

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**Richtlinie
DKD-R 3-5**

**Kalibrierung von
Drehmomentmessgeräten für
statische Wechseldrehmomente**

Ausgabe 09/2018

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



	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2 / 21

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

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	3 / 21

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 3-5, Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180823G>

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* und des Fachausschusses *Drehmoment* des DKD in der Zeit von 1998 bis 2009.

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

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	4 / 21

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Anwendungsbereich	4
2	Symbole und Benennungen (in Ergänzung zu DIN 51309)	4
3	Kalibrierung der Drehmomentmessgeräte	5
3.1	Vorbereitung der Kalibrierung	5
3.2	Messbereichsanfangswert	5
3.3	Kalibrierumfang und -verfahren bei eigenständiger Kalibrierung für Wechseldrehmoment	5
3.4	Kalibrierumfang und -verfahren bei vorangegangener Kalibrierung für Rechts- und Linksdrehmoment nach DIN 51309	6
4	Auswertung bei Kalibrierung nach 3.3	6
4.1	Kalibrierergebnis X_{rw} und mechanische Remanenz t	6
4.2	Relative Spannweiten b_w und b'_w	6
4.3	Relative Nullpunktabweichung f_0	7
4.4	Relative Umkehrspanne bei Wechseldrehmoment h_w	7
4.5	Relative Interpolationsabweichung f_a	7
5	Auswertung bei Kalibrierung nach 3.4	7
6	Klassifizierung	8
6.1	Klassifizierung bei eigenständiger Kalibrierung für Wechseldrehmoment	8
6.2	Klassifizierung nach vorangegangener Kalibrierung für Rechts- und Linksdrehmoment nach DIN 51309	8
7	Dokumentation der Kalibrierergebnisse	8
Anhang A	Anwendung von kalibrierten Drehmomentmessgeräten für Wechseldrehmoment	9
Anhang B	Bestimmung der relativen erweiterten Messunsicherheit U für die Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten bei Wechseldrehmoment	16
Anhang C	Kalibrierablauf	18
Literaturhinweise		19

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	5 / 21

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 *Drehmoment* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 1998 erstellt.

Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum.

Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 3-5 (Ausgabe 2010). Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 3-5 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 12/1998 veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 2002, durch den DKD
2. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
3. Neuauflage: 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 2. Neuauflage

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie ergänzt DIN 51309 [3] um die Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten mit Wechseldrehmoment.

2 Symbole und Benennungen

siehe DIN 51309 und Tabelle 1

Formel-zeichen	Benennung	Einheit
b_w	relative Spannweite bei Wechseldrehmoment in verschiedenen Einbaustellungen	%
b'_w	relative Spannweite bei Wechseldrehmoment in gleicher Einbaustellung	%
t	mechanische Remanenz (siehe Anhang A)	-
X_{rw}	Kalibrierergebnis bei Wechseldrehmoment	-
X'	Anzeigewert für ein Drehmoment bei abnehmender Belastung	-
\bar{X}	Mittelwert der Anzeigewerte für ein Drehmoment aus Auf- und Abwärtsreihe	-
h_w	relative Umkehrspanne bei Wechseldrehmoment	%

Tabelle 1: zusätzliche Symbole, Einheiten und Benennung

3 Kalibrierung der Drehmomentmessgeräte

Nachfolgend wird zwischen einer separaten Kalibrierung für Wechseldrehmoment (Punkt 3.3) und einer Zusatzkalibrierung bei vorangegangener Kalibrierung mit Rechts- und Linksdrehmoment (Punkt 3.4) unterschieden.

3.1. Vorbereitung der Kalibrierung

siehe DIN 51309

3.2 Messbereichsanfangswert

Unter Berücksichtigung der Auflösung r , mit der die Anzeige des Gerätes abgelesen werden kann, muss das in ein Drehmomentmessgerät eingeleitete Mindestdrehmoment (Messbereichsanfangswert) die beiden folgenden Bedingungen erfüllen:

- a) Der Messbereichsanfangswert M_A muss den in Tabelle 3 der DIN 51309 angegebenen Werten entsprechen.
- b) Der Messbereichsanfangswert M_A sollte größer oder gleich $0,2 \cdot M_{\text{nom}}$ sein.

3.3 Kalibrierumfang und -verfahren bei eigenständiger Kalibrierung für Wechseldrehmoment

3.3.1 Vorbelastung

Nach dem Einbau in die Kalibriereinrichtung ist der Drehmomentaufnehmer dreimal, nach jeder Änderung der Einbaustellung einmal bis zum Endwert des zu kalibrierenden Messbereiches M_E mit folgendem Ablauf $0 \Rightarrow +M_E \Rightarrow 0 \Rightarrow -M_E \Rightarrow 0$ vorzubelasten.

3.3.2 Einbaustellung

Der Drehmomentaufnehmer ist vorzugsweise in drei verschiedenen Einbaustellungen durch Drehung des Aufnehmers um jeweils 120° um die Messachse zu kalibrieren. Davon abweichend sind vier Einbaustellungen (sinnvoll bei Adaption über Vierkantaufnahme) messtechnisch sinnvoll. Bei nur zwei Einbaustellungen (Klassen 1, 2 und 5) müssen sich diese um 90° oder 120° unterscheiden.

3.3.3 Durchführung der Kalibrierung

Die Anzahl der Messreihen ergibt sich nach Tabelle 2 aus der geforderten Klasse des Drehmomentmessgerätes; diese bestimmt somit den erforderlichen Kalibrierumfang (siehe auch Anhang C).

Klasse	Anzahl der Messreihen	
	in gleicher Einbaustellung	je weitere Einbaustellung
0,2 und 0,5	2	1
1, 2 und 5	1	

Tabelle 2: Anzahl der erforderlichen Messreihen

Die Mindestanzahl der Drehmomentstufen zusätzlich zur Stufe mit Drehmoment Null muss für zunehmendes und abnehmendes Drehmoment für die

- Klassen 0,2 und 0,5 10 (z. B. 20, 40, 60, 80, 100, -20 , -40 , -60 , -80 und $-100\% M_E$)
- Klassen 1, 2 und 5 6 (20, 60, 100, -20 , -60 und $-100\% M_E$)

betragen. Der Messbereichsanfangswert M_A muss Bestandteil der Kalibrierwerte sein. Ein Drehmomentmessgerät kann für mehrere Wechseldrehmomentmessbereiche getrennt kalibriert werden.

