

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**DKD**

---

**Richtlinie  
DKD-R 9-4**

**Dynamische Kalibrierung von  
Werkstoffprüfmaschinen**

---

Ausgabe 04/2023

<https://doi.org/10.7795/550.20240606>



	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	2 / 58

## 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-tzGeschäftsstelle  
Bundesallee 100      38116 Braunschweig  
Postfach 33 45      38023 Braunschweig  
Telefon Sekretariat: +49 531 592-8021  
Internet:              www.dkd.eu

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	3 / 58

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 9-4 Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen, Ausgabe 04/2023, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.

DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20240606>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7866947> (en)

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:

Siegfried Gerber (Federführung), Arnd Nitschke und Steffen Neumann:  
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), Kalibrierung, Stuttgart;

Dr. Rolf Kumme, Dr. Falk L. Tegtmeier, Jonas Sander und Frank Hauschild:  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Fachbereich 1.2 Festkörpermechanik,  
Braunschweig;

Rafael Soares de Oliveira and Renato Reis Machado  
National Institute of Metrology, Quality and Technology (Inmetro), Division of Mechanical  
Metrology, Rio de Janeiro, Brasilien;

Mikolaj Wozniak:  
RISE Research Institutes of Sweden, Department Measurement Technology, Borås,  
Schweden;

Dr. Haldun Dizdar und Dr. Bulent Aydemir:  
Turkiye Bilimsel ve Teknolojik Arastirma Kurumu (TÜBİTAK ÜME), Türkei;

Jani Korhonen:  
National Metrology Institute VTT MIKES, Force and torque, Kajaani, Finnland;

Dr. Miha Hiti:  
Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG), Metrology Laboratory,  
Ljubljana, Slowenien;

Lukáš Vavrečka:  
Czech Metrology Institute (CMI), Force and Torque department, Prague, Tschechische  
Republik;

Dr. Schönteich, MPA Braunschweig;

Dr. Jörg Ellermeier und Armin Hecht, MPA Darmstadt;

Helge Reinold, MPA Dortmund.

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Werkstoffprüfmaschinen* des DKD und dem VMPA-Arbeitskreis *Prüfmaschinen und Prüfgeräte*.

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	4 / 58

## 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 dafürsprechen.

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.

Diese Richtlinie ist der veröffentlichte Arbeitsentwurf 04/2023 (deutsche Übersetzung<sup>1</sup>), entwickelt im Projekt 18SIB08 ComTraForce [1], das von der PTB Braunschweig koordiniert wurde. Das Projekt wurde aus Mitteln des EMPIR-Programms finanziert, kofinanziert von den Mitgliedsstaaten und dem Europäischen Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizon 2020“.



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

<sup>1</sup> Die Anhänge wurden nicht übersetzt.

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	5 / 58

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	7
1.1	Zweck und Anwendung der Richtlinie .....	7
1.2	Definition von dynamischen Kräften und der dynamischen Kalibrierung .....	7
1.3	Definition des TransfERNORMALS .....	7
1.4	Grundprinzip des Kalibrierverfahrens .....	7
1.5	Kalibrieresetup .....	8
2	Symbole .....	8
3	Vorbereitungen .....	13
3.1	Maschinenregler .....	13
3.2	Statische Kalibrierung der Werkstoffprüfmaschine .....	13
3.3	Laststrangausrichtung .....	13
3.4	Parametermatrix .....	13
3.5	Statische Kalibrierung des TransfERNORMALS .....	14
3.6	Dynamische Kalibrierung des TransfERNORMALS .....	14
3.7	Messverstärker des TransfERNORMALS .....	14
3.8	Datenerfassungssystem .....	15
4	Dynamische Kalibrierung der Werkstoffprüfmaschine .....	15
4.1	Vorbereitung der zyklischen Belastung .....	15
4.2	Die zyklische Belastung .....	16
4.3	Auswertung der Messdaten .....	16
4.4	Nächster Parametersatz .....	20
5	Messunsicherheit .....	21
5.1	Messunsicherheit des TransfERNORMALS .....	21
5.1.1	Unsicherheit der dynamischen Kalibrierung des TransfERNORMALS .....	22
5.1.2	Unsicherheit der statischen Kalibrierung des TransfERNORMALS .....	22
5.1.3	Anwendungsbezogene Messunsicherheiten .....	22
5.1.4	Messverstärker des TransfERNORMALS .....	23
5.2	Messunsicherheit der Maschine .....	23
5.2.1	Unsicherheit der statischen Kalibrierung .....	24
5.2.2	Drift der Maschine .....	24
5.2.3	Temperaturbeitrag .....	24
5.2.4	Auflösung .....	25
5.2.5	Nullpunktdrift .....	25
5.2.6	Laststrangausrichtung .....	26
5.2.7	Messverstärker der Maschine .....	26
5.3	Unsicherheit durch unkompenSIerte Massen .....	26
5.3.1	Beschleunigung (der unkompenSIerten Massen) .....	27
5.3.2	UnkompenSIerte Massen .....	27
5.4	Verfahren .....	27
5.4.1	Wiederholbarkeit .....	27

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	6 / 58

5.4.2	Fitfunktion.....	28
5.4.3	Synchronisation .....	28
6	Literatur.....	29
	Anhang.....	30
A	Generally.....	30
A.1	Necessity of Calibration .....	30
A.2	Dynamic Calibration Compared to Others.....	30
B	Practical and Auxiliary Procedures (Annotations) .....	31
B.1	Paths for the Analysis of Characteristic Parameters .....	31
B.2	Factors Relevant to the Mounting of the Transfer Standard to the Machine .....	32
B.3	Specific Procedures for the Correct Load Series Application .....	33
B.4	Stiffness Adapter (Design and Validation).....	33
B.5	Temperature .....	35
B.6	Non-linear effects.....	36
C	Certificate.....	40
C.1	Contents .....	40
C.2	Example Certificate.....	40

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	7 / 58

## 1 Einleitung

### 1.1 Zweck und Anwendung der Richtlinie

Das vorliegende Dokument beinhaltet eine Richtlinie für die dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen, die z. B. zur Ermittlung von Wöhler-Linien genutzt werden. Dafür wird ein dynamisch kalibriertes Kraft-TransfERNormal verwendet, das mit Adaptern ausgestattet werden kann, mit deren Hilfe sowohl die Steifigkeit, als auch die Masseverhältnisse im Laststrang im Prüfalltag nachgebildet werden können. Diese Richtlinie kann für dynamische Kalibrierungen von Maschinen für Frequenzen zwischen 0 Hz und 1 kHz und für Kräfte zwischen 1 N und 1 MN verwendet werden.

Dieses Kalibrierverfahren entstand aus dem Forschungsprojekt 18SIB08 ComTraForce [1], welches von der PTB Braunschweig koordiniert wurde. In der Arbeitsgruppe „Dynamische Kalibrierung“ des DKD-Fachausschusses *Werkstoffprüfmaschinen* wird das Dokument kontinuierlich weiterbearbeitet und es werden weitere Optimierungen vorgenommen. Es wird darum gebeten, Änderungshinweise und Erfahrungen zu dem Dokument an die Arbeitsgruppe zu geben (Kontakt: [siegfried.gerber@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:siegfried.gerber@mpa.uni-stuttgart.de)).

### 1.2 Definition von dynamischen Kräften und der dynamischen Kalibrierung

Basierend auf der Richtlinie DKD-R 3-10, Blätter 1-3, werden dynamische Kräfte als periodische Kräfte erachtet, bei denen sich das Produkt aus Masse und Beschleunigung periodisch ändert. Die Kalibrierung dieser in einer Werkstoffprüfmaschine aufgebrachten Kräfte wird als dynamische Kalibrierung bezeichnet.

### 1.3 Definition des TransfERNormals

Ein Gerät, das als hoch präzises Kraftmessmittel entwickelt wurde, wird nachfolgend als Kraft-TransfERNormal oder nur TransfERNormal bezeichnet. Dieses Gerät kann mit zusätzlichen hoch präzisen Messelementen ausgestattet sein, wie z. B. Temperatursensoren.

### 1.4 Grundprinzip des Kalibrierverfahrens

Die dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen gliedert sich in zwei Teile: den umfangreichen Vorbereitungen und der Kalibrierung selbst.

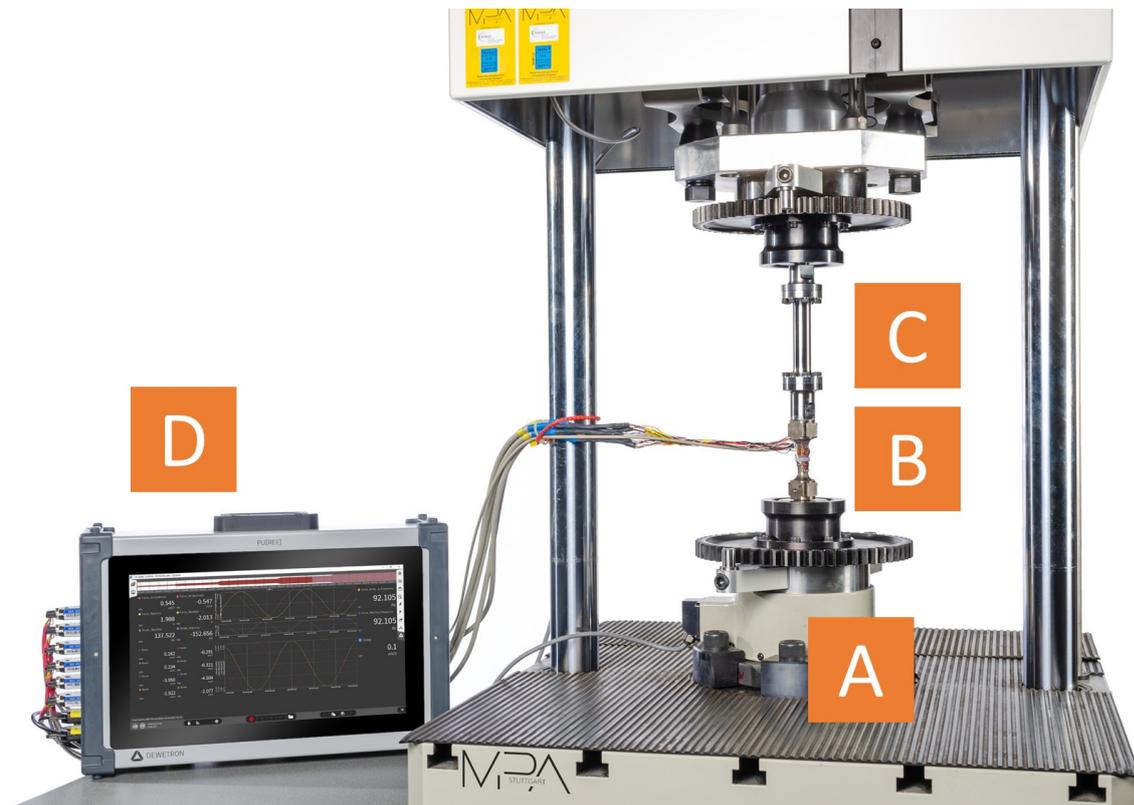
Zu den Vorbereitungen gehören u. a. die statische Kalibrierung der Maschine gemäß ISO 7500-1, die statische Kalibrierung des TransfERNormals gemäß ISO 376 sowie die dynamische Kalibrierung des TransfERNormals gemäß DKD-R 3-10, Blatt 2. Zur Kalibrierung selbst, gehören u. a. die Auswahl und der Zusammenbau des Kalibriersetups, die Konfiguration der Datenerfassung und die Auswertung der erfassten Daten.

Beide Teile sind in den Kapiteln 3 und 4 beschrieben. Sie sind an die ASTM E467 und die ISO 4965-1 angelehnt.

Die statische und die dynamische Kalibrierung der Werkstoffprüfmaschine können mit jeweils unterschiedlichen TransfERNormalen und unterschiedlichen Kalibrieraufsetups durchgeführt werden.

## 1.5 Kalibrieresetup

Ein Beispielsetup für die dynamische Kalibrierung ist in Abbildung 1, dargestellt, worin A den Maschinenrahmen inkl. des zu kalibrierenden Kraftsensors, B das dynamische Kraft-Transfornormal, C einen Steifigkeitsadapter, mit dem elastischen Verhalten eines Prüfkörpers und D die Mess- und Datenerfassungselektronik darstellt. Es basiert auf [2, 3, 4].



