

# Mehrkomponentenmesseinrichtung für Kräfte bis 1 MN und Drehmoment bis 2 kN·m – Funktionsprinzip und Messunsicherheitsbudget

Sebastian Baumgarten<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Abt. 1.2, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig  
E-Mail: [sebastian.baumgarten@ptb.de](mailto:sebastian.baumgarten@ptb.de)

## Zusammenfassung

Im Folgenden wird die Fertigstellung und das Messunsicherheitsbudget einer Mehrkomponentenmesseinrichtung vorgestellt. Die Messeinrichtung ist Teil der 1-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung (1-MN-K-NME) [1]. Mit der Zusatzeinrichtung (ZE) ist es möglich, zur dargestellten Kraft im Messbereich von 20 kN bis 1 MN ein Drehmoment im Bereich von 20 N·m bis 2 kN·m zu erzeugen. Somit können Messsysteme untersucht und charakterisiert werden, welche kombinierte Belastungen mit Axialkräften  $F_z$  und Drehmomenten  $M_z$  voraussetzen, zum Beispiel Reibwertmessköpfe aus der Schraubenindustrie. Die erweiterte relative Messunsicherheit von  $F_z$  liegt bei  $2 \cdot 10^{-5}$ . Die Zielvorgabe für die Messunsicherheit ( $k = 2$ ) von  $M_z$  ist  $< 0,02 \%$ . Das Modell liefert eine Messunsicherheit von  $5,9 \cdot 10^{-5}$ . Durch praktische Vergleichsmessungen wird die Messunsicherheit bisher aber mit  $< 3,5 \cdot 10^{-4}$  abgeschätzt.

**Keywords:** Mehrkomponenten, Kraft, Drehmoment, Direktbelastung, Messunsicherheitsbudget

## 1 Einleitung

Anwendungen mit der Messung von mehr als einer Komponente der vektoriellen physikalischen Größen Kraft oder Drehmoment sind in den letzten Jahren in den Vordergrund getreten. Es gibt daher einen hohen Bedarf für Rückführungen im Bereich der Mehrkomponentenkraft- und Momentenmesstechnik. Realisierungen von diesbezüglichen Messeinrichtungen mit hinreichender kleiner Messunsicherheit und passendem Messbereich sind komplex und selten. Beispiele sind die Hexapode der PTB [2] und die Messeinrichtung am IMGIC [3]. Um den Mangel abzuheben, ist es sinnvoll, die vorhandene Infrastruktur an Messeinrichtungen zu verwenden und diese um eine oder mehrere zusätzliche Kraft- oder Momentenkomponenten zu erweitern. Diese Idee wurde in der PTB verfolgt. In der 1-MN-K-NME der PTB kann über ein Hebel-Band-Masse-System ein zusätzliches Drehmoment erzeugt werden. Durch die Zusatzeinrichtung (ZE) in der 1-MN-K-NME kommt zum Messbereich von 20 kN bis 1 MN Axialkraft noch ein Drehmomentmessbereich von 20 N·m bis 2 kN·m hinzu. Dadurch erweitert sich das Leistungsspektrum der Messeinrichtung. Mehrkomponentensensoren und Reibwertmessköpfe können gezielt hinsichtlich ihres Signalübersprechverhaltens untersucht werden. Das

Messunsicherheitsbudget (MUB) für das Drehmoment  $M_z$  der ZE wird vorgestellt.

## 2 Aufbau

Der Aufbau der Drehmomentzusatzeinrichtung ist modular und kann in den Druckeinbauraum und damit in Kraftfluss der 1-MN-K-NME ein- oder ausgebaut werden. Das Funktionsprinzip basiert auf einem zweiarmigen Hebel an dessen Enden ein Kräftepaar angreift. Die beiden Kräfte sind dabei vom Betrag identisch, parallel und entgegengesetzt gerichtet. Somit neutralisieren sich die Querkräfte und in Summe wird ein wirkendes Drehmoment  $M_z$  realisiert. Ein ähnliches Prinzip findet sich bei einer seinerzeit für das britische NPL entwickelten Normalmesseinrichtung (NME), allerdings ausschließlich für Drehmomentbelastungen [4]. Die Abb. 1 zeigt den Aufbau der ZE der PTB. Zwei symmetrische Belastungsmassestapel (MS),  $MS_1$  (1) und  $MS_2$  (2) dienen zur Erzeugung des Kräftepaars  $F_{x1}$  und  $F_{x2}$ . Die Kräfte werden jeweils über ein Metallband (3) auf den zweiarmigen Hebel (4) übertragen. Das somit erzeugte Drehmoment  $M_z$  überträgt sich anschließend auf ein Adapter-Sensor-System, was auf Grund der Perspektive nicht in Abb. 1 zu erkennen ist. Die Belastungsmassestapel sind symmetrisch aufgebaut, daher werden die technischen Details nur am Beispiel vom  $MS_2$  näher erläutert.