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	7 / 21

3.4 Kalibrierumfang und -verfahren nach vorangegangener Kalibrierung für Rechts- und Linksdrehmoment nach DIN 51309

Die zusätzlichen Messungen dienen zur experimentellen Bestimmung der mechanischen Remanenz. Sie wird bestimmt aus einer dreimaligen Vorbelastung nach Punkt 3.3.1. Eine weitere Kontrollmessreihe in gleicher Einbaustellung dient der experimentellen Überprüfung des aus der mechanischen Remanenz **berechneten** Kalibrierergebnisses für Wechseldrehmoment. Die Kontrollmessreihe soll den Anforderungen nach Punkt 3.3.3 bzgl. der Mindestanzahl der Drehmomentstufen entsprechen.

4 Auswertung bei Kalibrierung nach 3.3

4.1 Kalibrierergebnis X_{rw} und mechanische Remanenz t

Das Kalibrierergebnis einer Drehmomentstufe berechnet sich nach Gleichung (1) als Mittelwert der Anzeigewerte aus den Auf- und Abwärtsreihen aller Einbaustellungen (ohne Wiederholungsreihe in gleicher Einbaustellung), reduziert um den halben Remanenzwert.

$$X_{rw} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\bar{X}_j) - \frac{t}{2} \quad \text{mit} \quad \bar{X} = \frac{1}{2} (I + I') - I_0 \quad (1)$$

$$t = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n \bar{X}_{0,j} \quad (2)$$

Dabei ist:

n Anzahl der Messreihen bei verschiedenen Einbaustellungen

Von den Messergebnissen der 0°-Stellung werden die Wiederholungsmessungen zur Bestimmung von b'_w (Klasse 0,2 und 0,5) nicht in die Berechnung von X_{rw} einbezogen.

4.2 Relative Spannweiten b_w und b'_w

Die relativen Spannweiten in verschiedenen Einbaustellungen (b_w) und in gleicher Einbaustellung (b'_w) werden für jede Drehmomentstufe i aus den Mittelwerten der Aufwärts- und Abwärtsmessung nach den Gleichungen (3) und (4) errechnet.

$$b_w = \left| \frac{\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}}{X_{rw}} \right| \cdot 100\% \quad (3)$$

Dabei sind:

\bar{X}_{\max} bzw. \bar{X}_{\min} die in verschiedenen Einbaustellungen gemessenen Extremwerte der Mittelwerte aus Auf- und Abwärtsreihe.

$$b'_{w,i} = \left| \frac{\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}}{X_{rw}} \right| \cdot 100\% \quad (4)$$

Dabei sind:

\bar{X}_{\max} bzw. \bar{X}_{\min} die in gleicher Einbaustellung gemessenen Extremwerte.

Die zweite Aufwärtsreihe der 0°-Stellung (Klasse 0,2 bis 0,5) wird nicht in die Berechnung von b_w einbezogen.

Für den Fall $m = 1$ (Klasse 1 bis 5) wird der Wert für b'_w gleich dem errechneten Wert für b_w gesetzt (die Formel (4) ist für diesen Fall nicht anwendbar).

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	8 / 21

4.3 Relative Nullpunktabweichung f_0

Die Nullpunktanzeige wird vor jeder Messreihe und nach jeder Messreihe aufgezeichnet. Die Nullpunktlesung ist ungefähr 30 s nach völliger Entlastung vorzunehmen. Die relative Nullpunktabweichung wird nach Gleichung (5) für jede Einbaustellung berechnet.

$$f_0 = \max \left| \frac{I_f - I_0}{X_E} \right| \cdot 100\% \quad . \quad (5)$$

4.4 Relative Umkehrspanne bei Wechseldrehmoment h_w

Die relative Umkehrspanne h_w wird nach Gleichung (6) als Mittelwert der Absolutwerte der relativen Differenzen zwischen den Anzeigen der Aufwärts- und der Abwärtsreihen für jede Drehmomentstufe i ermittelt. Im Nullpunkt entspricht dieser Wert betragsmäßig dem relativen mechanischen Remanenzwert ($h_{w,0} = t / X_{rw}$).

$$h_w = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |I_j - I'_j|}{|X_{rw, j}|} \cdot 100\% \quad (6)$$

Dabei ist:

n Anzahl vergleichbarer Messreihen bei verschiedenen Einbaustellungen.

4.5 Relative Interpolationsabweichung f_a

Die relative Interpolationsabweichung wird für jede Drehmomentstufe i mit Hilfe einer Gleichung ersten Grades ohne Absolutglied für den Anzeigewert in Abhängigkeit vom Drehmoment ermittelt. Die benutzte Gleichung ist im Kalibrierschein anzugeben.

Die mathematische Bestimmung der Interpolationsgleichung muss so erfolgen, dass die Summe der Quadrate der absoluten Abweichungen im kalibrierten Messbereich ein Minimum ergibt.

Die relative Interpolationsabweichung errechnet sich aus Gleichung (7).

$$f_a = \frac{X_{rw} - X_a}{X_a} \cdot 100\% \quad . \quad (7)$$

5 Auswertung bei Kalibrierung nach 3.4, Berechnung der zusätzlichen Parameter

Der mechanische Remanenzwert bestimmt sich aus den Nullanzeigen der zweiten und dritten Vorbelastung mit Wechseldrehmoment nach Gleichung (8) zu

$$t = \frac{1}{2} \sum_{j=2}^3 (I'_{0,j} - I_{0,j}) \quad (8)$$

Hierin bedeuten:

I_0 Anzeige vor Beginn des Wechseldrehmomentzyklus (mit Rechtsdrehmoment beginnend)

I'_0 Anzeige bei Drehmoment Null nach Entlastung aus Rechtsdrehmoment

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	9 / 21

Das Kalibrierergebnis X_{rw} einer Drehmomentstufe für Wechseldrehmoment berechnet sich nach Gleichung (9) aus dem Mittelwert der Anzeigewerte aus den Auf- und Abwärtsreihen der gedrehten Einbaustellungen **bei Kalibrierung mit Rechts- und Linksdrehmoment** und dem Wert der mechanischen Remanenz t nach Gleichung (8).

$$X_{rw} = \frac{t}{2} \cdot \frac{M_K}{M_E} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{2} (I_j + I'_j) - I_{0,j} \right) \quad (9)$$

6 Klassifizierung

6.1 Klassifizierung bei eigenständiger Kalibrierung für Wechseldrehmoment

Grundlage der Klassifizierung für Wechseldrehmoment ist Tabelle 3 der DIN 51309. Anstelle der bei Rechts- bzw. Linksdrehmoment ermittelten Werte für b , b' und h werden die bei Wechseldrehmoment bestimmten Werte für b_w , b'_w und h_w für die Klassifizierung benutzt.