**Abbildung 1:** Beispiel-Setup für die dynamische Kalibrierung einer Werkstoffprüfmaschine: A Maschinenrahmen inkl. des zu kalibrierenden Kraftsensors, B dynamisches Kraft-Transfornormal, C Steifigkeitsadapter, mit dem elastischen Verhalten eines Prüfkörpers und D Mess- und Datenerfassungselektronik; Es basiert auf [2, 3, 4].

## 2 Symbole

$\alpha$	Temperaturkoeffizient des Kraftaufnehmers der Maschine
$\Delta f$	Frequenzdifferenz
$\Delta F_i(t)$	Differenz zwischen der Kraft die mit Hilfe der Fitfunktion für den Zeitpunkt $t$ berechnet wird und der zum Zeitpunkt $t$ gemessenen Kraft
$\Delta F_{\max}(c)$	Differenz zwischen der Maximalkraft der Maschine und der Maximalkraft des Transfornormals im Lastwechsel $c$
$\Delta F_{\min}(c)$	Differenz zwischen der Minimalkraft der Maschine und der Minimalkraft des Transfornormals im Lastwechsel $c$

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	9 / 58

$\Delta F_{SMS}(c)$	Differenz zwischen der Schwingbreite der Kraft von Maschine $F_{SV_M}$ und Transfornormal $F_{SV_S}$ im Lastwechsel $c$
$\Delta F_{SMS}(c)_{rel}$	Relative Differenz zwischen der Schwingbreite der Kraft Maschine $F_{SV_M}$ und Transfornormal $F_{SV_S}$ im Lastwechsel $c$
$\Delta F_{SMS}_{mean}$	Mittlere Differenz der Schwingbreiten der Kraft Maschine $F_{SV_M}$ und Transfornormal $F_{SV_S}$ im Lastwechsel $c$
$\Delta F_{SVF_i}(c)$	Differenz zwischen der Schwingbreite ( $F_{SV_i}(c)$ ) und der zweifachen Fit-Amplitude ( $2b_i$ ).
$\Delta MFS$	Differenz zwischen den mittleren Schwingbreiten der Kräfte, die aus den beschleunigten Zusatzmassen resultieren und der mittleren Differenz der Schwingbreiten von Maschine und Transferstandard.
$\Delta p$	Phasenverschiebung
$\Delta T$	Temperaturspanne während der Kalibrierung, inkl. Messunsicherheit
$a_{m_{add}}$	Gemessene Beschleunigung der Zusatzmasse
$b_i$	Kraftamplitude, Parameter der Fitfunktion
$b_M + u_M$	Summe von Mittellast und Amplitude, die beide aus den Messwerten der Maschine ermittelt wurden
$c$	Nummer des betrachteten Lastwechsels
$F$	Nennkraft bezogen auf den Fehler $q$ (gemäß ISO 7500-1)
$\bar{F}$	Mittelwert der gemessenen Kräfte $F_j$
$f_i$	Frequenz, ein Parameter der Fitfunktion
$F_i(t)$	Zum Zeitpunkt $t$ gemessene Kraft
$F_j$	Gemessene Kraft (in Maßeinheit der Kraft)
$f_M$	Frequenz der Maschine, ein Parameter der Fitfunktion
$F_{max,i}$	Automatisiert in-situ ermittelte Maximalkraft
$F_{max,M}(c)$	Automatisiert in-situ ermittelte Maximalkraft der Maschine im Lastwechsel $c$
$F_{max,S}(c)$	Automatisiert in-situ ermittelte Maximalkraft des Transfornormals im Lastwechsel $c$
$F_{min,i}$	Automatisiert in-situ ermittelte Minimalkraft
$F_{min,M}(c)$	Automatisiert in-situ ermittelte Minimalkraft der Maschine im Lastwechsel $c$
$F_{min,S}(c)$	Automatisiert in-situ ermittelte Minimalkraft des Transfornormals im Lastwechsel $c$

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	10 / 58

$f_S$	Frequenz des Transfornormals, ein Parameter der Fitfunktion
$FF_i(t)$	Kraft zum Zeitpunkt $t$ , berechnet über die Fitfunktion
$FMAD$	Kraft, resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen
$FMAD_{\max}(c)$	Maximalkraft im Lastwechsel $c$ , resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen
$FMAD_{\min}(c)$	Minimalkraft im Lastwechsel $c$ , resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen
$FSMAD_{\text{mean}}$	Mittlere Schwingbreite der Kräfte, resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen
$FSMAD(c)$	Schwingbreite der Kraft im Lastwechsel $c$ , resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen
$FSV_i(c)$	Schwingbreite der Kraft im Lastwechsel $c$
$FSV_M(c)$	Schwingbreite der Maschine im Lastwechsel $c$
$FSV_S(c)$	Schwingbreite des Transfornormals im Lastwechsel $c$
$i$	Komponenten-Index: M für Maschine, S für Transfornormal
$j$	Nummer der Messreihe
$m_{\text{add}}$	Gemessene oder abgeschätzte Zusatzmasse
$n$	Anzahl der analysierten Lastwechsel
$N_c$	Anzahl der analysierten Lastwechsel
$p_i$	Phase der zyklischen Last, Parameter der Fitfunktion
$p_M$	Phase der Maschine, Parameter der Fitfunktion
$p_S$	Phase des Transfornormals, Parameter der Fitfunktion
$q_{\text{drift}}$	Differenz der Fehler der Kraftmessung der Maschine, ermittelt aus vorausgegangenen Kalibrierungen
$t$	Laufzeit der Messung
$u_i$	Mittellast, Parameter der Fitfunktion
$w(\Delta FSMS_{\text{mean}})$	Relative Standardmessunsicherheit der mittleren Differenz der Schwingbreiten von Maschine und Transfornormal
$w(a_{m_{\text{add}}})$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Beschleunigungsmessung an der Zusatzmasse
$w(b_i)$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Ermittlung der Kraftamplitude der Fitfunktion
$w(f_i)$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Ermittlung der Frequenz der Fitfunktion

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	11 / 58

$w(F_M)$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Kraftmessung der Maschine
$w(F_{M,stat})$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der statischen Kalibrierung der Maschine
$w(F_S)$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Kraftmessung des Transfernormals
$w(F_{S,dyn})$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der dynamischen Kalibrierung des Transfernormals (frequenzabhängig)
$w(F_{S,stat})$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der statischen Kalibrierung des Transfernormals
$w(F_{Fi})$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus dem Fitting der Messwerte (zeitabhängig)
$w(F_{MAD})$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Kraft durch unkompenzierte Zusatzmassen
$w(F_{SMAD_{mean}})$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Kraft durch unkompenzierte Zusatzmassen im Zusammenhang mit der Wiederholbarkeit
$w(m_{add})$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Bestimmung der Zusatzmasse
$w(p_i)$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Ermittlung der Phase via Fitting
$w(u_i)$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Ermittlung der Mittellast via Fitting
$w_{M,align}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Laststrangausrichtung
$w_{M,ctr}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus den Eigenschaften des Maschinenreglers (frequenzabhängig)
$w_{M,drift}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Langzeitstabilität, des Kriechverhaltens der Maschine
$w_{M,noise}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus dem Rauschverhalten des Maschinenmesssignals
$w_{M,T}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus Temperatureinflüssen während des Kalibrierens
$w_{M,zer}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Nullpunktdrift der Maschine
$w_{S,amp}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus den Eigenschaften des Messverstärkers des Transfernormals (frequenzabhängig)
$w_{S,drift}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Nullpunktdrift des Transfernormals

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	12 / 58

$w_{S,end}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus dem Endlageneffekt des TransfERNORMALS
$w_{S,par}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus parasitären Einflüssen
$w_{S,res}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Messauflösung des TransfERNORMALS
$w_{S,T}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus Temperatureinflüssen auf die Empfindlichkeit des TransfERNORMALS
$w_{S,use}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus dem Gebrauch des TransfERNORMALS
$\bar{X}$	Mittelwert aufgezeichneter Messwerte $X_j$
$X_j$	Aufgezeichneter Messwert in elektrischer Maßeinheit
$X_N$	Abweichung zur Kraft $b_M + u_M$

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	13 / 58

### 3 Vorbereitungen

#### 3.1 Maschinenregler

Es wird empfohlen, den Maschinenregler gemäß DKD-R 3-2 zu kalibrieren. Dabei sollen alle Signalein- und -ausgänge des Reglers kalibriert werden – insbesondere die Ausgänge, die für den Datentransfer zum Datenerfassungssystem im Rahmen der dynamischen Kalibrierung benutzt werden.

#### 3.2 Statische Kalibrierung der Werkstoffprüfmaschine

Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb ist die Kraftmesseinrichtung der Maschine zunächst gemäß ISO 7500-1 zu kalibrieren. Eine Kalibrierung gemäß ASTM E4 ist ebenfalls möglich. Die Maschine muss im zu kalibrierenden dynamischen Kraftbereich in Klasse 1 nach ISO 7500 1 eingestuft sein.

#### 3.3 Laststrangausrichtung

Die Ausrichtung des Laststrangs ist gemäß ISO 23788 zu überprüfen und ggf. so zu adjustieren, dass sie den Anforderungen der Klasse 5 entspricht. Der Nachweis kann auch nach dem in der ASTM E1012 beschriebenen Verfahren erbracht werden.

#### 3.4 Parametermatrix

In Anlehnung an ISO 4965-1 wird empfohlen eine Parametermatrix zu erstellen, die alle Maschinenkonfigurationen enthält, die innerhalb einer Kalibrierperiode zum Einsatz kommen. Um den Kalibrieraufwand zu reduzieren sind mind. zwei Parametersätze für die Kalibrierung auszuwählen, die die Gesamtmatrix am besten Umschließen. Ist Letzteres nicht möglich, sollte die dynamische Kalibrierung für jeden Parametersatz der Matrix durchgeführt werden.

Die Gesamtmatrix umfasst mindestens die folgenden Parameter: unkompensierte Massen des Spannzeugs, Art und Form der Prüfkörper, Steifigkeit der Prüfkörper, Temperaturbereich der Probenprüfung, Kompensationsmethoden und -parameter die die Maschine bietet.

Die Steifigkeit des Kalibrieresetups soll mit Hilfe von entsprechenden Adaptern an die der Probenprüfung angenähert werden und sollte im Vorfeld vom Maschinenbetreiber ermittelt werden. Sollte sie nicht a priori zugänglich sein, so ist sie durch Berechnung oder im Falle von Standardrundproben aus dem Anhang B.4 zu ermitteln.

Eine Beispielmatrix ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Matrix und die gewählten Parametersets sind Teile des Kalibrierzertifikats.

**Tabelle 1:** Beispielparametermatrix mit willkürlich gewählten Parameterwerten, die Werte sind aus dem Prüfaufkommen an der zu kalibrierenden Maschine abzuleiten

Parameter	Value (Machine's capacities)		Parameter Set A	Parameter Set B
Mode of periodic force	Tension only or compression only or tension-compression		Compression	Compression
Compensation method provided by machine's software	Mass, Temp., Bending, ...		Mass Compensation	Mass Compensation
Value used with the compensation method			20 kg	150 kg
Parameter	Min. Value	Max. Value	-	-
Force amplitude [kN]	2	50	50	50
Mean force [kN]	-20	200	-20	200
Frequency [s <sup>-1</sup> ]	50	250	250	250
Mounting equipment's uncompensated masses [kg]	20	150	20	150
Specimen's uncompensated masses [kg]	3	10	3	10
Stiffness [kN·mm <sup>-1</sup> ]	400	1000	400	1000
Temperature [°C]	20	25	25	25

### 3.5 Statische Kalibrierung des Transfernormals

Es sind für den dynamisch zu kalibrierenden Kraftbereich einer oder mehrere geeignete Transfernormale auszuwählen, die nach ISO 376 und nach den nachfolgenden Kriterien entsprechend statisch zu kalibrieren sind:

- der dynamische Kraftbereich muss mittels statischer Kalibrierung abgedeckt sein
- dabei sind die Beanspruchungsrichtungen (Zug und Druck) zu berücksichtigen
- Einstufung in Klasse 1 oder besser ist erforderlich.

### 3.6 Dynamische Kalibrierung des Transfernormals

Das Transfernormal ist gemäß DKD-R 3-10, Blatt 2 dynamisch zu kalibrieren.

**Anmerkung:** Genauigkeitsklassen sind derzeit für die dynamische Kalibrierung nach der genannten DKD-Richtlinie nicht vorhanden. Sobald diese verfügbar sind, ist hier eine Mindestanforderung zu spezifizieren.

