

# XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern

## XXVI.1 Räumliche Infrastruktur

Siehe QMH Kapitel 3.1.1, LAB27

## XXVI.2 Umgebungsbedingungen

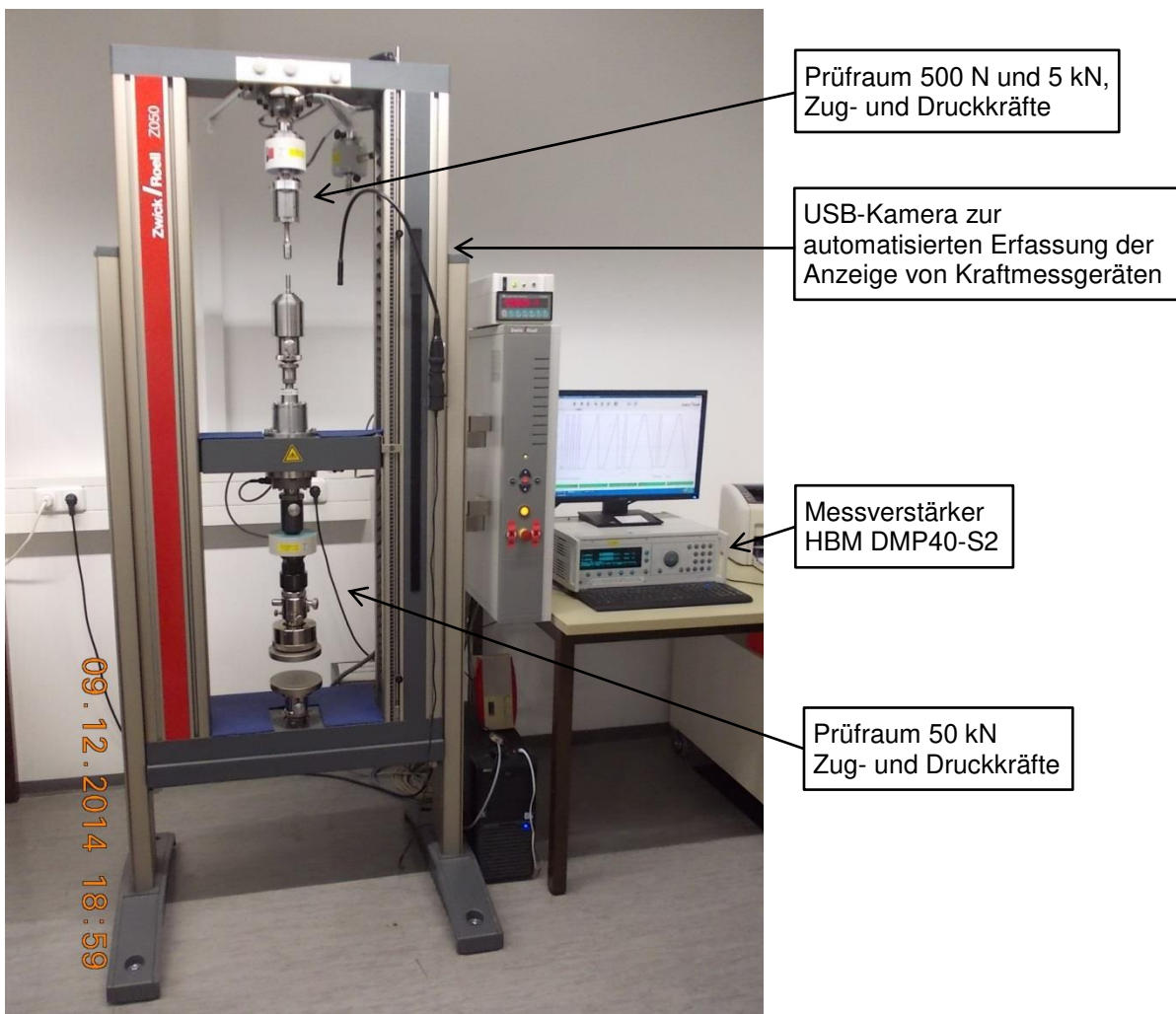
Siehe QMH Kapitel I.2

## XXVI.3 Messtechnische Rückführung und Messplatzbeschreibung

Siehe auch QMH Kapitel II

Die messtechnische Rückführung erfolgt über Transferaufnehmer HBM TOP-Z30A/500 N, HBM Z30A/5 kN und HBM TOP-Z4A/50 kN, welche bei Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (D-K-12029-01-00) nach DIN EN ISO 376:2011 akkreditiert kalibriert werden. Die in XXVI.5.2 beschriebenen Messunsicherheiten werden mithilfe der Transferaufnehmer in der Prüfmaschine verifiziert unter Durchführung von Kalibrierablauf A gemäß DAkkS-DKD-R 3-3 mit 10 Kraftstufen je Messreihe. Die Messwerterfassung erfolgt am Trägerfrequenzverstärker HBM DMP40-S2.