6.2 Klassifizierung nach vorangegangener Kalibrierung für Rechts- und Linksdrehmoment nach DIN 51309

Grundlage der Klassifizierung für Wechseldrehmoment ist Tabelle 3 der DIN 51309. Anstelle der bei Rechts- bzw. Linksdrehmoment ermittelten Werte für h wird der ermittelte Wert der relativen mechanischen Remanenz t/X_{rw} für die Klassifizierung benutzt.

7 Dokumentation der Kalibrierergebnisse

Über das Ergebnis der Kalibrierung mit Wechseldrehmoment stellt das Kalibrierlaboratorium einen Kalibrierschein nach DAkKS-DKD-5 [5] und Punkt 6.3 der DIN 51309 [3] aus.

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	10 / 21

Anhang A

Anwendung von kalibrierten Drehmomentmessgeräten für Wechseldrehmoment

Zusammenfassung: Drehmomentaufnehmer, die für quasistatische Anwendungen mit Wechseldrehmomentbelastung vorgesehen sind, werden auch quasistatisch mit Wechseldrehmoment kalibriert. Es werden Vorschläge für eine effiziente Gewinnung der Wechseldrehmomentkalibrierkurve aus den Kurven für die einfache Rechts- bzw. Linksdrehmomentkalibrierung diskutiert. Die mechanische Remanenz genannte Hysterese im Nullpunkt gibt Aufschluss über die Messunsicherheit bei Wechseldrehmomentbelastung und damit über die Eignung eines Aufnehmers für diesen Anwendungsfall. Im Allgemeinen werden bei der Verwendung eines solchen Aufnehmers keine Untersuchungen zur Lage des Nullpunktes, auf den sich die Messergebnisse beziehen, durchgeführt. Das führt dazu, dass mit dem doppelten Wert der bei der Wechseldrehmomentkalibrierung bestimmten Hysterese gerechnet werden muss.

Schlüsselwörter: Drehmomentkalibrierung, Wechseldrehmoment, mechanische Remanenz

1 Einleitung

Bei der einfachen Rechts- bzw. Linksdrehmomentkalibrierung wird der Aufnehmer für jede Richtung getrennt kalibriert. Auch hier werden Ausgleichskurven – bzw. Kalibrierwerte für den Fall einer linearen Interpolation – berechnet. Dieser Wert kann für Rechts- bzw. für Linksdrehmoment einzeln oder aber für beide Richtungen gemeinsam angegeben werden. Da mit tarierten Werten gerechnet werden muss, um ein von Null verschiedenes Aufnehmernullsignal bzw. den Einfluss der Einspannung des Aufnehmers auf dieses zu eliminieren, geht im Kalibrierwert die Information über das Nullsignal vor bzw. nach einer Belastung mit Rechts- oder Linksdrehmoment verloren. Der Kennwert „Rückkehr zur Null“ beschreibt die Reproduzierbarkeit des Nullsignals für Belastungen mit Drehmomenten in nur einer Richtung bzw. Kriecheflüsse. Untersuchungen an verschiedenen Aufnehmern haben nun aber gezeigt, dass das Nullsignal eines Aufnehmers – abhängig u.a. von den Materialien des Aufnehmers und der Dehnungsmessstreifen sowie von der Applikation – stark variieren kann, wenn der Aufnehmer einen Wechseldrehmomentzyklus durchfährt. Daraus resultieren für den Fall einer Wechselbelastung große Unterschiede im angezeigten Signal bei gleich wirkendem Drehmoment und starke Abweichungen von den für einseitige Kalibrierung ermittelten Kennwerten für die Umkehrspanne bzw. die Rückkehr zur Null.

2 Kalibrierung mit Wechseldrehmoment

Bei den folgenden Ausführungen wird davon ausgegangen, dass die betrachteten Aufnehmer ein verschwindend kleines Kriechen aufweisen, so dass dessen Einfluss auf das Kalibrierergebnis vernachlässigt werden kann. Während einer einfachen Kalibrierung wird das Aufnehmernullsignal im Laufe der Vorbelastungen und auch nach den Messreihen einen Wert annehmen und ihn im Rahmen der Reproduzierunsicherheit auch beibehalten. Dieser Wert kann für Rechts- (bezeichnet mit I_{0+}) bzw. für Linksdrehmoment (I_{0-}) sehr verschieden sein. Dabei ist die Differenz $t = I_{0+} - I_{0-}$ dieser beiden Werte ein typischer, mechanische Remanenz genannter Kennwert des Aufnehmers. Die Lage der Nullsignale auf der Messsignalachse ist allerdings von den Einbaubedingungen, der Vorlast, der Temperatur und anderen Faktoren abhängig, d.h. beide Werte können um einen gleichen Betrag größer oder kleiner sein.

Die Werte von Messreihen einer Rechtsdrehmomentkalibrierung werden bezüglich I_{0+} tariert, die für eine Linksdrehmomentkalibrierung bezüglich I_{0-} . Da die Interpolationsabweichungen in ein und dasselbe Diagramm (Bild 1a) eingezeichnet werden können, hat man den Eindruck, dass beide Kurven durch denselben Nullpunkt verlaufen. In Wirklichkeit muss man sich beide Kurvenäste um die Differenz der Nullpunkte versetzt denken (Bild 1b). Von dieser Darstellung ausgehend gelangt man auch direkt zum Diagramm für die Wechseldrehmomentkalibrierung: die Endpunkte der Kurven bei maximalem Rechts- oder Linksdrehmoment werden durch Kurvenzüge mit den Nullpunkten der gegenüberliegenden Kurven verbunden (Bild 2a).

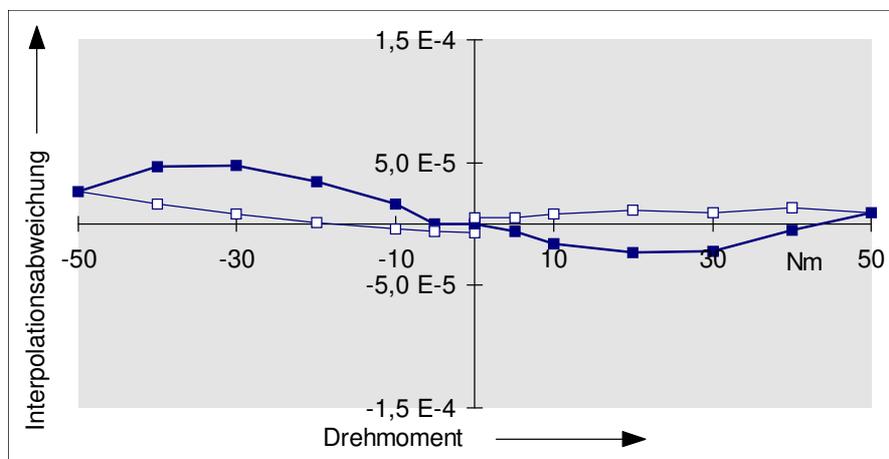


Bild 1a Kalibrierkurven für Rechts- und Linksdrehmoment, bezogen auf die jeweils zugehörigen Nullpunkte (volle Symbole: steigender Betrag des Drehmomentes, leere Symbole: fallender Betrag)