### 3.7 Messverstärker des Transfernormals

Der Messverstärker des Transfernormals sollte gemäß DKD-R 3-2 dynamisch kalibriert werden, wenn das Transfernormal nicht in der Messkette mit ihm kalibriert wurde.

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	15 / 58

### 3.8 Datenerfassungssystem

Das Datenerfassungssystem sollte in der Lage sein, alle während der dynamischen Maschinenkalibrierung benötigten Messkanäle simultan zu erfassen. Ist dies nicht möglich, so sind die Datensätze von Maschine und TransfERNormal getrennt zu erfassen und durch, zielgerichtet während der Messung erzeugte, charakteristische Ereignisse synchronisierbar zu machen. Siehe hierfür Kapitel 4.2.

## 4 Dynamische Kalibrierung der Werkstoffprüfmaschine

### 4.1 Vorbereitung der zyklischen Belastung

Die Kalibrierung sollte in Anlehnung an die ISO 7500-1 bei Temperaturen zwischen 10 und 35 °C durchgeführt werden, wobei die Temperatur um nicht mehr als 2 Kelvin während des Kalibrierens schwanken darf. Die Temperatur ist zu dokumentieren.

Das Kalibrieresetup ist zunächst vollständig und voll funktionstüchtig aufzubauen, inkl. aller Verkabelungen. Prüfmaschine und Messtechnik sind einzuschalten und über einen angemessenen Zeitraum aufzuwärmen, um stabile Temperaturverhältnisse und stabile elektrische Signale zu gewährleisten. Dabei sind die Maschinensensoren mit dem Regler der Maschine und die Sensoren des TransfERNormals mit dem dazugehörigen Messverstärker zu verbinden. Es wird empfohlen alle Messkanäle zur Datenerfassung in einem Vielkanal-Datenerfassungssystem zu bündeln.

Zusatzmassen, Steifigkeitsadapter, TransfERNormal, die entsprechend des zur Kalibrierung anstehenden Parametersatzes ausgewählt wurden, sind entsprechend der in den Anhängen B.2 bis B.4 gemachten Empfehlungen zusammenzusetzen.

Die folgenden Messkanäle sind aufzuzeichnen:

- Laufzeit der Messung<sup>□</sup>,
- Maschinenkraft<sup>□, ‡</sup>,
- Kraft des TransfERNormals<sup>□, ‡</sup>,
- Biegedehnungen<sup>□, ‡</sup>,
- Beschleunigung der unkompensierter Massen<sup>□, ‡</sup>,
- Temperatur<sup>□</sup>.
- Querhauptweg, gemessen mit dem Wegsensor der Maschine oder abgeleitet aus Beschleunigungsmessungen<sup>□, ‡, #</sup>

Symbole:

□ als kontinuierlicher Datenstrom in einer Datei zu erfassen,

‡ Min- und Max.-Werte in einer separaten Datei erfassen

# Validierungsparameter im Falle unerwarteter Kurvenverläufe.

Nicht aufgeführte Messkanäle können optional erfasst werden.

In Anlehnung an DKD-R 3-10, Blatt 3 und ASTM E1942 sollen die elektrischen Sensorsignale entweder ohne jegliche Filter oder unter Verwendung von Anti-Alias- und Low-Pass-Filtern

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	16 / 58

verarbeitet werden. Wobei die Grenzfrequenz des Low-Pass-Filters rund 10 % bis 15 % der Sampling-Rate betragen soll. Die Datenerfassung soll mit einer Sampling-Rate von mind. 80 Datenpunkten pro Lastwechsel (Zyklus) für eine sinusförmige Belastung und 400 Datenpunkten pro Lastwechsel für eine dreieckförmige Belastung erfolgen.

Für eine sinusförmige Belastung mit einer Frequenz von 70 Hz ergibt sich die minimale Sampling-Rate damit zu  $(70 \text{ Zyklen/s} \cdot 80 \text{ Datenpunkte/Zyklus}) = 5600 \text{ Datenpunkte/s}$ . Daraus ergibt sich die Grenzfrequenz des Low-Pass-Filters  $(5600 \text{ Datenpunkte/s} \cdot 10 \% / 100 \% =) 560 \text{ Datenpunkte/s}$ , was einer Frequenz von 560 Hz entspricht.

Alle zu erfassenden Messbrücken sind, nach Erreichen eines stabilen (Signal-)Zustandes und bei geöffnetem Laststrang, abzugleichen und zu nullen.

Alle gewählten Kompensationsmethoden und deren Werte sind zu dokumentieren.

## 4.2 Die zyklische Belastung

Zunächst ist die Mittellast der zyklischen Kalibrierbelastung anzufahren, anschließend die zyklische Belastung so zu beginnen, dass die Maschine stabil und sicher die benötigte Lastamplitude, bzw. die benötigten Max.- und Min.-Werte erreicht. Hierbei sind ggf. die Maschinenregelparameter anzupassen.

**Anmerkung:** Es ist dabei darauf zu achten, dass die Kalibriermittel immer innerhalb ihres Nennlastbereichs arbeiten und Überlasten ausgeschlossen werden. Die Grenzen der Nennbereiche und mögliche Schutzmaßnahmen sind den technischen Dokumenten der Kalibriermittel und Anlagen im Vorfeld zu entnehmen.

Nach Erreichen der Kalibrierbelastung ist eine Lastwechselzahl von mind. dem 10-fachen der Belastungsfrequenz abzuwarten, um in einem nachweislich stabilen Zustand des Kalibrier setups mit der Datenerfassung beginnen zu können.

Nach dem Beginn der Datenerfassung ist nach einer Lastwechselzahl von mind. dem 3-fachen der Belastungsfrequenz die Belastungsamplitude signifikant abzusenken und erst danach die Datenerfassung zu beenden. Die Absenkung der Amplitude ermöglicht das Synchronisieren der Messdaten von Maschine und Transfornormal während der Auswertung zur Bewertung der Maschine. Der Start-Stop-Zyklus wird zwei Mal wiederholt, sodass schließlich drei Messzyklen im Rahmen der Kalibrierung ausgewertet werden können. Je Messzyklus liegen sogenannte Fullstreams und Min.-Max.-Streams vor. Erstere enthalten die mit Sampling-Rate abgetasteten Messkanäle, Letztere enthalten nur deren Min.- und Max.-Werte. Die zu erfassenden Messkanäle sind Kapitel 4.1 zu entnehmen, ebenso die erforderliche Konfiguration der Mess- und Datenerfassungssysteme.

## 4.3 Auswertung der Messdaten

Die Messwerte von drei Messzyklen stehen für jeden zur Kalibrierung ausgewählten Parametersatz zur Verfügung, erfasst in Fullstreams und in Min.-Max.-Streams jedes Messzyklus‘.

Anhang B.1 gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der Auswertung in Abhängigkeit vom Aufkommen der erfassten Messkanäle.

Die Auswertung wird mit den Fullstreams begonnen. Die darin erfassten Messwerte der Kraftsensoren von Maschine und Transfornormal werden zunächst gefittet. Das Fitting beschränkt sich auf den Datenbereich mit konstanter Belastungsamplitude für die Kraftkanäle

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	17 / 58

von Maschine und TransfERNormal. Der für die Synchronisation verfügbare Bereich mit abnehmender Amplitude ist beim Fitting nicht zu berücksichtigen.

Das Fitting liefert Amplitude, Mittellast, Frequenz und Phase für jeden Kraftkanal. Es sind die Differenzen zwischen den Werten der Fitfunktionen und der Messwerte sowie die Differenzen der Belastungsfrequenzen und Phasen der beiden Kraftkanäle zu berechnen.

**Anmerkung:** Drei Messzyklen wurden für jeden zur Kalibrierung ausgewählten Parametersatz durchgeführt. Jeder dieser Zyklen ist in sich geschlossen auszuwerten. Die dafür zu verwendenden und nachfolgend aufgeführten Formeln bedürften eines zusätzlichen Index' der den Bezug zum Messzyklus gewährt, auf den jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet wurde. Auf dem Kalibrierzeugnis sollten die Auswerte-Ergebnisse jedoch eindeutig jedem Messzyklus zugeordnet werden können.

Die Fitfunktion und ihre Parameter:

$$FF_i(t) = u_i + b_i \cdot \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t + p_i) \quad (1)$$

wobei:

- $i$  Komponenten-Index: M für Maschine, S für TransfERNormal
- $t$  Laufzeit der Messung
- $FF_i(t)$  Kraft zum Zeitpunkt  $t$
- $u_i$  Mittellast, Parameter der Fitfunktion
- $b_i$  Kraftamplitude
- $f_i$  Frequenz
- $p_i$  Phase

Differenzen zwischen den Kraftwerten von Fitfunktion und Messungen:

$$\Delta F_i(t) = FF_i(t) - F_i(t) \quad (2)$$

wobei:

- $i$  Komponenten-Index: M für Maschine, S für TransfERNormal
- $t$  Laufzeit der Messung
- $FF_i(t)$  Berechnete Kraft zum Zeitpunkt  $t$  (Gleichung 1)
- $F_i(t)$  Zum Zeitpunkt  $t$  gemessene Kraft

Differenzen der Belastungsfrequenzen and Phasen:

$$\Delta f = f_M - f_S \quad (3)$$

$$\Delta p = p_M - p_S \quad (4)$$

wobei:

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	18 / 58

$f_M, p_M$  Frequenz und Phase der Maschine (Gleichung 1)

$f_S, p_S$  Frequenz und Phase des Transfornormal (Gleichung 1)

**Anmerkung:** Die obige Methode zur Ermittlung von Frequenz- und Phasendifferenzen ist zu überdenken, um zeitabhängige Differenzen und Effekte, wie z. B. Ditheramplituden in servo-hydraulischen Maschinen oder harmonischen Interferenzen berücksichtigen zu können.

Es folgt die Auswertung der maschinell ermittelten Min.- und Max.-Werte beider Kraftkanäle, aufgezeichnet in den Min.-Max.-Streams. Zunächst wird die Schwingbreite für jeden Belastungszyklus aus dem dazugehörigen Min.-Max.-Wertepaar sowohl für die Maschine als auch für das Transfornormal berechnet. Schließlich werden die Differenzen zwischen den zyklusbezogenen Schwingbreiten und dem Zweifachen der im Fitprozess ermittelten Amplituden berechnet.

Schwingbreite aus den maschinell ermittelten Min.- und Max.-Werten:

$$FSV_i(c) = F_{\max,i}(c) - F_{\min,i}(c) \quad (5)$$

wobei:

$i$  Komponenten-Index: M für Maschine, S für Transfornormal

$c$  Nummer des betrachteten Lastwechsels

$F_{\max,i}$  Automatisiert in-situ ermittelte Maximalkraft

$F_{\min,i}$  Automatisiert in-situ ermittelte Minimalkraft

Differenz von Schwingbreite und dem Zweifachen der gefitteten Amplitude:

$$\Delta FSVF_i(c) = FSV_i(c) - 2b_i \quad (6)$$

wobei:

$i$  Komponenten-Index: M für Maschine, S für Transfornormal

$c$  Nummer des betrachteten Lastwechsels

$FSV_i(c)$  Schwingbreite der Kraft im Lastwechsel  $c$  (Gleichung 5)

$2b_i$  Schwingbreite berechnet aus der Amplitude der Fitfunktion

$b_i$  Kraftamplitude (Gleichung 1)

Zyklusbezogene Differenz der Schwingbreiten von Maschine und Transfornormal  $\Delta FSMS(c)$  und zyklusbezogene Differenz der Extrema beider Kraftkanäle und ihr Relativwert  $\Delta FSMS(c)_{\text{rel}}$ :

$$\Delta FSMS(c) = FSV_M(c) - FSV_S(c) \quad (7)$$

$$\Delta FSMS(c)_{\text{rel}} = \frac{\Delta FSMS(c)}{FSV_S(c)} \cdot 100 \quad (8)$$

wobei:

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	19 / 58

$c$  Nummer des betrachteten Lastwechsels

$FSV_M(c)$  Schwingbreite der Maschine im Lastwechsel  $c$  (Gleichung 5)

$FSV_S(c)$  Schwingbreite des Transfornormal im Lastwechsel  $c$  (Gleichung 5)

$$\Delta F_{\min}(c) = F_{\min,M}(c) - F_{\min,S}(c) \quad (9)$$

$$\Delta F_{\max}(c) = F_{\max,M}(c) - F_{\max,S}(c) \quad (10)$$

wobei:

$c$  Nummer des betrachteten Lastwechsels

$F_{\min,M}(c), F_{\min,S}(c)$  Automatisiert in-situ ermittelte Minimalkraft von Maschine und Transfornormal im Lastwechsel  $c$

$F_{\max,M}(c), F_{\max,S}(c)$  Automatisiert in-situ ermittelte Maximalkraft von Maschine und Transfornormal im Lastwechsel  $c$

Wenn  $\Delta FSMS(c)_{\text{rel}}$  einen signifikanten Betrag erreicht, dann ist mit der Ermittlung der aus unkompensierten Massen resultierenden Kraft  $FMAD$  aus dem entsprechenden Fullstream-Datensatz fortzufahren. Diese ergibt sich aus dem Produkt aus der Zusatzmasse  $m_{\text{add}}$  und deren gemessenen Beschleunigung  $a_{m_{\text{add}}}$ . Anschließend folgt eine Min.- und Max.-Wert-Analyse und die Berechnung der Differenz zwischen der Schwingbreite der  $FMAD$  und der Differenz der Schwingbreiten von Maschine und Transfornormal  $\Delta FSMS_{\text{mean}}$ .

$$FMAD = m_{\text{add}} \cdot a_{m_{\text{add}}} \quad (11)$$

wobei:

$FMAD$  Kraft, resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen

$m_{\text{add}}$  Gemessene oder abgeschätzte Zusatzmasse

$a_{m_{\text{add}}}$  Gemessene Beschleunigung der Zusatzmasse

$$FSMAD(c) = FMAD_{\max}(c) - FMAD_{\min}(c) \quad (12)$$

wobei:

$c$  Nummer des betrachteten Lastwechsels

$FSMAD(c)$  Schwingbreite der Kraft im Lastwechsel  $c$ , resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen

$FMAD_{\max}(c)$  Maximalkraft im Lastwechsel  $c$ , resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen

$FMAD_{\min}(c)$  Minimalkraft im Lastwechsel  $c$ , resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	20 / 58

$$FSMAD_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} FSMAD_i(c)}{N_c} \quad (13)$$

wobei:

- $c$  Nummer des betrachteten Lastwechsels
- $N_c$  Anzahl der analysierten Lastwechsel
- $FSMAD_{\text{mean}}$  Mittlere Schwingbreite der Kräfte, resultierend aus beschleunigten, unkompenzierten Zusatzmassen

$$\Delta FSMS_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \Delta FSMS_i(c)}{N_c} \quad (14)$$

wobei:

- $c$  Nummer des betrachteten Lastwechsels
- $N_c$  Anzahl der analysierten Lastwechsel
- $\Delta FSMS_{\text{mean}}$  Mittlere Differenz der Schwingbreiten der Kraft Maschine  $FSV_M$  und Transfornormal  $FSV_S$  im Lastwechsel  $c$

$$\Delta MFS = FSMAD_{\text{mean}} - \Delta FSMS_{\text{mean}} \quad (15)$$

wobei:

- $\Delta MFS$  Differenz zwischen den mittleren Schwingbreiten der Kräfte, die aus den beschleunigten Zusatzmassen resultieren und der mittleren Differenz der Schwingbreiten von Maschine und Transferstandard.
- $FSMAD_{\text{mean}}$  Mittlere Schwingbreite der Kräfte, resultierend aus beschleunigten, unkompenzierten Zusatzmassen
- $\Delta FSMS_{\text{mean}}$  Mittlere Differenz der Schwingbreiten der Kraft Maschine  $FSV_M$  und Transfornormal  $FSV_S$  im Lastwechsel  $c$

#### 4.4 Nächster Parametersatz

Die Abschnitte 4.1 bis 4.3 sind für den nächsten Parametersatz zu wiederholen, der für die Kalibrierung ausgewählt wurde. Jedes Kalibrieresetup (Frequenz, Steifigkeit, Kraftamplitude) besitzt seine eigenen Tarierungswerte, die vorzugsweise in separaten Dateien gespeichert werden, siehe Anhang B.3.

Um den Benutzereinfluss zu minimieren und ein Höchstmaß an Wiederholbarkeit zu erzielen, wird empfohlen, mehr als eine Belastungsamplitude je Kalibrieresetup anzuwenden und auszuwerten. Sofern möglich, sollten je Belastungsamplitude mehrere Belastungsfrequenzen angewendet und ausgewertet werden. In jedem Falle sollen Bereiche um Resonanzfrequenzen vermieden werden und bei der Kalibrierung unberücksichtigt bleiben.

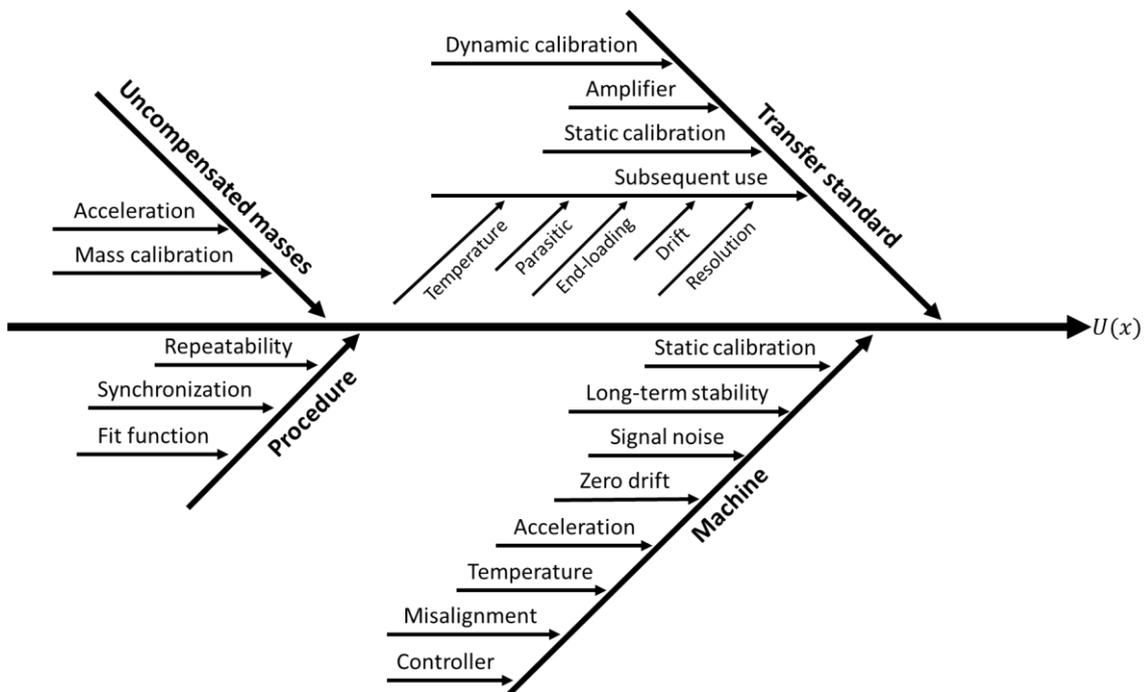
## 5 Messunsicherheit

Dieses Kapitel bietet eine Richtlinie zur Abschätzung der Messunsicherheit der dynamischen Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen. In Abhängigkeit vom Anwendungsfall ist es möglich, dass weitere, hier unbenannte, aber relevante Quellen der Messunsicherheit existieren, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

Die Messunsicherheit ist für jeden Parametersatz getrennt zu ermitteln.

Die Quellen der Messunsicherheit werden in vier Gruppen unterteilt: eine dem TransfERNormal zugeordnete, eine der Maschine zugeordnete, eine den unkompensierten Massen zugeordnete und eine dem Verfahren zugeordnete, wie es in Abbildung 2 veranschaulicht ist.

Zur Beschreibung der dynamischen Kraftkalibrierung werden lineare Produkt-Modelle herangezogen, die relative Messunsicherheiten berücksichtigen. Einige der Einflussgrößen sind frequenzabhängig, wie z. B. die Messunsicherheit der dynamischen Empfindlichkeit des TransfERNormals, welche eine frequenzbezogene Abschätzung der Messunsicherheit erfordern.



**Abbildung 2:** Messunsicherheitsquellen, gruppiert nach den Orten des Messwertaufkommens und der Messwertanalyse.

### 5.1 Messunsicherheit des TransfERNormals

Die relative Standardmessunsicherheit der Kraftmessung des TransfERNormals  $w(F_S)$  für das gewählte Linearmodell, mit den Empfindlichkeitskoeffizienten gleich  $\pm 1$ , kann wie folgt ermittelt werden:

$$w(F_S) = \sqrt{w^2(F_{S,dyn}) + w^2(F_{S,stat}) + w_{S,use}^2 + w_{S,amp}^2} \quad (16)$$

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	22 / 58

wobei:

- $w(F_{S,dyn})$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der dynamischen Kalibrierung des Transfornormals (frequenzabhängig)
- $w(F_{S,stat})$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der statischen Kalibrierung des Transfornormals
- $w_{S,use}$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus dem Gebrauch des Transfornormals
- $w_{S,amp}$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus den Eigenschaften des Messverstärkers des Transfornormals (frequenzabhängig)

### 5.1.1 Unsicherheit der dynamischen Kalibrierung des Transfornormals

Die relative Standardunsicherheit  $w(F_{S,dyn})$  ist dem Zertifikat seiner dynamischen Kalibrierung zu entnehmen.

Während der dynamischen Kalibrierung des Transfornormals wurden seine dynamische Empfindlichkeit und die dazugehörige Messunsicherheit ermittelt. Beide Parameter sind frequenzabhängig, wodurch die mit einem Parametersatz festgelegte Belastungsfrequenz sowohl die dynamische Empfindlichkeit, als auch die Messunsicherheit festlegt, die dem Kalibrierzeugnis entnommen werden können.

### 5.1.2 Unsicherheit der statischen Kalibrierung des Transfornormals

Die relative Standardunsicherheit der statischen Kalibrierung nach ISO 376 des Transfornormals  $w(F_{S,stat})$  sollte mit Blick auf die vollständig rückgeführte Kalibrierung berücksichtigt werden, falls sie nicht in die Unsicherheit der dynamischen Kalibrierung des Transfornormals eingeflossen ist. Die relative Standardunsicherheit der statischen Kalibrierung lässt Effekte dynamischer Belastung unberücksichtigt, gibt jedoch einen Eindruck über das generelle Messverhalten des Normals. Gewöhnlich ist der Betrag der statischen Unsicherheit  $w(F_{S,stat})$  signifikant kleiner als der der dynamischen Unsicherheit  $w(F_{S,dyn})$ , sodass er auch vernachlässigt werden könnte.

### 5.1.3 Anwendungsbezogene Messunsicherheiten

Die sich aus der Anwendung ergebende relative Standardunsicherheit  $w_{S,use}$ , für ein gewähltes lineares Modell und Empfindlichkeitskoeffizienten gleich  $\pm 1$  kann wie folgt formuliert werden:

$$w_{S,use} = \sqrt{w_{S,res}^2 + w_{S,drift}^2 + w_{S,T}^2 + w_{S,end}^2 + w_{S,par}^2} \quad (17)$$

wobei:

- $w_{S,res}$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Messauflösung des Transfornormals
- $w_{S,drift}$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Nullpunktdrift des Transfornormals
- $w_{S,T}$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus Temperatureinflüssen während des Kalibrierens

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	23 / 58

$w_{S,end}$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus dem Endlageneffekt des TransfERNORMALS

$w_{S,par}$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus parasitären Einflüssen

### 5.1.3.1 Auflösung

Die Messwerte des TransfERNORMALS unterliegen erfahrungsgemäß einer Streuung, eines Rauschens, unabhängig davon, ob das Messsignal gefiltert wird oder nicht. Dieses Rauschen wird als Unsicherheit der Auflösung betrachtet.

Sie kann wie folgt ermittelt werden: a) Aufzeichnung einer Nullmessung, d. h. Erfassung der Sensorsignale des unbelasteten TransfERNORMALS mit hoher Abtastrate, z. B. mit der 50-fachen Frequenz, siehe Anhang B für weitere Informationen b) Ermittlung der relativen Standardabweichung der aufgezeichneten Nullmessung, die als Unsicherheitskomponente der Auflösung erachtet wird.

### 5.1.3.2 Drift

Siehe ISO 376.

### 5.1.3.3 Temperatur

Siehe ISO 376.

### 5.1.3.4 End-Belastungswirkung (End-loading effect)

Siehe ISO 376.