### XXVI.3.1 Zwick Roell Z050



Messplatz zur Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.16	von: KR/ PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	1

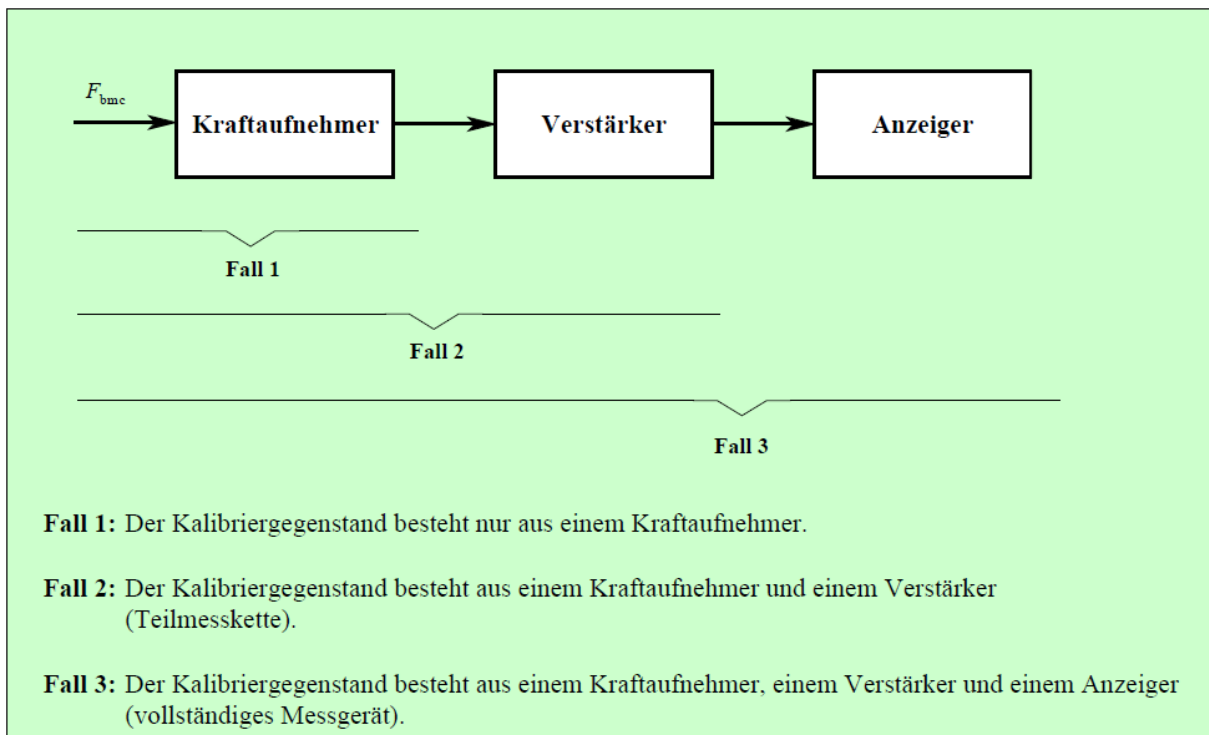
Für die Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern steht im Labor LAB 27 (vgl. Raumplan QMH 3.1.1) eine Universalprüfmaschine von Zwick Roell mit einer Nennkraft von 50 kN für elektromechanisch (Spindelantrieb) erzeugte Zug- und Druckkräfte zur Verfügung. Die Kalibrierung erfolgt automatisiert über die Software Zwick testexpert II. Dabei können Kalibrierkräfte durch Einsatz von Referenzkraftaufnehmern mit den Nennkräften 500 N (z. B. HBM Z30A/500N, esz-ID:052255), 5 kN (z. B. HBM Z30A/5kN, esz-ID:006904) und 50 kN (z. B. HBM TOP-Z4A/50kN, esz-ID:006905) erzeugt werden. Die Referenzkräfte werden im Verbund mit dem zweikanaligen Trägerfrequenzmessverstärker DMP40-S2 (225 Hz / 5 V) erfasst. Am zweiten Kanal kann simultan die vom Kalibriergegenstand erfasste Kraft gemessen werden. Ist der Kalibriergegenstand stattdessen ein Kraftmessgerät mit eigener Anzeige, so kann dessen angezeigte Kraft mithilfe einer USB-Kamera automatisiert erfasst werden.

