

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**DKD**

---

**Richtlinie  
DKD-R 3-10  
Blatt 1**


**Dynamische Kalibrierung von  
einachsig beanspruchten Kraft-  
messgeräten und Prüfmaschinen  
(Grundlagen)**

---

Ausgabe 06/2017

<https://doi.org/10.7795/550.20240404>



	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	2 / 39

## Deutscher Kalibrierdienst (DKD)


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

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

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

### Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)  
DKD-Geschäftsstelle  
Bundesallee 100      38116 Braunschweig  
Postfach 33 45      38023 Braunschweig  
Telefon Sekretariat: 0531 592-8021  
Internet:              www.dkd.eu

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	3 / 39

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Richtlinie DKD-R 3-10 Blatt 1 Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen), Ausgabe 06/2017, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.  
DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20240404>*


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:

Dr. Thomas Bruns, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin;  
Dr. Sascha Eichstädt, PTB;  
Thomas Gaube, Zwick Roell GmbH & Co. KG, Ulm;  
Siegfried Gerber, MPA Universität Stuttgart, Stuttgart;  
Christian Häuser, MPA Kalibrierdienst GmbH, Berlin;  
Martin Iwanczik, SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH, Dresden;  
Dr. Michael Kobusch, PTB;  
Dr. Martin Laube, Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA BS), Braunschweig;  
Dr. Heiko Müller, Volkswagen AG, Wolfsburg;  
Dr. Georg Schading, Kistler Instrumente AG, CH-Winterthur;  
Dr. Christian Schlegel, PTB, Braunschweig;  
Daniel Schwind, GTM Testing and Metrology GmbH, Bickenbach;  
Lioba Stenner, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.

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

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	4 / 39

## Vorwort

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente zu den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. In den Richtlinien werden technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe beschrieben, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien als Vorbild zur Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. DKD-Richtlinien können zum Bestandteil von Qualitätsmanagementhandbüchern der Kalibrierlaboratorien werden. Durch die Umsetzung der Richtlinien wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien gefördert und die Kontinuität und Überprüfbarkeit der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert.


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

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


Die vorliegende Richtlinie wurde im Rahmen der Fachausschüsse *Kraft und Beschleunigung* sowie *Werkstoffprüfmaschinen* erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	7
1.1	Definition dynamischer Kräfte.....	7
1.2	Zweck und Geltungsbereich .....	7
1.3	Regelwerke zur Kalibrierung von Kraftmessgeräten .....	8
1.3.1	Statische Kalibrierung nach DIN EN ISO 376 .....	8
1.3.2	Statische Kalibrierung nach DKD-R 3-3 .....	8
1.3.3	Kontinuierliche Kalibrierung nach DKD-R 3-9 .....	9
1.3.4	Dynamische Kalibrierung entsprechend dieser Richtlinie .....	9
1.4	Regelwerke zur Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen.....	11
1.4.1	Statische Kalibrierung nach DIN EN ISO 7500-1 .....	11
1.4.2	Dynamische Kalibrierung entsprechend dieser Richtlinie .....	12
2	Begriffe, Definitionen .....	13
3	Einteilung dynamischer Kräfte .....	18
3.1	Anwendung dynamischer Kräfte zu Kalibrier- und Prüfzwecken .....	18
3.2	Übersicht von dynamischen Kraftanregungen (Beispiele) .....	19
3.3	Einteilung nach Primär- und Sekundärmethode .....	20
4	Technische Ausrüstung .....	21
4.1	Normale .....	21
4.1.1	Primärkalibrierung .....	21
4.1.2	Sekundärkalibrierung .....	23
4.2	Erreger.....	25
4.2.1	Schwingungserreger .....	25
4.2.2	Stoßerreger.....	26
4.3	Kraftaufnehmer .....	27
4.3.1	Bestandteile der Kraftmesskette - Kalibriergegenstand .....	27
4.3.2	Kraftaufnehmer auf Basis von Dehnungsmessstreifen (DMS) .....	28
4.3.3	Piezoelektrische Kraftaufnehmer.....	29
4.4	Beschleunigungsaufnehmer .....	30
4.4.1	Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer .....	30
4.4.2	Piezoresistive Beschleunigungsaufnehmer .....	31
4.4.3	Kapazitive Beschleunigungsaufnehmer.....	31
4.4.4	Servo-Beschleunigungsaufnehmer.....	32
4.4.5	Laservibrometer .....	32
4.5	Krafteinleitung .....	33
4.6	Elektronik .....	34
4.6.1	Messverstärker für DMS-Kraftaufnehmer .....	34

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	6 / 39

4.6.2	Ladungsverstärker für piezoelektrische Aufnehmer .....	34
4.6.3	A/D-Wandlung und Signalfilterung.....	36
4.6.4	Dynamische Kalibrierung von Messverstärkern und Ladungsverstärkern.....	36
4.7	Krafterzeugung bei Schwingprüfmaschinen .....	37
5	Literaturverzeichnis .....	38

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	7 / 39

## 1 Einleitung

### 1.1 Definition dynamischer Kräfte

Eine dynamische Kraft ist das Produkt aus Masse und Beschleunigung, wobei die Masse oder die Beschleunigung zeitlich veränderlich sind. Das Kalibrieren dynamischer Kräfte ermöglicht die Bestimmung der frequenzabhängigen Eigenschaften der kraftmess-technischen Anwendung.


### 1.2 Zweck und Geltungsbereich

Die Richtlinie soll Bemühungen und Bestrebungen unterstützen, in der Industrie häufig vorkommende Anwendungen dynamischer Kräfte auf nationale Normale zurückzuführen. In diesem Dokument und den ergänzenden Blättern werden nur einachsige Beanspruchungen betrachtet. Wegen ihrer frequenzabhängigen Beiträge spielen Störkräfte und Störmomente zwar eine wichtige Rolle in der dynamischen Kraftmessung, die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für mehrachsige dynamische Kraftkalibrierungen sind allerdings bisher noch nicht gegeben.

Die Richtlinie ist als Ergänzung zu anderen Normen und Richtlinien zu verstehen. Die Vielzahl der dynamischen Kraftanwendungen erfordert eine Vielzahl von spezifischen Normen und Richtlinien zur Kalibrierung, die zum größten Teil noch künftig auszuarbeiten sind. Diesen künftigen Normen und Richtlinien soll diese Richtlinie als Hilfestellung dienen.

Der Gültigkeitsbereich ist mit Kraftmessgeräten und Werkstoffprüfmaschinen bewusst weit gefasst. Die Richtlinie soll dementsprechend auch Anwendung finden z. B. bei temporär aufgebauten Prüfständen, wie sie in vielen Industriezweigen zur Baugruppenprüfung üblich sind oder in der Crash-Messtechnik.

Die Gültigkeit bestehender Kalibriervorschriften und die Notwendigkeit ihrer Durchführung wird keinesfalls eingeschränkt. Kraftmessgeräte und Werkstoffprüfmaschinen sollten auch im Fall der dynamischen Kalibrierung als Rückführungsnachweis zusätzlich eine statische Kalibrierung aufweisen (z. B. ISO 376 oder ISO 7500).

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	8 / 39

### 1.3 Regelwerke zur Kalibrierung von Kraftmessgeräten

In Abbildung 1 sind die bestehenden Regelwerke zur Kalibrierung von Kraftmessgeräten aufgeführt, sowie die hier neu zu beschreibenden Kalibrierverfahren zur dynamischen Kalibrierung, wie z. B. periodische Verfahren, Sprung- oder Stoßverfahren. Wird eine dynamische Kalibrierung angestrebt, ist es erforderlich, diese zusätzlich auf einer statischen Kalibrierung mit deutlich geringerer Messunsicherheit abzustützen.

Im Folgenden wird auf die wesentlichen Unterschiede der in Abbildung 1 genannten Kalibrierverfahren eingegangen.

<b>Kalibrierung von Kraftmessgeräten</b>	
<b>Statisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DIN EN ISO 376: Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung</li> <li>- DKD-R 3-3: Kalibrierung von Kraftmessgeräten</li> </ul>
<b>Kontinuierlich</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DKD-R 3-9: Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren</li> </ul>
<b>Dynamisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Periodische Verfahren</i></li> <li>- <i>Sprungverfahren</i></li> <li>- <i>Stoßverfahren</i></li> </ul>

**Abbildung 1:** Bestehende Regelwerke zur Kalibrierung von Kraftmessgeräten. Für die kursiv dargestellten Anwendungen sind entsprechende Regelwerke zu erarbeiten.


#### 1.3.1 Statische Kalibrierung nach DIN EN ISO 376

Die DIN EN ISO 376 [1] beschreibt die statische Kalibrierung von Kraftmessgeräten, wie sie für die statische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen benötigt wird. Der schematische Kalibrierablauf ist in Tabelle 1 gezeigt. Die Kalibrierdauer erstreckt sich hierbei je Messreihe mit steigenden und fallenden Messwerten über etwa zehn Minuten. Es sind mindestens acht Messpunkte je Messreihe erforderlich und die Kalibrierung wird in drei verschiedenen Einbaustellungen durchgeführt. In der ersten Einbaustellung werden zwei steigende Messreihen gefahren, in der zweiten und dritten Einbaustellung wird je eine steigende und fallende Messreihe gefahren.

#### 1.3.2 Statische Kalibrierung nach DKD-R 3-3

Auch bei der DKD-R 3-3 [2] werden die Kraftmessgeräte statisch kalibriert – allerdings dürfen diese dann nicht für die Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen eingesetzt werden. Hierbei



	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	9 / 39

handelt es sich um eine vereinfachte Vorgehensweise, welche zu einer höheren Messunsicherheit führt. Je nach Kalibrierablauf werden weniger Messpunkte je Messreihe (bis zu wenigstens drei Messpunkte) angefahren, ggf. nur eine Einbaustellung verwendet und ggf. werden weniger Messreihen oder keine Abwärtsmessreihen gefahren. In Tabelle 1 ist ein schematischer Kalibrierablauf einer Messreihe mit steigenden und fallenden Messwerten aufgezeigt. Hierfür werden üblicherweise etwa drei Minuten benötigt.

### 1.3.3 Kontinuierliche Kalibrierung nach DKD-R 3-9

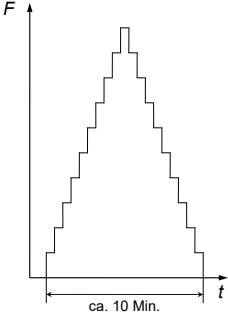
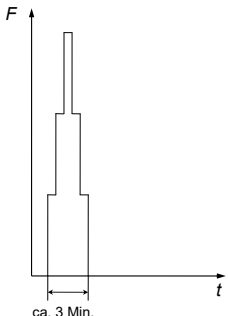
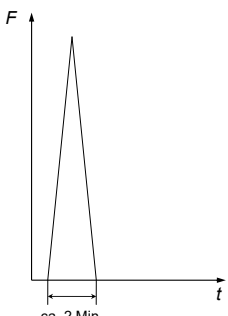
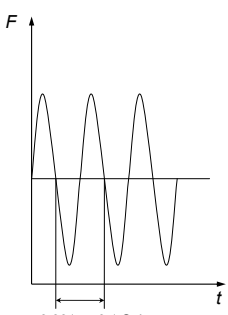
In DKD-R 3-9 [3] wird unter dem kontinuierlichen Kalibrierablauf eine stetige Messgrößenänderung verstanden, deren Zeitverhalten z. B. rampenförmig verläuft. Der Ablauf ist aber als quasistatisch zu betrachten (im Gegensatz zur dynamischen Belastung mit beispielsweise sinus- oder stoßförmigem Zeitverlauf). Es wird von einer Dauer der Belastungszeit von Null bis zum Kalibrierbereichsendwert von minimal einer Minute ausgegangen. In Tabelle 1 ist ein schematischer Kalibrierablauf einer Messreihe mit steigenden und fallenden Messwerten aufgezeigt.


