

Physikalisch- Technische Bundesanstalt




**Richtlinie
DKD-R 10-5**

**Statische Kalibrierung von
Drehmomentmessgeräten mit
Wechseldrehmoment**

Ausgabe 01/2020

[https:// doi.org/10.7795/550.20200203](https://doi.org/10.7795/550.20200203)



	Statische Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten mit Wechseldrehmoment https://doi.org/10.7795/550.20200203	DKD-R 10-5	
		Ausgabe:	01/2020
		Revision:	0
		Seite:	2 / 20

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

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

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

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

Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: 0531 5 92-8021

Internet: www.dkd.eu

	Statische Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten mit Wechseldrehmoment https://doi.org/10.7795/550.20200203	DKD-R 10-5	
		Ausgabe:	01/2020
		Revision:	0
		Seite:	3 / 20

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 10-5, Statische Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten mit Wechseldrehmoment, Ausgabe 01/2020, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20200203

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: Dirk Röske, PTB, Braunschweig und Nabil Lachkam, Porsche AG, Weissach, im Namen vieler weiterer, hier nicht genannter Kolleginnen und Kollegen

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

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. Außerdem kann durch die Umsetzung der Richtlinien der Stand der Technik auf dem jeweiligen Gebiet in die Laborpraxis Eingang finden.

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

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

Die vorliegende Richtlinie wurde im Rahmen des Fachausschusses *Drehmoment* erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt. Sie basiert auf der 3. Neuauflage der als DKD-R 3-5 (Ausgabe 09/2018, DOI: 10.7795/550.20180823G) herausgegebenen Richtlinie, die – um die Konsistenz zur 2005 neu erschienenen DIN 51309 zu verbessern – im Wesentlichen in folgenden Punkten verändert wurde:

- die Spannweite b_w wird als Vergleichspräzision bezeichnet
- die Spannweite b'_w wird als Wiederholpräzision bezeichnet
- die Spannweiten b_w und b'_w sowie die Umkehrspanne h_w werden jetzt als absolute Größen definiert und bekommen die neuen Bezeichnungen b_{at} und b'_{at} sowie h_{at} („at“ – alternating torque)
- die Interpolationsabweichung wird jetzt als Regressionsabweichung bezeichnet (zwar nicht konform zur DIN 51309:2005-12, aber trotzdem sinnvoll)
- der Unsicherheitsbeitrag der Spannweite b_w (jetzt Vergleichspräzision b_{at}) wird anstelle einer U-Verteilung jetzt mit einer Rechteckverteilung berechnet
- der bisher mit X gekennzeichneten Ergebnisgröße wird jetzt das Symbol Y zugeordnet
- der Begriff „Kennwert“ für die experimentell bestimmten Parameter wurde durch den Begriff „Kenngröße“ ersetzt (zwar nicht konform zur DIN 51309:2005-12, aber trotzdem sinnvoll)
- die Literaturliste wurde bereinigt.

Inhaltsverzeichnis

1	Anwendungsbereich.....	6
2	Symbole und Benennungen	6
3	Kalibrierung der Drehmomentmessgeräte	6
3.1	Vorbereitung der Kalibrierung	6
3.2	Messbereichsanfangswert	6
3.3	Kalibrierumfang und -verfahren bei eigenständiger Kalibrierung mit Wechseldrehmoment.....	6
3.3.1	Vorbelastung.....	6
3.3.2	Einbaustellung.....	6
3.3.3	Durchführung der Kalibrierung	7
3.4	Kalibrierumfang und -verfahren nach vorangegangener Kalibrierung für Rechts- und Linksdrehmoment nach DIN 51309.....	7
4	Auswertung bei Kalibrierung nach 3.3	7
4.1	Kalibrierergebnis Y_{at} und mechanische Remanenz t	7
4.2	Vergleichspräzision b_{at} und Wiederholpräzision b'_{at}	8
4.3	Nullpunktabweichung f_0	8
4.4	Umkehrspanne bei Wechseldrehmoment h_{at}	8
4.5	Regressionsabweichung f_a	8
5	Auswertung bei Kalibrierung nach 3.4, Berechnung der zusätzlichen Parameter	9
6	Klassifizierung	9
6.1	Klassifizierung bei eigenständiger Kalibrierung für Wechseldrehmoment	9
6.2	Klassifizierung nach vorangegangener Kalibrierung für Rechts- und Linksdrehmoment nach DIN 51309.....	9
7	Dokumentation der Kalibrierergebnisse.....	9
	Literatur	9
Anhang A	Anwendung von kalibrierten Drehmomentmessgeräten für Wechseldrehmoment	10
Anhang B	Bestimmung der relativen erweiterten Messunsicherheit W für die Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten mit Wechseldrehmoment	17
Anhang C	Kalibrierablauf	19

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie ergänzt DIN 51309 [1] um die Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten mit Wechseldrehmoment.