### 5.1.3.5 Wirkung von Störkomponenten (Effect of parasitic components)

Siehe ISO 376.

## 5.1.4 Messverstärker des TransfERNORMALS

Wurde das TransfERNORMAL in Messkette mit seinem Messverstärker kalibriert, so ist die relative Standardunsicherheit des Messverstärkers  $w_{S,amp}$  bereits in der Unsicherheit des TransfERNORMALS enthalten. Andernfalls wird empfohlen, den Messverstärker nach DKD-R 3-10, Blatt 2, zu kalibrieren, wobei die Unsicherheitsbeiträge ermittelt und im Kalibrierzertifikat angegeben werden.

## 5.2 Messunsicherheit der Maschine

Die relative Standardmessunsicherheit der Kraftmessung des TransfERNORMALS  $w(F_M)$  für das gewählte Linearmodell, mit den Empfindlichkeitskoeffizienten gleich  $\pm 1$ , kann wie folgt ermittelt werden:

$$w(F_M) = \sqrt{w^2(F_{M,stat}) + w_{M,drift}^2 + w_{M,T}^2 + w_{M,noise}^2 + w_{M,zer}^2 + w_{M,align}^2 + w_{M,ctr}^2} \quad (18)$$

wobei:

$w(F_{M,stat})$  Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der statischen Kalibrierung der Maschine

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	24 / 58

$w_{M,drift}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Langzeitstabilität, des Kriechverhaltens der Maschine
$w_{M,T}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus Temperatureinflüssen während des Kalibrierens
$w_{M,noise}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus dem Rauschverhalten des Maschinenmesssignals
$w_{M,zer}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Nullpunktdrift der Maschine
$w_{M,align}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Laststrangausrichtung
$w_{M,ctr}$	Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus den Eigenschaften des Maschinenreglers (frequenzabhängig)

### 5.2.1 Unsicherheit der statischen Kalibrierung

Die relative Standardunsicherheit der Maschine ist dem Zeugnis der Kalibrierung nach ISO 7500-1 zu entnehmen.

Falls möglich, kann die von der Maschine gemessene Kraft entsprechend der bei der statischen Kalibrierung ermittelten Abweichungen korrigiert werden. In diesem Falle ist die relative Standardunsicherheit der statischen Kalibrierung  $w(F_{M,stat})$  zu berücksichtigen.

### 5.2.2 Drift der Maschine

Dieser Unsicherheitsbeitrag,  $w_{M,drift}$ , ist vom Maschinenbetreiber, auf vorangegangenen Ergebnissen dynamischer Kalibrierungen beruhend, abzuschätzen. Falls keine Ergebnisse verfügbar sind, können die vorangegangener statischer Kalibrierungen dafür genutzt werden.

Für dynamische Kalibrierergebnisse:

$$w_{M,drift} = \frac{1}{|b_M + u_M|} \cdot \frac{|q_{drift}|}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

Für statische Kalibrierergebnisse:

$$w_{M,drift} = \frac{1}{|F|} \cdot \frac{|q_{drift}|}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

wobei:

$q_{drift}$	Differenz der Fehler der Kraftmessung der Maschine, ermittelt aus vorausgegangenen Kalibrierungen
$b_M + u_M$	Summe von Mittellast und Amplitude, die beide aus den Messwerten der Maschine ermittelt wurden
$F$	Nennkraft bezogen auf den Fehler $q$ (gemäß ISO 7500-1)

### 5.2.3 Temperaturbeitrag

Temperaturänderungen während der dynamischen Kalibrierung können das Ergebnis signifikant beeinflussen. Zur Abschätzung des Beitrags ist die Temperatur des Maschinen-

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	25 / 58

Kraftaufnehmers während der Kalibrierung zu messen. Ist dies nicht möglich, so ist die Temperatur so nahe wie möglich am Kraftaufnehmer der Maschine zu messen.

$$w_{M,T} = \alpha \cdot \frac{\Delta T}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

wobei:

$\alpha$  Temperaturkoeffizient des Kraftaufnehmers der Maschine

$\Delta T$  Temperaturspanne während der Kalibrierung, inkl. Messunsicherheit

#### 5.2.4 Auflösung

Die Messwerte der Maschine unterliegen erfahrungsgemäß einer Streuung, eines Rauschens, unabhängig davon, ob das Messsignal gefiltert wird oder nicht. Dieses Rauschen wird als Unsicherheit der Auflösung betrachtet.

Sie kann wie folgt ermittelt werden: a) Aufzeichnung einer Nullmessung, d. h. Erfassung der Sensorsignale der Maschine mit hoher Abtastrate im unbelasteten Zustand, z. B. mit der 50-fachen Frequenz, siehe Anhang B für weitere Informationen b) Ermittlung der relativen Standardabweichung der aufgezeichneten Nullmessung, die als Unsicherheitskomponente der Auflösung erachtet wird. Sie ergibt sich wie folgt:

Für Anzeigen in elektrischen Einheiten:

$$w_{M,\text{noise}} = \frac{1}{|X_N|} \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2} \quad (22)$$

Für Ablesungen in Kräfteinheiten:

$$w_{M,\text{noise}} = \frac{1}{|b_M + u_M|} \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (F_j - \bar{F})^2} \quad (23)$$

wobei:

$n$  Anzahl der analysierten Lastwechsel

$X_j, F_j$  Aufgezeichnete Messwerte

$\bar{X}, \bar{F}$  Mittelwerte der aufgezeichneten Messwerte  $X_j, F_j$

$X_N$  Abweichung (in derselben Maßeinheit wie  $X_j$ ) zur Kraft  $b_M + u_M$ , ermittelt aus den Messreihen

#### 5.2.5 Nullpunktdrift

Zur Abschätzung des Unsicherheitsbeitrags der Nullpunktdrift sind vor und nach jeder Messreihe die Sensorsignale der Maschine mit hoher Abtastrate im unbelasteten Zustand, z. B. mit der 50-fachen Frequenz, siehe Anhang B für weitere Informationen, aufzuzeichnen und der Mittelwert jeder Nullmessreihe zu ermitteln.

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	26 / 58

Anschließend ist die maximale Differenz zwischen den Mittelwerten vor und nach jeder Messreihe ( $\bar{X}_{\text{before}}$ ,  $\bar{F}_{\text{before}}$ ,  $\bar{X}_{\text{after}}$ ,  $\bar{F}_{\text{after}}$ ) zu ermitteln. Die relative Standardunsicherheit infolge Nullpunktdrift ergibt sich wie folgt:

Für Anzeigen in elektrischen Einheiten:

$$w_{M,\text{zer}} = \frac{1}{|X_N|} \cdot \frac{\max\{|\bar{X}_{\text{after},j} - \bar{X}_{\text{before},j}|\}}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

Für Ablesungen in Kräfteinheiten:

$$w_{M,\text{zer}} = \frac{1}{|b_M + u_M|} \cdot \frac{\max\{|\bar{F}_{\text{after},j} - \bar{F}_{\text{before},j}|\}}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

wobei:

- $j$                       Nummer der Messreihe
- $X_N$                     Abweichung zur Kraft  $b_M + u_M$
- $\bar{X}_{\text{before}}$ ,  $\bar{F}_{\text{before}}$     Mittelwert der Messwerte vor der Messreihe  $j$ ,
- $\bar{X}_{\text{after}}$ ,  $\bar{F}_{\text{after}}$        Mittelwert der Messwerte nach der Messreihe  $j$

### 5.2.6 Laststrangausrichtung

Wenn es möglich ist, die Abweichung der Kraftmessung als Funktion der Biegedehnung, die aus seiner unzureichenden Laststrangausrichtung resultiert, zu beschreiben, so ist die Standardunsicherheit  $w_{M,\text{align}}$  von dieser Funktion abzuleiten.

### 5.2.7 Messverstärker der Maschine

Wenn es möglich und notwendig ist, den Maschinenregler, der den Messverstärker beinhaltet, nach DKD-R 3-2 zu kalibrieren, so ist die Standardunsicherheit  $w_{M,\text{ctr}}$  dem Kalibrierzertifikat zu entnehmen und zu berücksichtigen.

## 5.3 Unsicherheit durch unkompensierte Massen

Für den Fall, dass Kräfte von unkompensierten, beschleunigten Massen  $FMAD$  gemäß Gleichung (11) ermittelt wurden, so ist die relative Standardunsicherheit  $w(FMAD)$ , für das gewählte Linearmodell und die Empfindlichkeitskoeffizienten gleich  $m_{\text{add}}$  und  $a_{m_{\text{add}}}$ :

$$w(FMAD) = \sqrt{m_{\text{add}} \cdot w^2(a_{m_{\text{add}}}) + a_{m_{\text{add}}} \cdot w^2(m_{\text{add}})} \quad (26)$$

wobei:

- $w(a_{m_{\text{add}}})$     Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Beschleunigungsmessung an der Zusatzmasse
- $w(m_{\text{add}})$        Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Bestimmung der Zusatzmasse

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	27 / 58

### 5.3.1 Beschleunigung (der unkompensierten Massen)

Die Beschleunigung von unkompensierten Massen kann durch direkte Messung der Beschleunigung oder der Geschwindigkeit oder des Weges bestimmt werden.

Der Beitrag der relativen Unsicherheit der Beschleunigungsmessung ist abzuschätzen, einschließlich der Kalibrierunsicherheit des Beschleunigungsmessgeräts.

### 5.3.2 Unkompensierte Massen

Der relative Standardunsicherheitsbeitrag der zusätzlichen Massen kann den Kalibrierzertifikaten der Massen entnommen werden.

## 5.4 Verfahren

Die Auswertung der Messdaten umfasst die Berechnung von Mittelwerten von  $FSMAD_{\text{mean}}$  (Mittelwert der Kraftspanne durch zusätzliche Massen) und  $\Delta FSMS_{\text{mean}}$  (Mittlere Differenz zwischen Kraftspannweiten von Maschine und Transfornormal) und des Fittings. Des Weiteren sind die Beiträge der relativen Standardunsicherheiten bezogen auf die Wiederholbarkeit sowie die Parameter der Fitfunktion zu ermitteln.

Darüber hinaus muss der Anwender dieses Verfahrens weitere mögliche Unsicherheitsbeiträge identifizieren, analysieren und berücksichtigen. Dies kann z. B. die Auswirkung von nicht vollständig synchronisierten Kanälen des Datenerfassungssystems sein, die während der Kalibrierung der Maschine verwendet werden.

### 5.4.1 Wiederholbarkeit

Die relative Standardunsicherheit, die mit der Wiederholbarkeit verbunden ist, ist die Standardabweichung des geschätzten Mittelwerts, die durch die folgenden Formeln angegeben ist.

Für die mittlere Kraftspanne aufgrund zusätzlicher Massen (falls ermittelt):

$$w(FSMAD_{\text{mean}}) = \frac{1}{|FSMAD_{\text{mean}}|} \cdot \sqrt{\frac{1}{N_c(N_c - 1)} \sum_{i=1}^{N_c} (FSMAD_i(c) - FSMAD_{\text{mean}})^2} \quad (27)$$

Für die mittlere Differenz zwischen den Kraftspannen der Maschine und des Transfornormals:

$$w(\Delta FSMS_{\text{mean}}) = \frac{1}{|\Delta FSMS_{\text{mean}}|} \cdot \sqrt{\frac{1}{N_c(N_c - 1)} \sum_{i=1}^{N_c} (\Delta FSMS_i(c) - \Delta FSMS_{\text{mean}})^2} \quad (28)$$

wobei:

$c$  Nummer des betrachteten Lastwechsels

$N_c$  Anzahl der analysierten Lastwechsel

$FSMAD_{\text{mean}}$  Mittlere Schwingbreite der Kräfte, resultierend aus beschleunigten, unkompensierten Zusatzmassen

$\Delta FSMS_{\text{mean}}$  Mittlere Differenz der Schwingbreiten der Kraft Maschine  $FSV_M$  und Transfornormal  $FSV_S$  im Lastwechsel  $c$

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	28 / 58

### 5.4.2 Fitfunktion

Die relative Standardunsicherheit der gefitteten Kraft als Funktion der Zeit, bestimmt nach (1), kann wie folgt beschrieben werden:

$$w(FF_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial FF_i}{\partial u_i}\right)^2 \cdot w^2(u_i) + \left(\frac{\partial FF_i}{\partial b_i}\right)^2 \cdot w^2(b_i) + \left(\frac{\partial FF_i}{\partial f_i}\right)^2 \cdot w^2(f_i) + \left(\frac{\partial FF_i}{\partial p_i}\right)^2 \cdot w^2(p_i)} \quad (29)$$

wobei:

- $i$             Komponenten-Index: M für Maschine, S für Transfornormal
- $w(u_i)$       Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Ermittlung der Mittellast via Fitting
- $w(b_i)$       Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Ermittlung der Kraftamplitude der Fitfunktion
- $w(f_i)$       Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Ermittlung der Frequenz der Fitfunktion
- $w(p_i)$       Relative Standardmessunsicherheit, resultierend aus der Ermittlung der Phase via Fitting

Die Werte der Standardunsicherheiten sind aus den statistischen Daten abzuleiten, die für das Fitverfahren verwendet wurden.

