

Themenschwerpunkt
Masse und abgeleitete
mechanische Größen
Teil 2



Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft
Amts- und Mitteilungsblatt der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

118. Jahrgang, Heft 3, September 2008

Inhalt

Themenschwerpunkt

Masse und abgeleitete mechanische Größen, Teil 2	
• <i>Rolf Kumme, Jens Illemann, Vladimir Nesterov, Uwe Brand:</i> Kraftmessung von Mega- bis Nanonewton	143
• <i>Michael Kobusch, Thomas Bruns, Rolf Kumme:</i> Dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern	152
• <i>Dirk Röske:</i> Die Messung des Drehmoments: Von der Schraube bis zur Turbinenwelle	158
• <i>Dirk Röske:</i> Mehrkomponentenmessungen der mechanischen Größen Kraft und Moment	166
• <i>Wladimir Sabuga:</i> Druckmessung von Kilo- bis Gigapascal	170
• <i>Karl Jousten:</i> Das Maß des „Nichts“: Die Messung des Vakuums	175

Amtliche Bekanntmachungen

(eigenes Inhaltsverzeichnis)

179

Zum Titelbild:

Die Kraftmessung spielt im Maschinenbau und vielen sicherheitsrelevanten Bereichen eine Rolle, z. B. bei der Werkstoffprüfung, bei der Überwachung von Ölplattformen oder bei der Bauwerksüberwachung. Das Bild zeigt die größte Direktbelastungsanlage der PTB, die 2-MN-Kraftnormalmessein-

richtung, die sich über mehrere Stockwerke mit einer Gesamthöhe von 18 m erstreckt. Die Kräfte werden über die Gewichtskraft von Belastungskörpern mit insgesamt etwa 200 Tonnen erzeugt, die auf das Kilogrammprototyp (siehe PTB-Mitteilungen 118 (2008), Heft 2) zurückgeführt sind.

Impressum

Die **PTB-Mitteilungen** sind metrologisches Fachjournal und amtliches Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Als amtliches Mitteilungsblatt steht die Zeitschrift in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht. Die PTB-Mitteilungen veröffentlichen in ihrer Rubrik „Amtliche Bekanntmachungen“ unter anderem die aktuellen Geräte-Prüfungen und -Zulassungen aus den Gebieten des Eich-, Prüfstellen- und Gesundheitswesens, des Strahlenschutzes und der Sicherheitstechnik.

Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74–76,
27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven
Internet: www.nw-verlag.de
E-Mail: info@nw-verlag.de

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig und Berlin
Postanschrift:
Postfach 33 45, 38023 Braunschweig
Lieferanschrift:
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)
Gisela Link
Telefon: (05 31) 592-82 02
Telefax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: gisela.link@ptb.de

Leser- und Abonnement-Service

Marina Kornahrens
Telefon: (04 71) 9 45 44-61
Telefax: (04 71) 9 45 44-88
E-Mail: vertrieb@nw-verlag.de

Anzeigenservice

Karin Drewes
Telefon: (04 71) 9 45 44-21
Telefax: (04 71) 9 45 44-77
E-Mail: info@nw-verlag.de

Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 50,50 Euro, das Einzelheft 15 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

© Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2008

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Kraftmessung von Mega- bis Nanonewton

Rolf Kümme¹, Jens Illemann², Vladimir Nesterov³, Uwe Brand⁴

1 Einleitung

Bei zahlreichen Anwendungen in der Forschung und in der Industrie ist die Messung von Kräften erforderlich, die auf die nationalen Normale in der PTB rückgeführt sind. Thema dieses Beitrags ist die Messung statischer Kräfte – dynamische Kräfte werden im Beitrag „Dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern“ (dieses Heft) behandelt. Während in der Vergangenheit hauptsächlich die Rückführung für Kräfte größer 1 Newton gefordert wurde, entsteht zunehmend der Bedarf nach der Rückführung für kleinere Kräfte im Milli-, Mikro- und Nanonewtonbereich.

Der vorliegende Beitrag gibt zunächst einen Überblick über die klassischen Anwendungen der Kraftmessung und die Prinzipien der Kraft-Normalmesseinrichtungen der PTB, mit denen der Messbereich von 1 N bis 16,5 MN abgedeckt wird.

Um der Nachfrage nach der Rückführung für kleinere Kräfte bis in den nN-Bereich gerecht zu werden, wurden und werden derzeit neue Messeinrichtungen entwickelt, die im Anschluss in einem Abschnitt über den mN-Bereich und einem Abschnitt über den nN-Bereich beschrieben werden. Die Anwendungen für diese kleinen Kräfte werden in den entsprechenden Abschnitten erläutert.

2 Kraftmessung von 1 N bis 16,5 MN

Die klassischen Anwendungen der Kraftmessung reichen von 1 N bis zu 100 MN und werden von 1 N bis 16,5 MN für Zug- und Druckkräfte durch die Kraftskala der PTB abgedeckt (siehe Bild 1). Werkstoffprüfung und Sicherheitstechnik erfordern das Messen von Kräften über den gesamten Bereich. In der Raumfahrt, der Off-shore-Industrie und im Tagebau überwiegen Anwendungen im MN-Bereich. Im mittleren Kraftbereich von 1 kN bis 1 MN liegen die Anwendungen in der Automobilindustrie, Fördertechnik und Flugzeugindustrie, während in der Textilindustrie, Automatisierungstechnik und medizinischen Messtechnik

überwiegend Kräfte im unteren Kraftbereich bis zu einigen kN gemessen werden.

Die Kraftskala der PTB deckt den Bereich von 1 N bis 2 MN mit Kraft-Normalmesseinrichtungen (K-NME) mit direkter Massewirkung ab und den oberen Messbereich bis 16,5 MN mit Kraft-Normalmesseinrichtungen mit hydraulischer Übersetzung [1, 2].

Die kleinsten relativen Messunsicherheiten für Kalibrierungen mit direkter Massewirkung betragen 0,002 % und für Kalibrierungen mit hydraulischer Übersetzung 0,01 %. Diese Angaben entsprechen den PTB-Einträgen in den CMC-Tabellen (CMC = Calibration and Measurement Capabilities), die auf der Internetseite www.bipm.org des Internationalen Büros für Maß und Gewicht (BIPM) veröffentlicht sind.

Im Deutschen Kalibrierdienst (DKD) sind derzeit 18 Kalibrierlaboratorien für die Messgröße „Kraft“ und 29 Kalibrierlaboratorien für die Kalibrierung von „Werkstoffprüfmaschinen“ akkreditiert und über kalibrierte Kraftmessgeräte (Transferkraftaufnehmer) auf das nationale Normal rückgeführt. Eine Übersicht über die vom DKD akkreditierten Kalibrierlaboratorien und zahlreiche Publikationen wie z. B. die DKD Richtlinien DKD-R3-3 und DKD-R3-9 ist auf der Internetseite des Deutschen Kalibrierdienstes www.dkd.eu zu finden [3, 4].

- ¹ Dr. Rolf Kümme, Leiter des Fachbereichs „Festkörpermechanik“
E-Mail: rolf.kuemme@ptb.de
- ² Dr. Jens Illemann, Mitarbeiter der Arbeitsgruppe „Darstellung Kraft“,
E-Mail: jens.illemann@ptb.de
- ³ Dr. Vladimir Nesterov, Mitarbeiter der Arbeitsgruppe „Nanokraftmesstechnik für taktile Sensoren“,
E-Mail: vladimir.nesterov@ptb.de
- ⁴ Dr. Uwe Brand, Leiter der Arbeitsgruppe „Nanokraftmesstechnik für taktile Sensoren“,
E-Mail: uwe.brand@ptb.de

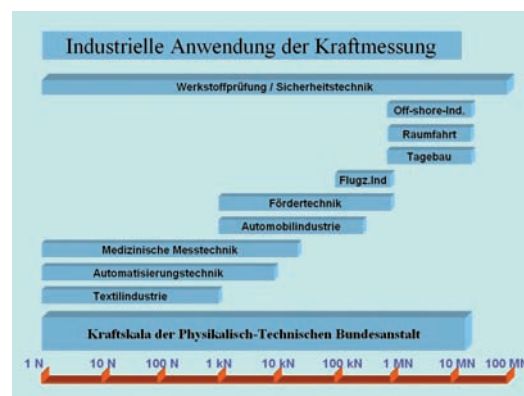


Bild 1: Industrielle Anwendungen der Kraftmessung im Bereich von 1 N bis 100 MN

Zur Weitergabe der Kraftskala werden Kraftmessgeräte in solchen Anlagen nach unterschiedlichen Verfahren und Normen wie z. B. der DIN EN ISO 376 bei verschiedenen Kraftstufen kalibriert und untersucht und ihre Eigenschaften bestimmt [5,6]. Bei den Kraftsensoren handelt es sich in der Regel um mechanische Verformungskörper, die sich unter Einwirkung einer Kraft verformen. Diese Verformung wird meistens elektrisch z. B. basierend auf dem Prinzip der Messtechnik mit Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen. Es gibt aber auch andere Prinzipien wie z. B. piezoelektrische Kraftaufnehmer, die eine zur Kraft proportionale Ladung erzeugen. Bei der Präzisionsmessung von statischen Kräften, wie z. B. bei internationalen Vergleichsmessungen, haben sich besonders DMS-Kraftaufnehmer (Bild 2) bewährt, während bei dynamischen Messungen häufig piezoelektrische Kraftaufnehmer zur Anwendung kommen [7, 8].



Bild 2:
1-MN-Kraftaufnehmer, die bei dem 1-MN key comparison verwendet werden.

2.1. Kraft-Normalmesseinrichtung mit direkter Massewirkung

Bei Kraft-Normalmesseinrichtungen mit direkter Massewirkung werden Kraftaufnehmer mit definierten Gewichtskräften belastet. Dabei wirkt die Schwerkraft im Gravitationsfeld der Erde auf die Belastungskörper und erzeugt eine Kraft in vertikaler Richtung, die gegeben ist durch:

$$F = m \cdot g_{\text{loc}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{L}}}{\rho_{\text{m}}}\right)$$

Dabei sind:

- m die Masse der Belastungskörper,
- g_{loc} die lokale Erdbeschleunigung am Aufstellungsort der Belastungskörper,
- ρ_{m} die Dichte der eingesetzten Belastungskörper und
- ρ_{L} die Dichte der Luft.

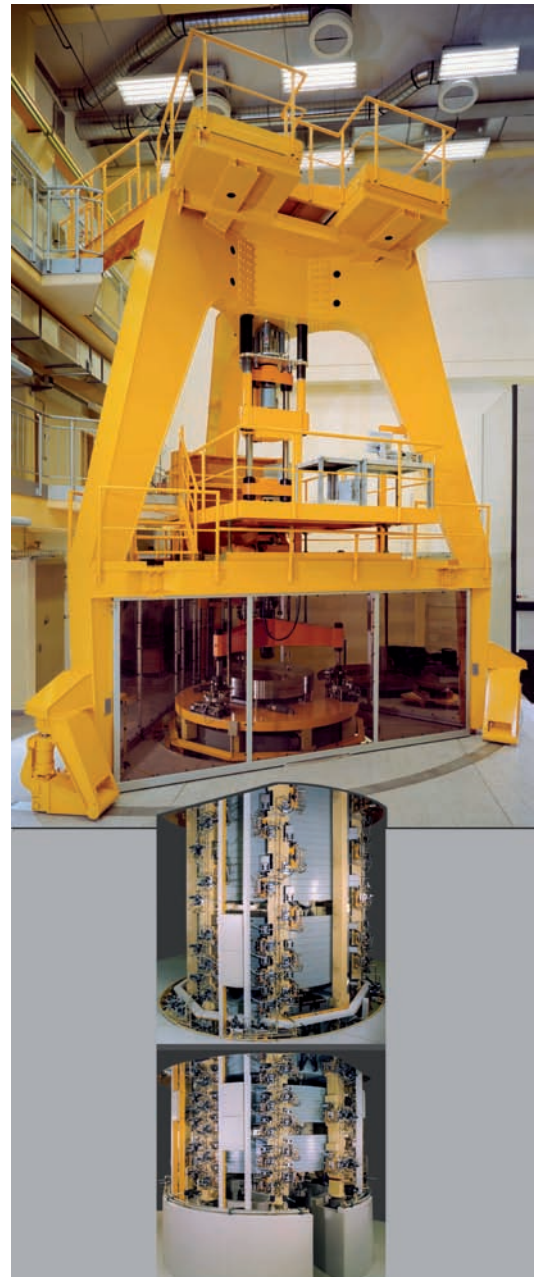


Bild 3:
Die 2-MN-K-NME erstreckt sich über drei Etagen

Die Rückführung ist somit durch die Masse der Belastungskörper und die lokale Erdbeschleunigung unter Berücksichtigung der Luftauftriebskorrektur gegeben [1, 2, 9, 10].

Als Beispiel für eine Anlage mit direkter Massewirkung wird im Folgenden die in Bild 3 gezeigte 2-MN-K-NME beschrieben [11, 12].

Bild 4 zeigt schematisch den Aufbau dieser Einrichtung, die sich über mehrere Stockwerke erstreckt und eine Gesamthöhe von ca. 18 m aufweist. Die durch Belastungskörper (13, 15, 16, 17, 18) erzeugten Gewichtskräfte werden über ein Belastungsgehänge (10) und einen Lastrahmen (3) in das zu kalibrierende Kraftmessgerät eingeleitet. Das zu kalibrierende Kraftmessgerät wird

zwischen dem Lastrahmen (3) und der justierbaren Quertraverse (4) des Einspanngehänges in dem Druck- bzw. Zugeinspannraum (2 bzw. 5) eingebaut.

Die variable Beaufschlagung des Gehängerahmens (14) mit einzelnen Massestücken aus den fünf Massestapeln der 2-MN-K-NME ermöglicht die Darstellung einzelner Kraftstufen von 50 kN bis 2 MN in Schritten von 10 kN. Dabei bildet der Belastungsrahmen (3) die erste Kraftstufe von 50 kN, da bei der Verwendung als nationales Normal die Tariervorrichtung (9) der 2-MN-K-NME nicht benutzt wird, um kleinstmögliche Messunsicherheiten zu gewährleisten.

Jeder der 50 einzelnen Belastungskörper (13, 15, 16, 17, 18) wird von jeweils drei an dem Absetzgestell für das Belastungsgehänge (12) montierten hydraulischen Zylindern getragen bzw. an das Lastgehänge (14) angekoppelt. Eine optimale Zentrierung sowie eine schwingungsfreie Ankoppelung der einzelnen Massescheiben wird durch eine exakte Synchronisation der jeweils drei Hydraulikzylinder erreicht.

Am Ende von zwei der drei Zugstangen des Gehängerahmens (14) sind Luftlager (19) zur reibungsfreien Unterbindung von Querschwingungen des Gehänges mit den aufgebrachtten Massestücken angebracht.

Die Steuerung der 2-MN-K-NME erfolgt über eine speicherprogrammierte Steuerung (SPS) durch einen PC auf der Arbeitsbühne. Die Maschine ist dabei für einen automatischen Kalibrierbetrieb entsprechend der ISO 376 ausgelegt.

Mit dieser Anlage wird nicht nur die Rückführung im DKD sondern auch für andere Staatsinstitute wie z. B. im Rahmen von EURAMET (www.EURAMET.org) gewährleistet. Darüber hinaus wird diese Anlage von der PTB als Pilotlabor für 500 kN und 1 MN in weltweiten CIPM key comparisons und bis 2 MN in EURAMET key comparisons eingesetzt.

Bild 5 zeigt die mit einem 1-MN-Präzisionskraftaufnehmer bei 500 kN und bei 1 MN gemessene relative Abweichung des Kraftaufnehmersignals vom Gesamtmittelwert, in Abhängigkeit von der Einbauposition des Kraftaufnehmers in der 2-MN-K-NME über zwei volle Drehungen um jeweils 360 Grad. Diese Messung zeigt, dass mit großen Kraft-Normalmessenrichtungen durch konstruktive Maßnahmen kleinstmögliche Rotationseffekte von $< 0,001\%$ erreicht werden können. Dies wurde auch durch spezielle Untersuchungen mit Mehrkomponentenkraftaufnehmern nachgewiesen [13].

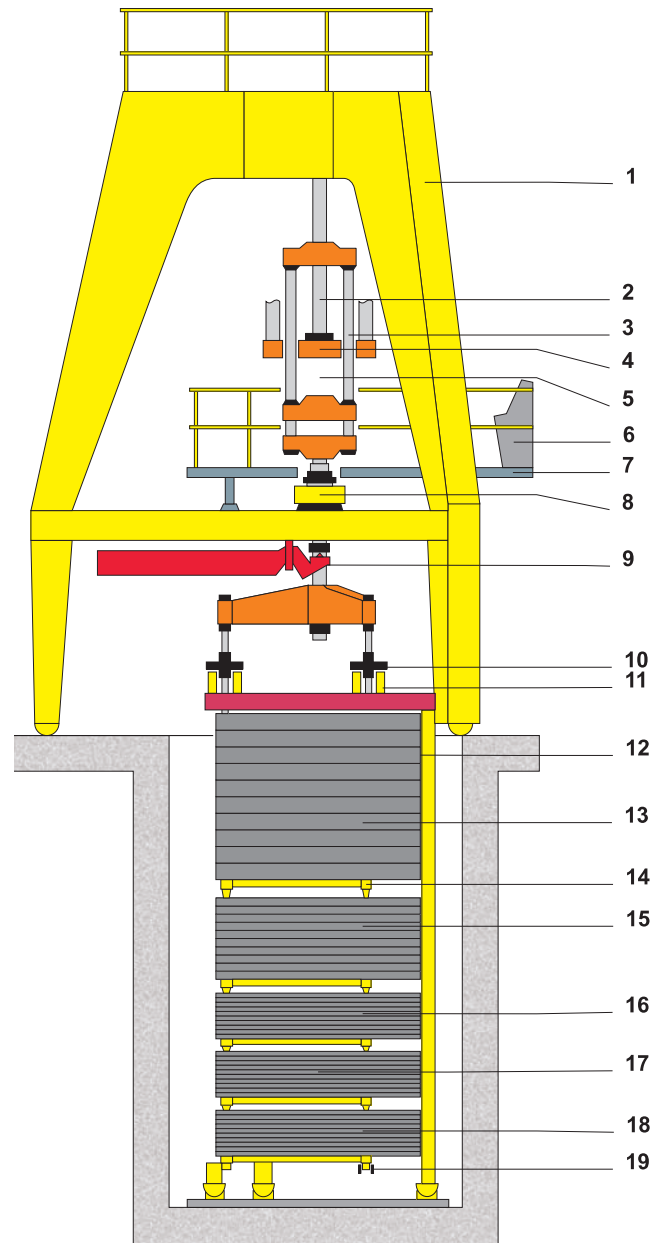
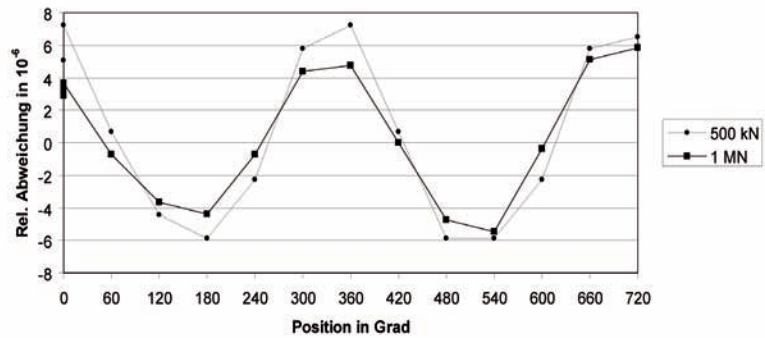


Bild: 4

Prinzip der 2-MN-K-NME

- 1 Dreisträngiger Stützrahmen,
- 2 Einbauraum für Druckkraftaufnehmer,
- 3 Lastrahmen (50 kN),
- 4 justierbare Quertraverse des Einspanngehänges,
- 5 Einbauraum für Zugkraftaufnehmer,
- 6 Steuerpult,
- 7 Arbeitsplattform,
- 8 Gehängeabstützung für Montagearbeiten,
- 9 Kompensationshebel,
- 10 Belastungsgehänge,
- 11 Absetzpunkt und Zentrierung des Gehänges,
- 12 Absetzgestell für die Belastungsmassen,
- 13 Stapel 5: 10 · 100 kN,
- 14 Gehängerahmen,
- 15 Stapel 4: 10 · 50 kN,
- 16 Stapel 3: 10 · 20 kN,
- 17 Stapel 2: 10 · 20 kN,
- 18 Stapel 1: 10 · 10 kN,
- 19 Luftlagerführung

Bild 5:
Rotationseffekt: relative Abweichung des Kraftaufnehmersignals vom Gesamtmittelwert in Abhängigkeit von der Einbauposition des Aufnehmers in Grad über zwei volle Umdrehungen für die 500-kN- und 1-MN-Kraftstufe.



2.2 Kraft-Normalmesseinrichtung mit hydraulischer Übersetzung

Bei Kraft-Normalmesseinrichtungen mit hydraulischer Übersetzung wirkt eine definierte Gewichtskraft auf ein Kolbenzylindersystem, in dem sich ein konstanter Öldruck p aufbaut. Durch Kopplung mit einem zweiten Kolbenzylindersystem mit größerer Querschnittsfläche (Druckwaage) wird eine Übersetzung der Kraft um den Faktor $Q = A_2/A_1$ realisiert, wobei A_1 und A_2 die effektiven Flächen der beiden Kolbenzylindersysteme sind [1, 2] (siehe Bild 6).

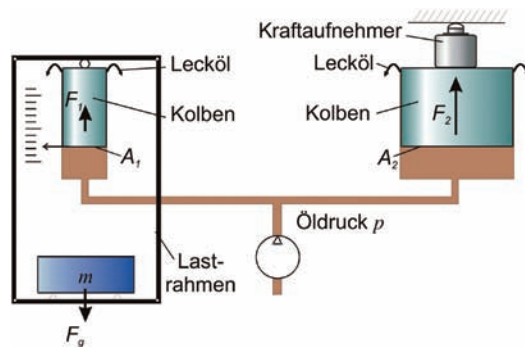


Bild 6:
Prinzip K-NME mit hydraulischer Übersetzung. F_g ist die durch die Belastungskörper der Masse m erzeugte Gewichtskraft. F_1 ist die durch das Kolbenzylindersystem auf der Messseite mit der effektiven Fläche A_1 erzeugte Kraft, die im Kräftegleichgewicht mit F_g ist. F_2 ist die durch das Kolbenzylindersystem auf der Arbeitsseite erzeugte Kraft mit der effektiven Fläche A_2 , welche auf den zu kalibrierenden Kraftaufnehmer wirkt

Somit ist die auf den Kraftaufnehmer wirkende Kraft gegeben durch:

$$F = Q \cdot m \cdot g_{loc} \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_m}\right)$$

Die 16,5-MN-K-NME arbeitet nach diesem Prinzip der hydraulischen Übersetzung (Bild 7) [14–16]. Dabei wirken zunächst die Gewichtskräfte der Belastungskörper auf der Messseite der Anlage auf ein Kolben-Zylindersystem und

es wird ein Kräftegleichgewicht zwischen der Gewichtskraft der Belastungskörper und der hydraulisch erzeugten Kraft hergestellt. Der für dieses Kräftegleichgewicht erforderliche Öldruck wirkt bei dieser Anlage gleichzeitig auf vier parallel angeordnete Kolben-Zylindersysteme auf der Arbeitsseite. Bedingt durch das Verhältnis der Flächen der Kolbenzylindersysteme auf der Arbeitsseite und auf der Messseite werden bei gleichem Druck die Kräfte entsprechend der geometrischen Abmessungen der Kolben-Zylindersysteme dieser Anlage hydraulisch um einen Faktor von ca. 1000 übersetzt. Durch verschiedene Kombinationen der 8 Belastungskörper auf der Messseite können auf der Arbeitsseite 165 Kraftstufen von 100 kN bis 16,5 MN in Stufen von 100 kN erzeugt werden. Auf dem Bild 7 sind auf der rechten Seite oben die Kolbenzylindersysteme auf der Arbeitsseite zu sehen, im mittleren Teil der Anlage ist der Einbauraum für Druckkraft-



Bild 7:
16,5-MN-K-NME mit hydraulischer Übersetzung

aufnehmer und im unteren Teil der Einbauraum für Zugkraftaufnehmer. Die Belastungskörper mit dem Hydraulikzylinder auf der Messseite befinden sich oberhalb der Betonsäule im oberen linken Teil des Bildes.