2 Symbole und Benennungen

Siehe dazu DIN 51309 [1] und Tabelle 1.

Tabelle 1: Zusätzliche Symbole, Einheiten und Benennung

Formelzeichen	Benennung	Einheit
	AE = Anzeigeeinheit des Ausgangssignals (z. B. N·m, mV/V, V, Hz)	
b_{at}	Vergleichspräzision bei Wechseldrehmoment	AE
b'_{at}	Wiederholpräzision bei Wechseldrehmoment	AE
t	mechanische Remanenz (siehe Anhang A)	AE
Y_{at}	Kalibrierergebnis bei Wechseldrehmoment	AE
Y'	Anzeigewert für ein Drehmoment bei abnehmender Belastung	AE
\bar{Y}	Mittelwert der Anzeigewerte für ein Drehmoment aus Auf- und Abwärtsreihe	AE
h_{at}	Umkehrspanne bei Wechseldrehmoment	AE

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 [1].

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 M_A) die beiden folgenden Bedingungen erfüllen:

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

3.3 Kalibrierumfang und -verfahren bei eigenständiger Kalibrierung mit 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).

Tabelle 2: Anzahl der erforderlichen Messreihen

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

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

- Klassen $\leq 0,5$: 10 (z. B. in % von M_E : 20, 40, 60, 80, 100, -20, -40, -60, -80 und -100)
- Klassen $> 0,5$: 6 (z. B. in % von M_E : 20, 60, 100, -20, -60 und -100)

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

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 Y_{at} 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.

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

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

Dabei ist n die Anzahl der Messreihen bei verschiedenen Einbaustellungen.

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

4.2 Vergleichspräzision b_{at} und Wiederholpräzision b'_{at}

Die Vergleichspräzision b_{at} – als Spannweite in verschiedenen Einbaustellungen – und die Wiederholpräzision b'_{at} – als Spannweite in gleicher Einbaustellung – werden für jede Drehmomentstufe i aus den Mittelwerten der Aufwärts- und Abwärtsmessung nach den Gleichungen (3) und (4) errechnet.

$$b_{at} = |\bar{Y}_{\max} - \bar{Y}_{\min}| \quad (3)$$

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

$$b'_{at} = |\bar{Y}_{\max} - \bar{Y}_{\min}| \quad (4)$$

Dabei sind \bar{Y}_{\max} bzw. \bar{Y}_{\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_{at} einbezogen.

Für den Fall der Klassen 1 bis 5 wird der Wert für b'_{at} gleich dem errechneten Wert für b_{at} gesetzt, (4) ist in diesem Fall nicht anwendbar.

4.3 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 Nullpunktabweichung wird nach Gleichung (5) für jede Einbaustellung berechnet.

$$f_0 = \max|I_f - I_0| \quad (5)$$

4.4 Umkehrspanne bei Wechseldrehmoment h_{at}

Die Umkehrspanne h_{at} wird nach Gleichung (6) als Mittelwert der Absolutwerte der Differenzen zwischen den Anzeigen der Aufwärts- und der Abwärtsreihen für jede Drehmomentstufe i ermittelt:

$$h_{at} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |I_j - I'_j| \quad (6)$$

Dabei ist n die Anzahl vergleichbarer Messreihen bei verschiedenen Einbaustellungen. Im Nullpunkt entspricht dieser Wert betragsmäßig dem Wert der mechanischen Remanenz ($h_{at,0} = t$).

4.5 Regressionsabweichung f_a

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

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

Die Regressionsabweichung errechnet sich aus Gleichung (7)

$$f_a = Y_{at} - Y_a \quad (7)$$

5 Auswertung bei Kalibrierung nach 3.4, Berechnung der zusätzlichen Parameter

Der Wert der mechanischen Remanenz t 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) und

I'_0 Anzeige bei Drehmoment Null nach Entlastung aus Rechtsdrehmoment.

Das Kalibrierergebnis Y_{at} 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).

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

6 Klassifizierung 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_{at} , b'_{at} und h_{at} 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 mechanischen Remanenz t für die Klassifizierung benutzt.