### 1.3.4 Dynamische Kalibrierung entsprechend dieser Richtlinie

In dieser Richtlinie soll die dynamische Kalibrierung von Kraftmessgeräten behandelt werden. Hierbei ist mit deutlich größeren Messunsicherheiten zu rechnen. Um die Kalibrierung zusätzlich abzusichern, ist es empfehlenswert, ergänzend zur dynamischen Kalibrierung eine statische Kalibrierung entsprechend DIN EN ISO 376 durchzuführen. Die dynamische Kraftanregung kann dabei periodisch (z. B. sinusförmig), mit einem Sprungverhalten oder stoßförmig erfolgen. In Tabelle 1 ist schematisch eine sinusförmige Kraftamplitude aufgezeigt, welche über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten werden muss.

Zur Auswahl und Beurteilung von dynamisch eingesetzten Kraftaufnehmern ist die Kenntnis der Grundresonanzfrequenz meist der erste Schritt. Diese für die Dynamik relevante Kenngröße ist in der Richtlinie VDI/VDE 2638 [4] über Kenngrößen für Kraftaufnehmer entsprechend genannt. Zusätzliche Anhaltspunkte für eine dynamische Eignung eines Kraftaufnehmers bieten Angaben zur Steifigkeit und Masse.

**Tabelle 1:** Schematische Kalibrierabläufe für die Kalibrierung von Kraftmessgeräten nach den verschiedenen Verfahren

Verfahren	Schematischer Ablauf der Kalibrierung	Zu erwartende Messunsicherheit
DIN EN ISO 376		<p>Klasse 1: &gt; 0,12 %                      Klasse 0,5: &gt; 0,06 %                      Klasse 00: &gt; 0,01 %</p>
DKD-R 3-3		~ 0,1 % bis ~1 %
DKD-R 3-9		> 0,1 % bis >1 %
Dynamische Kalibrierung		Etwa > 1 %

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	11 / 39

## 1.4 Regelwerke zur Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen

In Abbildung 2 sind die bestehenden Regelwerke zur Kalibrierung von Zug- und Druckprüfmaschinen aufgeführt, sowie die neu zu beschreibenden Kalibrierverfahren zur dynamischen Kalibrierung, wie z. B. periodische Verfahren, Sprung- oder Stoßverfahren. Wird eine dynamische Kalibrierung angestrebt, ist es erforderlich, diese zusätzlich auf einer statischen Kalibrierung mit deutlich geringerer Messunsicherheit abzustützen.

<b>Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen</b>	
<b>Statisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DIN EN ISO 7500-1: Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen. Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung</li> </ul>
<b>Kontinuierlich</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Derzeit nicht vorgesehen.</li> </ul>
<b>Dynamisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Periodische Verfahren</i></li> <li>- <i>Sprungverfahren</i></li> <li>- <i>Stoßverfahren</i></li> </ul>

**Abbildung 2:** Bestehende Regelwerke zur Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen. Für die kursiv dargestellten Anwendungen sind entsprechende Regelwerke zu erarbeiten.

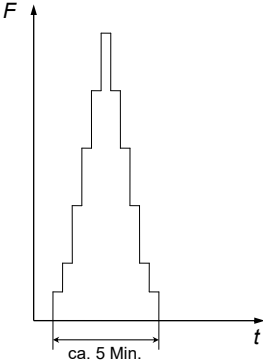
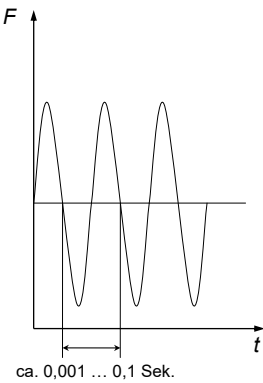
### 1.4.1 Statische Kalibrierung nach DIN EN ISO 7500-1


Die statische Kalibrierung von Zug- und Druckprüfmaschinen wird gemäß der DIN EN ISO 7500-1 [5] durchgeführt. Der schematische Kalibrierablauf ist in Tabelle 2 gezeigt. Die Kalibrierung erfolgt üblicherweise in den Messpunkten 10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % und 100 %. Werden feinere Abstufungen benötigt, wird die Messreihe um weitere Messpunkte, wie z. B. 0,1 %, 0,2 %, 0,4 %, 0,7 %, 1 %, 2 %, 4 % und 7 %, ergänzt. Der Zeitrahmen für eine steigende und fallende Messreihe beträgt hierbei üblicherweise etwa fünf Minuten. Für das Anfahren der jeweiligen Kraftstufe muss entweder der Kraftwert für mehrere Sekunden konstant gehalten werden oder, wenn dies nicht möglich sein sollte, ist es auch erlaubt, die Kalibrierung bei langsam zunehmender Kraft im gewünschten Messpunkt durchzuführen.

### 1.4.2 Dynamische Kalibrierung entsprechend dieser Richtlinie

In dieser Richtlinie soll die dynamische Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen behandelt werden. Hierbei ist mit deutlich größeren Messunsicherheiten als bei der statischen Kalibrierung zu rechnen. Um die Kalibrierung zusätzlich abzusichern, ist es erforderlich, ergänzend zur dynamischen Kalibrierung eine statische Kalibrierung entsprechend DIN EN ISO 7500-1 durchzuführen. In Tabelle 2 ist schematisch eine sinusförmige Kraftamplitude aufgezeigt, welche über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten werden muss.

**Tabelle 2:** Schematische Kalibrierabläufe für die Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen nach den verschiedenen Verfahren

Verfahren	Schematischer Ablauf der Kalibrierung	Zu erwartende Messunsicherheit
DIN EN ISO 7500-1		<p>Klasse 1: 0,24 %                      Klasse 0,5: 0,12 %</p>
Dynamische Kalibrierung		<p>Etwa &gt; 2 %</p>

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	13 / 39

## 2 Begriffe, Definitionen

Die Wiedergabe der nachfolgenden Begriffe und Definitionen hat informativen Charakter und ist eine Auflistung von Bezeichnungen aus aktuellen Normen und Richtlinien, ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

**Tabelle 3:** Begriffe und Definitionen

Begriff	Verweis	Definition
Amplitude <i>Amplitude</i>	Beiblatt 3 <sup>1</sup> <i>ASTM E467</i>	Hälfte der Schwingbreite der zyklischen Wellenform <i>One-half the peak-to-peak measurement of the cyclic waveform</i>
Angezeigte Kraft <i>Indicated force</i>	Beiblatt 3 <i>ASTM E467</i>	Der von einem Kraftaufnehmer ausgegebene Kraftwert (z.B. ein manuell ablesbarer numerischer oder graphischer Wert, einschl. Max.-Min.-Bestimmung); diese Werte erhält man im Allgemeinen von einem digitalen Voltmeter (DVM) oder durch Datenerfassung <i>The force value provided by the force transducer or the dynamometer's readout (for example, a numeric or graphical output for reading by a human including a peak picking capability); these values are typically obtained from a digital voltmeter (DVM), or files generated by a computerized data acquisition</i>
<i>Indicated force <math>F_i</math></i>	<i>ISO 4965-01</i>	<i>Force measured and indicated by the dynamic testing system's statically calibrated load cell under both static and dynamic conditions</i>
Angezeigte dynamische Kräfte <i>Dynamic indicated forces</i>	Beiblatt 3 <i>ASTM E467</i>	Die während eines dynamischen Teilversuchs von der Prüfmaschine übermittelten maximalen und minimalen Kräfte. Diese Werte erhält man im Allgemeinen mit einem Oszilloskop, Max.-Min.-Spitzenwertmessgerät oder über ein Messdatenerfassungsgerät. <i>The maximum and minimum forces reported by the test machine during a portion of a dynamic test. These values are typically obtained using an oscilloscope, peak-valley meter, or files generated by computerized data acquisition.</i>
<i>Indicated force <math>F_i</math></i>	<i>ISO 4965-01</i>	<i>Force measured and indicated by the dynamic testing system's statically calibrated load cell under both static and dynamic conditions</i>

<sup>1</sup> DIN EN ISO 7500-1 Beiblatt 3

Begriff	Verweis	Definition
Anzeigeabweichung <i>Display deviation</i> <i>Indication error <math>e_1</math></i>	Beiblatt 3 -- ISO 4965-01	Relative Anzeigeabweichung der angezeigten dynamischen Kraft der Prüfmaschine <i>Relative accuracy error of the indicated dynamic force of the testing machine</i> Difference in the force ranges indicated by the testing system and the dynamic calibration device (DCD), expressed as a percentage of the DCD force range
Aufnehmer <i>Transducer</i>	Beiblatt 3 ASTM E467	Messgerät mit einem Ausgangssignal proportional zur gemessenen technischen Größe <i>A measuring device which has an output signal proportional to the engineering quantity being measured</i>
Cal-Faktor <i>Cal factor</i> <i>Correction factor <math>C</math></i>	ASTM E467 ISO 4965-01	Umrechnungsfaktor zwischen der Kraft am probenspezifischen Kraftaufnehmer und der von der Maschine angezeigten Kraft bei einer gegebenen Frequenz <i>The conversion factor between the dynamometer force and the indicated force</i> Ratio between the dynamic force range determined by a DCD ( $\Delta F_{DCD}$ ) and the dynamic force range indicated by the testing system ( $\Delta F_i$ ), at the same testing frequency
Cal-Funktion <i>Conversion function</i>	BS 7935-1	Umrechnungsfaktor zwischen der Kraft am probenspezifischen Kraftaufnehmer und der von der Maschine angezeigten Kraft für ein Frequenzband <i>Ratio between the dynamic force range determined by a replica test-piece and the dynamic force range indicated by a given testing system, at a given frequency</i>
Datenerfassungsgerät <i>Data acquisition equipment</i>	Beiblatt 3 ASTM E467	Gerät zur Weiterverarbeitung und Anzeige einer konditionierten Kraft in eine angezeigte Kraft <i>The equipment used to convert a conditioned force to an indicated force</i>
Dynamische Messabweichung <i>Dynamic errors</i> <i>Indication error <math>e_1</math></i>	Beiblatt 3 ASTM E467 ISO 4965-01	Aus einer dynamischen Messung entstehende Messabweichung im korrigierten Kraftausgabewert des Kraftaufnehmers der Maschine (bei bewusst korrigiertem Einfluss der Biegung des Prüfkörpers) <i>Errors in the force transducer's corrected force output that occur due to dynamic operation (with specimen bending errors intentionally corrected out)</i> Difference in the force ranges indicated by the testing system and the DCD, expressed as a percentage of the DCD force range