## XXV.4 Kalibriergegenstände / Geltungsbereich

Das Labor kalibriert i.d.R. ausschließlich

- DMS-Kraftaufnehmer und -messgeräte im Nennkraftbereich von 500 N bis 50 kN

Dabei kann der Kalibriergegenstand einen der drei u.g. Fälle gem. DAkkS-DKD-R 3-3 Abb. 2 darstellen:



Fallunterscheidung Kalibriergegenstand

Eine Kalibrierung von piezoelektrischen, kapazitiven sowie induktiven Kraftaufnehmern wird nicht angeboten.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.16	von: KR/ PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	2

## XXV.5 Kalibrierverfahren und Messunsicherheitsberechnung

### XXV.5.1 Kalibrierverfahren

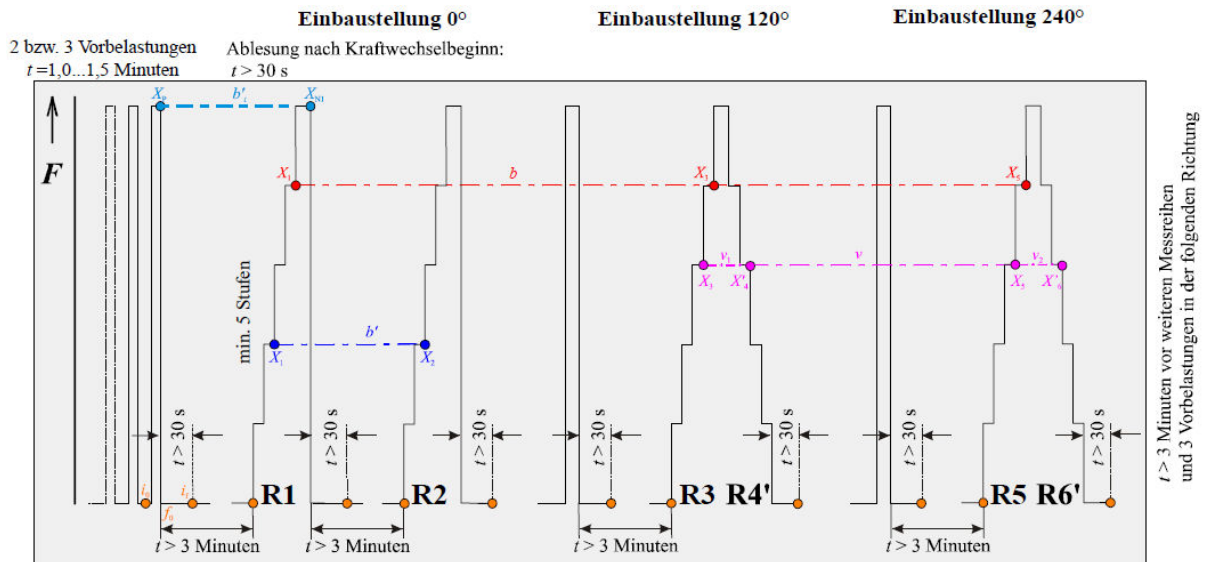
Gemäß DAkKS-DKD-R 3-3 sind vier Kalibrierverläufe möglich:

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

Parameter der Kalibrierverläufe

#### Ablauf A (Standard-DAkKS-Umfang esz AG):

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



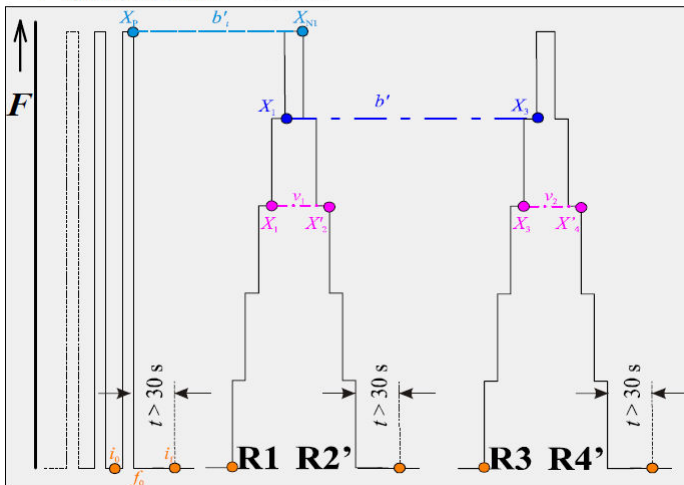
Kalibrierverlauf A

#### Ablauf B:

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

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.16	von: KR/ PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	3