2.3 Kraft-Normalmesseinrichtung nach anderen Prinzipien

Neben den Kraft-Normalmesseinrichtungen mit direkter Massewirkung und mit hydraulischer Übersetzung werden in DKD-Kalibrierlaboratorien, aber auch in nationalen Metrologieinstituten, noch die folgenden Verfahren eingesetzt:

- Kraftmesseinrichtungen mit Hebelübersetzung
- Kraftmesseinrichtungen mit Referenzaufnehmern
- Kraftmesseinrichtung mit Build-Up-Verfahren.

Bei Kraftmesseinrichtungen mit Hebelübersetzung wird analog zur hydraulischen Übersetzung die durch direkte Massewirkung erzeugte Kraft mittels eines Hebelsystems mechanisch übersetzt [17].

Bei Kraftmesseinrichtungen mit Referenzaufnehmer dient ein kalibrierter, in der Belastungsmaschine eingebauter Kraftaufnehmer, als Referenz [18]. Hierbei handelt es sich um ein kostengünstiges Verfahren, welches von vielen Kalibrierlaboratorien in der Industrie aber auch von nationalen Metrologieinstituten insbesondere im oberen Kraftbereich angewendet wird. Durch Parallelschaltung von mehreren Kraftaufnehmern kann die Messkraft auf noch größere Kräfte erweitert werden [19, 20]. Auf diese Weise ist z. B. die Rückführung für ein DKD Labor bis 32 MN realisiert [21]. Nähere Informationen zur Berechnung der Anschlussmessunsicherheit von Kraft-Messeinrichtungen sind in [22] gegeben.

3 Kraftmessung im mN-Bereich

Mit dem Fortschritt in Mikrosystemtechnik und Materialwissenschaft, z. B. Medizintechnik und Härtemessung, entsteht ein zunehmender Bedarf an rückführbaren Messungen im mN-Bereich. Zur Erweiterung des angebotenen Messbereichs in der PTB wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit eine konzeptionell neue Normalmesseinrichtung aufgebaut (Bild 8) [23].

Eine übliche elektromagnetisch kompensierte Wägezelle (EKWZ) wird mittels eines Kalibriergewichtes und der bekannten lokalen Schwerebeschleunigung auf das SI-System rückgeführt [23, 24]. Die Skala der EKWZ ist als hervorragend linear erwiesen. Die Kalibrierung erfolgt durch direkten Vergleich der Reactio-Kraft eines Transfer-Kraftaufnehmers auf den Unterfluranschluss der EKWZ. Dazu ist an diesem richtungsstarr ein Piezoaktuator befestigt, der durch

sein Auseinanderspreizen das nötige Kräftepaar kontinuierlich erzeugt. Indem dieses auf das Signal der EKWZ geregelt wird, kann jede beliebige Kraft dargestellt werden.

Eine genaue Analyse der Beiträge zur Messunsicherheit für Kalibrierungen von Kraftaufnehmern nach DIN EN ISO 376 [5] wurde aufgrund ausführlicher experimenteller Untersuchungen durchgeführt [23] (Bild 9). Bei Ausnutzung des vollen Messbereichs der EKWZ, einer Kraft von 2 N, kann der Kennwert eines hinreichend stabilen Aufnehmers mit einer relativen Unsicherheit von $6 \cdot 10^{-6}$ bestimmt werden (95 % Abdeckung), bei Benutzung eines Teilbereiches von 10 mN (1-mN- Laststufen) immer noch mit $2,5 \cdot 10^{-5}$. Die Unsicherheit für kleine Teilbereiche ist hauptsächlich durch die unbekannte Nullpunktdrift der EKWZ über die Zeitdauer eines Kalibrationszyklus (ca. 15 Minuten) gegeben.

Wiederholungsmessungen über einen Zeitraum von zwei Wochen wurden durchgeführt (Bild 10). Hierbei wurden die Achsrichtungen der Anlage teilweise neu justiert und der Kraftaufnehmer ein- und ausgebaut. Die Aufnehmer-temperatur lag in einem Intervall von 0,4 °C. Tatsächlich ist die Streuung der Messwerte innerhalb von 10 Tagen etwa um einen Faktor drei schlechter als die Unsicherheit der Messung. Dies ist nicht unbedingt ein Widerspruch, da nicht alle Einflussgrößen auf den Aufnehmer und seine intrinsische Stabilität a priori bekannt sind. Es wurde in weiteren Messungen über ein halbes Jahr eine kontinuierliche Abnahme des Kennwertes um 0,02 % festgestellt.

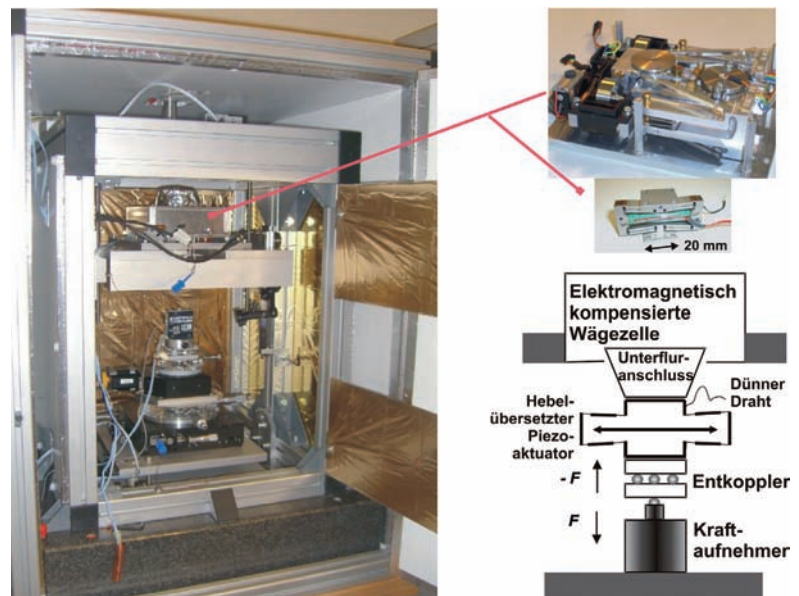


Bild 8: Aufbau und Konzept der neuen Normalmesseinrichtung für kleine Kräfte. Das System benutzt eine elektromagnetisch kompensierte Wägezelle als lineare Skala. Die Kräfteerzeugung geschieht durch einen fest an ihrem Unterfluranschluss angebrachten Piezoaktuator.

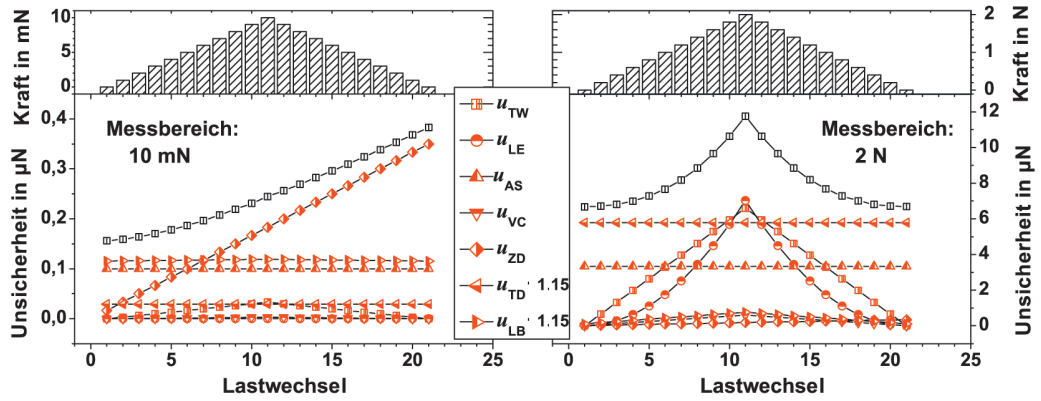


Bild 9: Kraftstufen und kombinierte Messunsicherheit mit 95 % Abdeckung. Aufgetragen sind die sieben relevanten Beiträge (rot) und die kombinierte Messunsicherheit (schwarz) für einen typischen Messzyklus einer Kalibrierung nach DIN EN ISO 376. Für einen kleinen Messbereich von 10 mN dominiert die Null drift der Wägezelle im Unsicherheitsbudget. Unsicherheitsanteile: u_{TW} Rückführbarkeit der Gewichtskraft, u_{LE} Querkraftempfindlichkeit, u_{AS} Ungleichzeitigkeit der Datenaufnahme, u_{VC} Einfluss der Piezospaltung auf das Waagensignal, u_{ZD} Nullpunktdrift, u_{TD} Zeitabhängigkeit der Empfindlichkeit der Waage, u_{LB} Linearität der Waage.

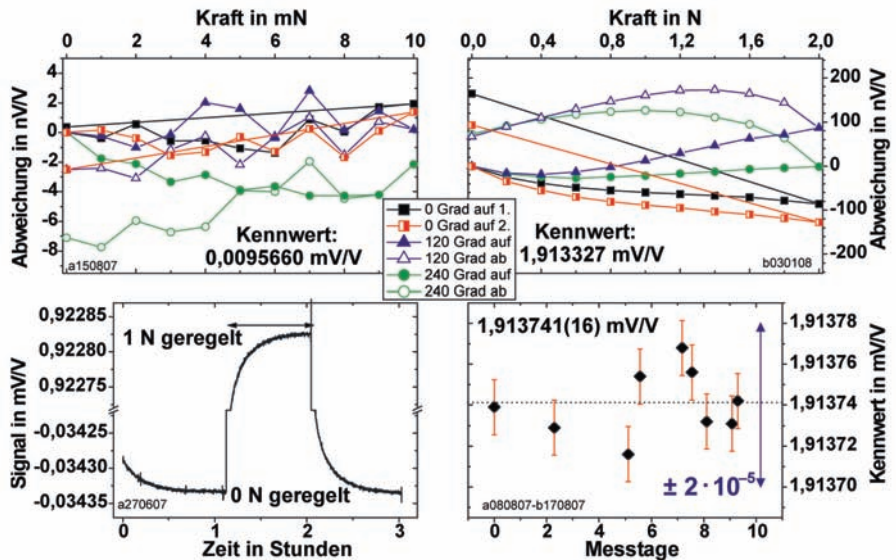


Bild 10: Oben: Kalibrierung eines Aufnehmers nach DIN EN ISO 376 im vollen Messbereich von 2 N und in einem Teilbereich von 10 mN. Der Kennwert ergibt sich als Mittelwert der drei Einbaustellungen bei Vollast. Unten rechts: Wiederholbarkeit des Kennwertes über zwei Wochen (Messbereich 2 N). Nach sechs Monaten (oben) ist er um 0,02 % kleiner. Unten links: Messung der Sprungantwortfunktion. Hieraus lassen sich scheinbare Hysterese und Residuum bei der Kalibrierung vorhersagen.

Ganz wesentlich für die Qualität der Messung sind die mechanischen Einkoppelbedingungen. Da bei dieser Einrichtung bei der Kraft-einleitung Zwangsbedingungen gegeben sind, müssen die Querkräfte und Momente unbedingt mittels eines reibungsarmen Lagers entkoppelt werden. Um den Einfluss der Achsausrichtungen untersuchen zu können, wurden bei der Einrichtung präzise Goniometer und Schiebetische vorgesehen.

4 Kraftmessung im nN-Bereich

Kräfte im Nano- und Piconewton-Bereich werden schon seit vielen Jahren in der Rasterkraftmikroskopie zur hochauflösenden Oberflächenmessung genutzt. Durch den zunehmenden industriellen Einsatz von Kunststoff-Mikroteilen, die beim taktilen Messen mit zu großer Antastkraft verkratzen, ergeben sich neue Herausforderungen für

die Qualitätssicherung sowohl für Rasterkraftmikroskope (AFM) als auch für herkömmliche Tastschnittgeräte. Richtlinien zur Festlegung von zulässigen Antastkräften in Abhängigkeit vom gewählten Tastspitzenradius und dem zu messenden Material sind hier notwendig.

Die Messung von Nanokräften ist darüber hinaus wichtig für nanomechanische Untersuchungen elastischer Eigenschaften, beispielsweise von einzelnen Zellen, aber auch für die Charakterisierung von MEMS (Mikro-Elektro-Mechanische Systeme) und NEMS (Nano-Elektro-Mechanische Systeme), die zunehmend Einzug halten in Alltagsprodukte (Handy, MP3-Player, PC, Pkw).

Ein neuer Anwendungsbereich für Rasterkraftmikroskope hat sich aus der Entwicklung von automatisierten Kraft-Spektroskopie-Geräten für die molekulare Analytik ergeben. Mit

diesen Geräten kann man messen, wo Wirkstoffe von Medikamenten an das Zielmolekül binden und wie stark die Bindung ist. Kräfte im Piconewton-Bereich können so gemessen werden.

Alle diese Messverfahren beruhen auf dem Einsatz von weichen Biegebalken (Cantilevern) mit integrierter Tastspitze. Die zu messende, auf die Tastspitze wirkende Kraft führt zu einer Durchbiegung des Cantilevers. Aus dieser Durchbiegung und der Biegesteifigkeit des Cantilevers lässt sich die wirkende Antastkraft berechnen. Die relative Unsicherheit der auf diese Weise gemessenen Antastkraft hängt von der Unsicherheit ab, mit der die Biegesteifigkeit des Cantilevers bestimmt werden kann. Bei der häufig verwendeten Methode, die das thermische Rauschen des Cantilevers analysiert, beträgt die erreichbare Messunsicherheit der Biegesteifigkeit 15 % bis 20 %. Dieser Wert und damit die erreichbare Kraft-Messunsicherheit ließe sich nur durch den Einsatz von präzise kalibrierten Nanokraft-Transfornormalen wesentlich reduzieren.

Für die Antastkraft-Kalibrierung von Tastschnittgeräten sind von der PTB in Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz Kraft-Transfer normale aus Silizium entwickelt worden [25] (siehe Bild 11), die inzwischen auch kommerziell erhältlich sind (Kraftnormal: Typ FC: Cantilever der SiMetricS GmbH, Chemnitz).

Darüber hinaus sind Antastkraft-Sensoren auf der Basis von piezoresistiven Si-Biegebalken entwickelt und untersucht worden [26]. Vergleichbar der Anwendung von Tiefeneinstellnormalen werden Profilmessungen auf den Biegebalken durchgeführt und aus der gemessenen Durchbiegung und der Biegesteifigkeit des Balkens die Antastkraft berechnet. Die Normale decken den Kraftbereich von 1 N bis 1 μ N ab. Die Anwendung der piezoresistiven Kraftsensoren ist einfacher, da sie eine kraftproportionale Ausgangsspannung liefern und daher Kraftmessungen an Sensoren ohne eigene Auslenkungsmessmöglichkeit erlauben.

Die Kalibrierung der Biegesteifigkeit der Transfornormale erfolgt mit Hilfe einer Mikrokraftmesseinrichtung [27] (siehe Bild 12) bestehend aus einer Präzisionsverschiebeeinrichtung (PIFOC Objektiv-Nanofokussiersystem, Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, 76228 Karlsruhe) und einer Kompensationswaage (Typ SC2, Sartorius AG, Göttingen) mit 1 nN Auflösung. Im Messbereich von 20 mN bis 1 nN werden Reproduzierbarkeiten von 2,5 nN, Linearitätsabweichungen von 9 nN und Messunsicherheiten von 20 nN bei einer Kraft von 1 μ N erreicht [28].

Die erreichbare Unsicherheit der gemessenen Biegesteifigkeit ist durch die Unsicherheit der Gewichtskraftmessung der Kompensationswaage begrenzt.

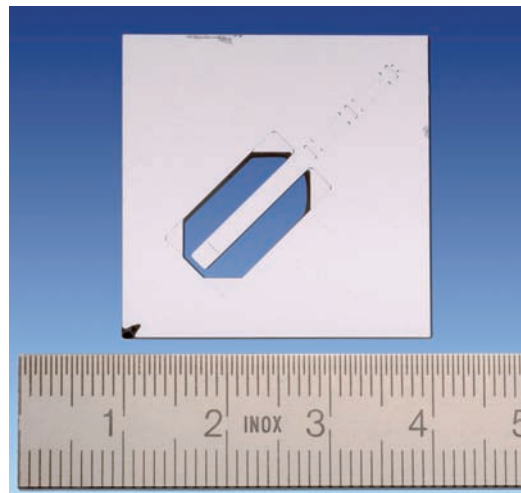


Bild 11: Mikrokrafteinstellnormal aus Silizium (30 mm x 30 mm) mit 2 mm breitem Balken

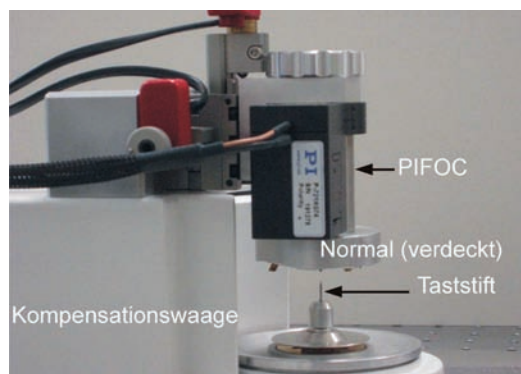


Bild 12: Mikrokraft-Kalibriereinrichtung mit PIFOC, Kompensationswaage und Taststift

Mit diesem Verfahren wurde die Biegesteifigkeit von AFM-Cantilevern (AFM-Cantilever: ThermoMicroscopes: MLCT-EXMT-BF, Explorer mounted, Gold coated, unsharpened) im Kraftbereich von wenigen nN bis 1 μ N gemessen. Die gemessenen Biegesteifigkeiten wichen um mehr als den Faktor zwei von der aus geometrischen und physikalischen Größen berechneten Steifigkeit ab [29]. Dieses Beispiel verdeutlicht die Wichtigkeit der Kalibrierung.

Für die Messung noch kleinerer Kräfte unterhalb von 1 nN, z. B. für die Bestimmung von chemischen Bindungskraften, werden zur Zeit in den metrologischen Instituten der USA, Großbritanniens und Deutschlands entsprechende Messeinrichtungen entwickelt [30].

In der PTB wird ein Verfahren zur Nanokraftmessung basierend auf einer Pendelscheibe im Vakuum mit elektrostatischer Kraftkompensation und interferometrischer Auslenkungsdetektion erprobt (siehe Bild 13) [31]. Eine Besonderheit des hier angewendeten Verfahrens liegt in der elektrostatischen Steifigkeitsreduktion des Scheibenpendels. Mit Spannungen $0 < U < 2$ V sind Steifigkeiten des Scheibenpendels von $3 \cdot 10^{-2}$ N/m bis $3 \cdot 10^{-8}$ N/m einstellbar. Die Steifigkeitsreduktion führt zu einer hohen Empfindlichkeit, die für kleine Messunsicherheiten notwendig ist. Damit wird die Anlage aber auch für äußere Störgrößen empfindlich.

Die Hauptstörgröße der Nanokraftmesseinrichtung stellt das seismische Rauschen dar. Um diesen Einfluss zu reduzieren, werden in der Einrichtung zwei nahezu identische Scheibenpendel verwendet, ein Messpendel und ein Referenzpendel. Das Referenzpendel dient der Messung und Elimination der seismischen Schwankungen und der thermischen Drift. Beide Pendel sind gleich aufgebaut, d. h. eine leitende Pendelscheibe ist zwischen zwei Platten aufgehängt. Jede dieser äußeren Platten besteht aus vier Ringsegmenten und jedes Segment kann als kapazitiver Sensor für die präzise, parallele Ausrichtung der Platten relativ zur Pendelscheibe benutzt werden. Mit Hilfe eines Kalibrierverfahrens lässt sich aus der Kompensationsspannung die entsprechende Kompensationskraft berechnen. Die Differenz zwischen den Kompensationsspannungen des Messscheibenpendels und des Referenzscheibenpendels wird verwendet, um die anliegende Kraft zu bestimmen.

In ersten Messungen an Luft über einen Zeitraum von 40 h wurde für jedes Scheibenpendel ein Rauschpegel mit $\sigma < 3$ pN (σ : Standardabweichung, Tiefpassfilter 10^{-2} Hz) ermittelt. Nach Subtraktion des Referenzsignals vom Messsignal ergab sich ein Rauschen der gemessenen Kraft und damit eine Auflösungsgrenze von 0,16 nN (siehe Bild 14). Diese Diskrepanz zwischen dem Rauschen der Messeinrichtung und dem des Einzelpendels ist in erster Linie auf eine relativ große Ungleichheit der beiden Pendelsysteme zurückzuführen. In einem optimierten Aufbau soll aufbauend auf den gesammelten Erfah-

rungen eine präzisere Nanokraftmesseinrichtung im Kraftbereich von 0,1 pN bis 10 μ N mit einer Unsicherheit von 1 pN bei einer Kraft von 1 nN entwickelt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag beschreibt den aktuellen Stand der Messung statischer Kräfte in der PTB (zu dynamischen Kräften siehe „Dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern“, dieses Heft). Die Kraft-Normalmesseinrichtungen decken derzeit den Kraftbereich von 1 N bis 16,5 MN ab und dank der Entwicklung einer neuen Messeinrichtung für den mN-Bereich werden die Normale zukünftig auf 1 mN erweitert. Neue, in der Entwicklung befindliche Messeinrichtungen reichen bis in den nN-Bereich und versprechen zukünftig messtechnische Untersuchungen in Bereichen der Nanotechnologie.

6 Literatur

- [1] Sawla, A.: Kraftskala, Messen von Kräften, Kohlrausch – Praktische Physik, Band 1, 24. Auflage, Teubner Verlag: Stuttgart 1996, S. 133–137
- [2] Peters, M.: Derived SI-Units: Force. Teilband a: Einheiten in Physik und Chemie, Springer Verlag: Berlin 1991, S. 2/143–2/151
- [3] DKD-R3-3: Kalibrierung von Kraftmessgeräten, Ausgabe 03/2007, www.dkd.eu.
- [4] DKD-R3-9: Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren, Ausgabe 2/2005, www.dkd.eu.
- [5] DIN EN ISO 376:Metallische Werkstoffe – Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung, Beuth Verlag: Berlin 2005.
- [6] VDI-Richtlinie VDI/VDE/DKD 2638, Kenngrößen für Kraftaufnehmer – Begriffe und Definitionen, Beuth Verlag: Berlin 2006.
- [7] Peters, M.: Experience and results of international comparison measurements of forces up to 1 MN, PTB-Mitteilungen 99, (1989), S. 343–350
- [8] Kumme, R.; Mack, O.; Bill, B.; Haab, H.-R.; Gossweiler, Ch.: Investigation of piezoelectric force measuring devices in force calibration and force standard machines. In: Proceedings of the 17th IMEKO TC3 Conference, 17.–21. Sept., 2001, Istanbul (Türkei), S. 92–103.
- [9] Schwartz, R.: Massebestimmung mit Waagen. In: Massebestimmung, M. Kochsiek, M. Gläser, VCH Verlag: Weinheim 1997, ISBN 3-527-29352-3, S. 249–253.
- [10] Lindau, A.; Kumme, R.; Heiker, A.: Investigation in the local gravity field of a force laboratory of PTB, Proceedings of the Joint International Conference IMEKO TC3/TC5/TC20, Celle 2002, S. 589–598.