Begriff	Verweis	Definition
Dynamische Kraft des probenspezifischen Aufnehmers <i>Dynamic dynamometer forces</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Maximale und minimale im probenspezifischen Kraftaufnehmer erzeugte Kraft während eines dynamischen Teilversuches <i>The maximum and minimum forces produced in the dynamometer during a portion of a dynamic test</i>
Grenzwerte <i>Endlevel</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Maximaler oder minimaler Wert für die zyklische Wellenform <i>Either a maximum or minimum level for a cyclic waveform</i>
Kraft am probenspezifischen Kraftaufnehmer <i>Dynamometer force</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Am probenspezifischen Kraftaufnehmer abzulesender Wert für die Kraft <i>The force value provided by the dynamometer's readout</i>
Konditionierte Kraft  <i>Conditioned force</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Aufbereitetes Kraftsignal in analoger oder digitaler Form, das von unabhängigen Messgeräten überwacht werden kann <i>The high level voltage or digital data available from the dynamometer or force transducer's signal conditioning instrumentation; it is frequently of value during dynamic verification as it can be more conveniently monitored by stand-alone measurement instrumentation</i>
Korrigierte Kraft  <i>Corrected force</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Kraft, die sich aus der vom Kraftaufnehmer der Maschine angezeigten Kraft nach Korrektur mit einem dynamischen Korrekturfaktor ergibt <i>The force obtained after applying a dynamic correction factor to the force transducer's indicated force</i>
Kraftsollwert  <i>Force command</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Die gewünschte Kraft, die durch die Prüfmaschine auf den probenspezifischen Kraftaufnehmer aufgebracht werden soll <i>The desired force to be applied to the specimen or dynamometer by the testing machine</i>
Maschinenkraftaufnehmer <i>Force transducer</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Aufnehmer der Prüfmaschine, der die aufgebrachte Kraft anzeigt <i>The test machine transducer which indicates the applied force by means of an electrical voltage which can be measured</i> <i>Discussion: the electrical voltage typically increases linearly with applied force. The testing system may use this voltage for control.</i>

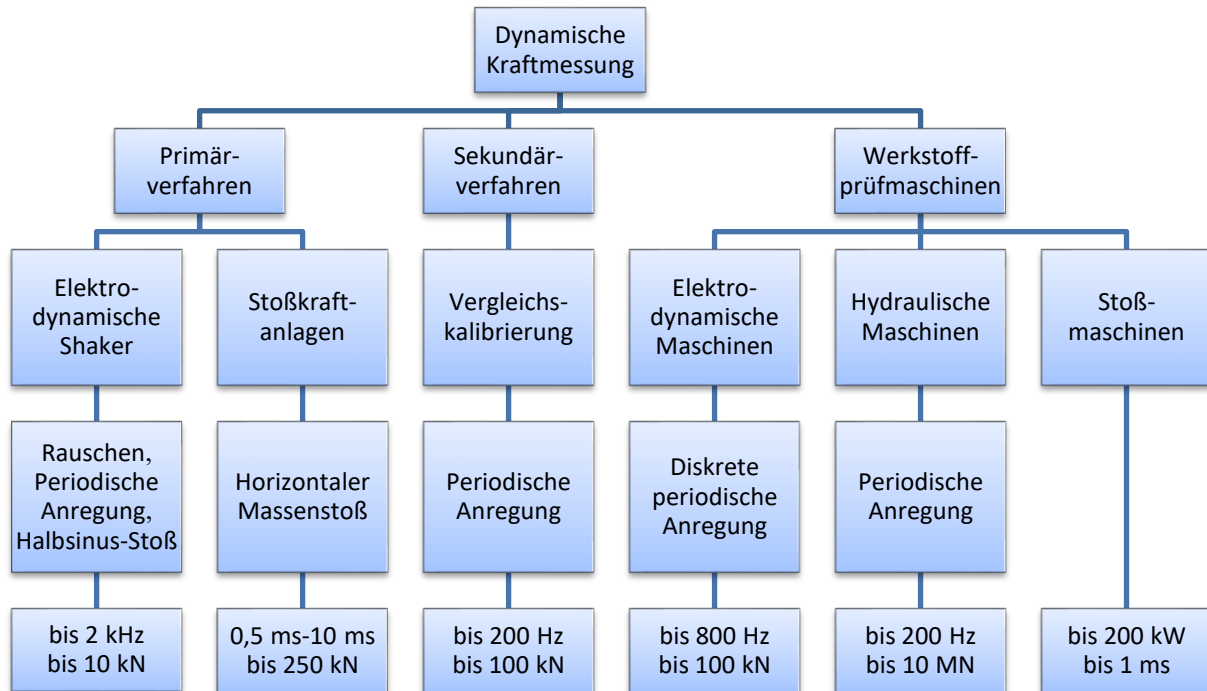
Begriff	Verweis	Definition
Messgeräte  <i>Instrumentation</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Zusammen mit einem Aufnehmer verwendete Elektronik inklusive Speisung, Messsignalaufbereitung und Auslesemöglichkeit für dieses Signal; das aufbereitete Signal ist im Allgemeinen eine elektrische Spannung und der ausgelesene Wert eine numerische Anzeige oder Ausdruck  <i>The electronics used with a transducer providing excitation for the transducer, conditioning of the measured signal, and readout of that signal; typically, the conditioned signal is a voltage and the readout is a numerical display or printout.</i>
Minimum Valley	Beiblatt 3 <i>ASTM E467</i>	Der untere Grenzwert eines Schwingungsplans <i>The minimum endlevel of a cycle</i>
Probenspezifischer Kraftaufnehmer  <i>Dynamometer</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Ein elastisches Kraftmessgerät zur Anzeige der in einem dynamischen Ermüdungsversuch aufgetragenen Kräfte. Normalerweise ist der probenspezifische Kraftaufnehmer ein mit Dehnungsmessstreifen bestückter Prüfkörper. Um genaue Messwerte über den gewünschten Frequenz- und Kraftbereich zu erhalten, sind ferner entsprechende Umformer erforderlich. <i>An elastic calibration device used to indicate the forces applied by a fatigue testing system during dynamic operation. A strain-gauged specimen is often used as the dynamometer. Suitable transducer instrumentation is also required to provide accurate readings over the intended frequency and force range.</i>
<i>Dynamic calibration device DCD</i>	<i>ISO 4965-01</i>	<i>For method A, a strain-gauged replica test-piece that has the same mass and compliance as the specimens to be tested. For method B, a strain-gauged replica test-piece or proving device, of known compliance</i>
<i>Calibration device</i>	<i>BS 7935-1+2</i>	<i>Replica test-piece or proving device</i>
Scheitelwert <i>Peak</i>	Beiblatt 3 <i>ASTM E467</i>	Die Kraftobergrenze eines Schwingungsplans <i>The maximum endlevel of a cycle</i>
Schwingbreite  <i>Span</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Differenz zwischen oberem und unterem Scheitelwert einer zyklischen Wellenform <i>The absolute value of the peak minus the valley for a cyclic waveform</i>
<i>Dynamic force range <math>\Delta F</math></i>	<i>ISO 4965-1</i>	<i>Difference between the maximum (peak) and minimum (valley) values of force under cyclic conditions</i>
<i>Force range</i>	<i>BS 7935-1</i>	<i>Difference between the maximum and minimum peak values of force under cyclic conditions</i>



Begriff	Verweis	Definition
Schwingprüfmaschine  <i>Fatigue testing system</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Eine Vorrichtung, mit der wiederholt Kraftzyklen auf einen Prüfkörper oder ein Bauteil aufgebracht werden; die Kraftzyklen haben stets gleiche Schwingbreite, Frequenz, Wellenform, Mittelwert und Grenzwerte <i>A device for applying repeated force cycles to a specimen or component, which applies repeated force cycles of the same span, frequency, wave shape, mean level, and end levels</i>
Spitzenwertbestimmung  <i>Peak picking</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Die Bestimmung des Scheitelwerts oder des Minimums einer zyklischen Wellenform <i>The process of determining the peak or valley of a cyclic waveform</i>
Tatsächliche Kraft  <i>True force</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Die tatsächlich auf den Prüfkörper oder den probenspezifischen Kraftaufnehmer aufgebrachte Kraft <i>The actual force applied to the specimen or dynamometer</i>
Wiederholbarkeit  <i>Repeatability</i>	Beiblatt 3  <i>ASTM E467</i>	Übereinstimmung der dynamischen Kräfte unter gleichbleibenden Bedingungen bei wiederholten Messungen <i>The closeness of agreement among repeated measurements of the dynamic forces under the same conditions</i>

### 3 Einteilung dynamischer Kräfte

#### 3.1 Anwendung dynamischer Kräfte zu Kalibrier- und Prüfzwecken



**Abbildung 3:** Einteilung dynamischer Kraftmessung mit derzeitigem Stand der Technik


### 3.2 Übersicht von dynamischen Kraftanregungen (Beispiele)

Tabelle 4: Übersicht von dynamischen Kraftanregungen

Anregungsart	Zeitbereich	Frequenzbereich
Rauschen		
Sinus		
Stoß		
Sprung		

### 3.3 Einteilung nach Primär- und Sekundärmethode

	Primärmethode	Sekundärmethode
	Kraftmessung über primäre Verfahren rückgeführt (einseitige Krafteinleitung, z. B. Sinus, Stoß)	Rückführung über Referenzkraftaufnehmer. (eingespannter, dynamisch belasteter Aufnehmer, (z. B. mit Referenzaufnehmer in Werkstoffprüfmaschine))
Modell		
Amplitudengang der Übertragungsfunktion	<p>Verhältnis der Beschleunigungsamplituden</p> $S_{bt} = \frac{\ddot{x}_b}{\ddot{x}_t}$	<p>Kraftamplitude des Prüflings (Dämpfung vernachlässigt):</p> $F_2 = k_2 \cdot (x_2 - x_1)$ $= F_1 + m_1 \cdot \ddot{x}_1$
Phasengang der Übertragungsfunktion	$\phi = \phi(\ddot{x}_b) - \phi(\ddot{x}_t)$	$\phi = \phi(F_2)$

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	21 / 39

## 4 Technische Ausrüstung

### 4.1 Normale

Für die dynamische Kalibrierung haben sinus- und pulsformige Kräfte die größte praktische Bedeutung. Diese im Zeit- und Frequenzbereich sehr unterschiedlichen Anregungen ermöglichen es, die Vielfalt dynamischer Kraftmessaufgaben relativ anwendungsnah abzudecken.

Bei der Sinuskalibrierung wirken sinusförmige Kräfte auf den zu kalibrierenden Kraftaufnehmer. Die auf ein Referenzsignal bezogenen Amplituden und Phasenlagen werden als dynamisches Kalibrierergebnis ausgewertet. In der Kalibrierung werden dabei nacheinander Sinusanregungen verschiedener Frequenzen durchgeführt, um das Aufnahmeverhalten in einem möglichst großen Frequenzbereich zu charakterisieren.

Bei der Stoßkalibrierung wirken Kraftpulse definierter Amplitude, Dauer und Form auf den zu kalibrierenden Kraftaufnehmer. Das Verhältnis der Pulshöhen von Ausgangssignal und Eingangskraft ist ein typisches Kalibrierergebnis, ist aber bei näherer Betrachtung von der Dauer und Form des Kraftpulses abhängig.