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

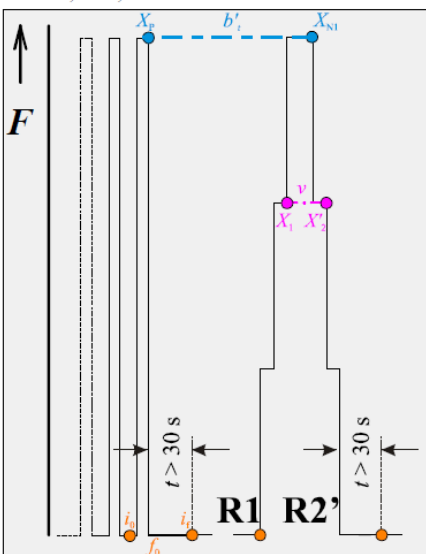


Kalibrierablauf B

**Ablauf C:**

Bei Ablauf C wird in nur einer Einbaustellung in einer Messreihe mit zu- und abnehmender Belastung kalibriert (vgl. Abbildung 7). Dabei kann die Wiederhol- und Vergleichspräzision nur aus a priori-Wissen stammen.

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

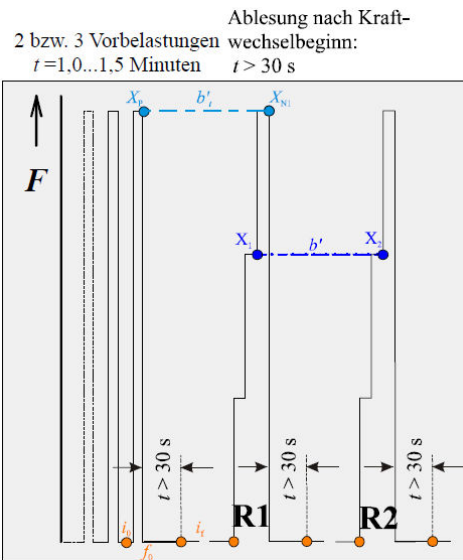


Kalibrierablauf C

**Ablauf D:**

Bei Ablauf D wird in nur einer Einbaustellung in zwei Messreihen mit zunehmender Belastung kalibriert. Dabei kann die Vergleichspräzision und die Umkehrspanne nur aus a priori-Wissen stammen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.16	von: KR/ PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	4



Kalibrierablauf D

Sofern vom Kunden kein anderer als der in DAkkS-DKD-R 3-3 beschriebenen Kalibrierabläufe gefordert ist, wird Ablauf A mit 5-8 Messpunkten je Messreihe durchgeführt.

Weitere Bedingungen der Kalibrierung:

- Nacheinander folgende Kalibrierung von Zug- und Druckkräften
- Drei Vorbelastungen, jeweils 1 Minute
- Belastungsschritte sind möglichst gleichmäßig über den Nennkraftbereich verteilt
- Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Belastungsschritten unterschreitet nicht 30 Sekunden
- Kalibrierung als Messkette (wird der Kraftaufnehmer mit einem Anzeigegerät des Kalibrierlaboratoriums kalibriert, wird dieses im Kalibrierschein angegeben)

Sofern gewünscht, kann eine Kalibrierung auch beispielsweise ohne Abwärtsreihen erfolgen. Die erweiterte Messunsicherheit kann dann ohne Umkehrspanneneinfluss ausgewiesen werden, wenn im Kalibrierzertifikat erwähnt wird, dass der Kalibriergegenstand auf Basis dieser Kalibrierung nur für zunehmende Kräfte zugelassen ist.

## XXV.5.2 Messunsicherheit

### XXVI.5.2.1 Bestimmung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit der K-BNME

Die kleinste angebbare Messunsicherheit wird gemäß der Beschreibung aus „Sawla, A.: *Uncertainty scope of the force calibration machines. Proc. IMEKO World Congress. Vienna, Austria, 2000*“ bestimmt.