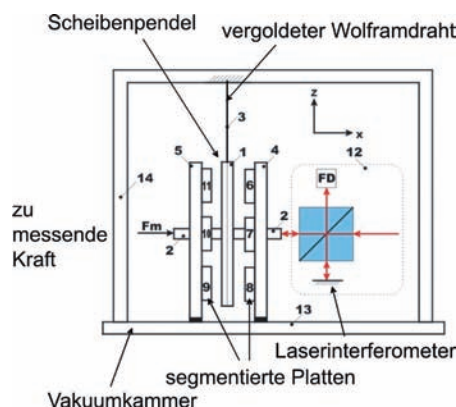


Bild 13:
Prinzipskizze der Nano-
kraftmesseinrichtung der
PTB

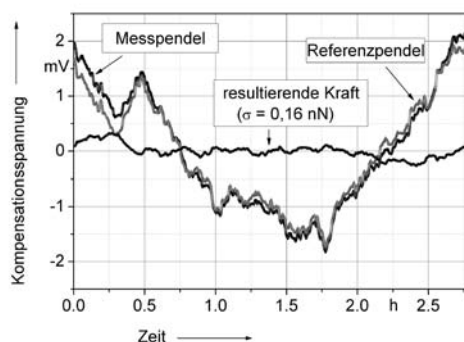


Bild 14:
Erste Messungen zum
Rauschen der Nano-
kraftmesseinrichtung

- [11] *Peschel, D.; Kumme, R.; Mauersberger, D.; Peters, M.*: PTB's "new" 2 MN dead weight force standard machine. In: Proceedings of the IMEKO TC3 Conference, 19.–23. Febr., 2005, Cairo (Egypt).
- [12] *Dietrich, M.; Hasche, K.; Peschel, D.*: About the uncertainty of the higher capacity primary standard and the dissemination of force in ASMW. Proceedings of the 11th IMEKO Conference, Amsterdam 1986, S. 217–226.
- [13] *Ferrero, C.; Marinari, C.; Kumme, R.*: Investigation of parasitic components in PTB's 2 MN deadweight machine by using the INRIM six-component dynamometer. In: Proceedings of the IMEKO XVIII World Congress, 17.–22. Sept., 2006, Rio de Janeiro (Brazil).
- [14] *Weiler, W.; Sawla, A.; Peters, M.*: Design and Calibration Problems of the 15 MN Hydraulic Force Standard Machine, VDI-Bericht 212 (1974)
- [15] *Peters, M.*: Developments and Realization of a new control principle for the 16,5 MN Force Standard Machine at PTB, Proceedings of the 12th IMEKO World Congress, Beijing (China), 1991
- [16] *Peters, M.*: Influences of the uncertainty of force standard machines with hydraulic multiplication, Proc. of the 13th IMEKO TC3 International Conference on Force and Mass Measurement, Helsinki, Finland, 1993, S. 11–19
- [17] *Sawla, A.; Peters, M.*: Realisation of force unit by means of different types of hydraulic and lever amplification machines. Proc. of the Advanced school of Metrology, Canela RS, Brazil, 1997, S. 97
- [18] *Ferrero, C.; Marinari, C.; Kumme, R.; Herte, W.*: PTB and INRIM high force intercomparison up to 9 MN. In: Proceedings of the IMEKO XVIII World Congress, 17.–22. Sept., 2006, Rio de Janeiro (Brazil).
- [19] *Fank, S.; Kumme, R.; Bülent, A.; Ercan, P.; Glöckner, B.; Haucke, G.*: Intercomparison of 3 MN hydraulic build-up and 1.1 MN lever amplification force standard machine between UME and PTB. In: Proceedings of the IMEKO XVIII World Congress, 17.–22. Sept., 2006, Rio de Janeiro (Brazil).
- [20] *Anderegg, P.; Honegger, W.; Sennhauser, W.; Kumme, R.; Sawla, A.*: Development and calibration of a build-up system for forces of up to 21 MN. In: Proceedings IMEKO TC3/APMF'98 of the 16th International Conference on Force, Mass and Torque Measurement, 14.–18. Sept. 1998, Taejon (Südkorea), S. 45–53.
- [21] *Marinescu, A.; Dumbrava, I.; Opran, Gh.; Sawla, A.; Peschel, D.; Peters, M.*: Accreditation of a romanian 32 MN force calibration laboratory within DKD. Proc. of the 16th IMEKO TC3/APMF '98 International Conference on Force, Mass and Torque Measurement, Taejon (Südkorea), 1998, S. 366–375
- [22] *Sawla, A.*: Uncertainty scope of the force calibration machines, Proceedings of the IMEKO World Congress, Wien 2000.
- [23] *Illemann, J.*: The achievable uncertainty for balance-based force standard machines in the range from micronewton to newton, Proc. of the Joint Int. Conf. IMEKO TC3/TC16/TC22, Merida, Mexico, 2007
- [24] *Niehe, S.*: A New Force Measuring Facility from the Range of 10 mN to 10 N, Proc. of the XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, 2003, S. 335–340.
- [25] *Frühau, J.; Trumpold, H.*: Silicon Standards for Assessment and Calibration of Stylus Probes. Proceedings of 52nd CIRP General Assembly, San Sebastian, Spain, 2002
- [26] *Behrens, I.; Herold, B.; Doering, L.; Peiner, E.*: Piezoresistive cantilever as portable micro force calibration standard. Journal of micro-mechanics and microengineering Vol. 13, 2003, S. 171–177
- [27] *Doering, L.; Peiner, E.; Behrens, I.; Brand, U.*: Calibration of micro force setting standards using a new nano force calibration device. Proceedings of Micro system technologies MST, Forum Hotel München, 2003, S. 492–494
- [28] *Peiner, E.; Doering, L.*: Force calibration of stylus instruments using silicon microcantilevers, Sensors and Actuators A, Vol. 123–124, 2005, S. 137–145
- [29] *Doering, L.; Brand, U.*: Calibration of V-shaped Cantilever for Micro Force Metrology in Biomedical Engineering, Proc. Euspen, 2006, S. 192–195
- [30] *Pratt, J. R.; Kramar, J.A.; Newell, D.B.; Smith, D.T.*: Review of SI traceable force metrology for instrumented indentation and atomic force microscopy, Measurement Science and Technology Vol. 16, 2005, S. 2129–2137
- [31] *Nesterov, V.*: Facility and methods for the measurement of micro and nano forces in the range below 10^{-5} N with a resolution of 10^{-12} N (development concept). Measurement Science and Technology, Vol. 18, 2007, S. 360–366

Dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern

Michael Kobusch¹, Thomas Bruns², Rolf Kümme³

1 Einleitung

Mit der Zunahme dynamischer Anwendungen in der Praxis und gestiegenen Anforderungen an die Messgenauigkeit hat die Messung zeitveränderlicher Kräfte mittlerweile eine sehr große Bedeutung erlangt. In vielen Bereichen der Industrie ist es erforderlich, dynamische Kräfte genau zu messen, beispielsweise in der Fertigungstechnik, bei der zerstörenden Materialprüfung, in der Automatisierungs- und Handhabungstechnik, in der Raumfahrtindustrie, wie beispielsweise bei Vibrationstests für Satelliten, schließlich in der Automobilindustrie bei Crashtests und Bauteilprüfungen. Je nach Anwendungsfall ist der zeitliche Kraftverlauf sehr verschieden. So werden periodische Kräfte bei Ermüdungstests appliziert, sprunghafte und kontinuierliche Kraftänderungen bei der zerspanenden Fertigung und stoßförmige Kräfte bei Crashtests.

Kraftaufnehmer sind elektromechanische Messgrößenwandler, bei der ein im Kraftfluss eingebrachtes Sensorelement ein von der Eingangsgröße Kraft abhängiges elektrisches Ausgangssignal erzeugt. Das Kraftsignal ist dabei im Allgemeinen proportional zur elastischen Deformation des Aufnehmers. Bei dynamischen Kräften werden im Inneren des Aufnehmers infolge von Materialelastizitäten und der an das Sensorelement angekoppelten Massen der Kräfteinleitungen und der ggf. benötigten Adaptionsteile frequenzabhängige Inertialkräfte erzeugt, die sich der zu messenden Eingangskraft störend überlagern können. Es dürfte daher prinzipiell ein frequenzabhängiges Messverhalten auftreten, das wesentlich durch den inneren mechanischen Aufbau des Kraftaufnehmers bestimmt wird [1]. Darüber hinaus müssen die dynamischen Eigenschaften der elektrischen Signalverarbeitungskette zusätzlich berücksichtigt werden.

Die Problematik einer Messwertverfälschung bei dynamischen Kraftmessungen durch auftretende Störkomponenten ist inzwischen weitgehend bekannt. So spezifizieren aktuelle Standards zur Instrumentierung von Crashtests

(ISO 6487 [2], SAE J211/1 [3]) zwar allgemein einzuhaltende Fehlerschranken für den Amplitudengang von Messaufnehmern, merken jedoch an, dass für Kraftaufnehmer noch keine zufriedenstellenden Methoden zur dynamischen Kalibrierung bekannt sind. Denn während die statische Kalibrierung von Kraftaufnehmern durch internationale Standards (DIN EN ISO 376, [4]) festgelegt ist, fehlen derzeit noch entsprechende Normen zur Kalibrierung dynamisch belasteter Aufnehmer. Es ist daher eine gängige Praxis, dynamisch eingesetzte Kraftaufnehmer nur statisch zu kalibrieren. Bestenfalls erfolgen dann noch weitergehende dynamische Messungen in dafür geeigneten Belastungseinrichtungen. Derartige Tests sind für vergleichende Prüfungen gut geeignet und in der Industrie daher weit verbreitet, geben sie doch weitgehend Aufschluss darüber, ob und wie weit sich das dynamische Messverhalten eines Kraftaufnehmers im Laufe der Zeit verändert hat und ob der Aufnehmer ersetzt werden muss.

In Anbetracht der vielfältigen dynamischen Anwendungen mit sehr unterschiedlichen Kraftsignalen stellt sich die Frage, ab wann oder unter welchen Bedingungen dynamische Effekte berücksichtigt werden müssen? Es interessiert hierbei insbesondere, ob eine dynamische Kraftmessung noch mit statisch kalibrierten Kenndaten durchgeführt werden kann, oder ob die geforderte Messunsicherheit schon durch störende Inertialkräfte überschritten wird. Eine realistische Angabe der wirkenden dynamischen Kräfte und der Messunsicherheiten ist nicht einfach und erfordert Kenntnis über die dynamischen Eigenschaften des Aufnehmers und des Messaufbaus. Ein erster Schritt zur Auswahl und Beurteilung von dynamisch eingesetzten Kraftaufnehmern ist häufig die Kenntnis der Grundresonanzfrequenz. Diese für die Dynamik relevante Kenngröße ist in der deutschen Richtlinie VDI/VDE 2638 [5] über Kenngrößen für Kraftaufnehmer entsprechend genannt. Zusätzliche Anhaltspunkte für eine dynamische Eignung eines Kraftaufnehmers bieten Angaben zur Steifigkeit und Masse.

¹ Dr. Michael Kobusch, Mitarbeiter der Arbeitsgruppe „Stoßdynamik“, E-Mail: michael.kobusch@ptb.de

² Dr. Thomas Bruns, Leiter der Arbeitsgruppen „Stoßdynamik“ und „Darstellung Beschleunigung“, E-Mail: thomas.bruns@ptb.de

³ Dr. Rolf Kümme, Leiter des Fachbereichs „Festkörpermechanik“, E-Mail: rolf.kuemme@ptb.de

Motiviert durch die zunehmende Bedeutung dynamischer Kalibrierungen und der derzeit metrologisch unbefriedigenden Situation sind in den zurückliegenden Jahren in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) verstärkte Forschungsanstrengungen zur Entwicklung wissenschaftlich fundierter Verfahren für die dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern und zur Übertragung der Ergebnisse in die Industrie unternommen worden (s. beispielsweise [6, 7]). Verschiedene Mess- und Kalibriereinrichtungen mit unterschiedlichen Wirkprinzipien, Dynamik- und Messbereichen wurden aufgebaut und daran Aufnehmer unterschiedlicher Funktionsweise und Bauart beispielhaft untersucht [8–10]. Mit all diesen Aktivitäten nimmt die PTB auf dem Gebiet der dynamischen Kraftmessung zur Zeit eine internationale Vorreiterrolle ein.

2 Dynamische Messverfahren

Für die dynamische Kalibrierung haben sinus- und stoßförmige Kräfte die größte praktische Bedeutung. Mit diesen beiden im Zeit- und Frequenzbereich doch sehr verschiedenen Anregungen lässt sich die Vielfalt dynamischer Kraftmessaufgaben relativ anwendungsnah abdecken. Bei der Sinuskalibrierung werden sinusförmige Kräfte veränderlicher Frequenz aufgebracht und die auf ein Referenzsignal bezogenen Amplituden und Phasenlagen als dynamisches Kalibrierergebnis ausgewertet. Dagegen werden bei der Stoßkalibrierung Kraftpulse definierter Amplitude, Form und Dauer appliziert. Das Verhältnis der Pulshöhen von Ausgangssignal und Eingangskraft sind hier häufig das typische Messergebnis, was sich aber bei näherer Betrachtung als nicht ausreichend herausstellt (s. Abschnitt 3).

Bild 1 veranschaulicht das Grundprinzip der Primärkalibrierung mit sinusförmigen Kräften,

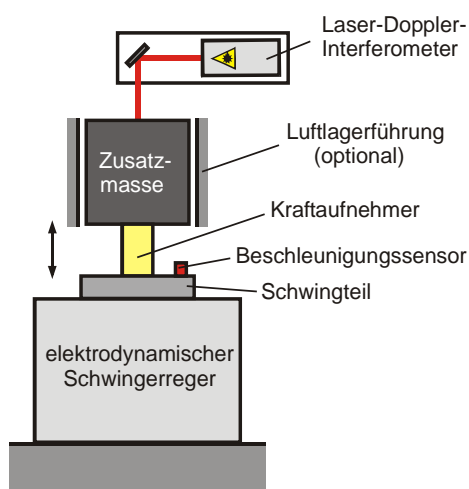


Bild 1: Prinzip der dynamischen Primärkalibrierung eines Kraftaufnehmers mit angekoppelter Zusatzmasse

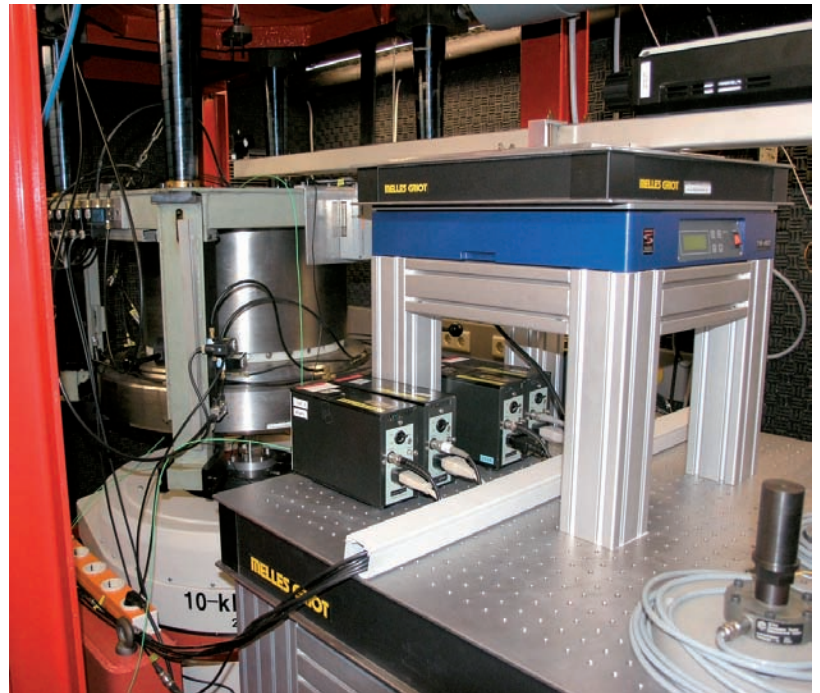


Bild 2: Dynamische 10-kN-Kraft-NME

und Bild 2 zeigt eine entsprechende technische Realisierung am Beispiel der dynamischen 10-kN-Kraft-Normalmesseinrichtung (NME) der PTB, ausgelegt für Frequenzen bis 1 kHz [11]. Ein elektrodynamischer Schwingerregger erzeugt eine periodische Fußpunktauslenkung des auf dem Schwingteil befestigten, zu kalibrierenden Kraftaufnehmers. Durch die an seinem oberen Gehäuseteil angekoppelte Zusatzmasse wird eine Inertialkraft nach dem Newton'schen Axiom „Kraft gleich Masse mal Beschleunigung“ erzeugt, die die gewünschte dynamische Eingangsgröße darstellt. Die Rückführung dieser Größe erfolgt über eine Wägung und eine zeit aufgelöste Beschleunigungsmessung, z. B. mittels Laser-Doppler-Interferometrie [12]. Optional lässt sich die Zusatzmasse in einem Luftlager axial führen, so dass sonst verstärkt auftretende parasitäre Biegeschwingungen minimiert werden.

Bei höheren Kräften und niedrigen Frequenzen ist das auf die Generierung von Inertialkräften basierende, o. g. Primärkalibrierverfahren weniger gut geeignet, da dabei gegebenenfalls unverhältnismäßig große und schwere Zusatzmassen 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 (Sekundärkalibrierung) arbeitenden Verfahrens, ist in Bild 3 skizziert. Der zu kalibrierende Kraftaufnehmer, ein Referenz-

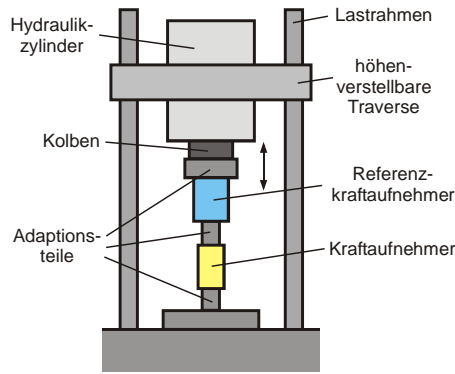


Bild 3:
Prinzip der dynamischen Sekundärkalibrierung eines Kraftaufnehmers in einem vorgespannten Lastrahmen

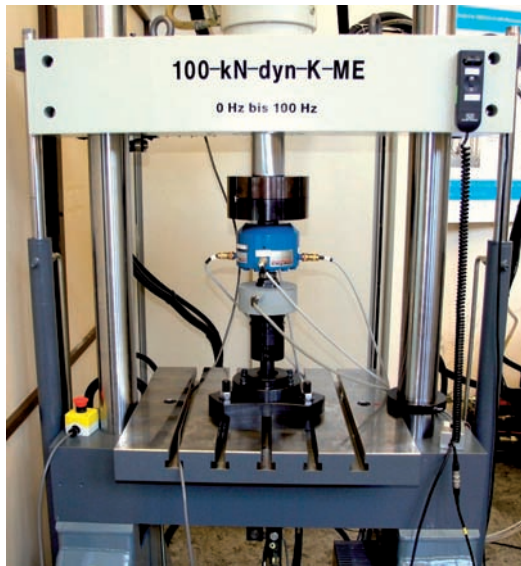


Bild 4:
Dynamische 100-kN-Kraft-NME

kraftaufnehmer und ein hydraulischer Schwingerreger sind in einem Lastrahmen mechanisch in Reihe gespannt. Über eine in der Höhe verstellbare Traverse lässt sich die Einbauhöhe den jeweiligen Erfordernissen anpassen. Die technische Realisierung dieses Sekundärkalibrierverfahrens ist in Bild 4 am Beispiel der dynamischen 100-kN-Kraft-NME der PTB gezeigt, ausgelegt für sinusförmige Kräfte bis 100 Hz.

Für die Primärkalibrierung mit stoßförmigen Kräften wurde eine Messeinrichtung mit zwei luftlagergeführten Stoßkörpern (je 10 kg Masse) entwickelt [7, 13, 14]. In Bild 5 ist das Prinzip

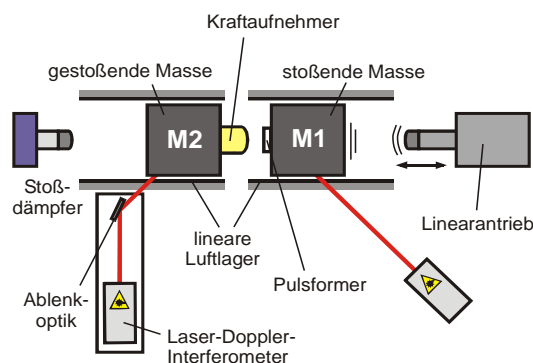


Bild 5:
Prinzip der primären Kraftstoßkalibrierung mit luftlagergeführten Stoßkörpern

des Messaufbaus dargestellt, ein Foto der realisierten 20-kN-Kraftstoß-NME zeigt Bild 6. 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 Inertialkräfte werden zeitlich hoch aufgelöst mittels Laser-Doppler-Interferometer (LDI) erfasst. Die Massekörper werden hierzu von den LDI an den optisch zugänglichen Seitenflächen unter schiefem Winkel angetastet. Die in der Einrichtung erzielte Stoßdauer liegt in der Größenordnung von einer Millisekunde, ist von der Steifigkeit des Aufnehmers abhängig und lässt sich über einen zwischengeschalteten Pulsformer variieren. Zur Zeit wird in der PTB eine zweite Kraftstoß-Kalibriereinrichtung für Kräfte bis 250 kN entwickelt und aufgebaut. Die neue Einrichtung wird mit deutlich größeren, 100 kg schweren Stoßkörpern betrieben und wird so auch eine Adaption und Kalibrierung von schwereren Prüflingen ermöglichen.

3 Charakterisierung von Kraftaufnehmern

Ein Schwerpunkt aktueller Forschungen ist die Charakterisierung von Kraftaufnehmern für dynamische Anwendungen. Ausgehend von der Kenngröße der statischen Empfindlichkeit, sind für dynamische Kalibrierungen zusätzliche aufnehmerspezifische Angaben erforderlich. Mit geeigneten dynamischen Kenngrößen wird für den Anwender eine Grundlage geschaffen, die dynamischen Messeigenschaften eines Kraftaufnehmers in einer konkreten Applikation einzuschätzen und seine Eignung beurteilen zu können.

Der festzulegende Satz von dynamischen Kenngrößen sollte für alle Messprinzipien und Bauformen von Kraftaufnehmern geeignet und weiterhin vom gewählten Kalibrierverfahren unabhängig sein, so dass Kalibrierungen mit z. B. sinus- oder stoßförmigen Anregungen konsistente Ergebnisse liefern. Übertragbare Erfahrungen aus der Stoßkalibrierung von Beschleunigungssensoren zeigen jedoch, dass eine Konsistenz selbst bei Anwendung gleicher Messverfahren nicht unbedingt gewährleistet ist, sobald unterschiedliche Messeinrichtungen Verwendung finden [15]. Die in der aktuellen Norm ISO 16063-13 zur Stoßkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern spezifizierte Kenngröße des Stoßübertragungsfaktors wird aus den Zeitsignalen als das Verhältnis der Aus- und Eingangsspitzenwerte ermittelt [16]. Das Verhältnis ist aber eine Funktion der spektralen

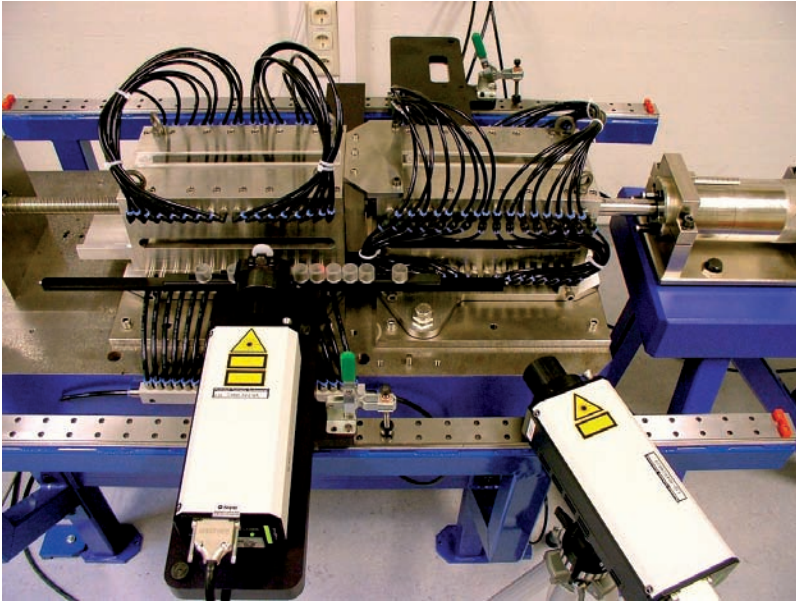


Bild 6:
20-kN-Kraftstoß-NME

Komponenten des Stoßes, d. h. es hängt von der Form und Dauer des Stoßpulses ab. Messungen unterschiedlicher Messplätze sind daher nur bedingt direkt vergleichbar. Diese Abhängigkeit von den jeweiligen Kalibrierbedingungen ist nicht erwünscht, weshalb die Weiterentwicklung der Stoßkalibrierverfahren für Kraft und Beschleunigung von der PTB als aktuelles Forschungsthema aufgegriffen wurde [15, 17].