### 5.4.3 Synchronisation

Der relative Unsicherheitsbeitrag, der mit der Wirkung nicht vollständig synchronisierter Kanäle des Datenerfassungssystems verbunden ist, ist in den Unsicherheitsbeitrag des Verstärkers einzubeziehen  $w_{S,amp}$ , beschrieben im Kapitel 5.1.4.

**Anmerkung:** Das Ergebnis des Synchronisierens kann sich auf die ermittelten Werte von  $f_i$  und  $p_i$  aus der Fitfunktion und deren Unsicherheiten  $w(f_i)$  and  $w(p_i)$  auswirken.

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	29 / 58

## 6 Literatur

[1] PTB Braunschweig, 18SIB08 – ComTraForce – Comprehensive Traceability for Force Metrology Services, <https://www.ptb.de/empir2019/comtraforce/home/>, visited on May 8<sup>th</sup> 2024

[2] M.J. Dixon: Dynamic Force Measurement, in Materials Metrology and Standards for Structural Performance, B.F. Dyson, M.S. Loveday, M.G. Gee [Editors], Chapman & Hall, 1<sup>st</sup> Edition, London, 1995

[3] A. Nitschke, et al.: Entwicklung eines Kraft-TransfERNormals für die Kalibrierung periodischer Kräfte in Werkstoffprüfmaschinen mit Quantifizierung parasitärer Einflussgrößen, ITG-Fachbericht 303 – Sensoren und Messsysteme, Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung, 10.-11. Mai 2022 in Nürnberg, VDE Verlag, 2022, ISBN 978-3-8007-5835-7, S.63-73

[4] R. S. Oliveira, et al: DYNAMIC CALIBRATION OF FATIGUE TEST MACHINES USING A DYNAMIC CALIBRATION DEVICE, IMEKO 23rdTC3, 13thTC5 and 4thTC22 International Conference 30 May to 1 June, 2017, Helsinki, Finland.

[5] H. Dizdar; B. Aydemir; C. Vatan, EVALUATION OF THE EFFECT OF DYNAMIC VERIFICATION ON DIFFERENT TYPES OF FORCE SENSORS, IMEKO 24rdTC3, International Conference 11 – 13 October 2022, Cavtat-Dubrovnik, Croatia. DOI: 10.21014/tc3-2022.012

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	30 / 58

## Anhang

### A Generally

#### A.1 Necessity of Calibration

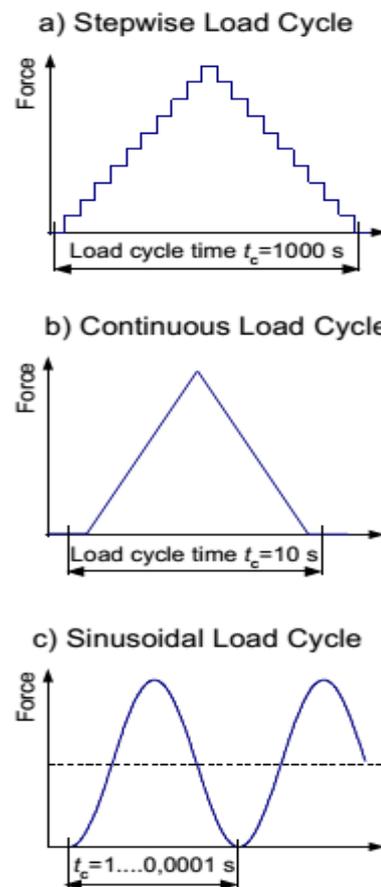
Material and mechanical tests are very important as they ensure the quality and safety of the products produced in today's industry in daily use. In material and mechanical tests, accurate force measurement is one of the most significant parameters to obtain reliable test results. Force measuring devices in materials testing machines are most often calibrated statically by comparison to transfer standards traceable to the National Metrology Institutes of that country. Therefore, the traceability of force measurement is needed for all applications under static, continuous, and dynamic loads. Systems used in testing machines are designed to operate dynamically as well as statically. Under certain conditions, the static calibration may be inadequate or in error for some domains of dynamic testing. The dynamic calibration of the material testing machine helps us to learn about the dynamic behaviour of the machine during use. This information validates the results obtained by testing the materials.

#### A.2 Dynamic Calibration Compared to Others

The force standard machines and the force calibration methods described in standards (ISO 376, ISO 7500-1) are optimized to calibrate force sensors with minimal measurement uncertainty. In these procedures the load is applied stepwise (Figure 3a) with time intervals of typically 60 s per step. Therefore, a duration of the order of  $t_c = 1000$  s results for a load cycle.

For the calibration of some force sensors (piezoelectric), where the drift is present in the signal, the duration of a load cycle should be shorter in order to reduce the measurement uncertainty. Therefore, continuous calibration procedures have been developed and established (Figure 3b), where the time interval for a load cycle is typically  $t_c = 10$  s

For dynamic calibrations, where the dynamic properties of the sensors are measured, much faster load cycles with cycle times in the range of  $t_c = 1$  to  $0.0001$  s are needed (Figure 3c). For the sake of comparison, the load cycle frequency  $f_c$  is defined as  $f_c = \frac{1}{t_c}$ . For the standard stepwise load cycle this yields  $f_{c,s} = 1$  mHz, for the continuous cycle  $f_{c,c} = 100$  mHz and for the dynamic calibration typically  $f_{c,d} = 1$  to  $10$  kHz.



**Figure 3:** Load-time dependence diagrams for stepwise, continuous and sinusoidal load cycles

## B Practical and Auxiliary Procedures (Annotations)

The measurement procedure for the dynamic calibration of a testing machine requires attention to some details that may impact the proposed metrological analysis, once some parameters may be sensitive to the assembly method and the load application sequence. Below there is a compilation of guidelines for best practice on this measurement, derived from experiences of e.g. [4, 5].

### B.1 Paths for the Analysis of Characteristic Parameters

The viability of the paths for the analysis of characteristic parameters of the measured sinusoidal curves (see Section 4.3) will depend on the way and capacity that these systems have to generate and store these values. The table 2 below shows an example of analysing the viability of certain curve parameters in different measurement systems.

**Table 2:** Evaluation paths

Legend: Evaluation possible = Y; Evaluation not possible = N

	Machine's Type Information of Interest	Machine						Transfer Standard	
		Servo-hydraulic		Resonance Young		Resonance Old		Wave	Extremes
		Wave	Extremes	Wave	Extremes	Wave	Extremes		
Acquired by	Machine	internal to an ASCII file	internal to an ASCII file	not stored	internal to an ASCII file	not stored	not stored	-	-
	External Multi-channel System	from machine's analog output to an ASCII file	Can be derived from wave file	from machine's analog output to an ASCII file	Can be derived from wave file	from machine's analog output to an ASCII file	Can be derived from wave file	from signal conditioner to an ASCII file	from signal conditioner to an ASCII file
	Considered Channels	t; F	t; F	t; F	t; F	t; F	t; F	t; F; a	t; F; a
Evaluation	Fit Function	Y	N	N	N	Y	Y	Y	N
	Delta Fit to Meas	Y	N	N	N	Y	Y	Y	N
	Delta Frequ.	Y	N	N	N	Y	Y	Y	N
	Delta Phase	Y	N	N	N	Y	Y	Y	N
	Fspan (peva)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	Delta Fspan (peva) to 2*ampl(FitFunc)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	Delta Fspan (pevaMc) to Fspan (pevaTStd)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	Delta Min(Mc) to Min(TStd)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	Delta Max(Mc) to Max(TStd)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	Fmadd	N	N	N	N	N	N	Y	Y
	Fspan (pevaz,madd)	N	N	N	N	N	N	Y	Y
	MeanFspan (pevaz,madd)	N	N	N	N	N	N	Y	Y
	MeanFspanDeltaMcTStd (Delta Fspan (pevaMc) to Fspan (pevaTStd))	N	N	N	N	N	N	Y	Y
	Delta MeanFpanmadd to MeanFspanDeltaMcTStd	N	N	N	N	N	N	Y	Y

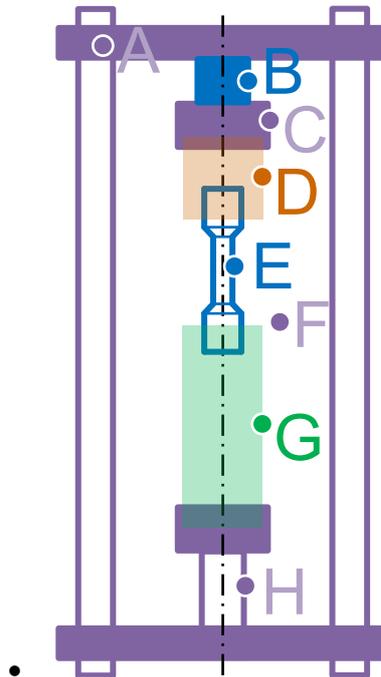
## B.2 Factors Relevant to the Mounting of the Transfer Standard to the Machine

Some factors are relevant to the mounting of the transfer standard to the machine. For example, we can cite:

The stiffness adapter (G in Figure 4) must not be coupled between the machine force transducer (B) and the force transfer standard (E).

Both force sensors must be directly connected through a rigid coupling (C). The mass of the coupling must be known, and its value can be used to compensate its inertia contribution to the readings. In the same way, it is desirable that this coupling should be able to receive coupling of the additional masses and the acceleration instrumentation (D), so it can work in both load train configurations with and without additional parts.

It is important to register the assembly sequence (photos, videos), with the position of each part of the load train identified (e.g. axles, screw-nut assemblies, masses, stiffness adapter parts, applied tightening torques), and there is the need for (visual) identification of each of these parts in order to ensure that during disassembly and reassembly, it is possible to reproduce the same original set.



**Figure 4:** Simplified scheme of the mechanical set-up for dynamic force calibration: A Load frame, B Machine's force transducer, C Mounting equipment, D Mounting zone for additional masses and accelerometers, E Force transfer standard, F Environment, G Stiffness adapter, H Force introducing element

### B.3 Specific Procedures for the Correct Load Series Application

Some specific procedures are important for the correct load series application:

Best balancing and zeroing practice have to be observed in test runs on different material testing systems, e.g. using machines with force transducer on the top vs. on the bottom. However, in both cases a minimum approximation force should be applied to the load train in order to carry out a first mechanical accommodation of parts. This force applied value will be the zero reference piston position for the machine;

The Zero Value (or the Tare Value) must be calculated from the data recorded continuously in the unload static condition before applying the offset force value.

The noise in both sensors, adopted as the resolution parameter, must be measured with the force sensors decoupled.

When applying an offset force value, it is interesting to apply a low rate ramp loading from zero force value up to the offset target and keep that for some seconds before starting cycling. In the same way, after ending the cycling period, the force should be brought to the offset again, and then unloaded through a low rate ramp up to zero value.

### B.4 Stiffness Adapter (Design and Validation)

The Stiffness adapter is the element responsible for suiting the stiffness of the mechanical set up. The design of this part will be mostly depending on the demanded characteristics of the calibration. In a first approach, the adapters can be divided into two groups: one of high

stiffness (tubular or cylindrical shafts coupled in line in the load train [1, 2]) and one of low stiffness (sets of bending beams [1, 3]).

For example, to estimate stiffness's of cylindrical specimens, Figure 5 could be helpful. Young's modulus, the diameter and the unsupported cylindrical length of a specimen are needed to estimate the stiffness. For that purpose, go to the x-axis which is closely related to the Young's Modulus of specimen's material. There are different x-axis for different Young's Modulus. At the appropriate x-axis look for the position of the diameter of the specimen of interest. If you find the position of the diameter, go straight upwards until you reached the length of the unsupported column of your specimen on the y-axis. The blue line closed to the point where your diameter and your unsupported length are intersecting marks roughly the stiffness of your specimen.