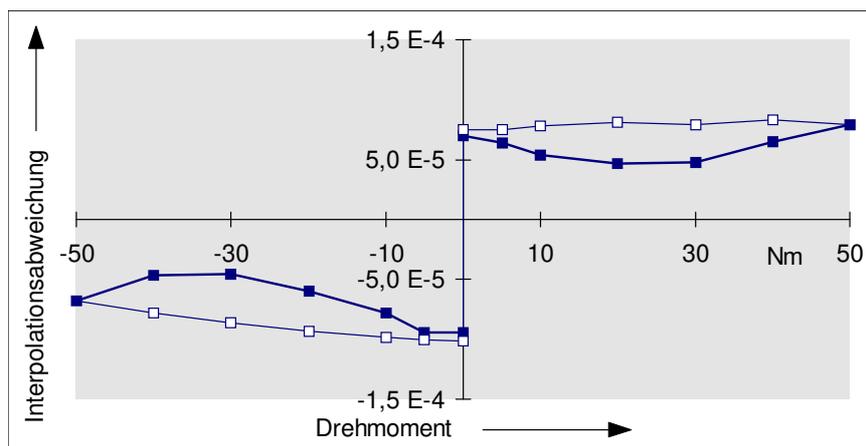


Bild 1b Kalibrierkurven für Rechts- und Linksdrehmoment, bezogen auf den Mittelwert der zugehörigen Nullpunkte

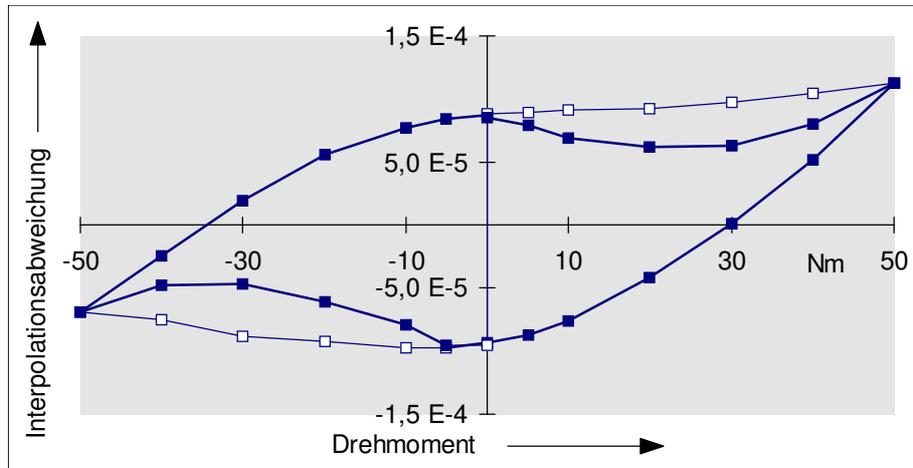


Bild 2a Beispiel für einen Drehmomentaufnehmer mit einem großen Wert der mechanischen Remanenz, gemessen am Wert der Umkehrspanne bei Rechts- bzw. Linksdrehmoment

In Bild 2a ist eine Kurve für einen Aufnehmer mit großem Wert der mechanischen Remanenz dargestellt, in Bild 2b ein Beispiel für einen kleinen Wert der mechanischen Remanenz. Wie man erkennen kann, sind die zusätzlichen Unsicherheitsanteile infolge der Wechseldrehmomentbelastung im ersten Fall mehrfach größer als die Umkehrspanne, die in reiner Rechts- oder Linksdrehmomentkalibrierung ermittelt wurde.

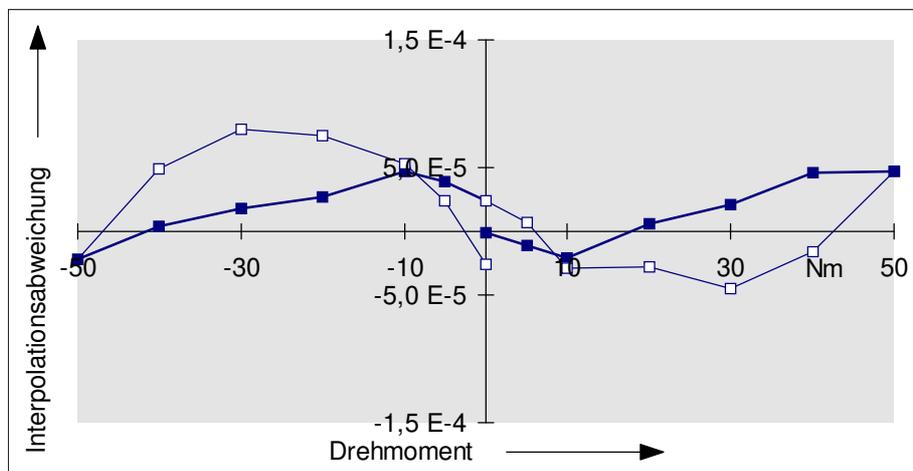


Bild 2b Beispiel für einen Drehmomentaufnehmer mit einem kleinen Wert der mechanischen Remanenz, gemessen am Wert der Umkehrspanne bei Rechts- bzw. Linksdrehmoment - dafür aber mit größerem Kriechen

3 Vorschlag für die Definition eines charakteristischen Parameters für Wechseldrehmoment

Wie Untersuchungen an einer Reihe von Drehmomentaufnehmern gezeigt haben, muss bei einem für Rechts- und Linksdrehmoment kalibrierten Aufnehmer nicht unbedingt eine

vollständige Wechseldrehmomentkalibrierung durchgeführt werden. Im Rahmen der Reproduzierbarkeit können aus den einfachen Rechts- und Linksdrehmomentkalibrierungen sowie aus Vorbelastungen in den entsprechenden Richtungen und aus der Bestimmung der Nullsignale I_{0+} und I_{0-} die Wechseldrehmomentkurve und die Wechseldrehmomentparameter mit akzeptabler Genauigkeit berechnet werden.