Wie einleitend bereits erwähnt, wurde die Grundresonanzfrequenz von Kraftaufnehmern als dynamische Kenngröße in der Richtlinie VDI/VDE 2638 aufgenommen [5]. Diese Größe kennzeichnet die Frequenz, mit der ein am Fußpunkt fest montierter Aufnehmer ohne zusätzlich angekoppelte Bauteile nach einer Stoßanregung entlang seiner Messachse schwingt. Experimentelle Untersuchungen an mit Dehnungsmessstreifen (DMS) messenden Kraftaufnehmern unterschiedlicher Bauform haben gezeigt, dass die Bestimmung der Grundresonanzfrequenz selbst keine einfache Aufgabe ist, da sich im Messsignal häufig die Signaturen von parasitären Quer- und Biegeresonanzen störend überlagern [9]. Um den Einfluss von inneren Inertialkräften auf das dynamische Messverhalten des Kraftaufnehmers abschätzen zu können, reicht die Angabe der Grundresonanzfrequenz nicht aus. Es ist hier vielmehr notwendig, die strukturelle Verteilung von Massen und Steifigkeiten im Inneren des Aufnehmers zu kennen.

Die an unterschiedlichen Messplätzen und mit verschiedenen piezoelektrischen und DMS-Kraftaufnehmern gemachten Untersuchungen zur dynamischen Kalibrierung haben ergeben [1, 8-10], dass sich das dynamische Messverhalten einachsig belasteter Kraftaufnehmer mit einem Modell federgekoppelter Massekörper gut beschreiben lässt. Die Ankopplung des

Aufnehmers an seine mechanische Umgebung ist darin jeweils adäquat zu berücksichtigen. Mathematisch wird dieses Modell durch ein System von Differentialgleichungen 2. Ordnung ausgedrückt.

Das dynamische Messverhalten eines Kraftaufnehmers mit konstruktiv gut definiertem Federkörper – wie bei DMS-Kraftaufnehmern – wird bereits mit einem einfachen 2-Massen-Modell sehr gut wiedergegeben [9]. Dies gilt sowohl für die Grundresonanzfrequenz eines aufgespannten Aufnehmers als auch für das Übertragungsverhalten bei angekoppelten Zusatzmassen. Die aufgrund ihrer hohen Steifigkeit und der damit verbundenen hohen Resonanzfrequenz für dynamische Messungen gerne eingesetzten piezoelektrischen Kraftaufnehmer besitzen von ihrer Konstruktion her dagegen keinen Federkörper im eigentlichen Sinn. Daher wird ihre Grundresonanzfrequenz von einem einfachen 2-Massen-Modell nur noch unzureichend erfasst, so dass es ggf. erforderlich ist, komplexere Modelle zu betrachten [10].

Das 2-Massen-Standardmodell mit einem Freiheitsgrad beschreibt den Kraftaufnehmer als zwei über ein viskoelastisches Federelement gekoppelte Modellmassen (s. Bild 7a). Es gibt vier Parameter: Kopf- und Fußmasse m_k bzw. m_f , Steifigkeit k , Dämpfung d . Für das gezeigte Beispiel des auf seiner Unterlage befestigten Aufnehmers wird die zeitabhängige Messkraft $F(t)$ an der oberen Modellmasse (Kopfmasse) eingeleitet. Die von der Kraft bewirkte kraftproportionale Längenänderung der Feder $x(t)$ stellt das Ausgangssignal im Modell dar. Für die Modellierung eines in eine Messeinrichtung eingebauten Aufnehmers sind die Parameter und Eingangsgrößen des Modells geeignet anzupassen. Für Sinuskalibrierungen an der 10-kN-Kraft-

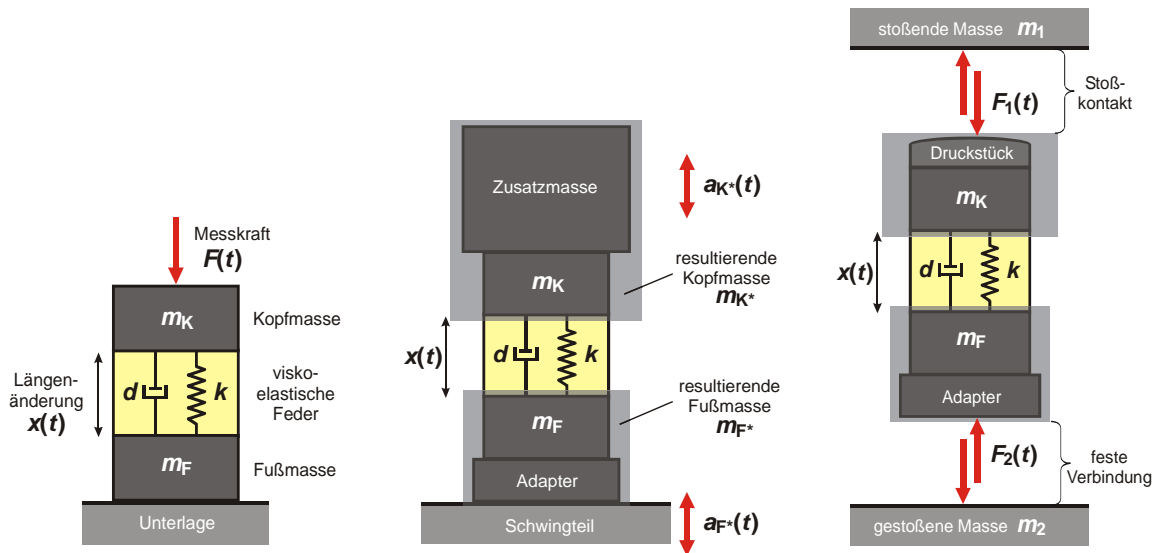


Bild 7:

Modellgestützte Charakterisierung des Kraftaufnehmers

a) Standardmodell

b) Sinuskalibrierung

c) Stoßkalibrierung

NME und Stoßkalibrierungen an der 20-kN-Kraftstoß-NME gelten die in den Bildern 7b und 7c skizzierten Modellvarianten [18], in denen nun Anbauteile wie Druckstücke, Adapter oder Zusatzmassen als – im Bild grau hinterlegte – resultierende Modellmassen m_{K^*} und m_{F^*} berücksichtigt werden. Als bekannte Eingangsgrößen sind bei der Sinuskalibrierung die gemessenen Beschleunigungen $a_{K^*}(t)$ und $a_{F^*}(t)$ einzusetzen, bei der Stoßkalibrierung die gemessenen Inertialkräfte $F_1(t)$ und $F_2(t)$.

Die mit realen Messdatensätzen durchgeführte modellgestützte Parameteridentifikation führt schließlich auf die gesuchten Modellparameter des Kraftaufnehmers, die die charakteristischen Kenngrößen zur Beschreibung des dynamischen Messverhaltens darstellen sollen [18, 19]. Bei dem Identifikationsprozess werden die Modellparameter so lange variiert, bis die vom Kraftaufnehmer gemessenen und die vom Modell gelieferten Datensätze bestmöglich übereinstimmen. Das in [19] ausführlich beschriebene Verfahren der modellgestützten Parameteridentifizierung ermöglicht über eine inverse Berechnung die Übertragung von Kalibrierergebnissen auf andere Messplätze. Die dort zu erwartenden Kalibrierergebnisse, wie Frequenzgänge bei Sinuskalibrierungen oder Übertragungsfaktoren bei Stoßkalibrierungen, ergeben sich dabei aus dem jeweils angepassten Modell. Mit Hilfe der Modellierung kann dann auch die eingangs gestellte Frage zum Einfluss der dynamischen Effekte beantwortet werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag beschreibt den aktuellen Stand der dynamischen Kraftmessung in der PTB, einem Fachgebiet, das in den zurückliegenden Jahren verstärkt in den Schwerpunkt der Forschung gerückt ist. Verschiedene dynamische Messeinrichtungen für stoß- und sinusförmige Belastungen sind entwickelt worden, und es wird an vielversprechenden, wissenschaftlich fundierten Verfahren zur dynamischen Kraftkalibrierung und zur Weitergabe der dynamischen Kraftskalen gearbeitet.

Zur Übertragung der Ergebnisse dynamischer Kraftkalibrierungen in die jeweilige industrielle Anwendung werden zwei Methoden diskutiert. Zum einen lässt sich eine modellgestützte Simulation der dynamischen Messapplikation bei bekanntem, dynamisch charakterisiertem Kraftaufnehmer durchführen, um damit das gemessene Kraftsignal zu kompensieren. Zum anderen lassen sich spezielle, für dynamische Messungen geeignete Transferaufnehmer einsetzen, an deren Entwicklung in der PTB derzeit intensiv gearbeitet wird. Beispielsweise ließe sich das frequenzabhängige Übertragungsverhalten mittels zusätzlicher Messsignale kompensieren, so dass ein solcher Transferaufnehmer ein dynamisch korrigiertes Ausgangssignal liefern würde.

Das auf dem Gebiet der dynamischen Kraftkalibrierung gewonnene Know-how wird bei Normungsarbeiten dazu beitragen, zukünftige Standards für dynamische Kraftmessungen entscheidend zu gestalten.

5 Literatur

- [1] *R. Kumme*: Untersuchung eines direkten Verfahrens zur dynamischen Kalibrierung von Kraftmessgeräten – ein Beitrag zur Verringerung der Messunsicherheit, Dissertation, TU Braunschweig, 1996.
- [2] International Standard ISO 6487: Road vehicles – Measurement techniques in impact tests – Instrumentation, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.
- [3] American Standard SAE J211-1 (R) Instrumentation for impact test – Part 1 – Electronic instrumentation, SAE International, Warrendale, USA, 2007.
- [4] DIN EN ISO 376: Metallische Werkstoffe – Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung, Beuth Verlag Berlin, 2005
- [5] VDI-Richtlinie VDI/VDE/DKD 2638, Kenngrößen für Kraftaufnehmer – Begriffe und Definitionen, Beuth, 2006.
- [6] *R. Kumme*: Dynamic force measurement in practical applications, Proc. of XVI IMEKO World Congress, 2000, Vienna, Austria, CD publication.
- [7] *Th. Bruns, R. Kumme, M. Kobusch, M. Peters*: From oscillation to impact: The design of a new force calibration device at PTB, Measurement, **32** (2002), S. 85–92.
- [8] *M. Kobusch, Th. Bruns, R. Kumme, Y.-K. Park*: Preliminary investigations of dynamic responses of a multi-component force-moment sensor subject to impulse forces, Proc. of IMEKO TC3/TC5/TC20 Joint International Conference, 2002, Celle, Germany, S. 183–191.
- [9] *M. Kobusch, Th. Bruns, L. Stenner, S.-P. Schotte*: Impulse force investigations of strain gauge sensors, IMEKO TC3 19th International Conference, 2005, Cairo, Egypt, CD publication.
- [10] *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.
- [11] *R. Kumme*: A new calibration facility for dynamic forces up to 10 kN, Proc. of XVII IMEKO World Congress, 2003, Dubrovnik, Croatia, S. 305–308.
- [12] *L. Zhang, R. Kumme*: Investigation of interferometric methods for dynamic force measurements, Proc. of XVII IMEKO World Congress, 2003, Dubrovnik, Croatia, S. 315–318.
- [13] *M. Kobusch, Th. Bruns*: The new impact force machine at PTB, Proc. of XVII IMEKO World Congress, 2003, Dubrovnik, Croatia, S. 263–267.
- [14] *M. Kobusch, Th. Bruns*: Uncertainty contributions of the impact force machine at PTB, Proc. of XVIII IMEKO World Congress, 2006, Rio de Janeiro, Brazil, CD publication.
- [15] *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.
- [16] 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.
- [17] *A. Link, A. Täubner, W. Wabinski, T. Bruns, C. Elster*: Calibration of accelerometers: Determination of amplitude and phase response upon shock excitation, Measurement Science and Technology, **17** (2006), S. 1888–1894.
- [18] *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.
- [19] *A. Link, M. Kobusch, T. Bruns, C. Elster*: Modellierung von Kraft- und Beschleunigungsaufnehmern für die Stoßkalibrierung, Technisches Messen **73** (2006) 12, S. 675–683, Oldenbourg Verlag, München.



MICOS
MECHANISCHES INSTRUMENTENGERÄTE GERMANY

CONTROL

- Standard and OEM Design
- Modular and Turn-Key solution
- Single and multi axes

POSITIONERS Phone: +49(0)7634-50 57-0 www.micos.ws

Die Messung des Drehmoments: Von der Schraube bis zur Turbinenwelle

Dirk Röske*

1 Einleitung

Drehmomente werden in der täglichen Praxis so häufig angewandt, dass man sich darüber kaum noch Gedanken macht. Einfachste Beispiele sind das Drehen des Schraubenschlusses einer Flasche oder das Öffnen einer gewöhnlichen Tür. Häufig muss man dabei das benötigte Drehmoment weder messen noch seine genaue Größe kennen. Anders sieht es aus, wenn es sich zum Beispiel um sicherheitsrelevante Schraubverbindungen handelt, wie das bei Kfz-Radverschraubungen der Fall ist, die bei der halbjährlichen Umstellung zwischen Winter- und Sommerbereifung gelöst und angezogen werden müssen. Hier ist es von enormer Wichtigkeit, zu wissen, mit welchem Drehmoment die Verschraubungen festgezogen wurden. Dieses Wissen setzt eine Messung voraus – am besten mit einem kalibrierten Drehmomentschlüssel. Natürlich wird erwartet, dass man dem Ergebnis der Messung auch trauen kann – egal welche Autowerkstatt in welchem Land der Welt den Radwechsel durchgeführt hat. Diese Erwartung kann nur erfüllt werden, wenn es für diese Messungen eine metrologische Infrastruktur gibt und diese von der Werkstatt auch genutzt wird. Dabei kommt es nicht nur auf die verwendeten Messgeräte an, sondern zu einem Großteil auch auf die Erfahrungen und die Expertise der Anwender dieser Geräte.

Drehmomentmessgeräte werden auf Einrichtungen untersucht, die das Drehmoment hochgenau erzeugen. Einige Industriefirmen unterhielten Drehmomentmeseinrichtungen bis etwa 1994 ohne die Möglichkeit, diese Anlagen rückzuführen, das heißt sie an ein „höherwertiges“ Gerät, ein so genanntes „Normal“ anzuschließen oder sie mit ihm zu vergleichen, da ein solches Normal nicht verfügbar war. Die PTB hat diese Herausforderung erkannt und nutzte die Gunst der Stunde, mit der Übernahme eines Teiles der Mitarbeiter des „Amtes für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung“ der DDR am 1. Januar 1991 unter anderem ein Drehmomentlabor einzurichten. Die von den Mitarbeitern vor-

her auf dem Gebiet der Darstellung und Weitergabe der Größe Kraft gewonnenen Erfahrungen und Fertigkeiten konnten Gewinn bringend in das neue Arbeitsgebiet einfließen. Zusammen mit neuen oder bereits erprobten Lösungen für spezielle Problemstellungen wurde die Darstellung der Einheit des Drehmoments auf höchstem Niveau, d. h. mit minimaler Messunsicherheit, über einen großen Messbereich realisiert. Heute gehört das Drehmomentlabor der PTB zur Weltspitze auf diesem Gebiet.

2 Die zwei Gesichter des Drehmoments

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, ein Drehmoment zu erzeugen. Die einfachste besteht darin, eine Kraft in einem gewissen Abstand zur Drehachse auf das Objekt selbst oder ein geeignetes Zusatzteil (Hebel, Türklinke) einwirken zu lassen. Vereinfacht dargestellt ist das die landläufige Formulierung „Kraft mal Hebelarm“. Präziser spricht man in der Physik vom Vektor- bzw. Kreuzprodukt des Ortsvektors \vec{r} – vom Drehpunkt (oder von der Drehachse) zum Kraftangriffspunkt – mit dem Kraftvektor \vec{F}

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} . \quad (1)$$

Das Drehmoment \vec{M} ist wie die Kraft eine gerichtete Größe, also ein Vektor, der nicht nur durch seinen Betrag, sondern auch durch seine Richtung (Lage im Raum) und den Richtungssinn (rechtsdrehend bzw. linksdrehend) zu kennzeichnen ist. Die gerade beschriebene Art der Darstellung eines Drehmoments hat für die Metrologen und Messtechniker einen Nachteil: die das Drehmoment hervorrufoende Kraft ist diesem überlagert – es handelt sich nicht um ein „reines“ Drehmoment, sondern um zwei gleichzeitig wirkende Größen – Kraft und Drehmoment. Das Bestreben ist aber, physikalische Größen einzeln und möglichst unbeeinflusst von anderen Größen darzustellen. Wenn es also gelänge, die Kraft zu eliminieren, ohne das Drehmoment zu verlieren, dann könnte man ein „reines“ Drehmoment erzeugen.

Die Lösung liegt in der Verwendung zweier gleich großer Kräfte, die entgegengesetzt gerich-

* Dr. Dirk Röske, Leiter der Arbeitsgruppe „Darstellung Drehmoment“,
E-Mail: dirk.roeske@ptb.de

tet sind. Diese bezeichnet man in der Mechanik als Kräftepaar. Dabei bedeutet „entgegengesetzt gerichtet“, dass die Richtungen gleich, die Kräfte also parallel, die Richtungssinne aber unterschiedlich, also genau entgegengesetzt sind. Wenn die Wirkungslinien der beiden Kräfte nicht zusammenfallen, ergibt sich ein Drehmoment, das sich ebenfalls nach (1) berechnet, wobei der Ortsvektor jetzt nicht vom Drehpunkt ausgeht, sondern vom Kraftangriffspunkt der zweiten Kraft. Die beiden Kräfte kompensieren sich, da sie ja gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet sind. Streng genommen gilt diese Betrachtung nur bei starren Körpern, wovon man allerdings in vielen Fällen ausgehen kann.

Im Gegensatz zum Fall einer Einzelkraft, in dem man vom Kraftmoment als Überlagerung von Kraft und Drehmoment spricht, nennt man den zweiten Fall des Kräftepaars auch Kräftepaarmoment als Ausdruck eines „reinen Drehmoments“.

Typische Anwendungsfälle sind Messungen in Motor- und Bremsenprüfständen (Kräftepaarmoment) oder bei Verschraubungen mit Hilfe von messenden oder auslösenden Drehmomentschlüsseln (Kraftmoment).

3 Weitere Aspekte der Größe Drehmoment

Neben dem Vektorcharakter besitzt das Drehmoment – wie die Kraft oder andere Größen auch – weitere Aspekte, die eine genauere Betrachtung verdienen. So spricht man bei einem zeitlich konstanten Drehmomentbetrag von statischem Drehmoment. Das kann zum Beispiel auch in einem rotierenden System der Fall sein, wenn die Drehzahl konstant ist. Da Bewegung immer nur relativ zu einem gegebenen Bezugssystem gesehen werden kann, ist das ruhende System mit der Geschwindigkeit Null nur ein Sonderfall des gleichförmig bewegten Systems mit einer Geschwindigkeit ungleich Null. Nun hat man es bei der (auch gleichförmigen) Rotation eines Sensors mit einem Nicht-Inertialsystem zu tun, das heißt, es ist zu erwarten, dass sich Trägheitskräfte auf die Messung auswirken. Bislang gibt es aber keine experimentellen Hinweise auf einen signifikanten Einfluss dieser Kräfte. Außerdem findet Bewegung häufig nicht gleichförmig statt, so dass die das System beschreibenden Größen zeitliche Veränderungen erfahren und dynamische Erscheinungen auftreten können. Beispiele dafür sind Anfahr- oder Abbremsvorgänge, die für jede Änderung des Bewegungszustands erforderlich sind. Wenn die Variationen des Drehmoments hinreichend langsam erfolgen, hat man es mit quasi-statischem Drehmoment zu tun. Was aber ist „hinreichend langsam“? Diese Frage kann nicht mit einer einzelnen Zahl beantwortet werden, denn der Über-

gang zu dynamischen Effekten und Einflüssen ist fließend und hängt von der konkreten Situation ab. Weiterhin spielt eine Rolle, mit welchen Anforderungen an die Messunsicherheit man das Drehmoment misst. Je genauer man „hinschaut“, je höher die Auflösung ist, umso eher wird man Abweichungen zwischen dem unbeschleunigt und dem beschleunigt rotierenden Zustand erkennen.

4 Darstellung des statischen Drehmoments im unbewegten Fall

• Direktbelastungseinrichtungen

Direktbelastungseinrichtungen verwenden einen drehbar gelagerten Hebel mit genau bekannter Länge, an dessen Ende die Gewichtskraft von Belastungsmassen (auch als Gewichtsstücke bezeichnet) im Schwerfeld der Erde für die statische Kräfteerzeugung genutzt wird. Diese wird ihrerseits auf die Größen Masse m (mit der Basiseinheit Kilogramm) und lokale Fallbeschleunigung g (d. h. auf die Größen Länge und Zeit mit den Basiseinheiten Meter und Sekunde) zurückgeführt. Als Material der Massen haben sich nicht rostende Stähle bewährt. Mit diesem Verfahren erreicht man relative Messunsicherheiten von 10^{-5} , wenn man den Effekt des Auftriebs in der Luft berücksichtigt. Die zeitliche Konstanz der Kraft ist auch gewährleistet. Einzig die Schwankungen des Luftdruckes, die die Luftdichte verändern, können im Extremfall so groß werden, dass man sie berücksichtigen muss [1]. Vernachlässigen kann man dagegen die halbtägliche Schwankung des Wertes der Fallbeschleunigung in Folge der Gezeitenkräfte, da deren relative Amplitude bei 10^{-7} liegt [2].

Ein nicht unerhebliches Problem ist die Frage der Einleitung der Kraft in den Hebelarm. Hierbei kommen bevorzugt dünne Metallfolien zum Einsatz, die als sehr biegeeweiche Elemente den Einfluss von Biegemomenten im Bereich der Kräfteinleitung minimieren können [3]. Andere Varianten wie Schneiden-Pfannen-Systeme oder Wälzlager bereiten dort größere Probleme, vor allem im Hinblick auf ihre Langzeitstabilität. Gute Ergebnisse erhält man auch mit elastischen Gelenken, die häufig dehnungskontrolliert ausgeführt sind, d. h. die Biegung des Gelenkes wird an dessen Oberfläche mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen bestimmt und diese Signale werden für die Steuerung bzw. Regelung der Anlage verwendet [4].