Das Modell dieser Bestimmung wird dargestellt als

$$F_{K-BNME} = F_{RefTra} \cdot K_{Ref} \cdot K_{approx} \cdot K_{DriftRef} \cdot K_{temp} \cdot K_{realization,HBM} \cdot K_{spread,HBM} \cdot K_{spread,esz} \cdot K_{Hyst,esz} \cdot K_{drift_TraStd} \cdot K_{RelDev}$$

mit

$F_{K-BNME}$	Erzeugte Kraft der K-BNME
$F_{RefTra}$	Angezeigte Kraft des Referenzkraftaufnehmers der K-BNME
$K_{Ref}$	Kalibrierunsicherheit des Referenzaufnehmers aus dessen Kalibrierung
$K_{approx}$	Interpolationsabweichung des Korrekturpolynoms des Referenzaufnehmers
$K_{DriftRef}$	Drift des Referenzaufnehmers

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.16	von: KR/ PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	5

$K_{temp}$	Temperatureffekte
$K_{realization,HBM}$	Anschlussmessunsicherheit des Transferaufnehmers
$K_{spread,HBM}$	Empirische Standardabweichung des Transferaufnehmers in der Anschlusskalibrierstelle
$K_{spread,esz}$	Empirische Standardabweichung des Transferaufnehmers in der K-BNME
$K_{Hyst,esz}$	Gemessene Umkehrspanne des Transferaufnehmers in der K-BNME
$K_{drift\_TraStd}$	Drift des Transferaufnehmers
$K_{RelDev}$	Relative Differenz zwischen den Messwerten des Transferaufnehmers in der Anschlusskalibrierstelle und in der K-BNME

**Unsicherheitsbeiträge:**

$K_{Ref}$	Kalibrierunsicherheit des Referenzaufnehmers aus dessen Kalibrierung wird berechnet als gewurzelte Quadratesumme der gewichteten Beiträge $K_{approx}$ , $K_{realization,HBM}$ , $K_{spread,HBM}$ , $K_{spread,esz}$ , und $K_{Hyst,esz}$ – Der Beitrag lässt sich somit als Unsicherheit der Bestimmung des Korrekturpolynoms („Justage“) des Referenzaufnehmers der K-BNME verstehen.
$K_{approx}$	Interpolationsabweichung des Korrekturpolynoms des Referenzaufnehmers. Verwendet wird die Differenz zwischen interpolierten und erwarteten Werten des Transferaufnehmers als Grenzen einer Rechteckverteilung
$K_{DriftRef}$	Die Drift des Referenzaufnehmers wird als maximale Differenz der Ergebnisse aufeinanderfolgender Kalibrierungen ermittelt.
$K_{temp}$	Temperatureffekte: Die Temperaturempfindlichkeit von Referenz- und Transferaufnehmer ist erwartungsgemäß sehr stark korreliert. Es wird anhand der Herstellerangabe anhand einer maximalen Temperaturdifferenz von $\pm 1$ K eine maximale Abweichung von 0,001 % als Grenze einer Rechteckverteilung angenommen.
$K_{realization,HBM}$	Anschlussmessunsicherheit des Transferaufnehmers, entnehmbar aus dem Kalibrierschein der Anschlusskalibrierstelle (Normalverteilung, $k = 2$ ).
$K_{spread,HBM}$	Die empirische Standardabweichung des Transferaufnehmers in der Anschlusskalibrierstelle wird aus den Aufwärtsreihen in verschiedener Einbaulage errechnet (Normalverteilung).
$K_{spread,esz}$	Die empirische Standardabweichung des Transferaufnehmers in der K-BNME wird aus den Aufwärtsreihen in verschiedener Einbaulage errechnet (Normalverteilung).
$K_{Hyst,esz}$	Die Gemessene Umkehrspanne des Transferaufnehmers in der K-BNME wird aus dem relativen Mittelwert der Differenz der Auf- und Abwärtsreihen als Halbbreite berechnet (Rechteckverteilung).
$K_{drift\_TraStd}$	Die Drift des Transferaufnehmers wird als maximale Differenz der Ergebnisse aufeinanderfolgender Kalibrierungen in der Anschlusskalibrierstelle ermittelt.
$K_{RelDev}$	Die Relative Differenz zwischen den Messwerten des Transferaufnehmers in der Anschlusskalibrierstelle und in der K-BNME wird gemäß „Sawla, A.: <i>Uncertainty scope of the force calibration machines. Proc. IMEKO World Congress. Vienna, Austria, 2000</i> “, Gleichung (11), dreiecksverteilt gewichtet.