7 Dokumentation der Kalibrierergebnisse

Über das Ergebnis der Kalibrierung mit Wechseldrehmoment stellt das Kalibrierlaboratorium einen Kalibrierschein nach Punkt 6.3 der DIN 51309 [1] aus.

Literatur

- [1] DIN 51309: Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente, Ausgabe 2005-12

	Statische Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten mit Wechseldrehmoment https://doi.org/10.7795/550.20200203	DKD-R 10-5	
		Ausgabe:	01/2020
		Revision:	0
		Seite:	10 / 20

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

A.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 Regression – berechnet. Dieser Wert kann für Rechts- bzw. für Linksdrehmoment einzeln oder aber für beide Richtungen gemeinsam angegeben werden. Da die Berechnung mit tarierten Werten durchgeführt 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. Die Kenngröße „Rückkehr zur Null“ beschreibt die Reproduzierbarkeit des Nullsignals für Belastungen mit Drehmomenten in nur einer Richtung bzw. Kriecheinflüsse. 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 gleichem wirkenden Drehmoment und starke Abweichungen von den für einseitige Kalibrierung ermittelten Kenngrößen für die Umkehrspanne bzw. die Rückkehr zur Null.

A.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 eine typische, als mechanische Remanenz bezeichnete Kenngröße 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 Regressionsabweichungen 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 Linksdrehmomentmoment werden durch Kurvenzüge mit den Nullpunkten der gegenüberliegenden Kurven verbunden (Bild 2a).

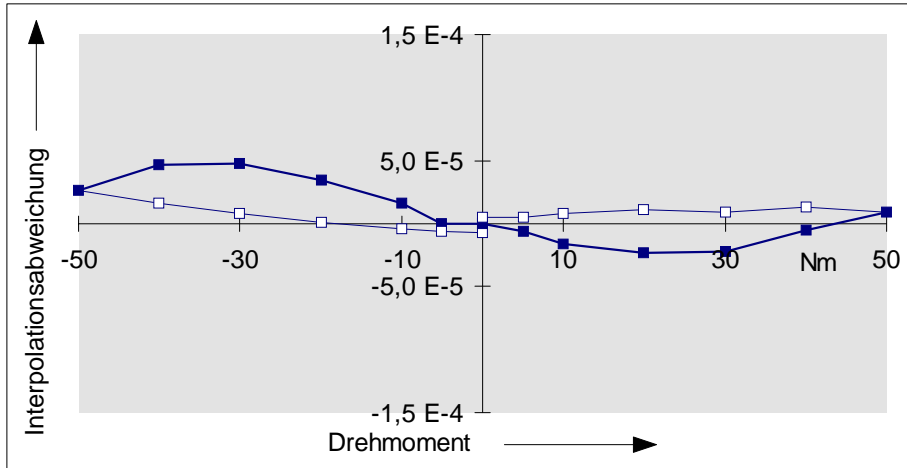


Bild 1a: Kalibrierkurven für Rechts- und Linksdrehmoment bezogen auf die jeweils zugehörigen Nullpunkte (volle Symbole: steigender Betrag des Drehmomentes, leere Symbole: fallender Betrag)

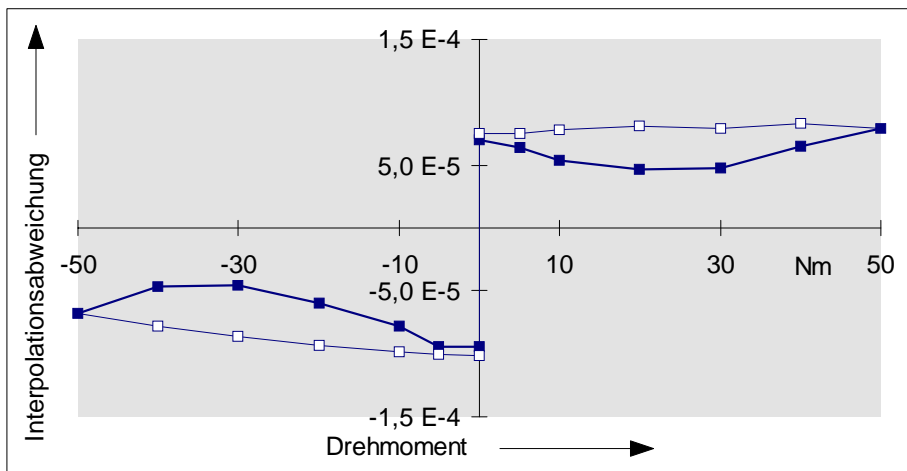


Bild 1b: Kalibrierkurven für Rechts- und Linksdrehmoment bezogen auf den Mittelwert der zugehörigen Nullpunkte