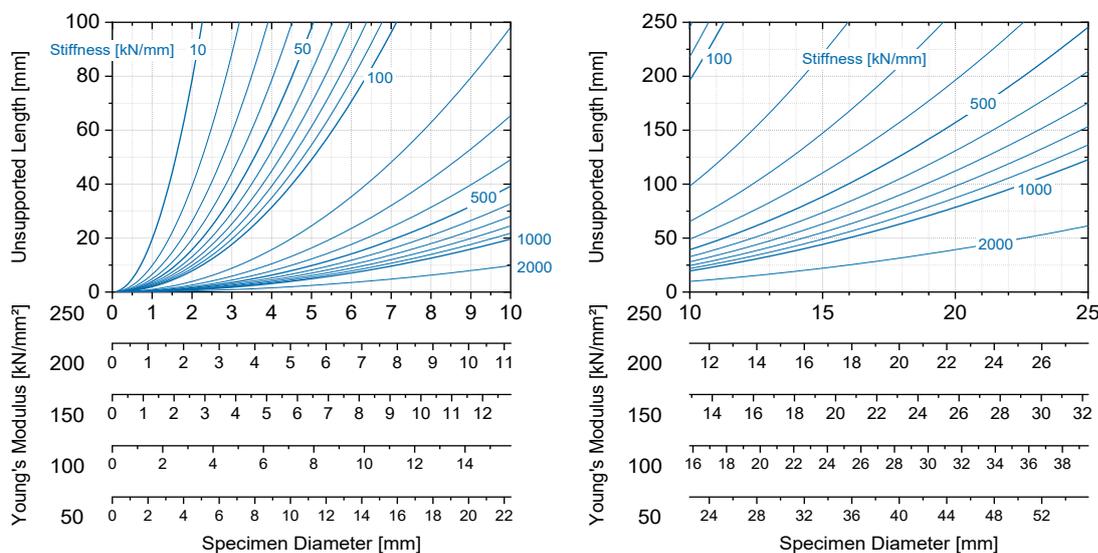
For other types of adapters, different from the shape aforementioned and more complex, the mechanical structures might be designed through some specific mechanical analysis tools (such as FEA).

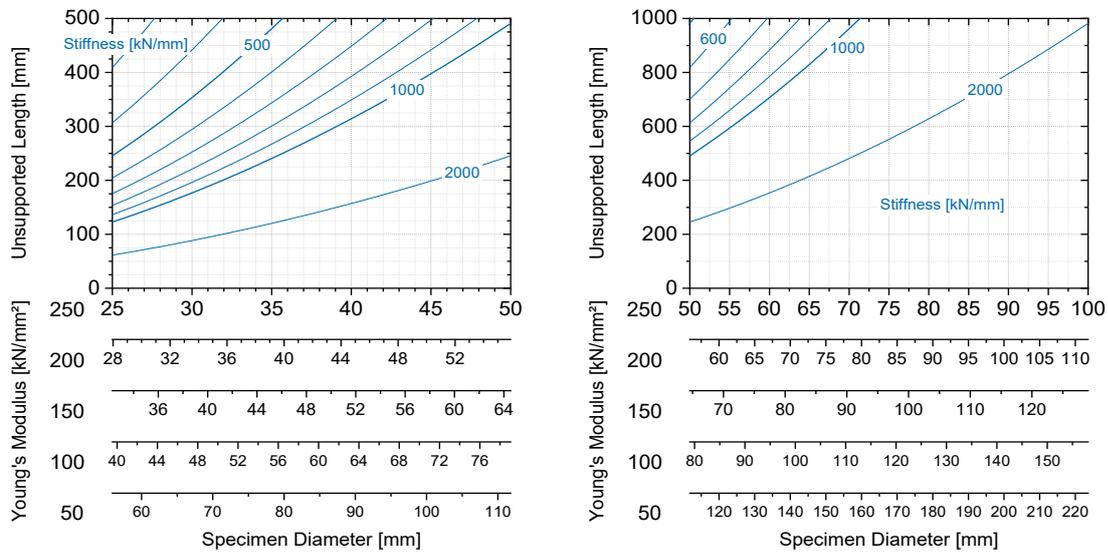
In all cases, the stiffness of the built structure can be verified through measurements. This can be done during the static calibration of the sensor (see section 3.5) when already coupled to the machine using as reference the measured values of force and displacement recorded by the machine's sensors (cross beam movement, LVDT). For each measured force value  $F$  there will be a measured deflection  $\delta$  and a calculated stiffness  $S$ , according to equation A1.

$$S = \frac{F}{\delta} \tag{A1}$$

These stiffness values should not vary too much from point to point. If this happens, check whether there is any kind of mechanical accommodation, looseness, or misalignment. Ultimately, it should be checked whether the stiffness design is adequate.

This stiffness calculation method should be repeated at the end of the last dynamic cycles (before unmounting the setup) and the value should be compared to the one calculated at the beginning.



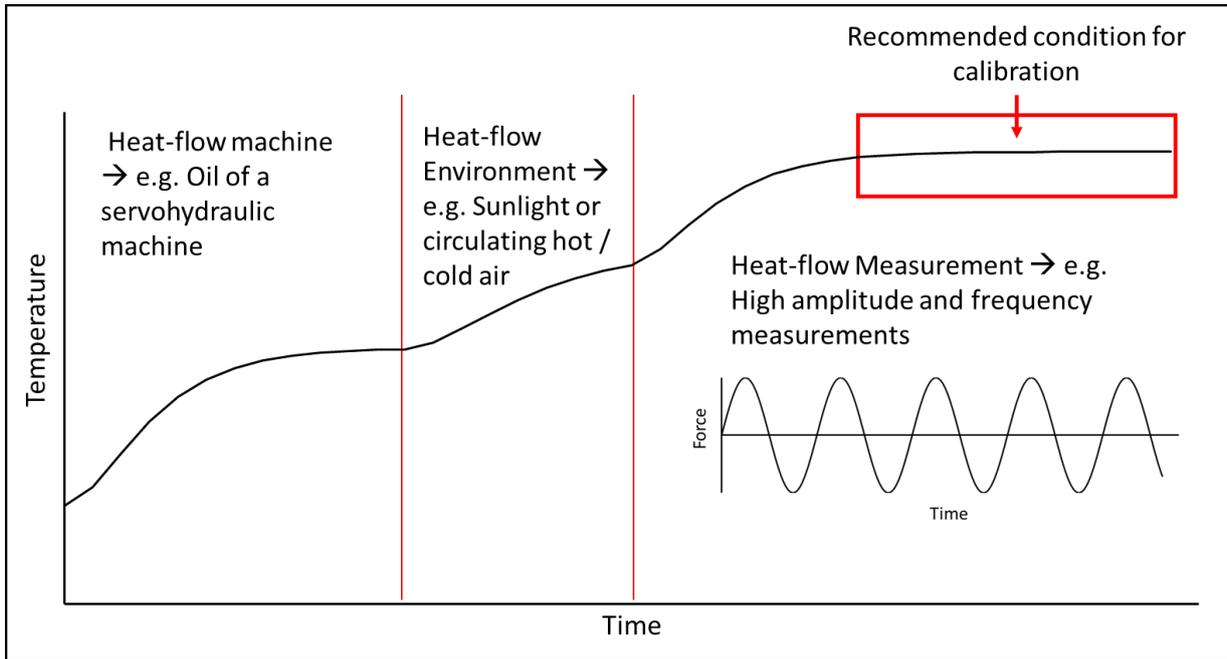


**Figure 5:** Stiffness as a function of specimen's diameter, unsupported cylindrical length and Young's modulus

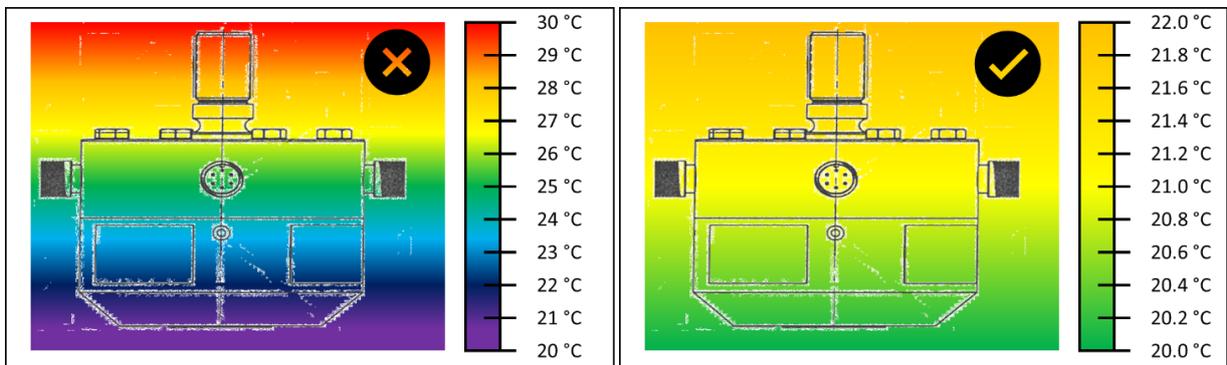
## B.5 Temperature

When a significant heat transfer on the machine and/or force-proving instrument is suspected, it is recommended to acquire the temperature near the transducer and the machine as well as directly on the machine and on the force-proving instrument as close as possible to the sensing element, e.g. to the strain gauge bridges when using strain gauge transducers. Temperature spots could be introduced due to radiation, e.g. sunlight; conduction, e.g. oil of a servo-hydraulic machine; convection, e.g. stream of air condition or due to a hot-cold gradient air circulation near the machine.

Before collecting the data for calibration, it should be taken care for the temperature fluctuation on the machine which shall be stable within 2 K during the whole calibration (see Figure 6) and that there are no significant temperature gradients across the force proving instrument (see Figure 7).



**Figure 6:** Schematic temperature time profile of a testing machine and /or the force proving instrument during a measurement day



**Figure 7:** Schematic non-acceptable (left hand side) and acceptable (right hand side) temperature gradient across the force proving instrument

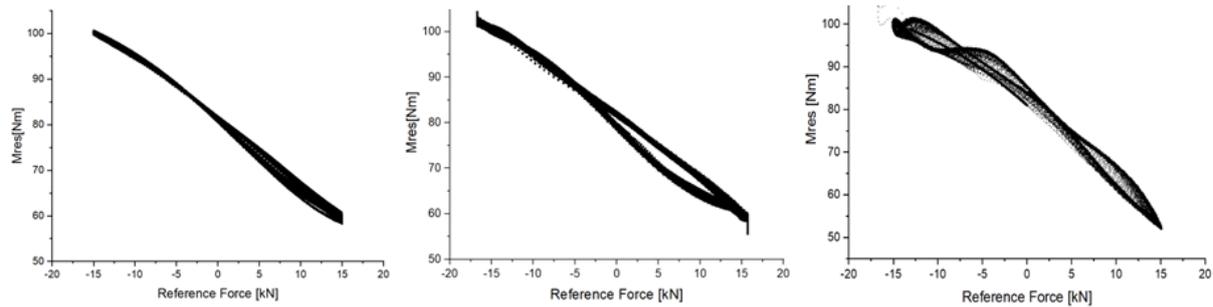
## B.6 Non-linear effects

Real measurements show a relevant impact of harmonics which are caused by different sources. Harmonics and non-linearities are interrelated. Sources for those non-linearities can be for example bending, torsion, side forces, deformation and movement of the adaptations, influences of the piston damping, mass and acceleration, machine frame dynamics, modal oscillations, and misalignments.

Non-linearities and harmonics causes, in interactions with other system behaviours as e.g. dithering signal or the control loop, several effects. Effects in compression, tension or both can get weaker and disappear while other effects appear and get stronger with frequency. Therefore, non-linearities should be minimized as far as possible. The recommendation is to apply, additional to force measurements, time series measurements of the displacement and the two-dimensional bending moment. For hydraulic machines these measurements should

be done at least at the lowest, the middle and the highest frequency. The time series measurements can be used to generate Lissajous figures of a force signal and the calculated geometric sum of the x and y bending moments. The goal is to reduce the non-symmetric-bludgeon-like or intersecting non-linearities. Examples for those at 0.1 Hz, 45 Hz and 100 Hz are shown in Figure 8.