Am Hebel ist noch ein weiterer wichtiger Punkt zu betrachten: die Länge des Hebelarms und deren zeitliche Konstanz. Längenmessungen sind heutzutage mit kleinsten Unsicherheiten im Sub-Nanometerbereich möglich. An einem komplexen Gebilde wie dem Hebel in einer Messeinrichtung gestaltet sich die Sache aber deutlich schwieriger. Jede Verschraubung führt

zu Verspannungen mit Längenänderungen von bis zu einigen Mikrometern. Hinzu kommt die Ausdehnung der Materialien bei Temperaturerhöhung. Temperaturschwankungen von ± 1 K führen bei Stahl zu Längenänderungen von etwa $\pm 16 \mu\text{m/m}$, was einer relativen Drehmomentänderung von $\pm 1,6 \cdot 10^{-5}$ entspräche. Daraus folgt, dass man für Präzisionseinrichtungen entweder die Temperatur auf ca. $\pm 0,2$ K konstant halten oder ein Material mit einem deutlich geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten α verwenden muss. In größeren Laborräumen ist die Erfüllung der ersten Anforderung allein trotz Klimatisierung nicht sehr einfach, deswegen erscheint eine Kombination beider Wege hier sinnvoller. Sie hat vor allem auch den Vorzug, dass man Untersuchungen an Sensoren bei in gewissen Grenzen veränderter Temperatur durchführen kann, wobei das dargestellte Drehmoment nicht beeinflusst wird. Als ein solches Material mit geringem α hat sich Super-Invar erwiesen, eine Legierung mit 50- bis 100-fach kleinerem Ausdehnungskoeffizienten im Vergleich zu Edelstahl oder Aluminium. Die Bestimmung der Hebelarmlänge erfolgt auf verschiedenen Wegen, entweder durch Messung auf einer Koordinatenmessmaschine oder durch Vergleich mit einem kalibrierten Endmaß vor Ort in der Messeinrichtung.

Damit wären „Kraft“ und „Hebelarm“ definiert, die Frage nach der Realisierung des „reinen“ Drehmoments ist aber noch nicht beantwortet. Hier hilft es, zu verstehen, wie ein Lager wirkt. Ein Körper verharrt in Ruhe bezüglich seiner Unterlage, wenn diese die Gewichtskraft und andere von außen einwirkende Kräfte durch entsprechende Reaktionskräfte kompensiert. Die Gesamtgegenkraft ist dabei immer vom selben Betrag wie die Resultierende der einwirkenden

Kräfte, zu ihr aber entgegengesetzt gerichtet. Das funktioniert auch für ein Kräftepaar: wenn der Hebel gelagert wird, dann muss die Gewichtskraft, die am Hebelende angreift, durch das Lager aufgefangen werden. Die Schwierigkeit besteht nun darin, die Lagerung so auszuführen, dass keine Rückwirkung auf das erzeugte Drehmoment auftritt. In Betracht kamen hierbei hydrostatische, aerostatische bzw. magnetische Lager, in denen durch eine mechanische oder magnetische Entkopplung zwischen beweglichem Rotor und unbeweglichem Stator die Beeinflussung des übertragenen Drehmomentes im Wesentlichen auf Reibungseinflüsse begrenzt ist. Die Wahl fiel auf aerostatische Lager (Luftlager) wegen der zum Teil sehr guten Erfahrungen mit diesem speziellen Lagertyp auf vielen anderen Gebieten.

Aufgabe der Metrologen ist es nun, ausgehend von den hier vorgestellten prinzipiellen Überlegungen, die weiteren Einflussgrößen aufzudecken und zu untersuchen. Dazu ist es hilfreich, in (1) die Kraft durch die Größen zu ersetzen, auf die sie zurückgeführt wird, und die zusätzlichen Einflussgrößen $\Delta\vec{M}_i$ zu ergänzen, so dass man mit den Dichten – der Luft ρ_L und des Materials der Belastungsmassen ρ_m – sowie der lokalen Fallbeschleunigung \vec{g} die folgende kompakte Darstellung für das erzeugte Drehmoment erhält

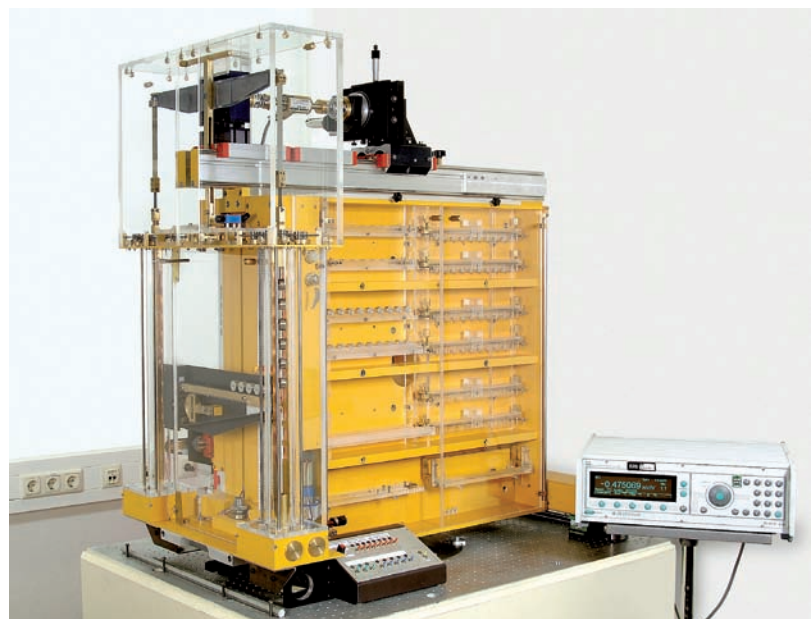
$$\vec{M} = m \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_m} \right) \cdot \vec{r} \times \vec{g} + \sum_i \Delta\vec{M}_i \quad (2)$$

Die Untersuchungen werden im Allgemeinen für jede Messeinrichtung einzeln durchgeführt. Ohne zu sehr ins Detail zu gehen, seien einige der Einflussgrößen genannt:

- Restbiegemomente der Metallfolien
- Restreibmoment im Luftlager

Bild 1:

1-N · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung mit einem Messbereich von 1 mN · m bis 1 N · m



- Einfluss der Druckluftschwankungen im Lager
- Magnetfelder zwischen den Belastungsmassen
- Luftströmungen zwischen den Belastungsmassen (Bernoulli-Effekt)
- elektrostatische Kräfte zwischen den Belastungsmassen
- mechanische Nebenschlüsse.

Durch Messung oder Abschätzung der Beiträge der Eingangsgrößen zur Ergebnisgröße und deren Unsicherheiten kommt man zu einer Gesamtaussage für das dargestellte Drehmoment [5].

In der PTB wird das Drehmoment in einem Bereich von $1 \text{ mN} \cdot \text{m}$ (siehe Bild 1) bis $20 \text{ kN} \cdot \text{m}$ in Direktbelastungseinrichtungen mit horizontaler Messachse dargestellt, wobei die kleinste erweiterte relative Messunsicherheit ($k = 2$) bei $2 \cdot 10^{-5}$ liegt. Ein Prinzipbild dieser Art von Messeinrichtungen ist in Bild 2 zu sehen.

• Kraft messende Einrichtungen

Für größere Drehmomente, wie sie zum Beispiel für Turbinen in der Energietechnik oder für Bohrgestänge in der Erdöl- oder Erdgasförderung gemessen werden müssen, stößt das Direktbelastungsprinzip mit Luftlagerung an technische und finanzielle Grenzen. Die PTB ist hier einen anderen Weg gegangen: die Messeinrichtung mit dem weltweit größten Drehmoment (zwei sich überlappende Messbereiche von $4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ bis $1,1 \text{ MN} \cdot \text{m}$) besitzt eine vertikale Messachse, das heißt, der Drehmomentvektor ist vertikal gerichtet. Die an Enden eines zweiarmigen Messhebels wirkenden Kräfte werden direkt mit Hilfe kalibrierter Kraftaufnehmer gemessen. Entsprechend wird das Drehmoment über zwei Antriebe am Antriebshebel erzeugt (siehe Bilder 3 und 4). Spezielle Sensoren erlauben dabei die Minimierung von Querkräften und Biegemomenten zur Einstellung des Kräftepaars für ein reines Drehmoment.

Dieser Ansatz hat eine Reihe von Vorteilen:

- der Einsatz großer Belastungsmassen wird vermieden
- das Kräftepaar wird direkt erzeugt und gemessen
- eine aufwändige Lagerung entfällt und
- das Eigengewicht der Aufnehmer und Adaptionsteile führt nicht zu einer unsymmetrischen Biegebeanspruchung, sondern wirkt als Axialkraft.

Aufgrund dieses Designs ist die erreichbare Messunsicherheit natürlich größer als bei Direktbelastungseinrichtungen, kann aber bei Verwendung von Präzisionskraftaufnehmern besser als $0,1 \%$ sein, im günstigen Fall sogar im Bereich von einigen 10^{-4} liegen, was für diesen Messbereich häufig ausreichend ist.

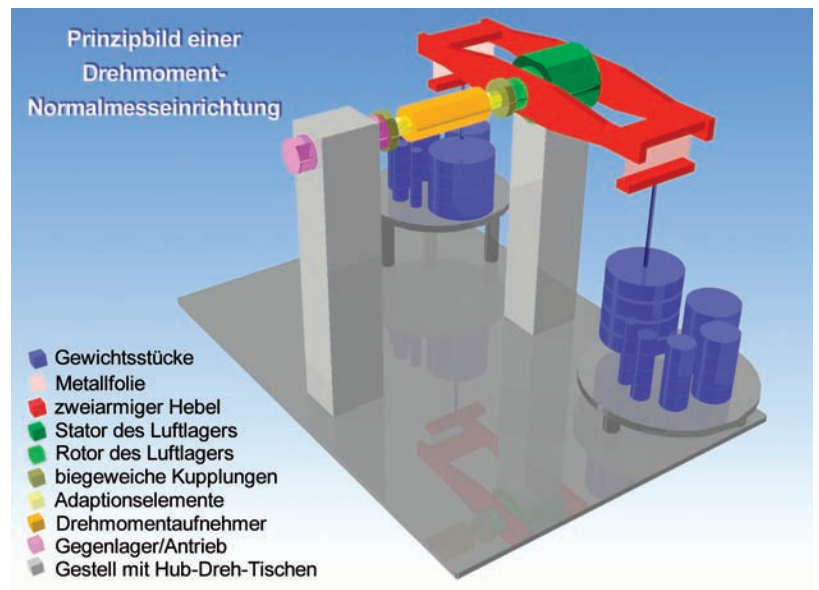


Bild 2:

Prinzipbild einer Drehmoment-Normalmeseinrichtung mit Direktbelastung

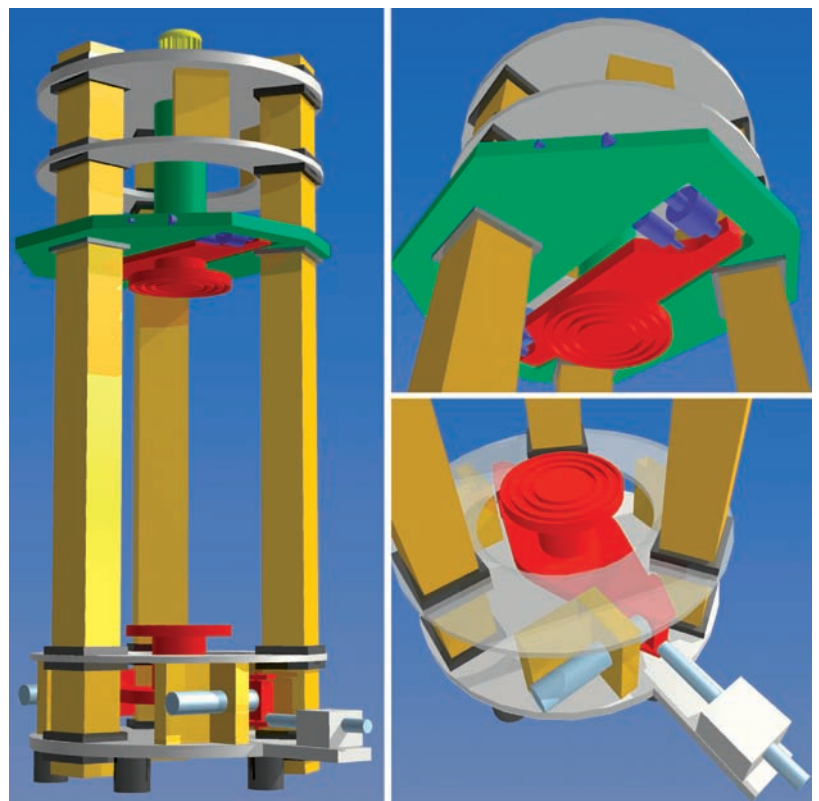


Bild 3:

Schematische Gesamtansicht einer Kraft messenden Drehmoment-Messeinrichtung (links), Ansicht der Messseite (rechts oben) und der Erzeugungsseite (rechts unten)



Bild 4:
1,1-MN·m-Drehmoment-
Normalmesseinrichtung
mit Messbereichen von
4 kN·m bis 220 kN·m
sowie von 20 kN·m bis
1,1 MN·m

• Referenzeinrichtungen

Für viele Anwendungen und Kalibrierungen ist der bei Direktbelastungseinrichtungen betriebene Aufwand zu groß im Verhältnis zum Nutzen. So werden insbesondere im industriellen Umfeld häufig Messgeräte mit steckbaren Vierkantadaptionen eingesetzt, die erheblichen Einfluss auf das Messergebnis haben. Zum Teil ist auch die Auflösung der elektronischen Anzeige – falls überhaupt vorhanden – gering. Skalen, die abzulesen sind, begrenzen die Stellenzahl des Messwertes ebenfalls. In solchen Fällen ist die Nutzung einer Messeinrichtung hinreichend, in der ein kalibrierter Drehmomentaufnehmer (siehe Abschnitt 8) als Normal verwendet wird. Der Aufnehmer wird damit zum Träger der Einheit, zur Referenz, mit der man den Prüfling vergleicht. Man spricht deshalb auch vom Vergleichsverfahren.

Mit diesem Messprinzip wird in der PTB ein Bereich von 0,01 N·m bis 5 kN·m abgedeckt, wobei die kleinsten erweiterten relativen Messunsicherheiten ($k = 2$) $2 \cdot 10^{-4}$ erreichen.

• Drehmomentschlüssel-Messeinrichtungen

Die Besonderheit des Kraftmoments als Überlagerung von Kraft und Drehmoment kommt bei Drehmomentschlüsseln zum Tragen, wobei hier wegen der Handbetätigung von einem Bereich darzustellender Drehmomente von etwa 1 N·m bis 3000 N·m auszugehen ist. In den Drehmo-

mentschlüssel wird ein reines Drehmoment eingeleitet, das Gegenmoment baut sich durch die Abstützung an einem speziell dafür angebrachten Hebel auf; die dabei von der Hebelarmlänge abhängige Querkraft wirkt auf die Drehmomenterzeugung zurück. Hierbei ist sicherzustellen, dass diese Rückwirkung das erzeugte Drehmoment nicht verfälscht. Prinzipiell eignet sich dazu ein zwischengeschaltetes Luftlager oder ein in dieser Richtung nachgewiesenen unempfindlicher Referenzempfänger (vorzugsweise in kurzer Flanschbauform, um die mit der Querkraft verbundenen Biegemomente zu minimieren).

Die Arbeitsgruppe Drehmoment betreibt drei Messeinrichtungen mit Zusatzhebel, in denen Drehmomentschlüssel kalibriert werden. Das sind in der Regel Drehmoment-Transferschlüssel, die für die Kalibrierung von Drehmomentschlüssel-Kalibriereinrichtungen als Träger der Einheit „Kraftmoment“ verwendet werden (siehe dazu auch Abschnitt 8).

• Kraftschrauber-Messeinrichtungen

In der Industrie werden Schraubwerkzeuge für Drehmomente von 1 kN·m bis 150 kN·m eingesetzt, die bis vor Kurzem nicht rückführbar zu kalibrieren waren. Diese Geräte arbeiten mit mechanischer Getriebeübersetzung, hydraulischen oder pneumatischen Antrieben und in der Regel mit sehr kurzen, einseitigen Abstützungen.

Untersuchungen zur Bestimmung der Messunsicherheit von Drehmomentaufnehmern bei großen überlagerten Querkraften und Biegemomenten haben gezeigt, dass der durch die überlagerten Komponenten verursachte zusätzliche Beitrag zum Messunsicherheitsbudget auf weniger als 0,5 % vom Messwert reduziert werden kann. Damit ist die Kalibrierung von Kraftschraubern möglich geworden. Die Messeinrichtung mit einem Messbereich bis 150 kN·m und einer einseitigen Hebelarmlänge von maximal 750 mm ist im Bild 5 wiedergegeben.

• Handbetätigte Drehmomentwerkzeuge

Bei diesen Messgeräten handelt es sich oft um kleine Schrauber oder Messuhren mit eingebauter Drehmomentmessung. Ihre Auflösung und Genauigkeit ist in der Regel gering, so dass eine rückführbare Kalibrierung eher bei einem im Deutschen Kalibrierdienst akkreditierten Labor (siehe 8) anzusiedeln ist.

5 Darstellung des statischen Drehmoments im rotierenden Fall

Ein in der PTB untersuchter Anwendungsfall für (quasi-)statisches Drehmoment unter Rotation ist die Kalibrierung von Ergometerprüfständen. Diese werden zur Kalibrierung von medizinisch eingesetzten Trekkurbelergometern verwendet. Grundlage hierfür ist die Betreiberverordnung



Bild 5:
Hydraulischer Kraft-
schrauber bis 70 kN·m in
einer Kalibriereinrichtung

für Medizinprodukte, nach der sich die genannten Geräte regelmäßig einer Messtechnischen Kontrolle (MTK) unterziehen müssen.

Im Prinzip handelt es sich hier um die Bestimmung der rotatorischen Leistung, die sich aus dem Produkt der gleichzeitig gemessenen Größen Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit (Drehzahl) ergibt. Die Messunsicherheitsanforderungen an das statische Drehmoment liegen in diesem Fall bei 0,05 %, die man mit einem guten, auf einer statischen Direktbelastungseinrichtung kalibrierten Drehmomentaufnehmer erreichen kann. Für die rotatorische Leistung beträgt die Messunsicherheit auf Grund verschiedener zusätzlicher Einflüsse bestenfalls 0,3 % (bis 1000 W bei einem maximalen Drehmoment von 75 N·m und im Drehzahlbereich von 10 min⁻¹ bis 150 min⁻¹).

Bis vor wenigen Jahren wurde ein Großteil der Ergometerprüfstände direkt an das PTB-Normal angeschlossen. Dieses befindet sich derzeit noch am Standort Berlin-Charlottenburg der PTB, eine Umsetzung in die Arbeitsgruppe „Darstellung Drehmoment“ nach Braunschweig findet aber demnächst statt. Die Rückführung der Ergometerprüfstände wird neuerdings im Rahmen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) von einem akkreditierten Labor durchgeführt, so dass sich der Beitrag der PTB auf Spezialuntersuchungen von Neuentwicklungen, Kalibrierung im Ausnahmefall sowie Begutachtungen im Auftrage des DKD beschränkt.

In der Vergangenheit sind im Drehmomentlabor einzelne Experimente zur Messung eines konstanten Drehmomentes unter Rotation vorgenommen wurden, wobei sowohl das Nullsignal (unter anderem bei Drehzahlen bis zu 40 000 min⁻¹) als auch der Kennwert untersucht wurden. Die dabei festgestellten Einflüsse durch Rotationseffekte sind so gering, dass ihre Berücksichtigung im Falle der Ergometer nicht notwendig ist.

6 Darstellung des dynamischen Drehmoments

In vielen Anwendungen tritt das Drehmoment als dynamische, das heißt zeitlich mehr oder weniger schnell veränderliche Größe auf. Insbesondere aus den Forschungen auf dem Gebiet der dynamischen Kraftmessung weiß man, dass die Dynamik und die mit ihr verbundenen Kräfte einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis haben können. Hierbei spielen unter anderem Resonanzerscheinungen eine Rolle. Für das dynamische Drehmoment gibt es derzeit Voruntersuchungen [6] sowie eine erste Messeinrichtung [7]. In dieser wird ein zu kalibrierender Drehmomentaufnehmer zwischen einen Rotationsantrieb (Rotationsschwingerreger) und einer Masse mit genau bekanntem Massenträgheitsmoment J eingebaut. Ein vom Schwingerreger erzeugtes und in den Aufnehmer eingeleitetes Drehmoment $M(t)$ ruft eine Drehschwingung mit der momentanen Winkelbeschleunigung $\ddot{\varphi}(t)$ hervor, wobei die genannten Größen über eine dem zweiten Newtonschen Axiom ähnliche Beziehung verknüpft sind

$$M(t) = J \cdot \ddot{\varphi}(t). \quad (3)$$

Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Massenträgheitsmoment J konstant ist, was aber keine prinzipiell notwendige Bedingung darstellt. Die Winkelbeschleunigung wird interferometrisch gemessen, so dass sich aus diesen beiden Größen unmittelbar das Drehmoment ergibt.

Die Arbeiten auf diesem Gebiet sind noch im Stadium der Forschung, so dass bislang keine Kalibrierungen angeboten werden. Es ist jedoch mittelfristig beabsichtigt, die dynamische Messung des Drehmomentes in die messtechnische Praxis einzuführen.

7 Vergleiche und Weitergabe der Einheit, Normung

Die Aufgabe der PTB besteht nicht nur darin, die Einheiten darzustellen, sondern auch in der Absicherung der Verfahren und Ergebnisse durch Vergleich mit anderen, auch gleichrangigen Instituten, und der Weitergabe der Einheiten an nachgeordnete Stellen.

Für Vergleichsmessungen werden häufig spezielle, an die Erfordernisse des Vergleichs angepasste Messabläufe und Prozeduren entwickelt. Diese spielen insbesondere bei internationalen Vergleichen wie „Key comparisons“, eine wichtige Rolle bei der metrologischen Absicherung der weltweiten Vergleichbarkeit der Messungen und ihrer Ergebnisse.

Die Weitergabe der Einheit ist vor allem im Rahmen des DKD über die Akkreditierung von Laboratorien geregelt, für die direkt oder indirekt eine Rückführung zur PTB realisiert ist. Aber auch andere, zum Teil ausländische Interessenten lassen ihre Messgeräte in der PTB kalibrieren. Dies geschieht in der Regel nach genormten Verfahren, bei deren Entwicklung und Ausarbeitung die Arbeitsgruppe Drehmoment der PTB häufig intensiv bzw. auch federführend beteiligt war und ist. Gemäß der „zwei Gesichter“ des Drehmoments haben wir hier auch den Fall der Drehmomentschlüssel bzw. deren Kalibriereinrichtungen separat zu behandeln (DKD-R 3-7 und 3-8 sowie DIN/EN/ISO 6789).

Wichtige Normen, deren Anwendungsbereich sowie Besonderheiten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die bei der Kalibrierung zu untersuchenden Parameter eines Messgerätes sind zum Beispiel die Wiederhol- und die Reproduzierunsicherheit. Diese sagen aus, wie stark sich das Ausgangssignal eines Sensors ändert, wenn eine Messung in unveränderter (Wiederholbarkeit) bzw. geänderte Einbaustellung (Reproduzierbarkeit) wiederholt wird.

Weiterhin spielt die Umkehrspanne (Hysterese) eine Rolle, die sich darin äußert, dass man ein leicht unterschiedliches Signal erhält, wenn man das selbe Drehmoment einmal von kleineren und ein anderes mal von größeren Werten her kommend einstellt. Bei Drehmomentschlüsseln gibt es zusätzlich eine Abhängigkeit von der Hebellänge, weil die zu einem gegebenen Drehmoment gehörende Querkraft mit zunehmender Hebellänge abnimmt (Hebelgesetz). Andere Parameter sind die Nichtlinearität oder die Kriechen genannte zeitabhängige Änderung der Anzeige bei konstanter Belastung. Erst die Kalibrierung eines Messgerätes weist nach, ob es bestimmte Anforderungen erfüllen kann – oder nicht.