#### 4.1.1 Primärkalibrierung

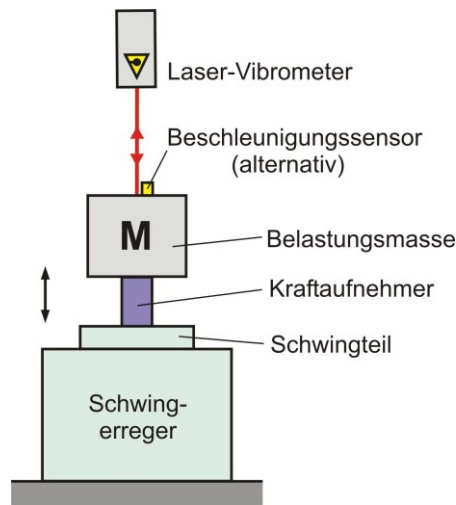
Zur dynamischen Primärkalibrierung eignen sich insbesondere Verfahren, bei denen die Messkraft mit Hilfe von beschleunigten Massekörpern definiert erzeugt wird. Gemäß dem zweiten Newtonschen Gesetz berechnet sich die Trägheitskraft  $F$  einer beschleunigten Masse aus dem Produkt von Masse und Beschleunigung,  $F(t) = m \cdot a(t)$ , die Masse  $m$  sei hierbei konstant, die Beschleunigung  $a$  ist von der Zeit  $t$  abhängig. Die Rückführung der dynamischen Kraft verlangt somit die Bestimmung des Massewertes  $m$  (durch Wägung) und des zeitabhängigen Beschleunigungsverlaufes  $a(t)$  (mittels Beschleunigungssensoren). Die Beschleunigungsmessung lässt sich sowohl über optische Verfahren (z. B. mittels Laser-Vibrometer) als auch über mechanisch kontaktierende Sensoren realisieren.

Verfahren zur dynamischen Primärkalibrierung von sinus- und stoßförmigen Kräften sind Thema aktueller Forschungstätigkeiten [6], [7] nationaler Metrologieinstitute wie der PTB. In Anlehnung an die Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern [8], [9], [10] ist es hierbei das Ziel, die Messergebnisse unterschiedlicher Verfahren und Messeinrichtungen mittels parametrischer Modellierung ineinander überführbar zu machen. Die beispielsweise aus der Kalibrierung durch Regression bestimmten Modellparameter des Kraftaufnehmers werden es erlauben, das dynamische Messverhalten eines Kraftaufnehmers in einer beliebigen Anwendung beschreiben zu können.

##### 4.1.1.1 Sinusförmige Belastung

Das Grundprinzip eines Verfahrens zur Primärkalibrierung mit sinusförmigen Kräften ist in Abbildung 4 veranschaulicht. Ein Schwingerreger generiert eine periodische Fußpunkt-auslenkung des auf dem Schwingteil befestigten, zu kalibrierenden Kraftaufnehmers. Die an der Aufnehmeroberseite angekoppelte Belastungsmasse  $M$  erzeugt eine Trägheitskraft, die die gewünschte dynamische Eingangsgröße darstellt.

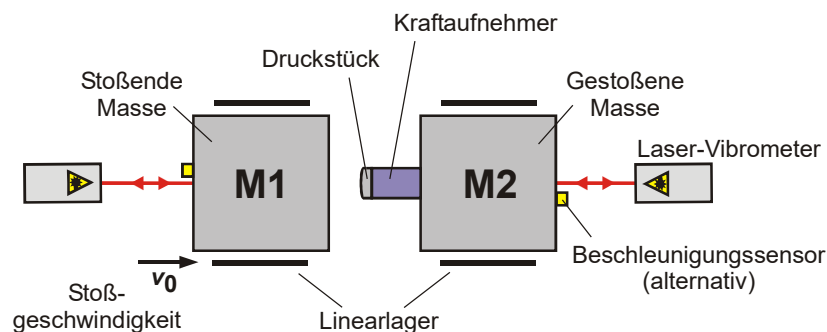
Weiterführende Information zur dynamischen Kraftkalibrierung mit sinusförmigen Kräften findet sich in [6], [7], [11], [12].



**Abbildung 4:** Grundprinzip der Primärkalibrierung mit sinusförmigen Kräften

#### 4.1.1.2 Stoßförmige Belastung

Das Grundprinzip eines Verfahrens zur Primärkalibrierung mit stoßförmigen Kräften ist in Abbildung 5 beispielhaft skizziert. Zwei Massekörper werden mit dem dazwischen montierten, zu kalibrierenden Kraftaufnehmer, zum Stoß gebracht. Der von einem Linearantrieb auf die gewünschte Stoßgeschwindigkeit beschleunigte Massekörper M1 trifft auf den Kraftaufnehmer, der auf dem Massekörper M2 befestigt ist und sich mit ihm anfangs in Ruhe befindet. Beim Stoß wird der Impuls auf den gestoßenen Körper übertragen und die dabei auftretenden Trägheitskräfte werden mit Hilfe von Sensoren gemessen. Die Rückführung der dynamischen Kraft erfolgt dabei über eine Beschleunigungsmessung, beispielsweise mittels Laser-Vibrometer oder Beschleunigungssensoren.



**Abbildung 5:** Grundprinzip der Primärkalibrierung mit stoßförmigen Kräften

Im Vergleich von Sinus- und Stoßkalibrierung ist festzuhalten, dass Stoßverfahren sehr gut für hohe Kraftamplituden geeignet sind, die bei sinusförmiger Anregung nicht realisierbare große Belastungsmassen bzw. Schwingwege erfordern würden.

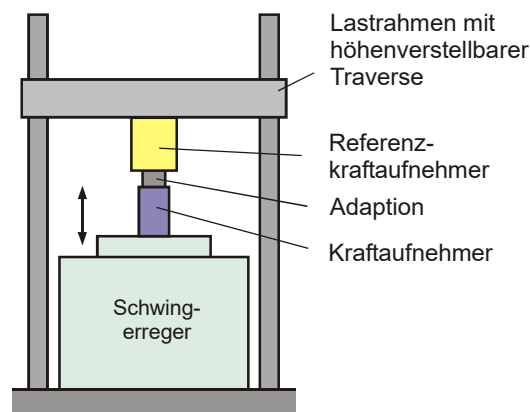
Weiterführende Information zur dynamischen Kraftkalibrierung mit stoßförmigen Kräften finden sich in [6] - [8], [14], [15].

#### 4.1.2 Sekundärkalibrierung

Im Unterschied zur Primärkalibrierung werden die Kalibriersignale durch Messung mittels dynamisch rückführbar kalibrierter Referenzkraftaufnehmer dargestellt.

##### 4.1.2.1 Sinusförmige Belastung

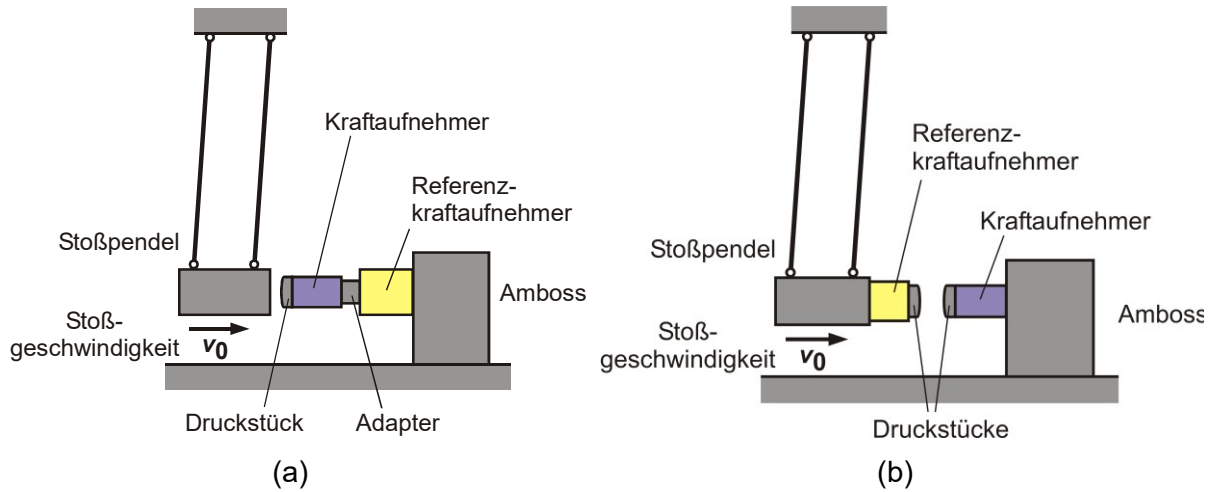
Bei der Sinuskalibrierung mit höheren Kräften und niedrigen Frequenzen ist ein auf der Generierung von Trägheitskräften basierendes Primärkalibrierverfahren weniger gut geeignet, da dabei gegebenenfalls unverhältnismäßig große und schwere Belastungsmassen erforderlich wären oder die Schwingamplituden unzulässig groß würden. Für diese Anforderungen eignet sich deshalb besser ein Verfahren, bei dem die Kräfte in einem vorgespannten Lastrahmen durch entsprechende elastische Verformungen erzeugt werden. Der Aufbau eines derartigen nach dem Vergleichsverfahren arbeitenden Verfahrens ist in Abbildung 6 skizziert. Der zu kalibrierende Kraftaufnehmer, ein Referenzkraftaufnehmer und ein Schwingerreger sind in einem Lastrahmen mechanisch in Reihe verspannt. Über eine in der Höhe verstellbare Traverse lässt sich die Einbauhöhe den jeweiligen Erfordernissen anpassen.



**Abbildung 6:** Grundprinzip der Sekundärkalibrierung mit sinusförmigen Kräften


##### 4.1.2.2 Stoßförmige Belastung

Eine Sekundärkalibrierung mit Kraftstößen lässt sich beispielsweise auf Stoßpendel-Einrichtungen durchführen (siehe Abbildung 7). Hierbei werden der zu kalibrierende Kraftaufnehmer und ein Referenzkraftaufnehmer mechanisch in Reihe angeordnet zum Stoß gebracht. Beide Aufnehmer können z. B. auf dem feststehenden Amboss montiert werden (Abbildung 7a), oder Prüfling und Referenzkraftaufnehmer werden jeweils auf dem Amboss und dem Stoßpendel befestigt (Abbildung 7b). Bedingt durch die beim Stoß generierten Trägheitskräfte von Aufnehmern und Adaptionsteilen (Druckstücke, Adapter) wirken im Allgemeinen auf beide Kraftaufnehmer unterschiedliche Kräfte. Abhängig von der Masse- und Steifigkeitsverteilung der im Kraftfluss liegenden Komponenten können die dabei auftretenden Messabweichungen insbesondere bei kurzen Stoßpulsen sehr groß werden, so dass ein derartiges Vergleichsverfahren keine brauchbare Kalibrierung mehr liefern würde.



**Abbildung 7:** Grundprinzip der Sekundärkalibrierung mit stoßförmigen Kräften unter Verwendung eines Stoßpendels, gemeinsame Befestigung beider Aufnehmer auf dem Amboss (a), getrennte Befestigung auf Stoßpendel und Amboss (b)



	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	25 / 39

## 4.2 Erreger

### 4.2.1 Schwingungserreger

Für die Erzeugung einer Sinus- oder Multisinusschwingung kommen hauptsächlich elektrodynamische Schwingungserreger in Betracht, bei denen sich eine mit dem Schwingteil verbundene (meist zylindrische) Spule in einem Magnetfeld bewegt. Die axiale Führung dieses Systems erfolgt mit Luftlagern, durch Membranfedern oder durch Wälzlager. Es gibt keinen Schwingungserreger, der für alle Frequenzen, Massen und Kraftamplituden gleich gut geeignet ist. Unter den vielen Schwingungserreger-Typen, die vorwiegend für Schwingungsprüfungen entwickelt wurden, haben sich nur wenige Typen für Kalibrierzwecke mit folgenden Merkmalen durchgesetzt:

1. Quer- und Taumelschwingungen möglichst gering
2. Magnetfeld an der Ankopplungsfläche des Schwingteils möglichst gering
3. Kraft für die Kalibrierung hinreichend groß
4. Betrieb des Schwingungserregers möglichst ohne Kühlung
5. vorzugsweise vertikale Schwingungsrichtung


Für die Aufstellung der Schwingungserreger gelten folgende Anforderungen:

1. Vorzugsweise Schwingungsisolierung des Schwingungserregers vom Aufstellort durch Isolatoren
2. Tiefe Abstimmung der Isolatoren: Die höchste Eigenfrequenz des schwingungs isolierten Systems (Schwingungserreger, Kalibrier Aufbau mit Kalibriergegenstand) muss viel kleiner sein als die niedrigste Erregerfrequenz.
3. Praktisch begrenzt der Schwingweg die Kraftamplitude bei tiefen Frequenzen, so dass für die meisten Schwingungserreger gilt: Die untere Frequenz, bei der die volle Kraftamplitude des Erregers zur Verfügung steht, ist wesentlich größer als die höchste Eigenfrequenz des schwingungs isolierten Systems.