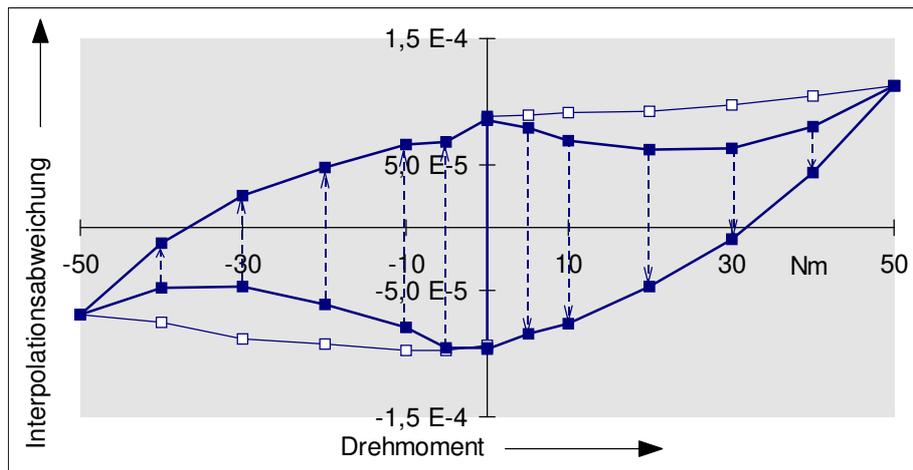


Bild 3 Berechnung des Kalibrierergebnisses für Wechseldrehmoment aus den Ergebnissen der Kalibrierung für Rechts- und Linksdrehmoment

Dabei ergibt sich die Wechseldrehmomentkurve aus folgenden Kurvenästen: die Teilkurven für betragsmäßig fallendes Drehmoment (von $+M_E$ bis 0 Nm und von $-M_E$ bis 0 Nm) entsprechen den Teilkurven für Rechts- (von $+M_E$ bis 0 Nm) bzw. Linksdrehmoment (von $-M_E$ bis 0 Nm), wobei diese im Nullpunkt um den Remanenzwert versetzt sind. Die Verbindung zwischen dem Nullpunkt der Rechtsdrehmomentkurve und dem Endpunkt der Linksdrehmomentkurve ergibt sich durch punktweise Subtraktion des $(1 - M / M_E)$ -fachen des Remanenzwertes τ vom entsprechenden Kurvenast für ansteigendes Drehmoment (Bild 3, rechts). Analog gilt für Linksdrehmoment, dass sich die Verbindung zwischen dem Nullpunkt der Linksdrehmomentkurve und dem Endpunkt der Rechtsdrehmomentkurve durch punktweise Addition des $(1 - |M| / |M_E|)$ -fachen des Remanenzwertes τ zum entsprechenden Kurvenast für betragsmäßig ansteigendes Drehmoment (Bild 3, links) ergibt. Wenn der Remanenzwert negativ ist, wird aus der Subtraktion im ersten Fall eine Addition, im zweiten Fall aus der Addition eine Subtraktion. Die in Experimenten ermittelten Differenzen zwischen der berechneten und der gemessenen Wechseldrehmomentkurve betragen in den meisten Fällen weniger als $1 \cdot 10^{-4}$ (Bilder 4a und 4b).

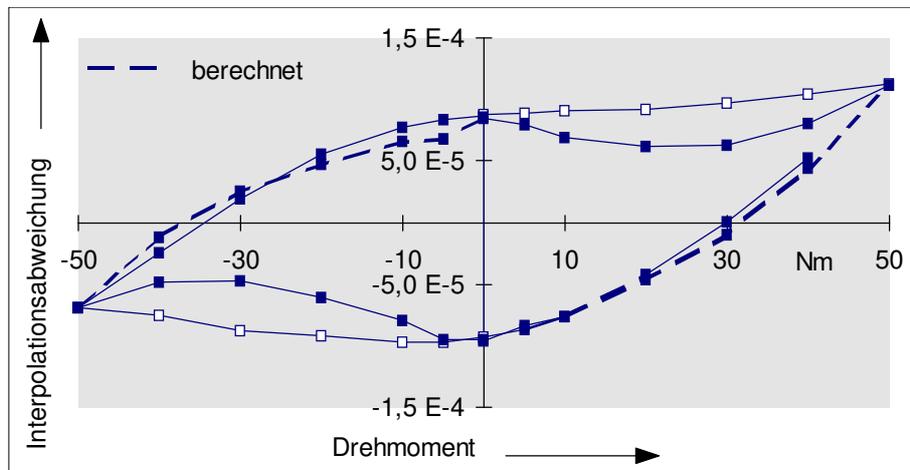


Bild 4a Kalibrierkurve mit berechneten Kurvenästen (Erläuterungen siehe Text) - 1 Schleife

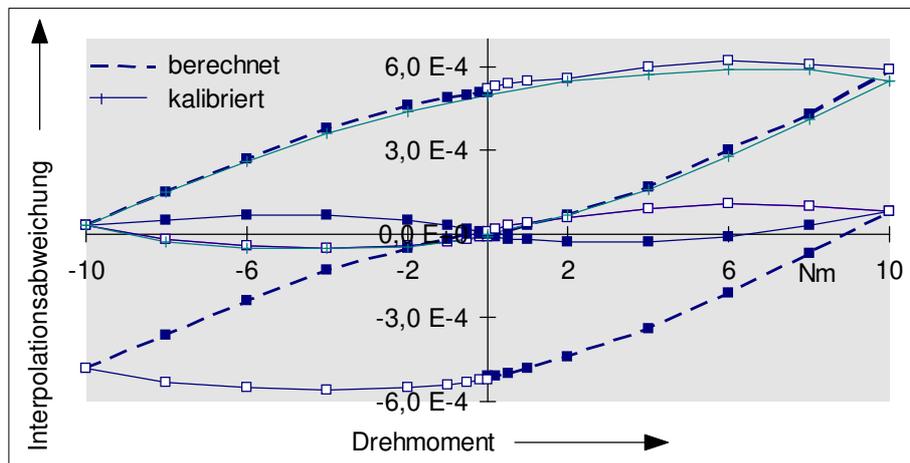


Bild 4b Kalibrierkurve mit berechneten Kurvenästen (Erläuterungen siehe Text) - 2 Schleifen angepasst an das Diagramm im Kalibrierschein

4 Anwendung von Drehmomentmessgeräten für Wechsel-drehmoment

Wenn ein Drehmomentaufnehmer mit Wechseldrehmoment kalibriert und die daraus folgenden Messunsicherheiten bestimmt wurden, können beim Einsatz dieses Aufnehmers zusätzliche Fehlereinflüsse auftreten, die aus folgendem Umstand resultieren: im Allgemeinen wird im eingebauten Zustand des Aufnehmers eine Tarierung der Anzeige ausgelöst. Da in den seltensten Fällen vorher Belastungen durchgeführt werden, um die Lage des Nullpunktes innerhalb der durch den Remanenzwert gegebenen Spanne festzulegen, mit anderen Worten also die Vorgeschichte des Aufnehmers nicht bekannt ist, muss man davon ausgehen, dass der gefundene Nullpunkt auch um den Remanenzwert größer oder kleiner hätte sein können.