Das Modell der Auswertung ist eine einfache Produkt-/ Quotienten-Modellfunktion mit den Exponenten  $\pm 1$ . Durch die Verwendung von bezogenen Messunsicherheiten ergeben sich Sensitivitätskoeffizienten von ebenfalls  $\pm 1$ .

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.16	von: KR/ PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	6

**Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:**

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient $ c_i ^1$	Unsicherheitsbeitrag <sup>2</sup>
$X_i$	$x_i$	$a$		$w(x_i)$		$w_i(y)$
$F_{RefTra}$	$f_{RefTra}$					
$K_{Ref}$	1	$a_{Ref}$	Normal	$a_{Ref}$	1	$w_{Ref}$
$K_{approx}$	1	$a_{approx}$	Rechteck	$\frac{a_{approx}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{approx}$
$K_{DriftRef}$	1	$a_{Drift}$	Rechteck	$\frac{a_{Drift}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{Drift}$
$K_{temp}$	1	$a_{temp}$	Rechteck	$\frac{a_{temp}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{temp}$
$K_{realization,HBM}$	1	$a_{HBM}$	Normal, $k = 2$	$\frac{a_{HBM}}{2}$	1	$w_{HBM}$
$K_{spread,HBM}$	1	$a_{spread,HBM}$	Normal	$a_{spread,HBM}$	1	$w_{spread,HBM}$
$K_{spread,esz}$	1	$a_{spread,esz}$	Normal	$a_{spread,esz}$	1	$w_{spread,esz}$
$K_{Hyst,esz}$	1	$a_{Hyst,esz}$	Rechteck	$\frac{a_{Hyst,esz}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{Hyst,esz}$
$K_{drift_TraStd}$	1	$a_{drift_TraStd}$	Rechteck	$\frac{a_{drift_TraStd}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{drift_TraStd}$
$K_{RelDev}$	1	$a_{RelDev}$	Dreieck	$\frac{a_{RelDev}}{\sqrt{6}}$	1	$w_{RelDev}$
$F_{K-BNME}$	rel. Standardunsicherheit			$w(F_{K-BNME}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 w_i^2(y)}$		
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(F_{K-BNME}) = 2 \cdot w(F_{K-BNME})$		

Zur Berechnung der angestrebten Messunsicherheit werden die berechneten Werte auf eine praktikable Obergrenze (cut-off-Wert) aufgerundet. Für die Validierung wird gefordert, dass die Differenz zwischen den Messwerten des Transferaufnehmers in der Anschlusskalibrierstelle und in der K-BNME maximal 80 % der angestrebten Unsicherheit erreichen darf, bevor ein neues Polynom des Referenzaufnehmers berechnet werden muss.

<sup>1</sup>  $c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$

<sup>2</sup> relative Beiträge werden mit  $w$  referenziert; absolute Beiträge mit  $u$

**XXVI.5.2.2 Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Kraftmessgeräten mit der K-BNME**

$$\Delta F = \frac{(F_{DUT} - F_{Ref})}{F_{Ref}} \cdot K_{K-BNME} \cdot K_{rep} \cdot K_{rev} \cdot K_{zer} \cdot K_{rot} \cdot K_t$$

mit

- $\Delta F$  gesuchte relative Abweichung des Messobjektes
- $F_{DUT}$  angezeigtes Messergebnis des Messobjektes (DUT)
- $F_{Ref}$  aus dem angezeigten Spannungsverhältnis des Referenzaufnehmers mit dessen Polynom errechnete Kraftstufe
- $K_{K-BNME}$  Unsicherheit der K-BNME
- $K_{rep}$  Gemessene Wiederholpräzision des Messobjektes in der K-BNME
- $K_{rev}$  Gemessene Hysterese (Umkehrspanne) bei der Kalibrierung des Messobjekts in der K-BNME
- $K_{zer}$  Gemessene Nullpunktabweichung des Messobjekts
- $K_{rot}$  Gemessene Spannweite der Messwerte der Aufwärtsreihen bei unterschiedlichen Einbaulagen
- $K_t$  Gemessene Kalibrierendwertabweichung des Messobjekts