Es gibt keinen Schwingungserreger, dessen Schwingteil sich ausschließlich in axialer Richtung (z-Richtung) bewegt. Je nach konstruktiver Ausführung des Schwingungserregers entstehen frequenz- und belastungsabhängig Kipp- und/oder Taumelbewegungen des Schwingteils, die transversal (x-, y-Richtung) zur nominellen Schwingungsrichtung Quer- komponenten der Kraft erzeugen.

Durch die Querrichtungsempfindlichkeit von mit seismischer Masse arbeitendem Beschleunigungsnormal und der Querrichtungsempfindlichkeit des Prüflings werden parasitäre Signal- komponenten generiert. Bei solchen Kalibrierbauten kann nur mit erhöhter Mess- sicherheit kalibriert werden.

Bei Primärkalibrierungen mit Laservibrometern verringert sich dieser Effekt, da ein Laser- vibrometer keine Querrichtungsempfindlichkeit aufweist.

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	26 / 39

#### 4.2.2 Stoßerreger

Im Falle der Stoßerregung gelten folgende Bedingungen:

1. Hammer-Amboss-Prinzip generiert Stoß.
2. Der Stoß muss geradlinig erfolgen.
3. Der Kraftnebenschluss durch die Lagerung muss vernachlässigbar sein.

##### 4.2.2.1 Stoßeinrichtung mit linear geführter Stoßmasse

Die vom einem Antrieb beschleunigte Stoßmasse kann entweder auf ein frei gelagertes Ziel (siehe Abbildung 5) oder ein fest gelagertes Ziel (Hammer-Amboss-Prinzip, ähnlich Abbildung 7) aufschlagen. Eine freie, reibungsarme und geradlinige Lagerung der Stoßmasse lässt sich mit Hilfe von Luftlagern durchführen. Die Beschleunigung des stoßenden Massekörpers erfolgt mit Hilfe eines geeigneten Antriebs. Mögliche Antriebsmechanismen sind:

1. Federantrieb
2. Hydraulikantrieb
3. elektrodynamischer Antrieb
4. Stoßpendel

##### 4.2.2.2 Stoßpendel, z. B. mit multifilarer Aufhängung

Die Pendelauslenkung und Pendelauslösung lässt sich über verschiedene Mechanismen realisieren. Der Aufschlag kann dabei auf ein festes Ziel (Hammer-Amboss-Prinzip, wie Abbildung 7), oder bei Auslegung als Doppelpendel, auf ein frei gelagertes Ziel erfolgen.

##### 4.2.2.3 Fallmassen-Stoßeinrichtung

Diese Einrichtung verwendet zur Stoßerzeugung eine im Schwerfeld vertikal fallende Fallmasse (Hammer-Amboss-Prinzip). Hierfür lassen sich beispielsweise Kugeln verwenden, die aus einer vorgegebenen Höhe fallen gelassen werden. Zur vertikalen Führung der Fallmasse kann gegebenenfalls ein Luftlager eingesetzt werden. Bei magnetischen Fallmassen lassen sich zum Anheben und Auslösen der Fallmasse Elektromagnete einsetzen.

##### 4.2.2.4 Elektrodynamische und elektrohydraulische Stoßerreger

Der Kalibrieraufbau zur Stoßanregung erfolgt analog Abbildung 4 (Primärkalibrierung) beziehungsweise Abbildung 6 (Sekundärkalibrierung).

Die Stoßanregungen mit seismischer Krafterzeugung der Primärkalibrierung (siehe Abbildung 4) ermöglichen nur vergleichsweise kleine Stoßkräfte, verglichen mit Stoßeinrichtungen, die stoßende Massekörper verwenden.

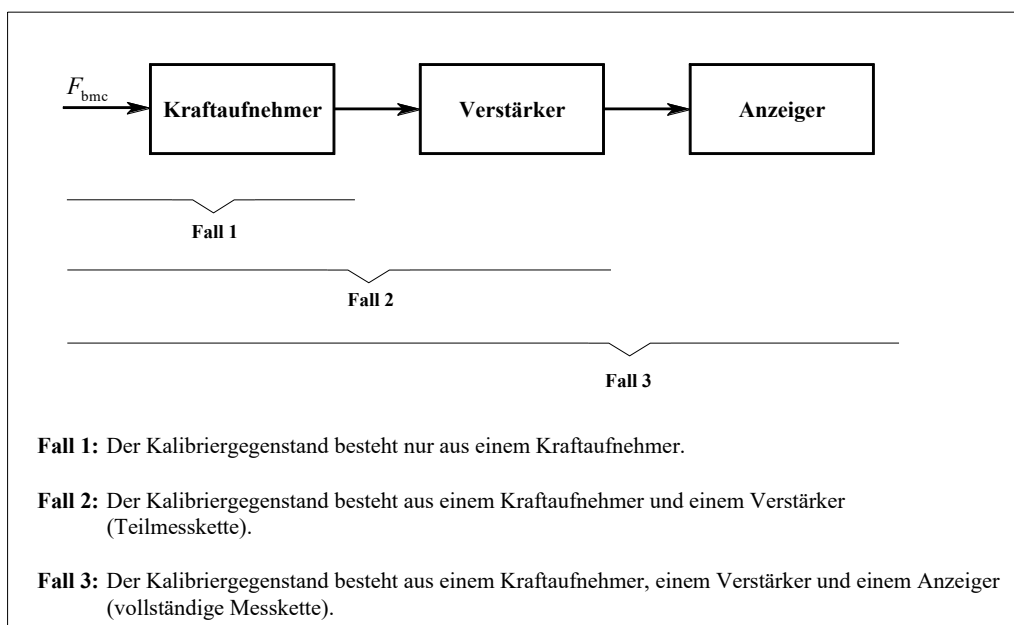
### 4.3 Kraftaufnehmer

#### 4.3.1 Bestandteile der Kraftmesskette - Kalibriergegenstand

Die vollständige Kraftmesskette besteht aus einem Kraftaufnehmer, einem Signalconditionierer (z. B. Verstärker) und einem Ausgeber (z. B. Anzeigeeinrichtung, Software). Beliebige Kombinationen in der Zusammenstellung von Kraftaufnehmer, Verstärker, Anzeiger, gemeinsam untergebracht in einer Einheit, sind möglich. Bei Kraftmessgeräten mit digitalem Ausgang kann anstelle der Geräteanzeige der Messwert auch über eine genormte Schnittstelle auf ein Datenendgerät – Drucker, Aufzeichnungsgerät oder Rechner – übertragen werden. Eine Anzeige der Messwerte während der Kalibrierung wird empfohlen. Es ist sicherzustellen, dass die eingelesenen Daten eindeutig interpretiert und verarbeitet werden.

Falls der Kalibriergegenstand nur aus dem Kraftaufnehmer besteht, muss mit dynamisch rückführbar kalibrierten Verstärkern und Anzeigern eine Messkette zusammengestellt werden. Es ergeben sich unter anderem Unterschiede in der Messunsicherheitsbetrachtung. Die vollständige Messkette ist vorzuziehen, da hier nur die Messunsicherheit einer Kalibrierung und nicht die Summe mehrerer Einzelkalibrierungen zu betrachten ist.

Abbildung 8 zeigt die unterschiedlichen Fälle, die als Kalibriergegenstand auftreten können.



**Abbildung 8:** Fallunterscheidung Kalibriergegenstand

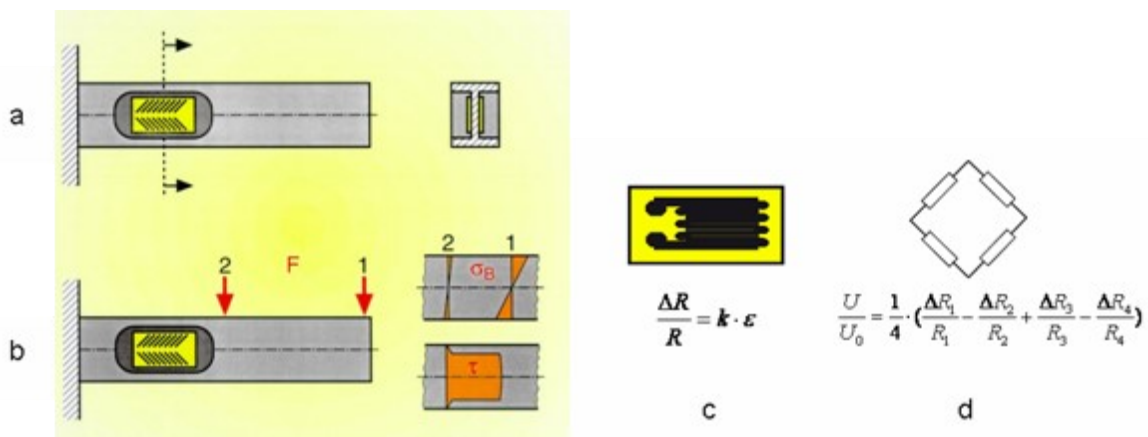
Es können Kalibrierungen über den gesamten Nennmessbereich, oder über einen Teilmessbereich (falls ein größerer Sicherheitsbereich für dynamische Spitzenbelastungen benötigt wird) durchgeführt werden.

Die Auflösung bei den einzelnen Komponenten des Kalibriergegenstands (Aufnehmer, Verstärker, Anzeiger) ist so zu wählen, dass die angestrebte Messunsicherheit erreicht werden kann.

### 4.3.2 Kraftaufnehmer auf Basis von Dehnungsmessstreifen (DMS)

Im Folgenden werden Einkomponenten-Kraftaufnehmer näher beschrieben. Diese eignen sich für die Messung bei einer definierten Belastungsrichtung. Daneben gibt es auch Mehrkomponenten-Kraftaufnehmer, die Kräfte in mehreren Richtungen und auch kombiniert Drehmomente messen. Die physikalischen Grundprinzipien entsprechen denen der folgenden Absätze, zur übersprechungsfreien Erfassung der Kräfte ist jedoch ein komplexer Aufbau des Messkörpers notwendig.

Ein Verformungskörper wird der zu messenden Kraft ausgesetzt, wodurch eine mechanische Spannung entsteht. Diese Spannung zieht nach dem Hookeschen Gesetz eine Dehnung nach sich.



**Abbildung 9:** Funktionsweise eines Kraftaufnehmers auf Basis von DMS

Abbildung 9 zeigt die Funktionsweise eines DMS-Kraftaufnehmers: Ein Federkörper (a) wird mit einer Kraft belastet (b) und verformt sich entsprechend. Die installierten DMS wandeln die entstehende Dehnung in eine Widerstandsänderung um (c). Durch Anwendung der Wheatstoneschen Brückenschaltung entsteht eine Ausgangsspannung, die proportional der verwendeten Speisespannung  $U_0$  und der Widerstandsänderung (d) und somit proportional der anliegenden Kraft ist. Alle Zusammenhänge sind in sehr guter Näherung linear voneinander abhängig [16].