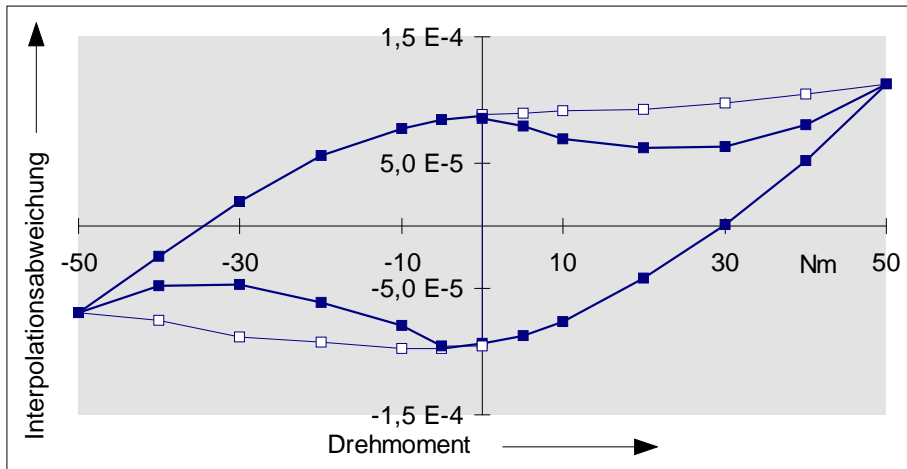


Bild 2a: Beispiel für einen Drehmomentaufnehmer mit einem großen Wert der mechanischen Remanenz, gemessen am Wert der Umkehrspanne bei Rechts- bzw. Linksdrehmoment

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.

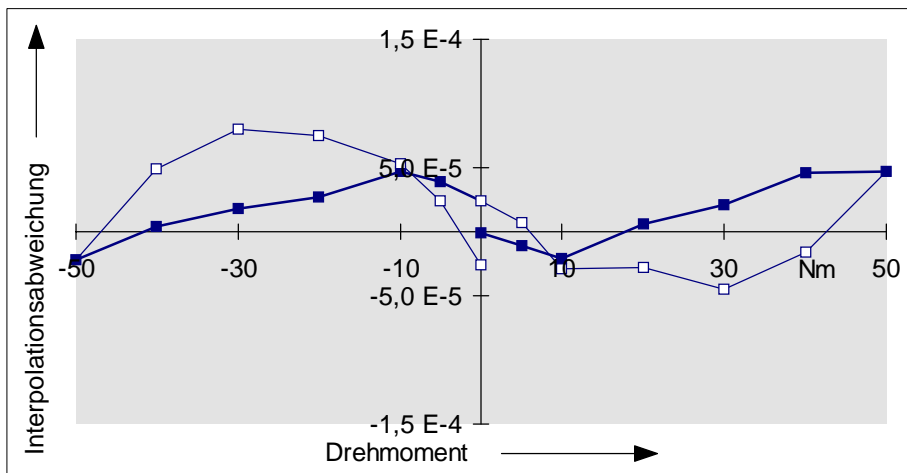


Bild 2b: Beispiel für einen Drehmomentaufnehmer mit einem kleinen Wert der mechanischen Remanenz, gemessen am Wert der Umkehrspanne bei Rechts- bzw. Linksdrehmoment - dafür aber mit größerem Kriechen

A.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.

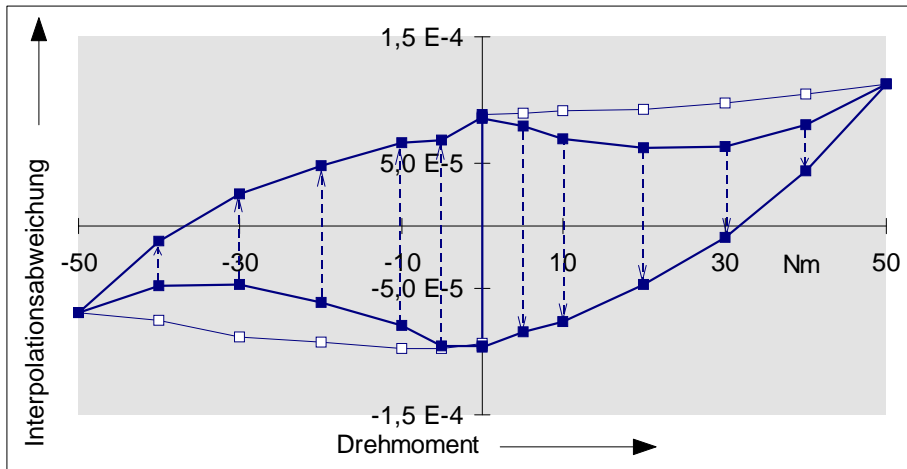


Bild 3: Berechnung des Kalibrierergebnisses für Wechseldrehmoment aus den Ergebnissen der Kalibrierung für Rechts- und Linksdrehmoment