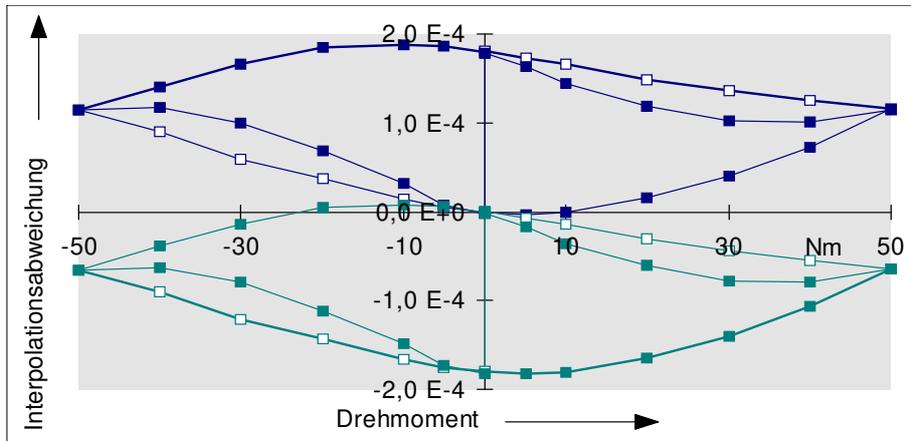


Bild 5a Bereich der Interpolationsabweichung (dicke Linien) für einen Wechsel-drehmomentaufnehmer mit unbekannter Vorgeschichte

Die Kurve aus Bild 2a könnte also die im Bild 5a dargestellten Extremallagen bezüglich des willkürlich gefundenen Nullpunktes haben. Daraus folgt, dass die Interpolationsabweichungen sogar das Doppelte des in der Wechseldrehmomentkalibrierung gefundenen Wertes betragen können! Während in der Kalibrierung die endwertbezogenen Messunsicherheiten in der Nähe der maximalen Drehmomentbeträge gegen Null gehen, muss bei der Anwendung der volle Remanenzwert angesetzt werden. Messwertbezogen spielen jedoch die Abweichungen bei kleinen Drehmomentbeträgen die dominierende Rolle.

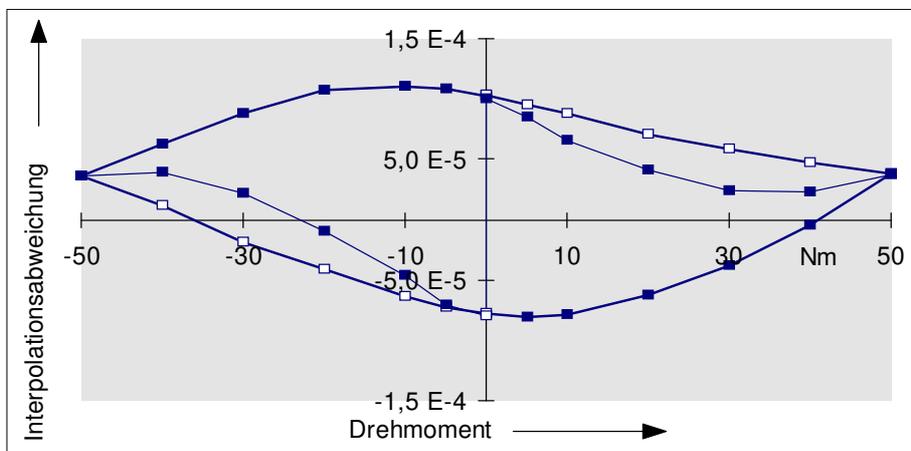


Bild 5b Bereich der Interpolationsabweichung (dicke Linien) für einen Wechsel-drehmomentaufnehmer mit bekannter Vorgeschichte

Bild 6a zeigt das Beispiel eines großen Rechtsdrehmomentes und nach Rückkehr kleine Schwingungen um den Nullpunkt bzw. das Gegenbeispiel – kleine Schwingungen um den Nullpunkt nach einem großen Linksdrehmoment und Rückkehr zur Null. Die absoluten Abweichungen sind so groß wie der Remanenzwert und können messwertbezogen Werte von einigen Prozent erreichen. Gerade bei den sehr viel interessanteren Messungen im Teillastbereich (kleine Drehmomente in unterschiedlichen Richtungen) können die Abweichungen – abhängig von der Vorgeschichte – sehr groß werden.

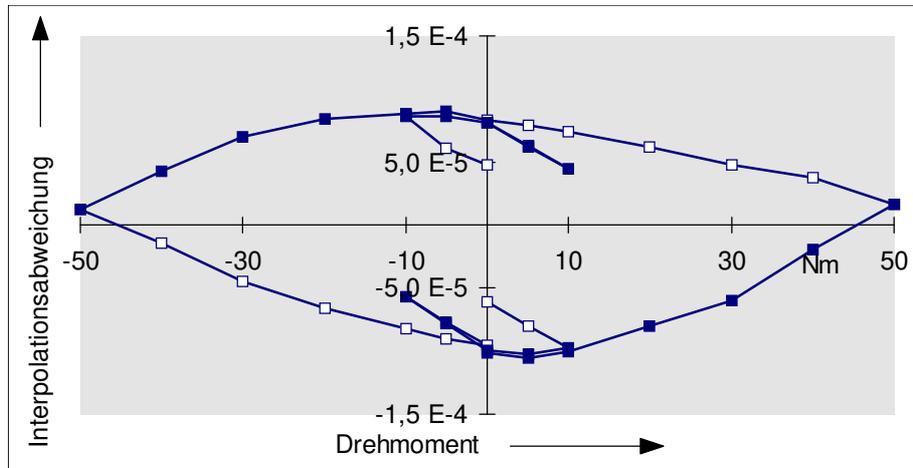


Bild 6a Wechseldrehmomentzyklen mit kleiner Amplitude für verschiedene Arten von Vorgeschichte