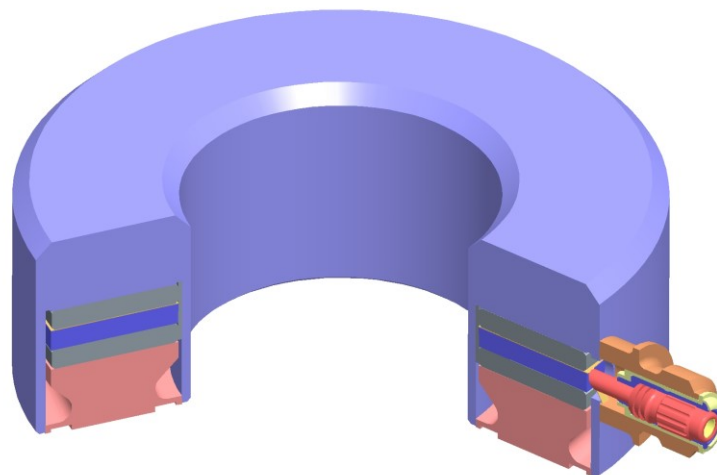
Die Bauform, das Trägermaterial und das Metall des Messgitters des DMS werden jeweils dem Material und den Abmessungen des Messkörpers angepasst. Temperaturverhalten und Kriechen werden hierdurch optimiert. Durch DMS mit angepasstem Temperaturkoeffizienten wird der Einfluss der Wärmedehnung des Federkörpermaterials minimiert.

Die Bauformen der DMS-Kraftaufnehmer sind sehr vielfältig, können auf reine Druckbelastung oder auf Zug- und Druckbelastung ausgelegt sein. Für die mechanische Ankopplung werden beispielsweise zentrale Gewinde oder Flanschgeometrien verwendet.

DMS selbst eignen sich hervorragend zur Messung dynamischer Kräfte [17]. Infolge ihrer sehr geringen Masse lässt sich der Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Messkörpers vernachlässigen. Im dynamischen Einsatz sind jedoch die Eigenfrequenz des Kraftaufnehmers und der Einfluss der angekoppelten Feder-Masse-Systeme zu beachten.

### 4.3.3 Piezoelektrische Kraftaufnehmer

Piezoelektrische Materialien erzeugen bei mechanischer Belastung elektrische Ladungen, die mit Hilfe von Ladungsverstärkern in dazu proportionale elektrische Spannungen umgewandelt werden. Die meisten Kraftaufnehmer arbeiten mit einem Messelement, das im Wesentlichen aus dünnen Quarzplatten, -scheiben oder -stäben besteht. Durch die hohe Steifigkeit des Kristalls sind die Messwege entsprechend klein, die meist im Bereich weniger Mikrometer liegen. Der endliche Isolationswiderstand macht rein statische Messungen mit piezoelektrischen Aufnehmern unmöglich. Die piezoelektrischen Aufnehmer verfügen aber zusammen mit geeigneten Signalaufbereitungsgeräten über gute quasistatische und dynamische Messeigenschaften.




**Abbildung 10:** Schematischer Aufbau eines piezoelektrischen Kraftaufnehmers

Zur Messung von Kräften in einer definierten Raumrichtung werden Einkomponenten-Kraftaufnehmer eingesetzt, die in verschiedenen Bauformen erhältlich sind. Grundsätzlich halten eine Grund- und eine Deckplatte zwei Quarzscheiben in einem dicht verschweißten Gehäuse unter leichter Vorspannung. Die zwischen den Quarzplatten liegende Elektrode nimmt das zur aufgebracht Kraft proportionale Messsignal auf und leitet es an den Stecker.

Für den Einsatz von Zug- und Druckkräften werden die ringförmig ausgeführten Kraftaufnehmer zwischen zwei Spezialmuttern gespannt, wodurch ein Kraftmesselement entsteht. Die Flächen der Ankopplung müssen die Anforderungen an eine hohe Oberflächengüte erfüllen, damit die Kräfte homogen übertragen werden.

Aufnehmer für kleinere Kräfte besitzen einen grundsätzlich anderen Aufbau. Zwischen den krafteinleitenden Teilen sind schlanke Stäbe eingespannt. Der piezoelektrische Transversaleffekt in den Stäben ergibt gegenüber den Quarzscheiben eine deutlich höhere Empfindlichkeit.

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	30 / 39

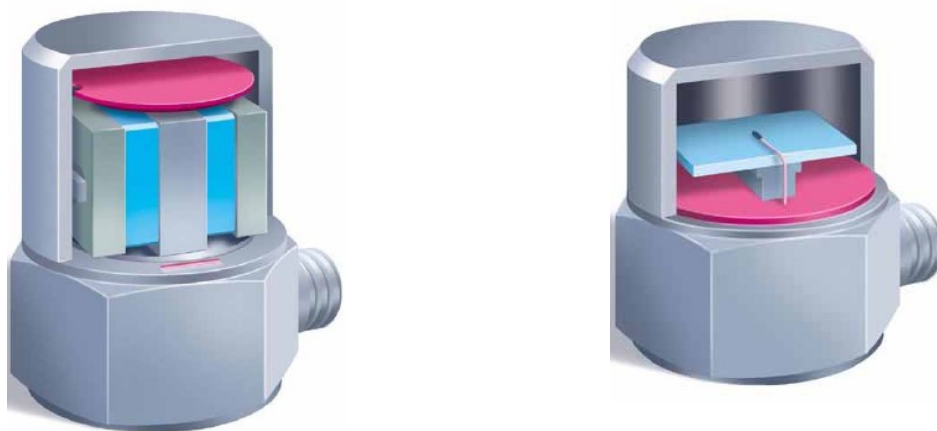
## 4.4 Beschleunigungsaufnehmer

Beschleunigungsaufnehmer dienen zum messtechnischen Erfassen der vektoriellen Messgröße Beschleunigung. Diese tritt periodisch oder stoßförmig auf. Durch geeignete mathematische Behandlung des gemessenen Beschleunigungssignals können die Größen Geschwindigkeit und Weg dargestellt werden.

Jeder Beschleunigungsaufnehmer enthält ein (bei mehrachsigen messenden Aufnehmern mehrere) elektromechanisches Wandler- oder Messelement, das die auf den Aufnehmer wirkende Beschleunigung in ein proportionales elektrisches Signal wandelt. Das Messelement befindet sich in einem Gehäuse, welches mit seiner Montagefläche das Befestigen des Aufnehmers an der zu untersuchenden Struktur ermöglicht. Das elektrische Signal steht an einem Steckeranschluss, an Lötanschlüssen oder einem integrierten Kabel zur Verfügung.

### 4.4.1 Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer

Das Messelement des piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers enthält piezoelektrisches Material (Quarz, andere piezoelektrische Kristalle, Turmalin, ferroelektrische Keramik), welches bei mechanischer Deformation an seinen Prismenflächen elektrische Ladung zur Verfügung stellt. Die mechanische Deformation erfolgt durch Krafteinwirkung, indem die auf den Aufnehmer wirkende Beschleunigung über die seismische Masse des Messelements auf das piezoelektrische Material wirkt.




**Abbildung 11:** Schematischer Aufbau eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers (links K-Shear®, rechts K-Beam®)

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer arbeiten hauptsächlich nach dem Kompressions- oder Schubprinzip. Beim Kompressionsprinzip wird das piezoelektrische Material durch Druckkräfte deformiert und beim Schubprinzip wirken Schub- oder Scherkräfte auf das piezoelektrische Material. Bauartbedingt können Beschleunigungsaufnehmer nach dem Kompressionsprinzip eine erhebliche Empfindlichkeit gegenüber Temperaturänderungen und Basisdehnung aufweisen. Beschleunigungsaufnehmer nach dem Schubprinzip weisen eine wesentlich geringere Empfindlichkeit gegenüber Temperaturänderungen und Basisdehnung auf.

Aufnehmer mit Ladungsausgang werden mit einem externen Signalkonditionierer betrieben. Dabei muss ein hoch isolierendes und rauscharmes Anschlusskabel verwendet werden. Sie weisen einen sehr hohen Dynamikbereich und ein sehr geringes Grundrauschen auf. Die



	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	31 / 39

untere Grenzfrequenz kann im Bereich einiger Millihertz liegen; echt statisches Messen ( $f = 0$  Hz) ist jedoch nicht möglich. Bei Aufnehmern mit Spannungsausgang ist der Signalkonditionierer im Aufnehmer integriert. Das Verwenden von hoch isolierenden und rauscharmen Anschlusskabeln ist deshalb nicht notwendig. Diese Aufnehmer werden mit einem Speisegerät für die im Aufnehmer integrierte Elektronik betrieben. Gegenüber den Aufnehmern mit Ladungsausgang weisen Aufnehmer mit Spannungsausgang einen eingeschränkten Dynamikbereich auf. Die untere Grenzfrequenz liegt in der Regel im Bereich von etwa 0,5 Hz bis 1 Hz.

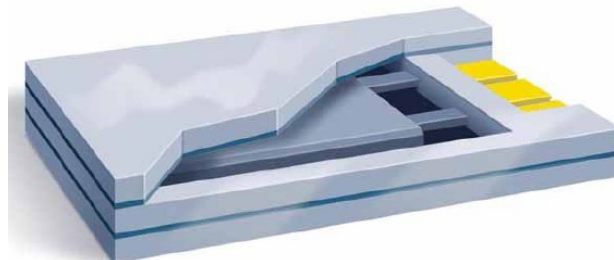
#### 4.4.2 Piezoresistive Beschleunigungsaufnehmer

Das Wandler- oder Messelement eines piezoresistiven Beschleunigungsaufnehmers besteht aus einem Silizium-Einkristall, in den eine Halb- oder Vollbrücke eindiffundiert ist. Die auf die seismische Masse des Messelements wirkende Beschleunigung deformiert den Silizium-Einkristall und verstimmt die Messbrücke. Am Ausgang des Brückenverstärkers steht ein zur wirkenden Beschleunigung proportionales Spannungssignal zur Verfügung. Das Ausgangssignal verhält sich ratiometrisch, d. h. es ist abhängig von der Brücken-Speisespannung.

Piezoresistive Beschleunigungsaufnehmer weisen die höchsten nutzbaren Frequenzbereiche auf. Diese können aber nur dann vollständig genutzt werden, wenn der Aufnehmer gemäß Herstellerangabe so steif wie möglich an der zu untersuchenden Struktur befestigt wird. Piezoresistive Beschleunigungsaufnehmer sind oft gasgedämpft und weisen dadurch keine Resonanzüberhöhung auf. Mit piezoresistiven Beschleunigungsaufnehmern kann echt statisch gemessen werden ( $f = 0$  Hz).


#### 4.4.3 Kapazitive Beschleunigungsaufnehmer

Das Wandler- oder Messelement eines kapazitiven Beschleunigungsaufnehmers besteht in der Regel aus einem mikromechanisch gefertigten Differenzialkondensator mit zwei feststehenden Elektroden und einem sich dazwischen befindlichen Feder-Masse-System. Die auf den Aufnehmer wirkende Beschleunigung lenkt dieses Feder-Masse-System aus und verstimmt dadurch die kapazitive Messbrücke. Die im Aufnehmer integrierte ASIC (application-specific integrated circuit) stellt ein zur wirkenden Beschleunigung proportionales Spannungssignal zur Verfügung. In der Regel wird zum Betreiben eines kapazitiven Beschleunigungsaufnehmers kein Signalaufbereitungsgerät benötigt. Der Aufnehmer muss nur nach Herstellerangabe mit einer Speisespannung versorgt werden.