Dabei ergibt sich die Wechseldrehmomentkurve aus folgenden Kurvenästen: die Teilkurven für betragsmäßig fallendes Drehmoment (von $+M_E$ bis $0 \text{ N}\cdot\text{m}$ und von $-M_E$ bis $0 \text{ N}\cdot\text{m}$) entsprechen den Teilkurven für Rechts- (von $+M_E$ bis $0 \text{ N}\cdot\text{m}$) bzw. Linksdrehmoment (von $-M_E$ bis $0 \text{ N}\cdot\text{m}$), 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 t 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 t 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.

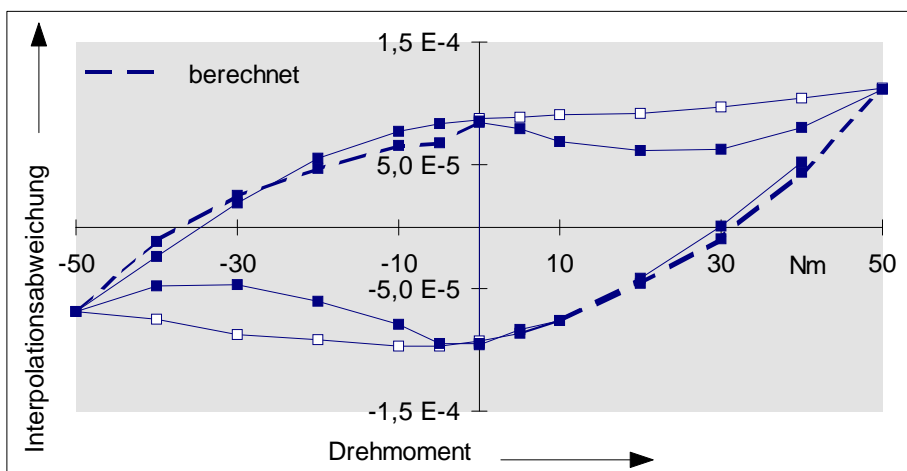


Bild 4a: Kalibrierkurve mit berechneten Kurvenästen (Erläuterungen siehe Text) - 1 Schleife

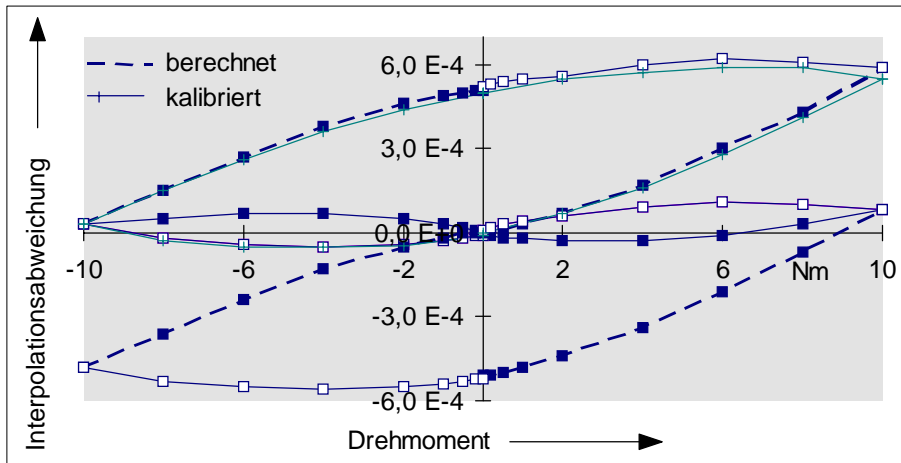


Bild 4b: Kalibrierkurve mit berechneten Kurvenästen (Erläuterungen siehe Text) - 2 Schleifen angepasst an das Diagramm im Kalibrierschein

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).

A.4 Anwendung von Drehmomentmessgeräten für Wechseldrehmoment

Wenn ein Drehmomentaufnehmer mit Wechseldrehmoment kalibriert und die daraus folgenden Messunsicherheiten bestimmt wurden, können beim Einsatz dieses Aufnehmers zusätzliche Fehlereinflüsse auftreten, die aus dem folgenden 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.