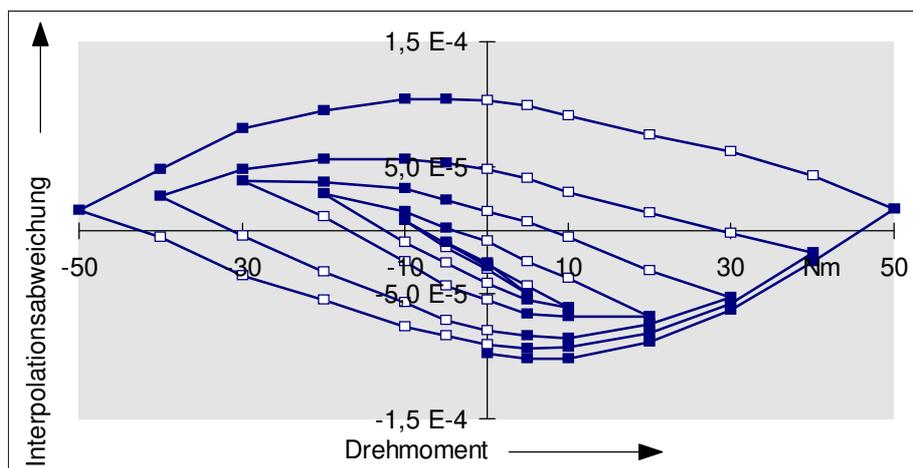


Bild 6b Wechseldrehmomentzyklen mit fallender Amplitude des Drehmomentes

Bild 6b zeigt den Fall sich wiederholt wechselnder Belastungszyklen zwischen $-M_E$ und $+M_E$, wobei der Betrag von M_E mit jedem Zyklus kleiner wird. Wie man erkennt, ist jeder Punkt innerhalb der Wechseldrehmomentkurve erreichbar. Außerdem wird die Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen mit sinkender Messbereichsspanne kleiner und beträgt z. B. bei einem Zyklus zwischen -20% und $+20\%$ nur noch 5% des Remanenzwertes.

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	17 / 21

Anhang B

Bestimmung der relativen erweiterten Messunsicherheit U für die Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten bei Wechseldrehmoment [4] [6] [7] [8] ¹

Die relative erweiterte Messunsicherheit U einer Wechseldrehmomentkalibrierung berechnet sich nach Gleichung (B.1) unter der Voraussetzung einer bekannten Vorgeschichte der Belastungsrichtung (siehe Anhang A, Punkt 4) aus der relativen erweiterten Messunsicherheit des Drehmomentmessgerätes

$$U_{MG,i} = |t| + k \cdot u_{MG,i} \quad k = 2 \quad (\text{B.1})$$

und der akkreditierten (bzw. im Kalibrierlaboratorium selbst bestimmten) relativen erweiterten Messunsicherheit der Drehmoment-Kalibriereinrichtung U_{KE} nach der Gleichung (B.2)

$$U = \sqrt{U_{MG}^2 + U_{KE}^2} \quad (\text{B.2})$$

u_{MG} wird aus den Messunsicherheitsbeiträgen berechnet, die sich aus den berechneten Kennwerten nach DIN 51309, Punkt 5.4.7, ergeben. Für die Unsicherheitsbeiträge werden die Verteilungsfunktionen und Werte der Standardmessunsicherheiten nach Tabelle B.1 benutzt. Die relative Messunsicherheit wird für jede Kalibrierstufe i errechnet.

$$u_{MG,i}^2 = \frac{1}{12} f_0^2 + \frac{1}{12} b_w'^2 + \frac{1}{8} b_w^2 + \frac{1}{24} f_{a,i}^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{r}{M_{K,i}} \right)^2 \quad (\text{B.3})$$

Für den Fall der zielgerichteten Kalibrierung in den Klassen 1 bis 5 ist im Kalibrierablauf keine Wiederholung der Messung in gleicher Einbaulage vorgesehen. Für die Berechnung sollte deshalb die Spannweite bei verschiedenen Einbaustellungen ebenfalls für den nicht ermittelten Wert bei gleicher Einbaustellung eingesetzt werden. Damit liegt das Ergebnis der Berechnung etwas sicherer, was bei Geräten dieser Klasse sinnvoll erscheint. Somit ergibt sich für die Klassen 1 bis 5:

$$u_{MG,i}^2 = \frac{1}{12} f_0^2 + \frac{1}{4} b_w^2 + \frac{1}{24} f_{a,i}^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{r}{M_{K,i}} \right)^2 \quad (\text{B.4})$$

Bei der Klasseneinteilung bestimmen die Einzelkriterien die Einhaltung einer Klasse, unabhängig von einem möglichen besseren Ergebnis aller weiteren Kennwerte. Im Gegensatz dazu wird bei der Messunsicherheitsberechnung ein aus allen Kennwerten berechneter Wert der Messunsicherheit bestimmt. Entsprechend der Verwendung des zu kalibrierenden Messgerätes kann der berechnete Wert der Messunsicherheit oder die ermittelte Klasse Priorität haben.

¹ Die hier vorgestellte Messunsicherheitsberechnung ist als vorläufige anzusehen. Sie ist konform mit der Betrachtungsweise in der DIN 51309 [3], die durch diese Richtlinie ergänzt wird (s. Abschnitt 1), und entspricht der Messunsicherheitsberechnung in der Richtlinie DKD-R 3-8 [1], folgt aber nicht streng der Schrift DAkkS-DKD-3 [4], welche die deutsche Übersetzung von EA-4/02 (EAL-R2) darstellt. Sie wird zu gegebener Zeit durch eine neue ersetzt.

Kennwert	Verteilungsfunktion	relative Varianz u^2
relative Nullpunktabweichung f_0	Rechteckverteilung	$u_0^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{f_0}{2} \right)^2$
relative Spannweite in verschiedenen Einbaustellungen b_w	U-Verteilung	$u_b^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{2} \right)^2$
relative Spannweite in gleicher Einbaustellung b'_w	Rechteckverteilung	$u_{b'}^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{b'}{2} \right)^2$
relative Interpolationsabweichung f_a	Dreieckverteilung	$u_a^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{f_a}{2} \right)^2$
Auflösung r	Rechteckverteilung	$u_r^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{r}{2 \cdot M_{K,i}} \right)^2$

Tabelle B.1: Verteilungsfunktionen für die Berechnung der Varianzen für die aus den experimentell bestimmten Spannweiten berechneten Kennwerte

Anhang C

Kalibrierablauf

Die nachfolgenden Bilder zeigen Varianten des Kalibrierablaufes für eine separate Wechsel-drehmoment-Kalibrierung nach Punkt 3.3 und eine Variante mit Zusatzuntersuchung nach Punkt 3.4 als Ergänzung zu einer Kalibrierung nach DIN 51309 [3] für Rechts- und Linksdrehmoment.