**Abbildung 12:** Schematischer Aufbau eines kapazitiven Beschleunigungsaufnehmers

Kapazitive Beschleunigungsaufnehmer sind in der Regel gasgedämpft und weisen dadurch keine Resonanzüberhöhung auf. Die untere Grenzfrequenz ist  $f = 0$  Hz, womit echt statisches Messen möglich ist. Bauartbedingt liegt der nutzbare Frequenzbereich bei etwa 1 kHz. Teilweise sind sie mit mechanischen Anschlägen versehen, was sie gegen Überlast schützt.

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	32 / 39

#### 4.4.4 Servo-Beschleunigungsaufnehmer

Servo-Beschleunigungsaufnehmer sind die empfindlichsten und genauesten Beschleunigungsaufnehmer. Sie enthalten eine seismisch aufgehängte Masse mit einem Wegaufnehmer. Wird der Beschleunigungsaufnehmer einer Bewegung ausgesetzt, verschiebt sich die Masse gegenüber dem Gehäuse um einen sehr kleinen Betrag. Diese kleine Auslenkung erzeugt ein Fehlersignal in einem Regelkreis, aus dem eine Regelgröße aufgebaut wird, die der Masse so zugeführt wird, dass das anfängliche Fehlersignal gegen Null geht. Die Beschleunigung ist dieser Regelgröße proportional. Sie wird durch den Spannungsabfall an einem zu der Spule in Reihe geschalteten Widerstand gemessen; die Spule erzeugt die Kraft zur Korrektur der Lage der seismischen Masse.

Servo-Beschleunigungsaufnehmer können zum Messen besonders kleiner Schwingamplituden sehr empfindlich gemacht werden. Der typische Frequenzbereich beträgt 0 Hz bis 50 Hz. Nachteile von Servo-Beschleunigungsaufnehmern sind ihr kleiner Frequenzbereich, ihre Größe und Masse sowie ihre Zerbrechlichkeit.


#### 4.4.5 Laservibrometer

Laservibrometer ermöglichen eine berührungslose Beschleunigungsmessung, bei denen das Messobjekt nicht durch die zusätzliche Masse eines Beschleunigungsaufnehmers beeinflusst wird. Ein Laserstrahl wird auf eine reflektierende Oberfläche an der zu messenden beschleunigten Masse fokussiert. Der reflektierte Strahl wird mit dem Ursprungslaserstrahl überlagert und aus der Analyse der Frequenz des reflektierten Strahles lässt sich mittels Dopplereffekt die Geschwindigkeit des Messobjekts ermitteln.

Je nach Ausführung des Laservibrometers können Einpunktmessungen, differentielle Messungen oder auch 3D-Messungen der Beschleunigungen durchgeführt werden.

Laservibrometer sind bis in den Kilohertz-Bereich einsetzbar, Messunsicherheiten von < 0,1 % können erreicht werden.




	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	33 / 39

## 4.5 Krafteinleitung

Bei der dynamischen Kraftmessung ist zu berücksichtigen, dass Krafteinleitungseffekte, die auch aus der statischen Kraftmessung bekannt sind, sich durch die zeitliche Änderung der Kraft in der Regel deutlich vergrößern. Daraus resultieren folgende Anforderungen:

1. *Einbau- und Kontaktflächen* müssen eben und sauber sowie frei von Fremdkörpern und Beschädigungen sein. Details zur richtigen mechanischen Adaption müssen den jeweiligen Montageanleitungen der Hersteller entnommen werden.
2. *Geringe Massenträgheit* der Krafteinleitungsteile. Angekoppelte Massen haben einen Einfluss auf das Messergebnis; insbesondere die Auswirkungen auf den Frequenzgang sind zu beachten.
3. *Geringe Exzentrizitäten*, da diese sich zeitlich ändernde Biegemomente verursachen.
4. *Geringe Einleitung von Störgrößen* wie Biegemomente, Drehmomente und Querkräfte, da auch diese sich zeitlich ändern.
5. *Spielfreie Krafteinleitung*. Auf eine feste Montage und Ankopplung ist besonders zu achten. Wird die Kraft über Gewinde eingeleitet, so ist bei der Montage darauf zu achten, dass die vom Hersteller vorgeschriebenen Drehmomente und gegebenenfalls notwendigen Vorspannungen eingehalten werden.
6. *Reproduzierbare Kontaktsteifigkeiten*. Zwecks Erzielung reproduzierbarer Bedingungen bei der Befestigung mechanischer Komponenten sollten Schraubverbindungen kontrolliert angezogen werden (z. B. mittels Drehmomentschlüssel).

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	34 / 39

## 4.6 Elektronik

### 4.6.1 Messverstärker für DMS-Kraftaufnehmer

Messverstärker für DMS-Kraftaufnehmer verstärken die im Millivoltbereich liegende Brückenausgangsspannung der Wheatstoneschen Messbrücke auf einen Pegel im Voltbereich.

Die Wheatstonesche Brückenschaltung kann sowohl mit Gleichspannung als auch mit Wechselspannung (sogenannte Trägerfrequenzmessverstärker) gespeist werden. Trägerfrequenzmessverstärker haben den Vorteil der geringeren Empfindlichkeit gegenüber Störgrößen (z. B. Thermospannungen, Störimpulse), da nur ein schmales Frequenzband verstärkt wird. Für den dynamischen Einsatz sind sie jedoch wenig geeignet, da die höchste Signalfrequenz typischerweise  $< 10\%$  der Trägerfrequenz sein soll.

Gleichspannungsverstärker werden auch für dynamische Signale bis zu hohen Frequenzen eingesetzt. Es gibt keine Limitierung des Frequenzgangs durch eine Trägerfrequenz.

Bei dynamischen Vorgängen ist für alle Verstärkertypen bei den Filtereinstellungen (Tiefpassfilter) auf eine ausreichend hohe Grenzfrequenz zu achten (Empfehlung: ca.  $20\%$  höher als die Signalfrequenz).

Die Messbrücke kann in 4-Leiterschaltung oder 6-Leiterschaltung (mit geregelter Brückenspeisespannung) an den Verstärker angeschlossen werden. Bei der 6-Leiterschaltung werden Einflüsse auf die Speisespannung durch Widerstandsänderungen des Kabels (z. B. durch Temperaturänderungen) kompensiert.

### 4.6.2 Ladungsverstärker für piezoelektrische Aufnehmer

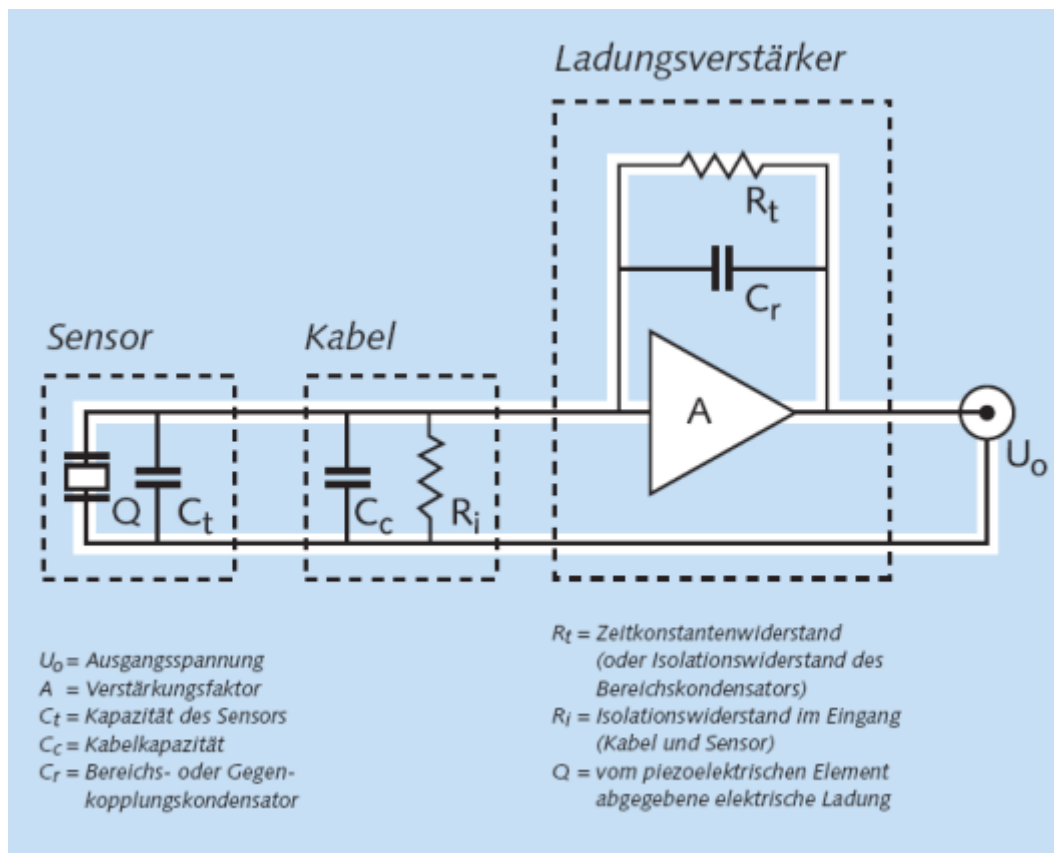
#### 4.6.2.1 Aufbau

Ladungsverstärker wandeln die von einem piezoelektrischen Aufnehmer abgegebene Ladung in eine proportionale Spannung um. Ein Ladungsverstärker besteht aus einem invertierenden Spannungsverstärker mit hoher innerer Verstärkung und kapazitiver Gegenkopplung. Der Eingang ist mit einem MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) oder JFET (Junction Field Effect Transistor) bestückt, um den nötigen hohen Isolationswiderstand und einen möglichst geringen Leckstrom zu gewährleisten.

Bei genügend großer innerer Verstärkung  $A$  hängt die Ausgangsspannung  $U_0$  nur von der Ladung  $Q$  am Eingang des Ladungsverstärkers und vom Bereichskondensator  $C_r$  ab:

$$U_0 = \frac{-Q}{C_r} \quad (1)$$

Der Verstärker wirkt als Integrator und kompensiert ständig die vom Aufnehmer abgegebene elektrische Ladung mit einer entgegengesetzt gleichen Ladung am Bereichskondensator. Die dabei über dem Bereichskondensator entstehende Spannung ist proportional zu der vom Aufnehmer abgegebenen Ladung und somit auch proportional zur wirkenden Messgröße.




**Abbildung 13:** Schematischer Aufbau eines Ladungsverstärkers zur Wandlung von Ladung eines piezoelektrischen Aufnehmers in eine proportionale Spannung

#### 4.6.2.2 Zeitkonstante und Drift

Zwei wichtige Eigenschaften des Ladungsverstärkers sind die Zeitkonstante und die Drift. Die Zeitkonstante  $\tau$  eines Ladungsverstärkers wird durch das Produkt der Kapazität  $C_r$  des Bereichskondensators und des Zeitkonstantenwiderstands  $R_t$  bestimmt:

$$\tau = R_t \cdot C_r \quad (2)$$

Als Drift bezeichnet man eine unerwünschte Änderung im Ausgangssignal über längere Zeit, die keine Funktion der Messgröße ist. Auch die besten MOSFET und JFET weisen Leckströme auf, welche hauptsächlich für die Drift verantwortlich sind. Ein zu geringer Isolationswiderstand  $R_i$  am Eingang kann eine zusätzliche Drift verursachen. Solange der Isolationswiderstand im Gegenkopplungskreis aber genügend hoch ist ( $> 10^{13} \Omega$ ) und kein zusätzlicher Zeitkonstantenwiderstand parallel geschaltet ist, driftet der Ladungsverstärker nur sehr langsam in die positive oder negative Begrenzung.