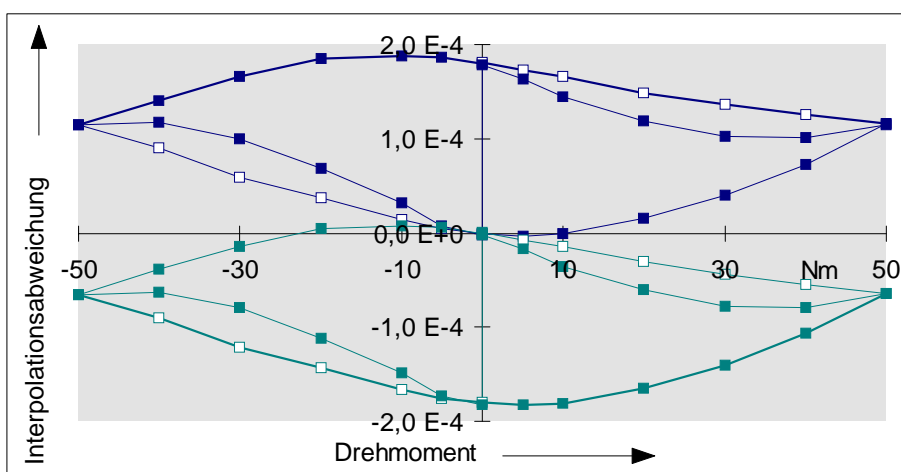


Bild 5a: Bereich der Regressionsabweichung (dicke Linien) für einen Wechseldrehmomentaufnehmer mit unbekannter Vorgeschichte

Die Kurve aus Bild 2a könnte also die im Bild 5a dargestellten Extremallagen bezüglich des willkürlich gefundenen Nullpunktes haben. Daraus folgt, dass die Regressionsabweichungen 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.

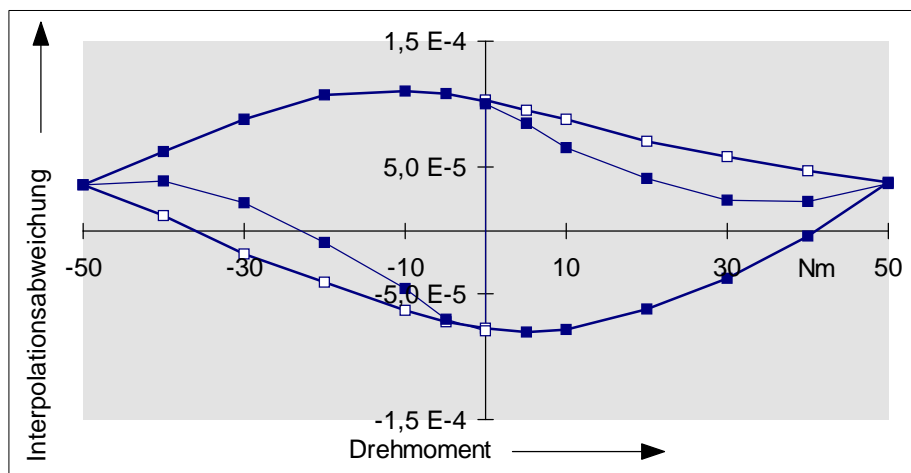


Bild 5b: Bereich der Regressionsabweichung (dicke Linien) für einen Wechseldrehmomentaufnehmer mit bekannter Vorgeschichte

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.

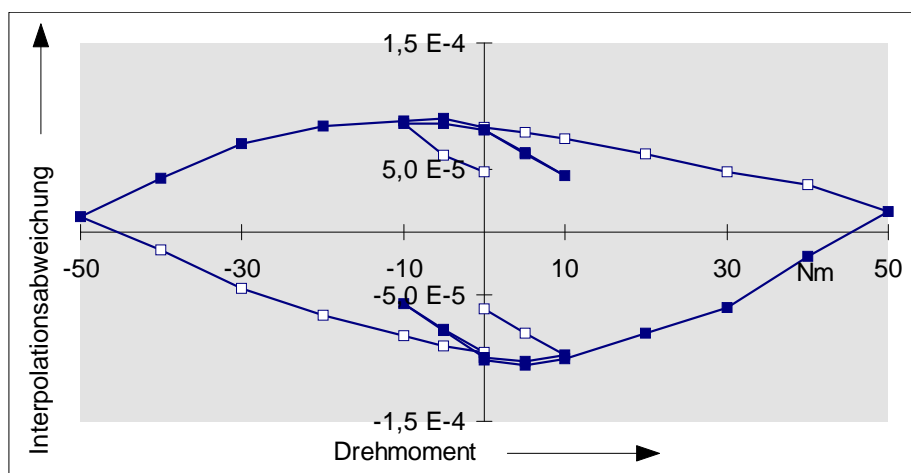


Bild 6a: Wechseldrehmomentzyklen mit kleiner Amplitude für verschiedene Arten von Vorgeschichte