8 Metrologische Infrastruktur und Deutscher Kalibrierdienst

Wie bereits erwähnt unterstützt die Arbeitsgruppe Darstellung Drehmoment die metrologische Infrastruktur insbesondere durch die Rückführung auf Normale, aber auch durch Beratung und Richtlinienarbeit. Im Fachausschuss 10 „Drehmoment“ des Deutschen Kalibrierdienstes ist die Arbeitsgruppe durch einen Beisitzer

Tabelle 1:
Wichtige Normen im Zusammenhang mit der Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten

Norm	Anwendung	Anmerkungen	Aktuelle Ausgabe
DIN 51309 [8]	Drehmomentaufnehmer	Rechts- bzw. Linksdrehmoment	2005-12
DKD-R 3-5 [9]	Drehmomentaufnehmer	Wechseldrehmoment	1998-12
DKD-R 3-7 [10]	Anzeigende Drehmomentschlüssel	Drehmoment-Transferschlüssel anzeigende Drehmomentschlüssel höherer Genauigkeit (vgl. DIN/EN/ISO 6789)	2003-10
DKD-R 3-8 [11]	Kalibriereinrichtungen für Drehmomentschraubwerkzeuge	Kalibrierung von Drehmomentschlüssel-Kalibriereinrichtungen	2003-10
DIN/EN/ISO 6789	Handbetätigte Drehmoment-Werkzeuge	Schraubwerkzeuge Handbetätigte Drehmoment-Werkzeuge	2003-10
VDI/VDE 2646	Drehmomentmessgeräte	Mindestanforderungen an Kalibrierungen, Werkskalibrierungen	2006-02
EA 10/14	Messgeräte für statische Drehmomente	Europäische Norm, in Überarbeitung als EURAMET-Richtlinie [12]	2007-07

vertreten. Die halbjährlichen Treffen werden inhaltlich mitgetragen, unter anderem werden regelmäßig Ringvergleiche organisiert bzw. unterstützt. Experten der Arbeitsgruppe werden außerdem vom DKD mit der Begutachtung von Laboratorien im Rahmen von Akkreditierungen nach der DIN/EN/ISO 17025 beauftragt. Auch viele Staatsinstitute in anderen Ländern haben in den letzten zehn Jahren Messeinrichtungen gekauft oder selbst entwickelt und aufgebaut, so dass heute im internationalen Maßstab Messungen durchgeführt werden können, die die weltweite Vergleichbarkeit absichern helfen, so dass man dem Ergebnis der Messung trauen kann – egal in welchem Land diese stattgefunden hat.

Literatur

- [1] *Davis R. S.*: Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/91), *Metrologia* **29** (1992), S. 67–70.
- [2] *Torge, W.*: Gravimetry, de Gruyter, Berlin 1989.
- [3] *Röske, D.*: Realization of the Unit of Torque – Determination of the Force-Acting Line Position in Thin Metal Belts, Proc. of the 15th International Conference of IMEKO TC3 „Accuracy, Assurance in Force, Torque and Mass Measurements, Madrid (Spain), Oct. 7–11, 1996, S. 261–264.
- [4] *Gassmann, H.; Allgeier, T., Kolwinski, U.*: A New Design of Primary Torque Standard Machines, Proc. of the XVI IMEKO World Congress, Vienna (Austria), Sept. 25–28, 2000, vol. III, S. 63–73.
- [5] *Peschel, D.; Röske, D.*: Messunsicherheiten bei der Drehmomentmessung, *Technisches Messen*, **72** (2005), 5, S. 308–324.
- [6] *Wedmann, A.*: Experimentelle Bestimmung des Rotormassenträgheitsmomentes einer Normalmesseinrichtung zur Kalibrierung mit dynamischem Drehmoment, Diplomarbeit, Fachhochschule Lübeck, 2005.
- [7] *Bruns, Th.; Kobusch, M.*: Rückführung dynamischer Kraft- und Drehmomentmessungen mithilfe von Laser-Doppler-Interferometrie, *Technisches Messen*, **72** (2005), 3, S. 130–135.
- [8] DIN 51309: Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente. Hrsg. vom Deutschen Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2005.
- [9] DKD-R 3-5: Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente. Hrsg. vom Deutschen Kalibrierdienst. Ausgabe Dezember 1998, www.dkd.eu/dokumente/Richtlinien/dkd_r_3_5.pdf [Zugriff am: 18.03.2008].
- [10] DKD-R 3-7: Statische Kalibrierung von anzeigenden Drehmomentschlüsseln. Hrsg. vom Deutschen Kalibrierdienst. Ausgabe Oktober 2003, www.dkd.eu/dokumente/Richtlinien/dkd_r_3_7.pdf [Zugriff am: 18.03.2008].
- [11] DKD-R 3-8: Statische Kalibrierung von Kalibriereinrichtungen für Drehmomentschraubwerkzeuge. Hrsg. vom Deutschen Kalibrierdienst. Ausgabe Oktober 2003, www.dkd.eu/dokumente/Richtlinien/dkd_r_3_8.pdf [Zugriff am: 18.03.2008].
- [12] EA-10/14: EA Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices. June 2000, www.euromet.org/docs/calguides/EA-10-14.pdf [Zugriff am: 18.03.2008].
- [13] EURAMET/cg-14/v.01: Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices. July 2007, URL: www.euromet.org/euramet/Calguides/EURAMET-cg-14.01_Static_Torque_Measuring_Devices.pdf [Zugriff am: 18.03.2008]

Mehrkomponentenmessungen der mechanischen Größen Kraft und Moment

Dirk Röske*

1 Begriffe

Die Größen Kraft F und Moment M sind Vektoren und werden als solche nicht allein durch einen Zahlenwert (Skalar) und eine Einheit bestimmt, sondern immer auch durch eine Richtung im Raum oder in der Ebene und einen zugehörigen Richtungssinn, zum Beispiel Zug- oder Druckkraft, Rechts- oder Linksdrehmoment. Zur Beschreibung eines Vektors kann man seinen Betrag und beispielsweise über geeignet definierte Winkel seine Richtung bezüglich eines gegebenen Koordinatensystems heranziehen. Eine andere Vorgehensweise besteht darin, den Vektor in einzelne Bestandteile, so genannte Komponenten, zu zerlegen, die den „Anteil“ des Vektors entlang der Koordinatenachsen enthalten. Bei Bewegungen spricht man beispielsweise von Längs- und Querbewegung bezüglich einer definierten Richtung, bei Kräften von Axial- und Querkraft. Die Zerlegung des Vektors erfolgt dadurch, dass man dessen Projektionen auf die Koordinatenachsen bestimmt. Die Werte der so gefundenen Komponenten sind Skalare. Als Gruppe beschreiben sie den Vektor eindeutig, das heißt, man benötigt in der Ebene zwei und im Raum drei Werte für die Komponenten des Vektors.

Aus Sicht der Theorie sind die verschiedenen Komponenten gleichrangig, weshalb für ihre Benennung in der Regel die Namen der Koordinatenachsen x , y und z verwendet werden. Man spricht dann von der x -Komponente der Kraft (F_x) und so weiter. Häufig tritt aber der Fall auf, dass eine der Komponenten wichtiger ist, vielleicht weil sie das Messergebnis stärker beeinflusst als die beiden anderen. Eventuell ist sie auch durch die geometrische Form des damit belasteten Körpers, zum Beispiel durch dessen Symmetrieachse, herausgestellt. In diesem Fall spricht man bei der Kraft von der Axialkraftkomponente (oder kurz Axialkraft), beim Moment vom Drehmoment. Beide bestimmen üblicherweise die z -Richtung.

Die in den vorherigen Beiträgen behandelten Größen Kraft und Drehmoment sind als derart definierte Komponenten zu verstehen, wobei

vorausgesetzt wird, dass die Beträge der jeweils beiden anderen Komponenten – der Querkraft- bzw. Biegemomentkomponenten, die man in diesem Fall zusammengefasst auch als Störkomponenten bezeichnet – im Idealfall Null sind.

2 Probleme bei der Mehrkomponentenmessung

Bei der Mehrkomponentenmessung werden alle Komponenten gleichartig behandelt – es gibt in diesem Sinne keine Störkomponenten. Allerdings können Kräfte und Momente nicht unmittelbar miteinander verglichen werden, da sie unterschiedliche Dimensionen haben, die sich durch eine Längendimension unterscheiden. Als Vergleichskriterium kann man aber die in einem Körper durch die Belastung mit der Größe hervorgerufenen mechanischen Spannungen bzw. die damit verbundenen und für die Messung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen erforderlichen Dehnungen heranziehen.

Es können nun verschiedenste Fälle vorliegen:

- alle Komponenten haben in etwa gleich große Beträge (Anwendung: Roboter, Manipulatoren, Crashtest-Dummys, Radlastsensoren)
- eine große Axialkraft in Kombination mit einem (relativ) kleinen Drehmoment (Vorspannkraft einer Schraube, die mit dem Drehmoment angezogen wird)
- größeres Drehmoment mit vergleichsweise kleiner Axialkraft kombiniert (Messung bei Bohrungen, Windkraftturbinen).

Diese bei Weitem nicht vollständige Aufzählung lässt erahnen, dass es eine Fülle von Kombinationsmöglichkeiten gibt, die nicht alle mit einem Standardmessverfahren abgedeckt werden können.

Erschwerend kommt hinzu, dass es einen engen Zusammenhang zwischen den Größen gibt. So ruft zum Beispiel eine in einem gegebenen Abstand zum Bezugspunkt wirkende Querkraft immer auch mindestens eine (ortsabhängige) Momentkomponente hervor. Ein nicht ideal als Kräftepaar realisiertes Drehmoment ist mit zusätzlichen Querkraften und (wiederum orts-

* Dr. Dirk Röske, Leiter der Arbeitsgruppe „Darstellung Drehmoment“, E-Mail: dirk.roeske@ptb.de

abhängigen) Biegemomenten verbunden. Aus Sicht der Theorie kann man einen Belastungszustand in einem vorgegebenen Punkt zwar durch genau sechs Werte – die drei Kraft- und die drei Momentkomponenten – beschreiben, für andere Punkte ergeben sich aber im allgemeinen andere Werte, so dass eigentlich von einem Vektorfeld gesprochen werden muss. Es ist also zu klären, auf welchen Punkt das Ergebnis zu beziehen ist, wenn man nicht ganze Tabellen oder Funktionen angibt oder angeben kann. Das Problem kann häufig eingegrenzt werden, wenn bekannt ist, an welcher Stelle die Kräfte und Momente gefragt sind und an welcher sie gemessen werden. Für einen Radlastsensor könnte zum Beispiel die Aufstandskraft an der Kontaktfläche zwischen Rad und Straße sowie das dort übertragene Drehmoment oder die Querkraft bei Kurvenfahrten eine Rolle spielen. Bei der Schraube ist das Kopf- sowie das Schafttreibmoment bzw. die Vorspannkraft von Interesse, um Verschraubungen zu optimieren.

Weiterhin treten bei der Messung von Kräften und Momenten zusätzliche Effekte auf, die zu berücksichtigen sind. So ist das Ausgangssignal einer Messbrücke nicht absolut linear, sondern weist Abhängigkeiten höherer Ordnung von der zu messenden Größe auf. Außerdem gibt es zeit- und richtungsabhängige Einflüsse bei einem gegebenen Wert der Messgröße. Für Letztere hängt die Anzeige davon ab, ob man den Wert von größeren oder kleineren Beträgen her kommend einstellt. Ein weiterer wesentlicher Einfluss ist das Übersprechen, das sich dadurch äußert, dass man bei einer einwirkenden Komponente mehr oder weniger große Signale auf allen Messkanälen erhält.

Diese Vielzahl von Parametern und Wechselwirkungen führt zu einer Komplexität des Problems, die sicher dazu beigetragen hat, dass die Mehrkomponentenmessung bisher nicht den Entwicklungsstand von (Axial-)Kraft und Drehmoment erreicht hat.

3 Lösungswege zur Darstellung von Mehrkomponentensituationen

Der Ansatz zur Darstellung von Mehrkomponenten-Kraft- und -Moment-Belastungen besteht in der Regel darin, dass man für einen gegebenen Punkt ein bestimmtes Ensemble von Komponenten erzeugen will. In einer alternativen Darstellung bedeutet das, in dem gegebenen Punkt einen Kraft- und einen Momentvektor darzustellen, wobei beide Vektoren jeweils durch Betrag, Richtung und Richtungssinn festgelegt sind.

Aufgrund der oben beschriebenen Vielfalt der Mehrkomponentensituationen gibt es auch verschiedenste Ansätze für deren Realisierung. Ganz allgemein kann man zwei Prinzipien unterscheiden, die beide Vor- und Nachteile haben.

Bei den seriellen Systemen versucht man, die Komponenten so gut es geht zu entkoppeln. Sie sollen dann als Einzelkomponenten generiert und überlagert werden können. Beispiele dafür sind häufig mit orthogonalen Antriebs- und Messgliedern ausgestattet, die entlang der Achsen eines definierten Koordinatensystems gerichtet sind.

Bei den parallelen Systemen (Parallelkinematiken) wird nicht versucht, die Komponenten zu trennen, sondern die Überlagerung der Komponenten wird bereits bei deren Erzeugung in Kauf genommen. Allerdings muss man in diesem Fall das System über seine geometrische Anordnung beschreiben oder einen anderen Weg der Rückführung (Positions- und Winkelmessung) beschreiben.

Parallelkinematiken werden zum Beispiel bei Robotern, Fahr- und Flugsimulatoren oder bei Werkzeugmaschinen eingesetzt. Sie sind häufig kompakter und leichter auszuführen als serielle Anlagen und bieten damit eine bessere Dynamik. In der Arbeitsgruppe „Darstellung Drehmoment“ der PTB wurde erstmals der Versuch unternommen, eine als Hexapode (griech. „Sechsfüßer“) ausgeführte Parallelkinematik für metrologische Zwecke einzusetzen [1, 2]. Da es hierbei nicht nur um die Position, sondern vielmehr um die Kräfte und Momente ging, mussten entsprechende Sensoren integriert werden.

4 Konstruktionsprinzip der Hexapoden-Einrichtung

Ein Grundprinzip der in der PTB entwickelten Mehrkomponenten-Referenzmesseinrichtung (MK-RME, siehe Bild 1 als schematische Darstellung und das Foto in Bild 2) besteht in einer räumlichen Trennung von Antrieb und Messung. Das heißt, die Maschine enthält zwei spiegelsymmetrisch aufgebaute Hexapoden (die Poden sind im Bild rot dargestellt), eine im oberen Teil mit sechs Motoren (gelb) für die

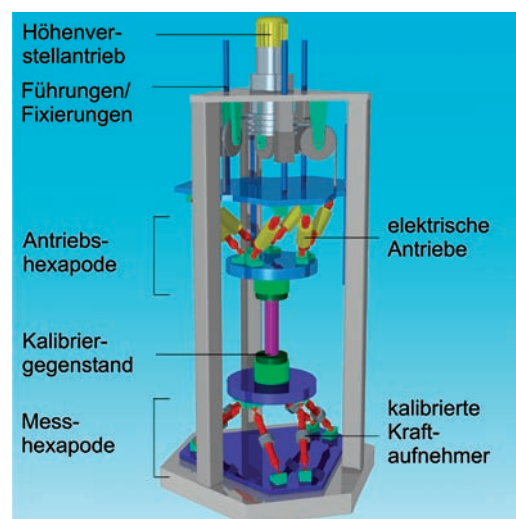


Bild 1:
Prinzipbild der Mehrkomponenten-Referenzmesseinrichtung.



Bild 2:
Mehrkomponenten-Referenzmesseinrichtung mit einem Kraftvektorbetrag von maximal 10 kN und einem Momentvektorbetrag von maximal 1 kN·m.

Erzeugung der Belastung und eine im unteren Teil für die Messung der erzeugten Kräfte und Momente mit Hilfe von kalibrierten Kraftaufnehmern (grau). Der Bezugspunkt ist dabei frei wählbar, er wird im allgemeinen durch den zu kalibrierenden Aufnehmer bestimmt und geht in die Software ein, die die erforderlichen Berechnungen durchführt.

Der obere Hexapode kann als Ganzes vertikal verschoben werden, um den Einbau eines Aufnehmers bzw. die Anpassung an unterschiedliche Aufnehmerlängen zu ermöglichen. Diese Bewegung erfolgt mit Hilfe des oben zentral angebrachten Motors, der über Seile, Umlenkrollen und vertikale Führungsstangen den Antriebshexapoden vertikal verfährt. Die Arretierung erfolgt dann über die Führungsstangen.

5 Theoretische Grundlagen und praktische Umsetzung des Hexapodenprinzips

Aus theoretischer Sicht benötigt man für sechs unbekannte Größen – also zum Beispiel die jeweils drei Komponenten der Kraft und des Moments – sechs linear unabhängige Modell-eingangsgroßen. Dies sind im Fall der hier vorgestellten Einrichtung die Signale der Kraft-

aufnehmer in den Messpoden. Aus ihnen kann man die in den Messpoden wirkenden Kräfte und mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems, das die Geometrie der Anordnung enthält, die unbekannt Kraft- und Momentkomponenten für einen gegebenen Punkt bestimmen.

Das wesentliche Prinzip des Hexapoden besteht darin, dass die Signale aller sechs Kraftaufnehmer gleichzeitig gemessen und zu jedem Zeitpunkt die wirkenden Komponenten berechnet werden können. Ähnliches gilt für die Antriebspoden. Aufgrund der direkten Kopplung ist es für eine auszuführende Bewegung fast immer notwendig, alle Antriebe gleichzeitig zu fahren. Dieser parallelen Wirkungsweise verdanken die Parallelkinematiken ihren Namen.

Neben der Kalibrierung der Kraftaufnehmer ist es natürlich notwendig, auch die räumliche Anordnung in den Hexapoden zu messen. Der Messhexapode besteht aus einer eckigen Grund- und einer runden Deckplatte sowie sechs beide Platten verbindende Poden. Letztere weisen an ihren Enden Verjüngungen als elastische Festlager auf. Diese sind notwendig, damit die graudargestellten Kraftaufnehmer (s. Bild 1) keine anderen Belastungen erfahren als die Axialkraft, für die sie kalibriert sind. Wegen der Verformung des Hexapoden können nämlich zusätzliche Querkräfte sowie Dreh- und Biegemomente entstehen, die die Signale der Kraftaufnehmer verfälschen.

Andererseits haben diese Lagerpunkte eine andere wichtige Funktion – sie können als Referenzpunkte für die Bestimmung der geometrischen Anordnung herangezogen werden. Die Messung der Podenlängen zwischen den Lagerpunkten und deren gegenseitige Lage im Raum wurde für diese Punkte auf einer Koordinatenmessmaschine durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Messungen und die Kalibrierdaten der Kraftaufnehmer gehen ebenfalls in die Software ein, die aus den Eingangsdaten die gesuchten Größen berechnet.

6 Erste Messungen und Ausblick

Die Mehrkomponenten-Referenzmesseinrichtung ist für kontinuierliche, quasistatische Messungen konzipiert worden; es sind keine dynamische Belastungen vorgesehen.

In ersten Messungen wurden neben einem Drehmomentaufnehmer mit Biegemomentmessbrücken ein Sensor zur Bauwerksüberwachung [3], zwei Mehrkomponentenaufnehmer [4] sowie ein neuartiger Kraftvektorsensor [5] untersucht. Die Ergebnisse stimmen hinreichend gut mit Ergebnissen von anderen Messeinrichtungen überein. Trotzdem besteht noch Optimierungsbedarf insbesondere im Hinblick auf das Zeitverhalten und die Software zur Bedienung der Anlage.

Mit der hier vorgestellten Messeinrichtung wird das weite Feld der Mehrkomponentenmessungen nur zu einem kleinen Teil abgedeckt. Das betrifft sowohl die Messbereiche als auch das Verhältnis der Beträge der beiden Größen Kraft und Moment. Betrachtet man die anderen im Punkt 2 genannten Fälle, dass also zum Beispiel eine große Axialkraft mit einem kleinen Drehmoment kombiniert auftritt (Schraubenvorspannkraft und Schraubmoment), dann müssen dafür neue Lösungen gesucht werden. Die könnten darin bestehen, dass für die Kraft- bzw. die Drehmoment-Messeinrichtungen (siehe die entsprechenden Beiträge in diesem Heft) Zusatzvorrichtungen entwickelt und gebaut werden, die die Erzeugung weiterer Komponenten innerhalb der Maschinen erlauben. Für die 100-kN-Kraft-Normalmesseinrichtung ist eine derartige Zusatzvorrichtung bereits im Entstehen [5].

Aller Voraussicht nach wird es aber für spezielle Mehrkomponenten-Messaufgaben spezieller Mehrkomponenten-Messeinrichtungen bedürfen. Das heißt, es wird vermutlich keine universelle Mehrkomponentenanlage geben, die die Anforderungen verschiedener Messaufgaben auf gleich bleibendem Niveau erfüllen kann. Außerdem ist die nationale und internationale Normung der Messverfahren auf dem Gebiet der Mehrkomponentenmessung bisher nicht geregelt. Hier besteht einiger Handlungsbedarf.

Literatur

- [1] *Röske, D.; Peschel, D.; Adolf, K.*: The generation and measurement of arbitrarily directed forces and moments: the project of a multi-component calibration device based on a hexapod structure, 17th IMEKO TC3 conference (Force, Mass, Torque and Pressure Measurements at Present and in the Future), September 17–21, 2001, Istanbul, Turkey, on CD-ROM.
- [2] *Röske, D.*: Metrological characterization of a hexapod for a multi-component calibration device, XVII IMEKO World Congress (Metrology in the 3rd millennium), June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia, on CD-ROM.
- [3] *Tegtmeier, F. L.*: Mehrkomponenten-Dehnungsaufnehmer für das Monitoring von Bauwerken, Braunschweig, Techn. Univ., Dissertation, 2005, 184 S.
- [4] *Park, Y.-K.; Kumme, R.; Kang, D.-I.*: Dynamic evaluation of column-type multi-component force transducers, XVIII IMEKO World Congress (Metrology for a Sustainable Development), Rio de Janeiro, Brazil, 17–22 September, 2006, on CD-ROM.
- [5] *Lietz, S.; Tegtmeier, F. L.; Kumme, R.; Röske, D.; Kolwinski, U.; Zöller, K.*: A new six-component force vector sensor – first investigations; IMEKO TC3 & TC16 & TC22 International Conference, 27th November – 1st December, 2007, Merida, Mexico, on CD-ROM.

Präzisions-Drucksensoren für „Fit and forget“ Anwendungen

- Drucksensoren
- Druckschalter
- Transducer und Zuberhör
für die invasive physiologische
Druckmessung

HJK Sensoren + Systeme GmbH & Co. KG
Engelschalkstrasse 32, D - 86316 Friedberg
Tel. +49 (0)821-26 99 00
FAX +49 (0)821-26 99 011
info@hjk.de • www.hjk.de



Ihr kompetenter Partner für die Druckmessung

Druckmessung von Kilo- bis Gigapascal

Wladimir Sabuga*

1 Einleitung

Der Druck ist nicht nur eine der wichtigsten Zustandsgrößen, er zählt zu den meistgemessenen physikalischen Größen in vielen Bereichen unseres täglichen Lebens und zu den wesentlichen Prozessparametern in vielen industriellen Verfahren. Heizungs-, Klima-, Kraftwerks-, Bio- und chemische Verfahrenstechnik; Gas- und Energieversorgung; Automobil-, Maschinen-, Apparate- und Anlagenbau; Luftfahrt, Verkehr, Medizin, Verteidigung und naturwissenschaftliche Forschung sind nur einige der unzähligen Anwendungsgebiete, wo die Druckmessung unverzichtbar ist. Allein in Deutschland liegt die Zahl der neu hergestellten und installierten Druckmessgeräte bei mehreren Millionen jährlich. Speziell müssen Druckmessgeräte, die bei den im Eichgesetz definierten Messaufgaben (Reifendruckmessung an Kraftfahrzeugen, Druckmessung bei der Herstellung von Arzneimitteln, geschäftlicher oder amtlicher Verkehr u. a.) eingesetzt werden, einer Bauart-Musterprüfung unterzogen und zur Verwendung im eichpflichtigen Bereich zugelassen werden.