	Dynamische Kalibrierung von einachsigen beanspruchten Kraftmessgeräten und Prüfmaschinen (Grundlagen) <a href="https://doi.org/10.7795/550.20240404">https://doi.org/10.7795/550.20240404</a>	DKD-R 3-10 Blatt 1	
		Ausgabe:	06/2017
		Revision:	0
		Seite:	36 / 39

#### 4.6.2.3 Frequenzbereich

Die Zeitkonstante  $\tau$  definiert die untere Grenzfrequenz

$$f_u = \frac{1}{2\pi \cdot \tau}, \quad (3)$$

bei der für sinusförmige Signale eine Amplitudenabschwächung von 3 dB (30 %) auftritt. Je länger die Zeitkonstante ist, desto tiefer liegt die untere Grenzfrequenz und umso länger wird die nutzbare Messzeit. Folglich ist zu beachten, dass für extrem langsame dynamische Messungen das Messsignal durch die Ladungsverstärkercharakteristik beeinträchtigt wird.

Gleichermaßen muss eine Amplitudenabschwächung für den oberen Frequenzbereich beachtet werden, der aus den Übertragungseigenschaften des Ladungsverstärkers resultiert. Typische Werte für die obere Eckfrequenz eines Ladungsverstärkers liegen bei über 100 kHz. Je nach Bedarf kann ein Tiefpassfilter zugeschaltet werden, der die Eckfrequenz (Amplitudenschwächung von 3 dB) entsprechend in Richtung kleinerer Frequenzen verschiebt. Die Grenzfrequenzen der jeweils verwendeten Tiefpassfilter sind den Herstellerangaben zu entnehmen.

#### 4.6.3 A/D-Wandlung und Signalfilterung

Die weitere Datenerfassung der am Ladungsverstärker oder DMS-Verstärker anstehenden Spannungssignale erfolgt mit konventionellen Analog-Digital-Wandlern. Das digital gewandelte Signal kann danach mit handelsüblichen Bus- und Rechnersystemen für den weiteren Datentransfer, die Datenverarbeitung und Speicherung weiterverarbeitet werden. Bei den vielfältigen zur Auswahl stehenden A/D-Wandlungsverfahren ist auf eine ausreichend hohe Abtastrate zu achten. Die Abtastrate muss laut Abtasttheorem (Nyquist und Shannon) mehr als das Zweifache der höchsten zu erfassenden Frequenz sein, wobei höherfrequente Anteile vor der Abtastung mit einem Anti-Aliasingfilter herausgefiltert werden müssen. Für ein sinusförmiges Spannungssignal fester, bekannter Frequenz sollten in der Praxis 8-12 Abtastungen je Periode vorgenommen werden, um ohne Fit- oder Interpolationsverfahren aus den gemessenen Datenpunkten die gesuchte Schwingungsamplitude zu bestimmen.

Die Grenzfrequenz zusätzlicher digitaler Filter nach der A/D-Wandlung zum Zweck der Rauschminderung muss zu der höchsten, im abgetasteten Signal zu bestimmenden Frequenz passen. Die Filterparameter, d. h. Filtergrenzfrequenz, Filterordnung und Filtertyp müssen daher so gewählt sein, dass das Nutzsignal in seiner Amplitude möglichst nicht verändert wird.

Auch die Wahl weiterer spezifischer Parameter (z. B. Glättung, Rauschunterdrückung usw.) kann das Kalibrierergebnis durchaus beeinflussen. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, die Auswirkungen der Parametereinstellungen zu kennen und die eventuellen Beiträge zur Messunsicherheit abzuschätzen.

#### 4.6.4 Dynamische Kalibrierung von Messverstärkern und Ladungsverstärkern

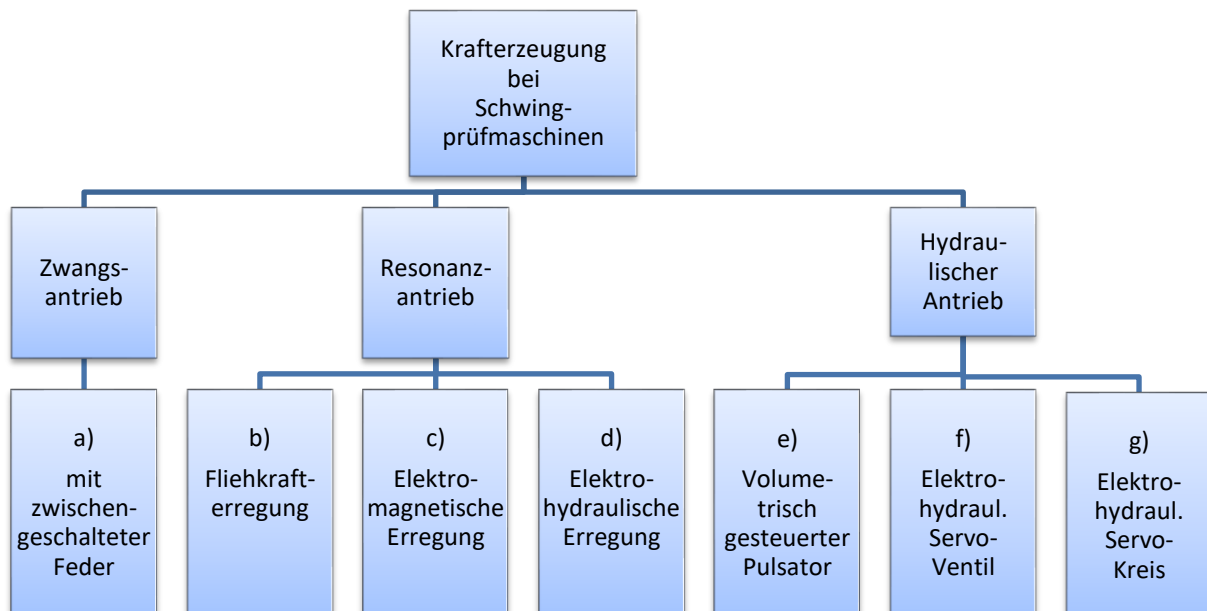
Werden bei dynamischen Messungen keine zusammenhängend kalibrierten Messketten verwendet, müssen die Komponenten (Kraftaufnehmer, Messverstärker usw.) einzeln kalibriert werden. Im Falle der dynamischen Kalibrierung von Messverstärkern erarbeitet die Arbeitsgruppe Beschleunigung des DKD-Fachausschusses *Kraft und Beschleunigung* eine Richtlinie [18], die künftig zur Kalibrierung von Messverstärkern herangezogen werden kann.

#### 4.7 Krafterzeugung bei Schwingprüfmaschinen

Ein Dauerschwingversuch wird üblicherweise mit verhältnismäßig schnell laufenden Schwingprüfmaschinen durchgeführt. Eine Unterteilung der Schwingprüfmaschinen nach [19] zeigt Abbildung 14:

- Maschinen mit Zwangsantrieb (a) werden mit Frequenzen zwischen 5 Hz und 50 Hz betrieben.
- Das schwingfähige System, bestehend aus Probe (= harter Feder), weicher Feder und Zusatzmasse, wird bei Resonanzmaschinen (b, c, d) in der Nähe der Resonanzfrequenz erregt, wobei sich
  - bei mechanischem Antrieb 10 Hz – 130 Hz,
  - bei elektromechanischem 35 Hz – 300 Hz
  - und bei elektrohydraulischem 150 Hz – 1000 Hz erreichen lassen.
- Volumetrisch gesteuerte hydraulische Schwingprüfmaschinen (e) arbeiten mit Frequenzen bis zu 60 Hz,
- Anlagen mit elektrohydraulischen Servoventilen (f, g) mit Frequenzen bis zu 150 Hz.

Bei der Durchführung des Schwingversuchs werden entweder die Lastgrenzen oder die Dehnungsgrenzen konstant gehalten. Im ersten Fall spricht man von einem spannungskontrollierten Versuch; der sich einstellende Dehnungsausschlag hängt vom Werkstoffverhalten ab. Der zweite Fall wird als dehnungskontrolliert bezeichnet, wobei dann die Spannungsamplitude eine Funktion des Werkstoffverhaltens ist.



**Abbildung 14:** Unterteilung von Schwingprüfmaschinen nach Art der Krafterzeugung [19]

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 376: Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung.
- [2] DKD-R 3-3: Kalibrierung von Kraftmessgeräten.
- [3] DKD-R 3-9: Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren.
- [4] VDI-Richtlinie VDI/VDE/DKD 2638, Kenngrößen für Kraftaufnehmer - Begriffe und Definitionen, Beuth, 2006.
- [5] DIN EN ISO 7500-2: Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen. Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung.
- [6] EMRP IND09: Traceable dynamic measurement of mechanical quantities, PTB-Mitteilungen 2015, Heft 2, doi: 10.7795/310.20150299.
- [7] M. Kobusch, S. Eichstädt: A case study in model-based dynamic calibration of small strain gauge force transducers, ACTA IMEKO Vol. 6, Nr. 1, 2017, doi: 10.21014/acta\_imeko.v6i1.433.
- [8] Th. Bruns, A. Link, C. Elster: Current Developments in the field of shock calibration, Proc. of XVIII IMEKO World Congress, 2006, Rio de Janeiro, Brazil, CD publication.
- [9] International Standard ISO 16063-13: Methods for the calibration of vibration and shock transducers – part 13: Primary shock calibration by laser interferometry, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2001.
- [10] Link, Täubner, Wabinski, Bruns, Elster: Modelling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation, Measurement 40 (2007), 928-935.
- [11] R. Kumme: Untersuchung eines direkten Verfahrens zur dynamischen Kalibrierung von Kraftmessgeräten – ein Beitrag zur Verringerung der Messunsicherheit, Dissertation, TU Braunschweig, 1996.
- [12] C. Schlegel et al., Traceable periodic force measurement, Metrologia, vol. 49, 224–235, 2012.
- [13] M. Kobusch, O. Mack, T. Bruns: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Resonanzverhalten piezoelektrischer Kraftaufnehmer, Technisches Messen 73 (2006) 12, S. 655-663, Oldenbourg Verlag, München.
- [14] M. Kobusch, A. Link, A. Buss, T. Bruns: Comparison of shock and sine force calibration methods, Proc. of IMEKO TC3 & TC16 & TC22 International Conference, 2007, Merida, Mexico, CD publication, online at [www.imeko.org](http://www.imeko.org).
- [15] M. Kobusch, S. Eichstädt, L. Klaus and T. Bruns, Investigations for the model-based dynamic calibration of force transducers by using shock excitation, ACTA IMEKO, 4 (2), 45–51, 2015. DOI: 10.21014/acta\_imeko.v4i2.214.
- [16] K. Hoffmann: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen, 1987.
- [17] K. Ueda, A. Umeda: Dynamic response of strain gages up to 300 kHz, Experimental Mechanics, vol. 38: 93-98, 1998. doi:10.1007/BF02321650
- [18] DKD-R 3-2: Kalibrierung von Messverstärkern für dynamische Anwendungen.
- [19] E. Macherauch, H.-W. Zoch: Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg+Teubner Verlag (2011), S. 345, ISBN 978-3-8348-0343-6.



Herausgeber:

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

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