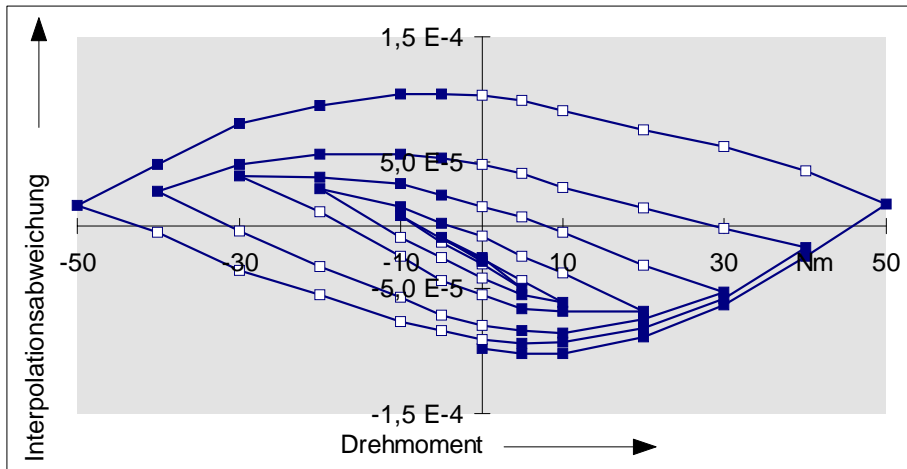


Bild 6b: Wechseldrehmomentzyklen mit fallender Amplitude des Drehmomentes

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.

Anhang B Bestimmung der relativen erweiterten Messunsicherheit W für die Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten mit Wechseldrehmoment

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

$$W_{MG,i} = \left| \frac{t}{Y_{at,i}} \right| + k \cdot w_{MG,i} \text{ mit } k = 2 \quad (\text{B.1})$$

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

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

Die relative Standardmessunsicherheit des Messgerätes w_{MG} wird aus den Messunsicherheitsbeiträgen berechnet, die sich aus den berechneten Kenngrößen 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.¹

$$w_{MG,i}^2 = \frac{1}{12} \left(\frac{f_0}{Y_E} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{b'_{at}}{Y_{at}} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{b_{at}}{Y_{at}} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{f_{a,i}}{Y_a} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{r}{M_{K,i}} \right)^2. \quad (\text{B.3})$$

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 Vergleichspräzision ebenfalls für den nicht ermittelten Wert der Wiederholpräzision 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:

$$w_{MG,i}^2 = \frac{1}{12} \left(\frac{f_0}{Y_E} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{b_{at}}{Y_{at}} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{f_{a,i}}{Y_a} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{r}{M_{K,i}} \right)^2. \quad (\text{B.4})$$

Bei der Klasseneinteilung bestimmen die Einzelkriterien die Einhaltung einer Klasse, unabhängig von einem möglichen besseren Ergebnis aller weiteren Kenngrößen. Im Gegensatz dazu wird bei der Messunsicherheitsberechnung ein aus allen Kenngrößen 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 Zum Modell der Auswertung s. [1].

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

Kenngröße	Verteilungsfunktion	relative Varianz w^2
Nullpunktabweichung f_0	Rechteckverteilung	$w_0^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{f_0}{2 \cdot Y_E} \right)^2$
Vergleichspräzision b_{at}	Rechteckverteilung	$w_b^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{b_{at}}{2 \cdot Y_{at}} \right)^2$
Wiederholpräzision b'_{at}	Rechteckverteilung	$w_{b'}^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{b'_{at}}{2 \cdot Y_{at}} \right)^2$
Regressionsabweichung f_a	Dreieckverteilung	$w_a^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{f_a}{2 \cdot Y_a} \right)^2$
Auflösung r	Rechteckverteilung	$w_r^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{r}{2 \cdot M_{K,i}} \right)^2$

Anhang C Kalibrierablauf

Die nachfolgenden Bilder zeigen Varianten des Kalibrierablaufes für eine separate Wechseldrehmoment-Kalibrierung nach Punkt 3.3 und eine Variante mit Zusatzuntersuchung nach Punkt 3.4 als Ergänzung zu einer Kalibrierung nach DIN 51309 [1] für Rechts- und Linksdrehmoment.