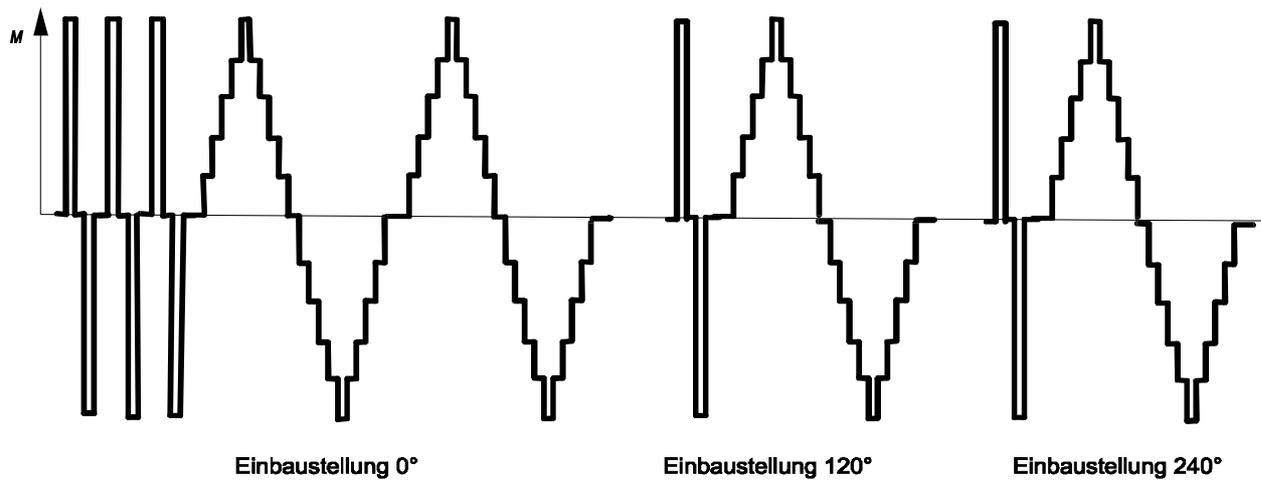


Bild C.1 :Beispiel der Vorbelastungen und Meßreihen für die Klassen 0,2 und 0,5 bei Kalibrierung nach 3.3

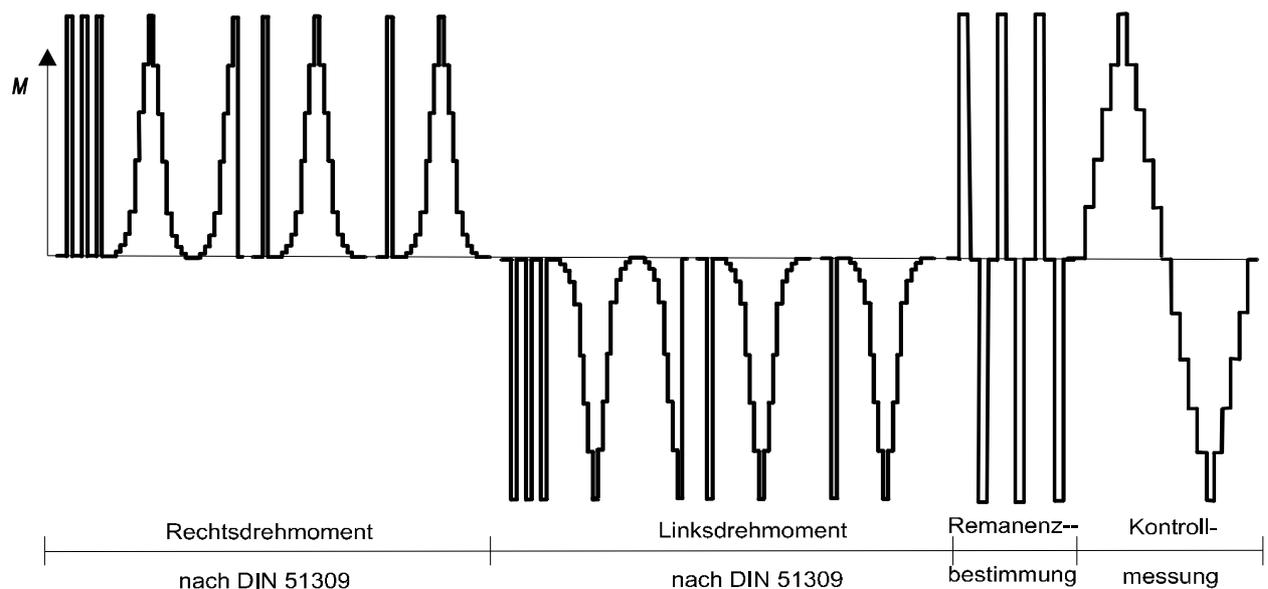


Bild C.2: Beispiel der Vorbelastungen und Meßreihen für Wechsel-drehmomentkalibrierung als Zusatzkalibrierung gemäß Punkt 3.4 zu einer Rechts- und Linksdrehmomentkalibrierung nach DIN 51309

	Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente https://doi.org/10.7795/550.20180823G	DKD-R 3-5	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	20 / 21

Literaturhinweise

- [1] DKD-R 3-8 *Statische Kalibrierung von Drehmomentschlüssel-Kalibriereinrichtungen*, PTB, Braunschweig, 2. Neuauflage 2018
- [2] DIN ISO 6789 *Handbetätigte Drehmomentwerkzeuge; Anforderungen und Prüfungen* (ISO 6789: 1992)
- [3] DIN 51309:1997 *Kalibrierung von Drehmomentmeßgeräten für statische Drehmomente*
- [4] DAkKS-DKD-3 *Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen*, Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH, 1. Neuauflage 2010 (deutsche Übersetzung von EA-4/02 [EAL-R2] *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, edition 1, April 1997 [revision of WECC Doc. 19-1990])
- [5] DAkKS-DKD-5 *Anleitung zum Erstellen eines Kalibrierscheines*, Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH, 1. Neuauflage 2010
- [6] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organisation for Standardisation (Geneva, Switzerland).
- [7] Sawla, A.: *Guidance for the determination of the best measurement capability of force calibration machines and uncertainty of calibration results of force measuring devices*, PTB-Mitteilungen 104 (1994) Heft 4, S. 237-242
- [8] EA-4/15 (EAL-G22) *Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements*, edition 1, August 1996
- [9] DKD-R 3-7 *Statische Kalibrierung von Referenz-Drehmomentschlüsseln*, PTB, Braunschweig, 2. Neuauflage 2018



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de