2 Definitionen

Die physikalische Größe Druck p wird definiert als der Quotient aus der Normalkraft F_N , die in einem flüssigen oder gasförmigen Medium gleichmäßig auf eine Fläche A wirkt [1]:

$$p = \frac{F_N}{A} \quad (1)$$

Die Einheit des Drucks im Internationalen Einheitensystem (SI) ist das Pascal (Pa): $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ m}^{-1} \text{ kg s}^{-2}$ [2]. Die gesetzliche Grundlage für die Messtechnik auf europäischer Ebene bildet die Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Einheiten im Messwesen. Für Deutschland werden im „Gesetz über Einheiten im Messwesen“ (Einheitengesetz) für die Druckmessung neben dem Pascal das Bar (bar), $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, und für die Messung des Blutdrucks sowie des Drucks anderer Körperflüssigkeiten die Millimeter-Quecksilbersäule (mmHg), $1 \text{ mmHg} \approx 133,322 \text{ Pa}$, festgelegt. Die früher gebrauchten Druckeinheiten wie Kilopond durch

Quadratzentimeter (kp/cm^2), technische Atmosphäre (at), physikalische Atmosphäre (atm), Torr (Torr), konventionelle Meter Wassersäule (mWS) dürfen nicht mehr verwendet werden und werden nach folgenden Beziehungen in die SI-Einheit Pascal umgerechnet:

$$1 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ at} = 98066,5 \text{ Pa},$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa},$$

$$1 \text{ Torr} = 101325/760 \text{ Pa} \approx 133,322 \text{ Pa},$$

$$1 \text{ mWS} = 9806,65 \text{ Pa (DIN 1314)}.$$

Man unterscheidet drei Arten des Drucks nach dem Bezugsdruck. Der absolute Druck oder Absolutdruck (engl.: absolute pressure), p_{abs} ist der Druck gegenüber dem Druck null im leeren Raum. Der Überdruck oder Relativdruck (engl.: gauge pressure), p_e ist die Differenz zwischen einem absoluten Druck p_{abs} und dem jeweiligen (absoluten) Atmosphärendruck, p_{amb} : $p_e = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$. Der Überdruck nimmt positive Werte an, wenn der absolute Druck größer als der Atmosphärendruck ist; er nimmt negative Werte an, wenn der absolute Druck kleiner als der Atmosphärendruck ist. Der Differenzdruck (engl.: differential pressure), ist die Differenz Δp zweier Drücke p_1 und p_2 , $\Delta p = p_1 - p_2$, oder, $p_{1,2}$ wenn sie selbst Messgröße ist.

3 Druckbereiche

Der Bereich der Absolutdrücke unterhalb des Atmosphärendrucks, dessen niedrigster Wert auf der Erdoberfläche etwa 300 hPa beträgt, zählt zum Vakuumbereich, dem der folgende Beitrag von Josten [3] gewidmet ist. Die auf der Erde vorkommenden natürlichen Drücke, von der Troposphäre, in Höhe von ca. 55 km, bis zum Erdkern, umfassen den großen Bereich von ca. 25 Pa bis 364 GPa (Bild 1).

Der maximale für den Menschen „zugängliche“ natürliche Druck herrscht an der tiefsten Stelle der Ozeane, im Witjastief 1 im Marianengraben mit 11034 m Tiefe, und beträgt 110 MPa. Der maximale, im Labor in Festkörpern erzeugte Druck kommt dem im Erdzentrum nahe. Für Flüssigkeiten liegt die Obergrenze der künstlichen Drücke bei 20 GPa [1]. Zu den Höchstdruckanwendungen mit industrieller Bedeutung zählt die Diamanten- und Hartmetallsynthese, für die Drücke zwischen 4 GPa und 10 GPa benötigt werden. Die Obergrenze der technischen

* Dr. Wladimir Sabuga, Leiter der Arbeitsgruppe „Druck“, E-Mail: wladimir.sabuga@ptb.de



Bild 1: Drücke auf der Erde und anderen Himmelskörpern, im Labor und industriellen Anwendungen. Fundamentale und mittelbare Druckmessgeräte und -verfahren

Druckskala, für die eine zuverlässige Rückführung der Druckmessungen auf die SI-Basiseinheiten gewährleistet ist, liegt bei 1,5 GPa. Zu den wichtigsten technologischen Prozessen, für welche Drücke bis 1,5 GPa benötigt werden und verhältnismäßig genau messbar sein müssen, zählen die hydraulische Extrusion und die Autofrettage. Mit Hilfe des letzteren Verfahrens lässt sich die Lebensdauer der im Betrieb einem hohen Druck ausgesetzten Komponenten wie Hochdruckrohren, -pumpen und -armaturen, Auto-Dieseleinspritzanlagen, Schusswaffen um das Vielfache erhöhen. Der überwiegende Teil der industriellen Anwendungen, zu denen verschiedenste pneumatische und hydraulische Vorrichtungen, Prozesse in der chemischen Industrie und der Automobilindustrie, der Werkstoffbearbeitung mit Wasserstrahlanlagen, der Gasversorgung und viele andere gehören, findet im Druckbereich zwischen 1 MPa und 300 MPa statt [4]. Ein neues, viele Vorteile bringendes Verfahren zur Sterilisierung von Lebensmitteln ohne thermische Behandlung, bei dem diese für kurze Zeit einem Druck von (0,7 bis 1) GPa ausgesetzt werden, wird in einigen Industrieländern schon routinemäßig eingesetzt. Zu den häufigsten Überdruckmessungen, mit denen der Bürger direkt konfrontiert wird, zählen Autoreifenluft- und Blutdruckmessungen im Bereich von ca. 10 kPa bis 500 kPa. Kleine Überdrücke im Bereich von ca. ± 1 kPa gewinnen immer mehr an Bedeutung im Zusammenhang mit der Raumklimatisierung und -lüftung, den Reinraumtechnologien und der Energieerzeugung. Absolutdrücke um 100 kPa und darunter müssen in der Meteorologie (Wettervorhersage) und der Luftfahrt (barometrische Höhenmessung) relativ genau gemessen werden.

4 Druckmessverfahren

Man unterscheidet zwischen unmittelbaren und mittelbaren Verfahren zur Druckmessung [4]. Unmittelbare Druckmessgeräte ermitteln die Größe des zu messenden Drucks direkt aus der Basisbeziehung (1), oder aus

$$p = h \cdot \rho_F \cdot g, \tag{2}$$

wobei die Letztere den hydrostatischen Druck einer Flüssigkeitssäule darstellt. Hier sind h – die Höhe der Flüssigkeitssäule, ρ_F – die Dichte der Flüssigkeit und g – die Fallbeschleunigung.

Die nach dem Prinzip (2) arbeitenden Druckmessgeräte sind Flüssigkeitsmanometer, in denen h gemessen und p daraus bestimmt wird. Zu den Flüssigkeitsmanometern gehören das U-Rohrmanometer, das Schrägrohrmanometer, das Schwimmermanometer, in denen die Höhe der Flüssigkeitssäule auf unterschiedliche Weise gemessen wird. Flüssigkeitsmanometer werden fast ausschließlich zur Druckmessung in Gasen verwendet. Je nach dem, ob in der Bezugsebene des Flüssigkeitsmanometers der Atmosphären- oder Nulldruck herrscht, wird mit dem Gerät entweder Über- oder Absolutdruck gemessen. Auch für Differenzdruckmessungen, z. B. Messungen von kleinen Druckdifferenzen bei einem hohen statischen Druck können Flüssigkeitsmanometer eingesetzt werden. Der Messbereich der Flüssigkeitsmanometer ist normalerweise auf 1 Pa bis 300 kPa begrenzt (Bild 1). Die kleinste erreichbare relative Messunsicherheit kann bei einigen 10^{-6} liegen.

Die nach der Beziehung (1) arbeitenden Druckmessgeräte sind Kolbenmanometer und Druckwaagen mit Sperrflüssigkeiten.

In einem Kolbenmanometer wirkt der Druck auf die Querschnittsfläche A des Kolbens und

bewirkt eine Kraft F_N . Bei einfachen Kolbendruckmessern für industrielle Anwendungen ist der Kolben abgedichtet und die auf den Kolben wirkende Kraft von einer Feder kompensiert. Der sich einstellende Federweg ist das Maß für den Druck. Wegen der Reibung zwischen Dichtung und Kolben ist die Genauigkeit solcher Kolbendruckmesser nicht besser als 1 %. Eine größere Bedeutung haben die in Messwerkstätten und Laboratorien als Drucknormale angewendeten Kolbenmanometer mit einem ungedichteten Kolben. In solchen Kolbenmanometern gibt es zwischen dem Kolben und dem Druckzylinder einen kleinen Spalt, der eine freie reibungslose Bewegung des Kolbens im Zylinder ermöglicht. Ein mechanischer Kontakt zwischen dem Kolben und Zylinder wird ausgeschlossen entweder durch eine Kolbenrotation (Drehkolbenmanometer) oder eine spezielle Form des Kolbenzylinderspaltes oder eine mechanische Halterung, mit denen der Kolben in der Zylinderbohrung zentriert wird. Die auf den Kolben wirkende Druckkraft wird entweder mit den auf den Kolben aufgelegten Gewichten kompensiert oder mit Hilfe einer elektronischen Waage gemessen. Diese Kraft dividiert durch die wirksame Querschnittsfläche des Kolben-Zylinder-Systems ergibt den Messdruck. Mit den kommerziellen Kolbenmanometern können Drücke in Gasen von etwa 30 Pa bis 100 MPa und in Flüssigkeiten bis 1,4 GPa gemessen werden (Bild 1). Kolbenmanometer eignen sich für die Messung von Absolut-, Über- und Differenzdrücken. Die kleinsten relativen Unsicherheiten der mit Kolbenmanometern gemessenen Drücke liegen zwischen 10^{-6} und 10^{-5} .

Bei den Druckwaagen mit Sperrflüssigkeiten, deren wichtigste Bauart das Tauchglockenmanometer ist, hat die Sperrflüssigkeit die Aufgabe, die Druckräume voneinander zu trennen. Der Messdruck wirkt auf eine definierte Fläche, z. B. die Fläche des inneren Querschnitts der in die Sperrflüssigkeit eingetauchten Glocke, und wird mit einer Gewichtskraft kompensiert oder mit Hilfe eines Dynamometers gemessen. Die Dichte der Sperrflüssigkeit hat keinen Einfluss auf das Messergebnis. Wegen des großen Querschnitts sind Tauchglockenmanometer besonders zur präzisen Messung kleiner Überdrücke im Bereich $[-4; +4]$ kPa geeignet. Die kleinste erreichbare Messunsicherheit liegt bei $0,02 \text{ Pa} + 10^{-5} p_e$.

Unter mittelbaren Druckmessgeräten versteht man Druckmesser, die die Wirkung eines Drucks auf speziell geformte Körper oder auf Stoffe zur Bestimmung des Drucks ausnutzen. Solche Wirkungen sind z. B. die elastische Formänderung von Hohlkörpern oder Platten in federelastischen Manometern, die wegen ihrer einfachen Bedienbarkeit, Robustheit und kostengünstigen Herstellung zu den wichtigsten

Druckmessern bei vielen industriellen Prozessen gehören. Die elastische Verformung des Messorgans wird mit Hilfe eines Zeigerwerks in einen Drehwinkel eines Zeigers umgewandelt, so dass der Messdruck auf einer entsprechend eingeteilten Skala direkt abgelesen werden kann. In vielen Fällen wird die Zeigerbewegung in ein elektrisches oder pneumatisches, analoges oder digitales Signal umgewandelt, so dass der Druckmesser zur automatischen Druckerfassung oder einer Prozesssteuerung benutzt werden kann. Die kleinste relative Messunsicherheit von federelastischen Manometern hat eine Größenordnung von 10^{-3} .

In der elektrischen Druckmesstechnik wird der Druck in eine elektrisch messbare Größe umgewandelt. So wird z. B. die durch den Druck hervorgerufene elastische Verformung eines Hohlkörpers mit Hilfe von darauf applizierten Dehnungsmessstreifen (DMS) als die Änderung ihres elektrischen Widerstands erfasst. Unter Verwendung unterschiedlicher DMS und Druckkörpergeometrien lassen sich Drucksensoren für den Druckbereich von ca. 100 kPa bis 1,5 GPa bauen. Bei kapazitiven Drucksensoren führt die Auslenkung einer vom Druck beanspruchten Membran, die als eine der Kondensatorplatten dient, zu einer zu messenden Kapazitätsänderung. Solche Drucksensoren sind besonders zur Messung von kleinen Drücken oder Druckdifferenzen von 1 Pa bis 5 MPa gut geeignet. Bei piezoelektrischen Sensoren wird der Druck mittels einer Membran in eine mechanische Kraft umgesetzt und auf piezoelektrische Kristalle übertragen. Die entstehende elektrische Oberflächenladung ist proportional zu der Belastung und führt zu einer messbaren elektrischen Spannung. Da die Ladungen über die endlichen Isolationswiderstände abfließen, eignen sich piezoelektrische Sensoren hauptsächlich für die Messung von dynamischen Drücken. Eine andere wichtige Klasse von Drucksensoren beruht auf der Änderung der Resonanzfrequenz von schwingenden Körpern, z. B. von Quarzkristallen, wenn diese vom Druck belastet werden. Diese Frequenzänderung kann mit einem Frequenzzähler sehr genau gemessen werden. Die Resonanzfrequenz-Drucksensoren werden im Druckbereich von 1 kPa bis 300 MPa eingesetzt und zeichnen sich durch eine sehr gute Stabilität und Auflösung von 10^{-6} bis 10^{-5} aus. Bei Höchstdruckmessungen oberhalb der technischen Druckskala, $p > 1,5 \text{ GPa}$, werden Widerstands- und optische Manometer eingesetzt [1, 4]. Bei den ersten misst man die Widerstandsänderung eines aus Speziallegierungen, z. B. Manganin, bestehenden und auf eine Spule aufgewickelten Drahtes, wenn dieser vom Druck hydrostatisch beansprucht wird. Das optische Druckmessverfahren wird z. B. im Rubinsensor verwendet, in dem eine durch die Druckbelas-

tung hervorgerufene Verschiebung der Fluoreszenzlinien von Rubin gemessen wird. Mit Rubinsensoren können Drücke von über 100 GPa gemessen werden.

5 Rückführung auf die SI-Einheiten

Die Rückführung der Druckeinheit auf die SI-Basiseinheiten das Kilogramm, das Meter und die Sekunde wird mit Hilfe von primären Flüssigkeits- und Kolbenmanometern unter Verwendung der Beziehungen (1) und (2) realisiert (Bild 2) [4, 5].

In den Flüssigkeitsmanometern wird in der Regel Quecksilber wegen der Stabilität seiner Dichte als Flüssigkeit verwendet [6]. Die lokale Fallbeschleunigung lässt sich genauer als auf $5 \cdot 10^{-7}g$ bestimmen. Die kombinierte Unsicherheit des Drucks hängt im Wesentlichen von der Unsicherheit der Säulenhöhe und der mittleren Dichte des Quecksilbers ab. Letztere wird stark von der Temperaturverteilung entlang der Säule beeinflusst. Bei der Messung der Säulenhöhe werden die optische Interferometrie, die kapazitive Erfassung der Menisken und die Ultraschall-Laufzeit Methoden eingesetzt. Die kleinsten relativen Messunsicherheiten von einigen 10^{-6} erreicht man in der Nähe des Atmosphärendrucks. Bei höheren Drücken wird die Genauigkeit der Druckmessung immer stärker von der Temperaturinhomogenität entlang der Quecksilbersäule beeinträchtigt. Bei kleineren Drücken, d.h. kleineren Säulen, verringert sich die Genauigkeit der Druckmessung infolge der erhöhten relativen Unsicherheit der Säulenhöhenmessung.

Bei Primärkolbenmanometern geschieht die Rückführung auf die SI-Basiseinheiten durch die Bestimmung der lokalen Fallbeschleunigung, der Masse des Kolbens mit den Gewichten und der wirksamen Querschnittsfläche (A_0) des Kolben-Zylinder-Systems. Die ersten zwei Größen tragen lediglich zwischen 10^{-7} und 10^{-6} zur relativen Messunsicherheit des Drucks bei. Die wirksame Querschnittsfläche ist entscheidend für die Genauigkeit der Druckmessung und wird aus dimensionellen Eigenschaften des Kolbens und der Zylinderbohrung bestimmt [7]. Dazu werden Durchmesser an mehreren Stellen, sowie Rundheits- und Geradheitsabweichungen entlang der Kreis- und Mantellinien sowohl am Kolben als auch an der Zylinderbohrung gemessen. Durch eine Verknüpfung der Rundheits- und Geradheitsdaten mit den Durchmessern werden 3-dimensionelle Datensätze für den Kolben und den Zylinder erzeugt [8]. Mit dieser dimensionellen Information wird die Strömung im Kolben-Zylinder-Spalt modelliert und die auf den Kolben wirkende Kraft als Funktion des Drucks unter dem Kolben berechnet. Das Verhältnis dieser Kraft zum Druck ergibt die wirksame Querschnittsfläche. Mit den modernsten

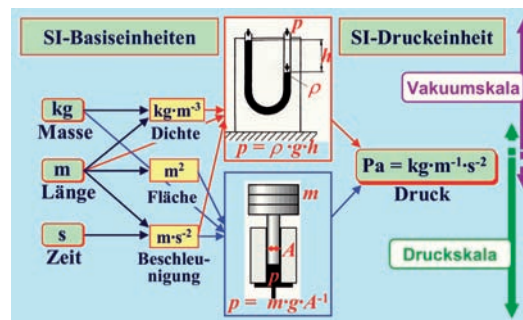


Bild 2: Rückführung der Druckeinheit auf die SI-Basiseinheiten mit Hilfe von Flüssigkeits- und Kolbenmanometern.



Bild 3. Kolben-Zylinder-System mit der nominellen Querschnittsfläche 10 cm² zur primären Darstellung der Druckskala in Gasen im Bereich von 50 kPa bis 1 MPa.

Geräten zur dimensionellen Vermessung können die Radien von Kolben und Zylindern mit der Unsicherheit von 30 nm bis 40 nm bestimmt werden. Bei den nominellen Kolben-Zylinder-Querschnittsflächen von 5 cm² bis 20 cm², die mit heutigen Technologien herstellbar sind (Bild 3), erreicht man für die wirksame Querschnittsfläche relative Unsicherheiten von $(4 \text{ bis } 6) \cdot 10^{-6}$.

Dementsprechend kleine Unsicherheiten des Drucks lassen sich mit primären Kolben-Zylinder-Systemen im Bereich von etwa 100 kPa bis 2 MPa erreichen. Die Erweiterung der Druckskala nach unten wird mit Hilfe von kraftkompensierten nicht rotierenden Kolbenmanometern, kapazitiven Membranvakuummern, statischen und kontinuierlichen Expansionsverfahren realisiert [3]. Die Erweiterung der Druckskala nach oben wird durch den Einsatz von Kolben-Zylinder-Systemen mit kleineren A_0 erreicht. Da die relative Unsicherheit der dimensionellen Charakterisierung mit dem abnehmenden Querschnitt zunimmt, wird A_0 von kleineren, für höhere Drücke bestimmten Kolben-Zylinder-Systemen nicht mehr dimensionell, sondern aus Druckvergleichsmessungen gegen größere Systeme bestimmt. Mit dem steigenden Druck nimmt die relative Unsicherheit etwa proportional dem Druck zu, weil sich die wirksame Querschnittsfläche des Kolben-Zylinder-Systems wegen der vom Druck hervorgerufenen elastischen Verformung ändert. In der ersten Näherung kann die druckabhängige Querschnittsfläche (A_p) mit der Gleichung beschrieben werden:

$$A_p = A_0(1 + \lambda p), \tag{3}$$

wo λ der Druckverformungskoeffizient des Kolben-Zylinder-Systems ist. Bei den frei verformbaren Hochdrucksystemen aus Wolframcarbid liegt λ zwischen $7 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ und $8 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ und wird bei Drücken oberhalb 50 MPa zur wichtigsten Unsicherheitsquelle. Zu ihrer genaueren Bestimmung werden die elastischen Konstanten der Werkstoffe der Kolben-Zylinder-Systeme gemessen, deren elastische Verformung dann mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode berechnet wird [9]. Bild 4 zeigt das PTB-Normaldoppelkolbenmanometer, mit dem die Druckskala in Flüssigkeiten im Bereich 0,5 MPa bis 1 GPa dargestellt wird.



Bild 4.
Normal-Kolbenmanometer zur Darstellung der Druckskala in Flüssigkeiten im Bereich von 0,5 MPa bis 1 GPa.

Dieses Kolbenmanometer ist mit einer Gesamtmasse von 500 kg ausgestattet und erlaubt es, mit Hilfe von dimensionell vermessenen 5 cm^2 – Kolbenzylindersystemen die Drücke zwischen 0,5 MPa und 10 MPa direkt auf die SI-Basiseinheiten zurückzuführen [10]. Durch den Einbau von Kolben-Zylinder-Systemen mit den nominellen Querschnittsflächen von 84 mm^2 , 30 mm^2 , $8,4 \text{ mm}^2$ und 5 mm^2 wird die Druckskala bis zum maximalen Druck von 1 GPa erweitert [11], der mit einer relativen Unsicherheit von $1,3 \cdot 10^{-4}$ gemessen werden kann. Im Bereich von 1 GPa bis zum maximalen in der PTB messbaren Druck von 1,4 GPa wird die Druckskala mit einem Manganin-Widerstandsmanometer realisiert, dessen Eigenschaften aus der Kalibrierung mit dem 1 GPa Kolbenmanometer bestimmt werden. Diese Art der Extrapolation führt zu deutlich höheren relativen Unsicherheiten von bis zu $4 \cdot 10^{-3}$ für Drücke $p > 1 \text{ GPa}$.

6 Ausblick

Bei der überwiegenden Zahl der Anwendungen reichen die von der PTB angebotenen und international anerkannten Druck-Messmöglichkeiten [12] völlig aus. Zwei neue, in den letzten Jahren an die Druckmetrologie gestellten Herausforderungen sind die Erweiterung des Messbereiches bis 1,6 GPa, in dem neu entwickelte und von der Industrie benötigte Präzisions-Druckaufnehmer kalibriert werden sollen, und die Verringerung der relativen Standardunsicherheit der Absolutdruckmessung im Bereich 1 MPa bis 7 MPa auf $1 \cdot 10^{-6}$, die für eine Neubestimmung der Boltzmann-Konstante und eine neue thermodynamische Definition der Temperatureinheit Kelvin erforderlich ist [13]. Zur Lösung beider Aufgaben müssen neue Drucknormale entwickelt werden, die nach dem Prinzip eines Kolbenmanometers funktionieren werden [14].

Literatur

- [1] Decker D.L., Bassett W.A., Merrill L., Hall H.T., Barnett J.D.: J. Phys. Chem. Ref. Data, 1 (1972), S. 773–836
- [2] ISO 1000-1973, DIN 1301, www.bipm.org
- [3] Jousten K.: PTB-Mitteilungen 118 (2008), Heft 3, S. 175–178
- [4] High Pressure Measurement Techniques, ed. by G.N. Peggs, London, N.Y., Applied Science Publishers, 1983
- [5] Pavese F., Molinar G.: Modern gas-based temperature and pressure measurements, N.Y., Plenum Press, 1992
- [6] Tilford C.R.: Metrologia 30 (1993/94), S. 545–552
- [7] Dadson R.S., Lewis S.L., Peggs G.N.: The pressure balance: theory and practice, London, HMSO, 1982
- [8] Jusko O., Bosse H., Lüdicke F.: High precision 3D-calibration of cylindrical standards, in: Advanced Mathematical Tools in Metrology III (ed. by P. Ciarlina, M.G. Cox, F. Pavese and D. Richter), Singapore, World Scientific Publishing Company, 1997, S. 186–194
- [9] Sabuga W., Molinar G., Buonanno G., Esward T., Legras J.C., Yagmur L.: Metrologia 43 (2006), S. 311–325
- [10] Jäger J., Sabuga W., Wassmann D.: Metrologia 36 (1999), S. 541–544
- [11] Jäger J., Schoppa G., Schultz W.: The standard instruments of the PTB for the 1 GPa range of pressure measurement, PTB-Report W-66, Braunschweig, October 1996
- [12] kcdb.bipm.org/AppendixC/search.asp?met=M&reset=1
- [13] Fellmuth B., Gaiser Ch., Fischer J.: Meas. Sci. Technol. 17 (2006), S. 145–159
- [14] Sabuga W.: MAPAN – J. Metrol. Soc. India, 22 (2007), S. 3–11.