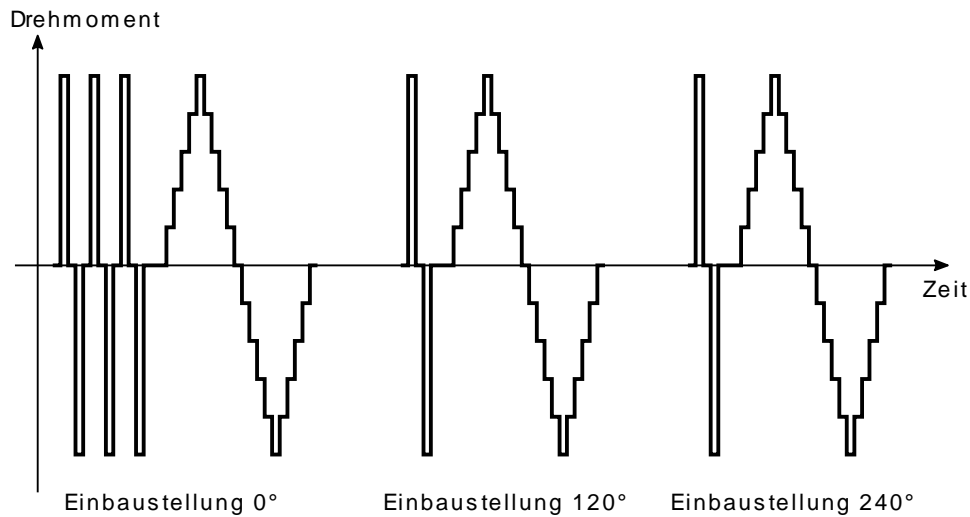


Bild C.1: Beispiel der Vorbelastungen und Messreihen für die Klassen 0,2 und 0,5 bei Kalibrierung nach 3.3

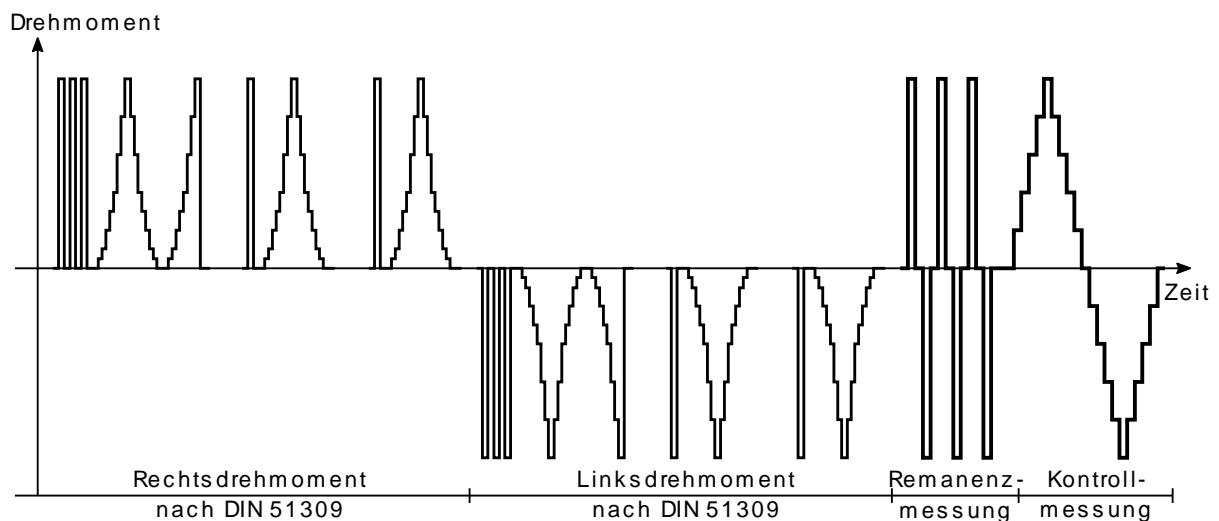


Bild C.2: Beispiel der Vorbelastungen und Messreihen für Wechseldrehmomentkalibrierung als Zusatzkalibrierung gemäß 3.4 zu einer Rechts- und Linksdrehmomentkalibrierung nach DIN 51309



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de