Auswertung das Modell „Anzeigeabweichung“ verwendet werden. Dabei wird unterstellt, dass die zuvor ermittelten Werte einer Ausgleichsfunktion Anzeigewerte darstellen.

$$\Delta F = F_{\text{Ausgleich}} - F_{\text{Normal}} + \sum_{i=1}^N \delta F_i \quad (\text{C.1})$$

Hierbei werden Messunsicherheiten in der Einheit der Größe Kraft, d. h. in kN, verwendet. Dies weicht von den bestehenden Normen und Regelwerken für die Größe Kraft ab, in denen die den Aufnehmer charakterisierende Kennwerte als relative, d.h. bezogene dimensionslose, Werte betrachtet werden (*analog EA-10/14: EA Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices, June 2000*).



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de