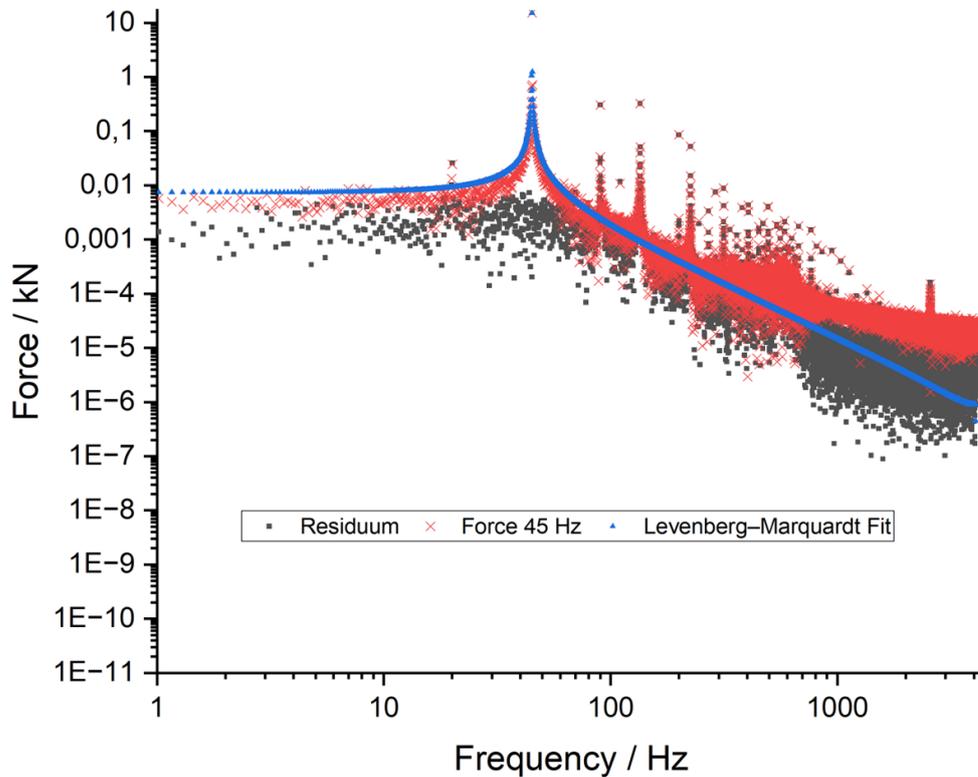
Beside the regular efforts to reduce side effects, as an alignment procedure and bolting under pre-load, two further approaches are suitable. First reduce the static values for both bending moments as good as possible during the assembling. Second reduce the starting force value,



**Figure 8:** Resulting bending moment over force of the reference force transducer: left hand side at 0.1 Hz; middle at 45 Hz; right hand side at 100 Hz

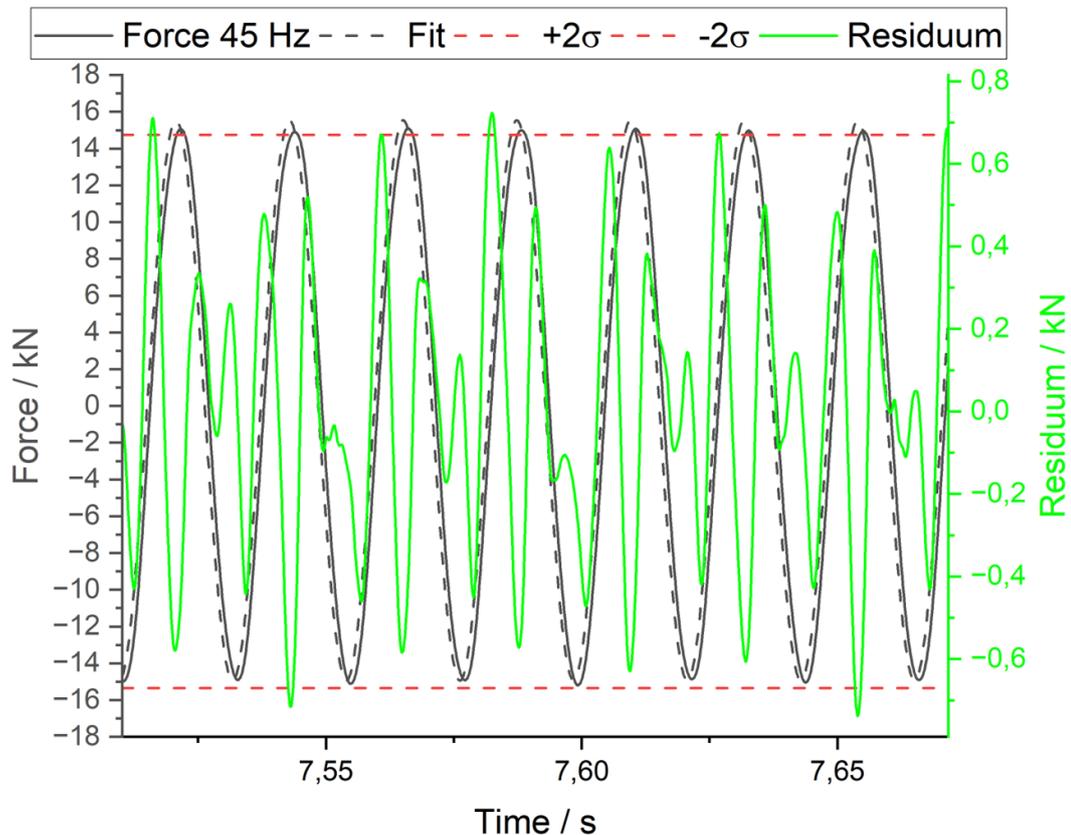
caused by the pre-load-process, by adjusting the frame height. The starting value of the force and displacement signal should be as close to zero as possible.

A way to distinguish between linear and non-linear effects in a numerical way is to use the difference of the used sinus fit and the original time series data. As the fit is per definition linear the difference must contain all non-linear impacts (see Figure 9).



**Figure 9:** FFT of a control looped force signal at 45 Hz: with original time series data, sine approximation (with Levenberg-Marquardt algorithm) and Residuum

For a hydraulic machine this difference contains all kind of harmonics as the harmonics of the applied force, the dithering signal, other interferences and their intermodulations. The ratio of the maximum amplitude of the fit and the 95 % scattering interval of the difference, also called residuum, is an indicator for the non-linear content of the time series (see Figure 10).



**Figure 10:** Real time series data, sine approximation, residuum and scattering interval of the residuum of a control looped force signal at 45 Hz

The residuum contains harmonics from all possible sources of non-linearities. The scattering interval is a better choice for the residuum as just the maximum value because that residuum usually contain high discrete-local deviations respectively spikes. As the scattering level delivers two thresholds the indicator can be defined separately for tension and compression.

Nevertheless, if the goal is e.g. to ensure that the bending moment does not impact the control looped force signal by more than 5 % the indicator could be used to ensure that the whole non-linear content is below 5 %. As the non-linear content rises with frequency this approach might only work till a specific frequency. If the threshold is exceeded at a frequency the above-mentioned procedure can be applied to reduce those non-linear impacts.

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	40 / 58

## C Certificate

### C.1 Contents

The certificate must contain the following information:

- a) Identification of the testing machine: (manufacturer, type, year of manufacture if known, serial number) and, if applicable, specific identification of the force indicator (manufacturer, type, serial number);
- b) the class of each range calibrated according to ISO 7500-1;
- c) Machine parameters: Mode of periodic force, Machine compensation method and its parameters, force range, frequency range, stiffness range;
- d) Calibration parameters (for each set): force amplitude, mode of calibration (tension, compression, tension/compression), mean force, frequency, , compensation method and its values, mounting parts (with mass value identified if necessary);
- e) Transfer standard arrangement: type, class and reference number of the force-proving instrument used, calibration certificate number, indicator, stiffness adapter used and expiration date of the certificate;
- f) Inertial Forces: information about additional masses, mounting parts (with mass value identified if necessary), accelerometers, indicator
- g) the calibration temperature;

Results of verification

- h) Dataset for Waves and Peak-Valleys (graphics are recommended)
- i) Fitting curve analysis: Parameters of the fitting curve, Phase analysis, force spans differences;
- j) Peak-to-peak analysis: Differences between peaks; Differences between valleys;
- k) any anomaly found during the general inspection;
- l) Portion measured of the inertia forces (additional masses and acceleration);
- m) Uncertainty evaluation

### C.2 Example Certificate

The following pages showing an example of the calibration certificate structure.

	Dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240606">https://doi.org/10.7795/550.20240606</a>	DKD-R 9-4	
		Ausgabe:	04/2023
		Revision:	0
		Seite:	41 / 58

*Certificate of Dynamic Calibration of a Material Testing System*

Object:			
Manufacturer:			
Type:			
Serial No.:			
Customer:			
Number of pages:			
Reference No.:			
Calibration mark:			
Location of calibration:			
Date of Calibration:			
Date of Certificate			
On behalf of	Institute and Seal	Head of calibration lab.	Person in charge

Page 2 of calibration certificate of DATE, calibration mark: 123 456 789

Calibration procedure            DKD-R 9-4

Calibration parameters

Parameter	Value		Parameter Set A	Parameter Set B
	Min. Value	Max. Value		
Mode of periodic force				
Compensation method provided by machine's software				
Numeric value used with the compensation method				
Parameter	Min. Value	Max. Value	-	-
Force amplitude [kN]				
Mean force [kN]				
Frequency [s <sup>-1</sup> ]				
Mounting equipment's uncompensated masses [kg]				
Specimen's uncompensated masses [kg]				
Stiffness [kN·mm <sup>-1</sup> ]				
Temperature [°C]				

Page 3 of calibration certificate of DATE, calibration mark: 123 456 789

Calibration arrangement

		Parameter set A		Parameter Set B	
		Machine	Transfer Standard	Machine	Transfer Standard
Force transducer	Type				
	Serial				
	Manufacturer				
	Cable length				
Force Indicator	Type				
	Serial				
	Manufacturer				
	Measuring range				
	Measuring channel				
	Sampling Rate				
	Filter				
Excitation voltage					
Stiffness Adapter	Type	-		-	
	Serial	-		-	
	Manufacturer	-		-	
	Stiffness	-		-	
Additional Mass	Type	-		-	
	Serial	-		-	
	Manufacturer	-		-	
	Mass	-		-	
Accelerometer	Type	-		-	
	Serial	-		-	
	Manufacturer	-		-	
	Cable length	-		-	
Accel. Indicator	Type	-		-	
	Serial	-		-	
	Manufacturer	-		-	
	Measuring range	-		-	
	Measuring channel	-		-	
	Sampling Rate	-		-	
	Filter	-		-	
Excitation	-		-		













Page 10 of calibration certificate of DATE, calibration mark: 123 456 789

Evaluation

Parameter Set A

Span of force due to additional masses

$FSMAD(c) = FMAD_{max}(c) - FMAD_{min}(c)$

		Series 1	Series 2	Series 3
Mean of span of force due to additional masses	$FSMAD_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} FSMAD_i(c)}{N_c}$			
Mean of differences of the force spans of machine	$\Delta FSMS_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \Delta FSMS_i(c)}{N_c}$			
Difference of mean force spans of forces due to additional masses and the mean difference between spans of machine and transfer standard	$\Delta MFS = FSMAD_{mean} - \Delta FSMS_{mean}$			

Uncertainty

Parameter Set A

Transfer Standard		Machine	
$w(F_S)$		$w(F_M)$	
$w_{S,use}$		$w_{M,ctr}$	
$w_{S,amp}$			

Parasitic Components	
$w(a_{m_{add}})$	
$w(m_{add})$	
$w(FMAD)$	













Page 17 of calibration certificate of DATE, calibration mark: 123 456 789

Evaluation

Parameter Set B

Span of force due to additional masses

$FSMAD(c) = FMAD_{max}(c) - FMAD_{min}(c)$

		Series 1	Series 2	Series 3
Mean of span of force due to additional masses	$FSMAD_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} FSMAD_i(c)}{N_c}$			
Mean of differences of the force spans of machine	$\Delta FSMS_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \Delta FSMS_i(c)}{N_c}$			
Difference of mean force spans of forces due to additional masses and the mean difference between spans of machine and transfer standard	$\Delta MFS = FSMAD_{mean} - \Delta FSMS_{mean}$			

Uncertainty

Parameter Set A

Transfer Standard		Machine	
$w(F_S)$		$w(F_M)$	
$w_{S,use}$		$w_{M,ctr}$	
$w_{S,amp}$			

Parasitic Components	
$w(a_{m_{add}})$	
$w(m_{add})$	
$w(FMAD)$	



Herausgeber:

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**  
Deutscher Kalibrierdienst  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

[www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)