Das Maß des „Nichts“: Die Messung des Vakuums

Karl Jousten*

1 Einleitung

Unter Vakuum wird häufig ein Raum ohne jegliche Materieteilchen verstanden. Dies nennt man genauer das ideale oder absolute Vakuum (Bild 1). Obwohl es in unserem Universum einen gänzlich leeren Raum nicht geben kann [1], – Energie ist überall präsent und Energie enthaltende Leere entsteht nur aus dem Gleichgewicht von Materie und Antimaterie –, gäbe es beim idealen Vakuum wirklich nicht viel für Metrologen zu messen. Anders sieht es bei dem für technische Zwecke definierten Vakuumbegriff aus (DIN 28400): Vakuum ist der Zustand eines Gases, wenn dessen Druck niedriger als der kleinste, auf der Erdoberfläche vorkommende Druck von 300 hPa ist. Die zu messende Skala reicht von diesem Druck herunter bis 10^{-12} Pa.

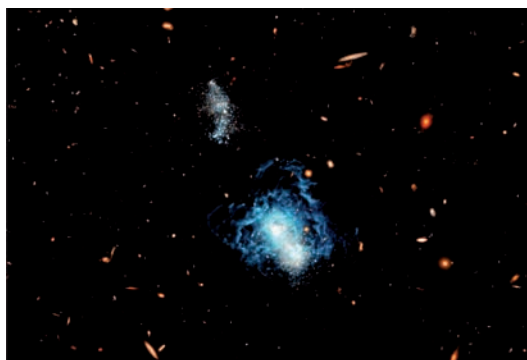


Bild 1:
Zwischen den Galaxien gibt es makroskopische Räume im cm^3 Bereich, die teilchenfrei sind (ideales Vakuum).
Foto StScI-PrC07-35a NASA/ESA/Hubble Space Telescope.

Wirtschaftliche Bedeutung hat das Vakuum zum ersten Mal bei der Herstellung der ersten Glühlampen 1879 durch Edison erlangt (Bild 2). Der Sauerstoff der Atmosphäre hätte die Glühfäden nach kurzer Brenndauer zerstört. Viele Anwendungsbereiche sind seitdem zur Beleuchtungsindustrie dazugekommen: Die Mikroelektronikindustrie ist dabei an erster Stelle zu nennen, weil sie etwa 40 % der weltweit für

das Vakuum hergestellten Produkte einkauft. Die Beschichtungsindustrie ist ein weiterer bedeutender Zweig. Hierbei handelt es sich um härtende Beschichtungen (z. B. Werkzeuge, Lager), funktionelle Beschichtungen (CD, DVD, Magnetspeicher, Brillen, Linsen, Architekturglas, PET-Flaschen, Folienmetallisierung, Textilien) oder auch dekorative Beschichtungen. Weitere wichtige Beispiele der Anwendungen von Vakuumtechnik sind die Automobilindustrie (Lecktest von Felgen und Motoren, Befüllen von Brems- und Klimaanlage), die Metallurgie, die chemische und pharmazeutische Industrie, die Elektroindustrie (Senderöhren) und die Raumfahrtindustrie.

Auch in der physikalischen Forschung wird fast überall eine definierte Vakuumumgebung benötigt.

* Dr. Karl Jousten, Leiter der Arbeitsgruppe „Vakuummetrologie“,
E-Mail: karl.jousten@ptb.de

Tabelle 1:
Die einzelnen Druckbereiche des Vakuums. Der bisher kleinste, im Labor bei Zimmertemperatur erzeugte Druck beträgt 10^{-12} Pa.

	Druck in Pa	Teilchendichte in cm^{-3}	mittlere freie Weglänge in m
Großvakuum	$100 \dots 10^5$	$10^{16} \dots 10^{19}$	$10^{-4} \dots 10^{-7}$
Feinvakuum	$0,1 \dots 100$	$10^{13} \dots 10^{16}$	$10^{-1} \dots 10^{-4}$
Hochvakuum	$10^{-5} \dots 0,1$	$10^9 \dots 10^{13}$	$10^{-1} \dots 10^3$
Ultrahochvakuum	$< 10^{-5}$	$< 10^9$	$> 10^3$

Im 20. Jahrhundert, besonders in dessen zweiten Hälfte, entwickelte sich aufgrund dieses Bedarfs eine starke Vakuumindustrie, welche die nötigen Vakuumpumpen, Kammern, aktive und passive Komponenten, und die zugehörige Messtechnik liefert. Dabei benötigen die einzelnen Vakuumbereiche (Tab. 1), welche 17 Größenordnungen des Drucks umfassen, recht unterschiedliche Techniken. Auch die Vakuummesstechnik benötigt viele verschiedene Messprinzipien, um diesen großen Messbereich überdecken zu können.

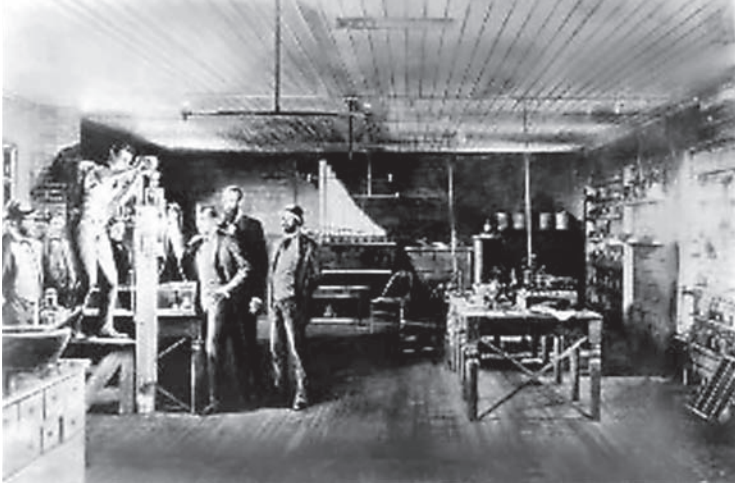


Bild 2:
Mit Edisons Glühlampenproduktion in Menlo Park begann 1879 die wirtschaftliche Bedeutung der Vakuumindustrie. Der erhöhte stehende Mann gießt Quecksilber in eine Sprengpumpe zum Evakuieren der Glühlampe.

2 Vakuummessung

Die Skala der Druckmessung im Vakuum baut auf der Definitionsgleichung des Drucks p als die Normalkraft F pro Fläche A auf:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Vakuummessgeräte, die direkt oder indirekt eine Kraft messen, lassen sich kostengünstig mit einem Messbereich bis herunter zu etwa 100 Pa bauen. Das Prinzip der Aneroidmanometer beruht auf der Durchbiegung einer Membran, die eine evakuierte Metallkapsel abschließt. Die Membran wird durch den einwirkenden äußeren Druck eingedrückt und die Eindrückung auf einen Zeiger übertragen [2]. Auch Geräte, die die Durchbiegung einer Membran piezoresistiv oder mit einem Piezokristall messen, sind üblich und kostengünstig.

Will man auch unter 100 Pa über die mechanische Kraftwirkung des Drucks genau messen, müssen empfindliche elektrische Methoden zu Hilfe genommen werden. Bei der kapazitiven Messung ist die sich unter einem Differenzdruck durchbiegende Membran als eine Elektrode eines Kondensators ausgebildet, welcher wiederum Teil eines Schwingkreises ist [3]. Mit dieser Messmethode lassen sich Durchbiegungen einer Membran bis herunter zu 0,5 nm messen. Die Auflösung dieser Geräte liegt bei 10^{-4} Pa. Damit ist aber auch das Ende der Vakuummessung über eine Druckmessung erreicht.

Unter 100 Pa ist es wesentlich kostengünstiger, die Wärmeleitung eines Gases von einem geheizten Element zu messen. Die Wärmeleitung ist im Feinvakuum und darunter der Gasdichte linear proportional. Im Hochvakuum dominieren allerdings Strahlungseffekte, so dass die untere Messgrenze bei etwa 0,1 Pa liegt.

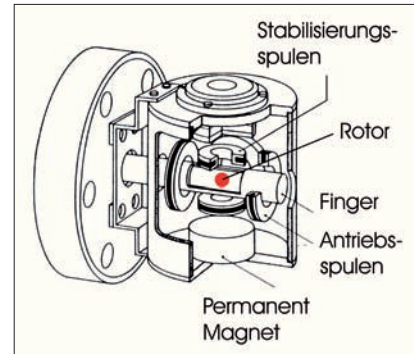


Bild 3:
Schemazeichnung eines Gasreibungsvakuummeters. Die Frequenzabnahme einer magnetisch aufgehängten rotierenden Kugel (rot) wird gemessen.

Das bei Kalibrierlaboratorien wegen seiner Stabilität sehr beliebte Gasreibungsvakuummeter (Bild 3) misst die Frequenzabnahme der Rotation einer im Vakuum magnetisch aufgehängten Kugel [4]. Sie wird durch den Impulsübertrag auf die Gasteilchen abgebremst.

Im Hoch- und Ultrahochvakuum ist die Druckeinheit eigentlich keine sinnvolle Messgröße mehr. Die Gasteilchen haben eine so große mittlere freie Weglänge, dass sie nicht mehr untereinander stoßen, sondern nur noch von Wand zu Wand des Vakuumsystems fliegen. Auch die Kraftwirkung eines Drucks ist nicht mehr messbar. Eine sinnvollere Messgröße ist die Gasdichte. Um die Skala nicht zu wechseln, wird die Gasdichte gemessen und mit Hilfe des idealen Gasgesetzes in eine Druckgröße umgerechnet.

Die Gasdichte wird durch Ionisierung der Gasteilchen gemessen. Der gemessene Ionenstrom ist proportional der Gasdichte und damit dem Druck. Die Ionisierung erfolgt entweder in einer Entladung (Penning-, Magnetron-Vakuummeter) oder durch schnelle Elektronen (Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter).

Für weitere Vakuummessgeräte und mehr Details sei auf die weiterführende Literatur verwiesen [2].

3 Kalibrierung von Vakuummessgeräten

Bei keinem Vakuummessgerät ist es möglich, aus dem Messsignal den Druck über eine physikalische Gleichung mit hinreichender Genauigkeit zu gewinnen. Entweder sind die physikalischen Vorgänge im Detail nicht bestimmbar oder die Parameter sind nicht hinreichend bekannt. Das Gasreibungsvakuummeter kommt einer absoluten physikalischen Druckbestimmung am nächsten. Bei diesem muss lediglich der effektive Akkommodationskoeffizient der Gasteilchen auf der Kugeloberfläche durch Kalibrierung bestimmt werden. Die Anzeigen aller Vakuummessgeräte müssen vom Hersteller individuell kalibriert, teilweise auch linearisiert werden.

Über die Kalibrierhierarchie muss somit bei allen Vakuummessgeräten die Rückführung auf die abgeleitete SI Einheit des Drucks gewährleistet sein.

4 Rückführung auf die SI-Einheiten

Die Druckskala im Vakuum wird über die Definitionsgleichung (1) und die Verwendung eines Quecksilbermanometers oder eines Kolbenmanometers auf die SI Einheiten der Masse, Länge und Zeit rückgeführt [5]. Bild 4 zeigt, wie die Skala der Vakuumdrücke zu kleineren Drücken in der PTB fortgesetzt wird. Mittels der Primärnormale des statischen und kontinuierlichen Expansionsverfahrens wird die Skala bis herunter zu 10^{-9} Pa dargestellt.

5 Primärnormale für das Vakuum

Im statischen Expansionsverfahren wird das Boyle-Mariottesche Gesetz angewendet: Das Produkt aus Druck und Volumen ist bei konstanter Temperatur für eine eingeschlossene Gasmenge konstant. Das heißt, schließt man Gas unter relativ hohen Druck in einem kleinen Volumen ein und expandiert es anschließend in ein wesentlich größeres, vorher evakuiertes Volumen, so wird sich der Druck entsprechend dem Volumenverhältnis verringern. Im allgemeinen Fall ist es nicht möglich, exakt gleiche Temperaturbedingungen bei den zwei Volumina und der Verbindungsleitung zwischen ihnen zu schaffen, so dass man anstatt des Boyle-Mariotteschen Gesetzes das ideale Gasgesetz anwendet. Bezeichnen p_1, V_1 und T_1 Druck, Volumen und Temperatur vor der Expansion, p_2 den Druck danach und V_2 das Volumen, in das hinein expandiert wird, einschließlich der Verbindungsleitungen, so gilt

$$p_2 = p_1 \frac{V_1 T_2}{V_1 + V_2 T_1} \quad (2)$$

Das sogenannte Expansionsverhältnis $V_1/(V_1+V_2)$ ist die entscheidende Kenngröße eines Expansionssystems und muss mit größtmöglicher Genauigkeit bestimmt werden [6], [7]. Ein Teil des auf den Druck p_2 expandierten Gases kann wiederum als Ausgangspunkt für eine weitere Expansion dienen. Mit solchen mehrfach hintereinander ausgeführten Expansionen können Drücke bis herunter zu etwa 10^{-2} Pa dargestellt werden, in Spezialfällen auch bis zu 10^{-6} Pa.

Die Ausgasung von den Vakuumwänden und die Adsorption des Kalibriergases begrenzen die Anwendbarkeit des Verfahrens zu niedrigen Drücken.

Daher wird bei kleineren Drücken das kontinuierliche Expansionsverfahren angewandt: Das Kalibriergas wird kontinuierlich durch zwei stark verschieden große Blenden (Leitwerte $C_1 \ll C_2$) in eine Vakuumpumpe gepumpt. Gibt es

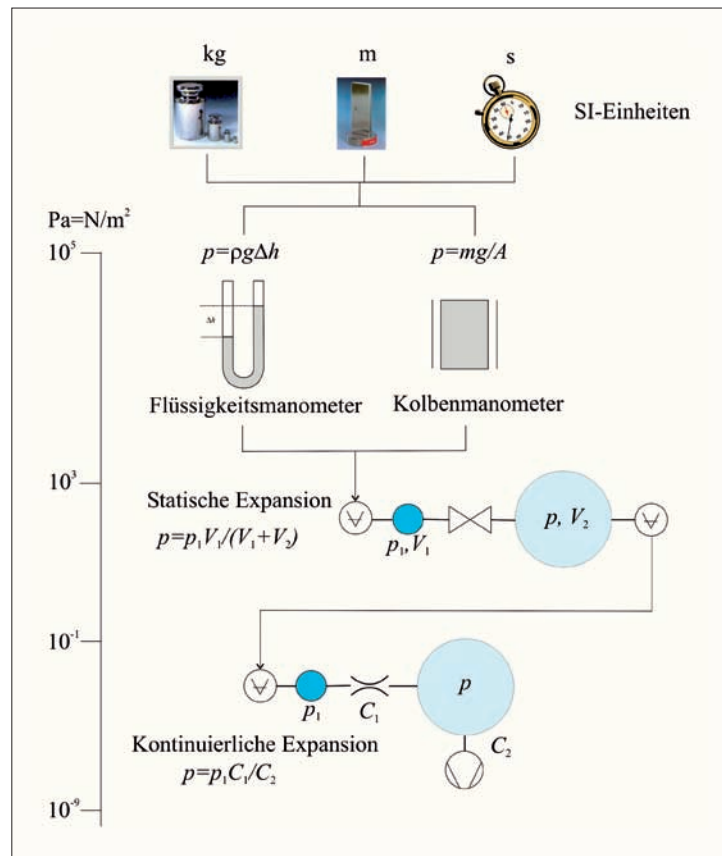


Bild 4: Überblick über die Rückführung der Druckeinheit im Vakuumbereich auf die SI Einheiten.

zwischen den Blenden keine Quelle oder Senke des Gases, so gilt die Kontinuumsgleichung, d. h. der pV -Durchfluss muss bei beiden Blenden gleich sein. Bezeichnet p_1 den Druck vor der ersten Blende, p_2 den Druck zwischen den Blenden und p_3 den Druck nach der zweiten Blende, so gilt unter isothermen Bedingungen

$$(p_1 - p_2)C_1 = (p_2 - p_3)C_2 \quad (3)$$

Da p_2 gegen p_1 sehr klein ist, ebenfalls p_3 gegen p_2 gilt in guter Näherung

$$p_2 = p_1 \frac{C_1}{C_2} \quad (4)$$

Während also beim statischen Expansionsverfahren zwei in ihrer Größe stark unterschiedliche Volumina benutzt werden, findet die Druckerniedrigung beim kontinuierlichen Expansionsverfahren durch zwei verschieden große Blenden statt. Der Anfangsdruck p_1 wird gemäß dem Blendenverhältnis zum Druck p_2 untersetzt. Dieser Druck p_2 ist der gewünschte Kalibrierdruck.

In einem Primärnormal nach dem kontinuierlichen Expansionsverfahren wird die Blende C_1 sehr klein (PTB: 10^{-6} l/s) gegenüber C_2 (100 l/s) gewählt, so dass die Druckuntersetzung entsprechend groß ist.

Der Vorratsbehälter für p_1 sowie die Blende des druckabhängigen Leitwerts C_1 werden in einem so genannten Gasdosiersystem zusammengefasst. Dieses produziert einen Gasfluss, dessen Wert durch die Messung von p_1 , C_1 und der Temperatur bekannt ist.

Die untere Messgrenze ist durch den kleinsten Druck p_1 bestimmt, bei dem der Leitwert C_1 noch mit hinreichender Genauigkeit gemessen werden kann. Dies ist bei etwa 10 Pa der Fall, so dass $p_2 = 10^{-7}$ Pa die untere Messgrenze ist.

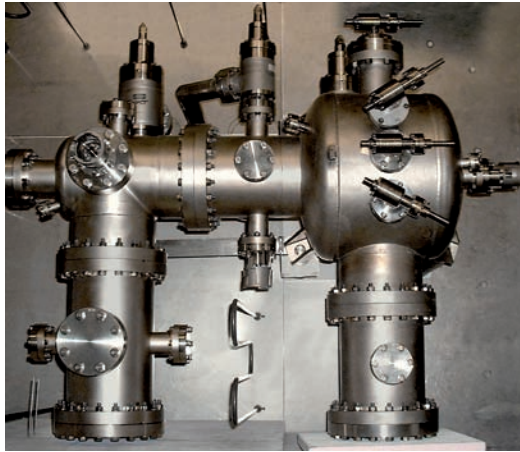


Bild 5:
Das Primärnormal CE3 der PTB nach dem kontinuierlichen Expansionsverfahren, welches weltweit die kleinsten Drücke bis 10^{-9} Pa darstellen kann.

In der PTB wurde diese durch die Verwendung eines Flusstellers [8] um einen Faktor 100 erniedrigt (Kammer mittig in Bild 5). Der Flussteller ist eine Kammer mit zwei sich um einen Faktor 100 im Leitwert unterscheidenden Blenden. Das in diese Kammer vom Gasdosiersystem einströmende Gas wird über die Blenden in zwei verschiedene Kalibrierkammern geleitet. Die sich hinter der kleineren Blende befindende Kammer erreicht einen Kalibrierdruck bis herunter zu 10^{-9} Pa.

Die Unsicherheiten der dargestellten Drücke liegen beim statischen Expansionsverfahren zwischen 0,1 % und 0,3 %, beim kontinuierlichen Expansionsverfahren zwischen 0,4 % und 2 %.

Die Druckweitergabe an Kalibrierlaboratorien erfolgt durch die Kalibrierung transportabler Vakuummessgeräte höchster Genauigkeit (Sekundärnormale).

6 Sekundärnormale für das Vakuum

Moderne Druckwaagen, welche die durch den Druck auf einen nicht rotierenden Kolben ausgeübte Kraft durch einen Kraftmesser (Waage) messen, sind bis herunter zu 10 Pa als Sekundärnormal, u. U. sogar als Primärnormal zu verwenden.

Sie sind jedoch recht groß und teuer, und statt dessen werden im Bereich von 0,1 Pa bis 100 kPa kapazitive Membranvakuummeter verwendet. Oberhalb 1 kPa können auch hochwertige Quartz-Bourdon-Spiralen und Schwingquartz-Manometer verwendet werden [2].

Von 0,1 Pa bis 10^{-4} Pa wird das Gasreinigungsvakuummeter als Sekundärnormal eingesetzt, bei noch kleineren Drücken Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter.

7 Herausforderungen für die Zukunft

Die Vakuumtechnik einschließlich der Vakuummesstechnik hat einen hohen Reifegrad erreicht, der viele Anwender zufrieden stellt. Dennoch gibt es kritische Punkte: Viele vakuumtechnischen Vorgänge in der Industrie laufen aus wirtschaftlichen Gründen extrem schnell ab. Die Zykluszeit einer CD-Metallisierung, d. h. das Evakuieren, Beschichten und wieder Belüften, beträgt, je nach Metallisierer, zwischen 1,5 s und 2,5 s. In einer Zeit von weniger als 0,7 s ändert sich der Druck um einen Faktor 10^4 . Inwieweit die Vakuummessgeräte dieser Dynamik folgen können, wurde bisher nur geschätzt, ob ihre Kalibrierung bei solcher Dynamik noch richtig ist, nie untersucht. Optische Methoden könnten hier in Zukunft eine Rolle spielen.

Diese könnten auch bei der Partialdruckmessung und deren Rückführung eine wichtige Rolle spielen. Oft ist die Gasreinheit und dessen Zusammensetzung eines Prozessgases von ebenso großer Bedeutung wie der Totaldruck. Die zur Zeit verwendeten Quadrupolmassenspektrometer zur Bestimmung des Partialdrucks haben hinsichtlich ihrer Kalibrierfähigkeit erhebliche Defizite [9]. Optische Methoden versprechen hier eine gute Perspektive [10, 11] und müssen noch erforscht werden.

Literatur

- [1] Genz, H.: Nichts als das Nichts – Die Physik des Vakuums, Wiley-VCH, 2004, 266 S., ISBN 3-527-40319-1
- [2] Jousten, K. (Hrsg.): Wutz – Handbuch Vakuumtechnik, 9. Auflage, Vieweg 2006, ISBN 3-8348-0133-X
- [3] Sullivan, J. J.: J. Vac. Sci. Technol. **A 3** (1985), 1721–1730
- [4] Fremerey, J.K.: Vacuum **32** (1982), S. 685–690
- [5] Sabuga, W.: PTB-Mitt. 118 (2008) S. 170–174
- [6] Jitschin, W., Migwi, J.K., und Grosse, G.: Vacuum **40** (1990), S. 293–304
- [7] Jousten, K., Aranda Contreras, V., and Röhl, P.: Vacuum **52** (1999), S. 491–499
- [8] Jousten, K., Menzer, H., Wandrey, D., Niepraschk, R.: Metrologia **36** (1999), S. 493–497
- [9] Lieszkovsky, L., Filipelli, A. R. and Tilford, C. R.: J. Vac. Sci. Technol. **A 8** (1990), S. 3838
- [10] Lanzinger, E., Jousten, K., Kühne, M.: Vacuum **51** (1998), S. 47–51
- [11] Padilla-Viquez, G., Koelliker-Delgado, J., Werhahn, O., Jousten, K., and Schiel, D.: Proceedings CPEM 2006, IEEE transactions on instrumentation and measurement, **56** (2) (2007), S. 529–533