**Unsicherheitsbeiträge:**

- $K_{K-BNME}$  Als relative erweiterte Messunsicherheit der K-BNME wird die angestrebte Messunsicherheit (normalverteilt,  $k=2$ ) gemäß XXVI.5.2.1 verwendet.
- $K_{rep}$  Die Wiederholpräzision des Mittelwertes des Messobjekts gemäß DAkkS-DKD-R 3-3 wird als Grenze einer Rechteckverteilung angesetzt.
- $K_{rev}$  Die gemessene Umkehrspanne des Messobjekts gemäß DAkkS-DKD-R 3-3 wird als Grenze einer Rechteckverteilung angesetzt.
- $K_{zer}$  Die Nullpunktabweichung des Messobjekts gemäß DAkkS-DKD-R 3-3 wird als Grenze einer Rechteckverteilung angesetzt.
- $K_{rot}$  Die Spannweite der Messwerte der Aufwärtsreihen bei unterschiedlichen Einbaulagen wird gemäß DAkkS-DKD-R 3-3 als Grenze einer u-förmigen Verteilung angesetzt.
- $K_t$  Die Kalibrierendwertabweichung des Messobjekts ist die rel. Wiederholpräzision beim Endwert zwischen letzter Belastung der 1. Messreihe (R1) und 2. Messreihe (R2). Gemäß DAkkS-DKD-R 3-3 wird sie als Grenze einer Rechteckverteilung angesetzt.

Das Modell der Auswertung ist eine einfache Produkt-/ Quotienten-Modellfunktion mit den Exponenten  $\pm 1$ . Durch die Verwendung von bezogenen Messunsicherheiten ergeben sich Sensitivitätskoeffizienten von ebenfalls  $\pm 1$ .

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.16	von: KR/ PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	8



**Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:**

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag <sup>4</sup>
$X_i$	$x_i$	$a$		$w(x_i)$	$ c_i ^3$	$w_i(y)$
$F_{DUT}$	$f_{DUT}$					
$F_{Ref}$	$f_{Ref}$					
$K_{K-BNME}$	0	$a_{Ref}$	Normal (k=2)	$\frac{a_{Ref}}{2}$	1	$w_{Ref}$
$K_{rep}$	0	$a_{rep} = \frac{b'}{2}$	Rechteck	$\frac{a_{rep}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{rep}$
$K_{rev}$	0	$a_{rev} = \frac{\vartheta}{2}$	Rechteck	$\frac{a_{rev}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{rev}$
$K_{zer}$	0	$a_{zer} = f_0$	Rechteck	$\frac{a_{zer}}{\sqrt{3}}$	1	$w_{zer}$
$K_{rot}$	0	$a_{rot} = \frac{b}{2}$	U-förmig	$\frac{a_{rot}}{\sqrt{2}}$	1	$w_{rot}$
$K_t$	0	$a_{rep} = \frac{b'_t}{2}$	Rechteck	$\frac{a_t}{\sqrt{3}}$	1	$w_t$
$\Delta F$	$\frac{(f_{DUT} - f_{Ref})}{f_{Ref}}$			$w(\Delta F) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 w_i^2(y)}$		$w(\Delta F)$
	rel. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$W(\Delta F) = 2 \cdot w(\Delta F)$		$W(\Delta F)$

<sup>3</sup>  $c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$

<sup>4</sup> relative Beiträge werden mit  $w$  referenziert; absolute Beiträge mit  $u$

Die Zahlenwerte der Berechnungen sind der Tabelle

- <http://dms.esz-ag.de/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XXVI-Zwick050.xlsx>

zu entnehmen, die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis und nachfolgend aufgeführt.

### **XXV.5.2.2 Ergebnisse**

Es erfolgt eine Festlegung der Messunsicherheit für die Kalibrierung von Kraftmessgeräten und -aufnehmern in Zug- und Druckkraftichtung gemäß nachfolgender Tabelle:

Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren	kleinste angebbare Messunsicherheit	Bemerkungen
Kraft  Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	50 N            bis    50 kN	Zug- und Druckkraft gemäß DAkkS-DKD-R 3-3	0,05 % · <i>F</i>	



© esz AG, 2018

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

<b>Ausgabe:</b>	<b>erstellt</b>	<b>geprüft/ genehmigt</b>	<b>Kapitel</b>	<b>Seite</b>
DMS.16	von: KR/ PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Kalibrierung von Kraftmessgeräten und Kraftaufnehmern	11