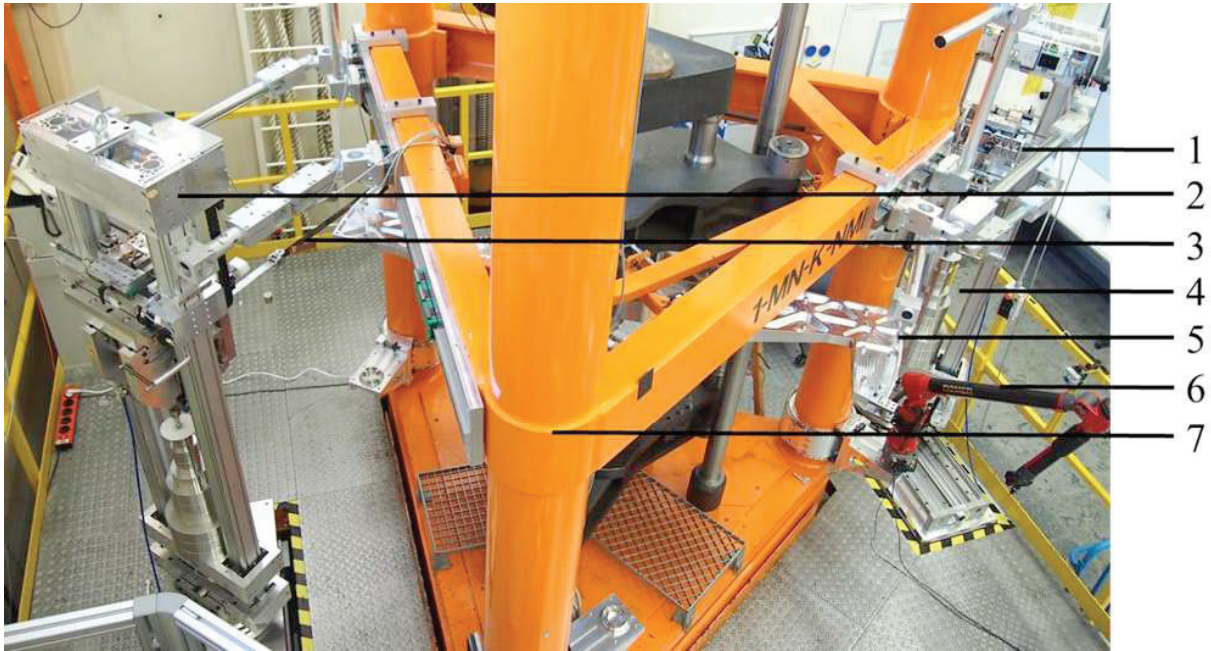


Abb. 1: Mehrkomponentenmesseinrichtung: 1 – Belastungsstapel 1, 2 – Belastungsstapel 2, 3 – Metallband zur Krafteinleitung in den Hebel, 4 – Belastungsmassen, 5 – zweiarmiger Hebel, 6 – Koordinatenmessarm montiert an einer Stützsäule, 7 – 1-MN-K-NME

Die Abb. 2 zeigt den entsprechenden Belastungsmassestapel. Der Rahmen ist auf einem Rotationstisch (7) montiert, welcher wiederum auf einem Lineartisch aufgesetzt ist. Somit kann der komplette MS gedreht und verschoben werden. Dies ist für den Fall einer neuen Ausrichtung notwendig, wie es beim Wechsel von links- auf rechtsgerichtetes Drehmoment notwendig ist. Der MS<sub>2</sub> wird am Lastrahmen der 1-MN-K-NME abgestützt (2). Im unteren Abschnitt befindet sich ein absenkbarer Massesatz (6). Dieser ist an ein Metallband (5) angekoppelt, welches im Luftlagerkopf (4) über einen Rotor umgelenkt wird und abschließend am Hebelarm ankoppelt. Der gesamte Luftlagerkopf kann mittels Schrittmotoren (3) in Höhe, Querposition und Neigung manuell oder automatisch justiert werden. Die dafür notwendige SPS-Steuerung ist im Kopfteil (1) des Belastungsmassestapels eingebaut. Die einzelnen Massescheiben sind aus einem schwer magnetisierbaren Spezialstahl X2CrNiMoN18-14-3 gefertigt und ihr Gewicht ist auf die zu erzeugende Kraft abgeglichen. Der Ablageblock wird über einen Schrittmotor angehoben oder abgesenkt. Durch das Absenken koppeln die Massescheiben beginnend mit der 10 N Masse nacheinander in einem Kettengehänge ein. Entsprechend gibt es zehn definierte Lastzustände und die wirkende Gewichtskraft  $F_g$  ergibt sich als Produkt aus der Summe der eingehängten Massen  $m_m$  mit der lokalen Fallbeschleunigung

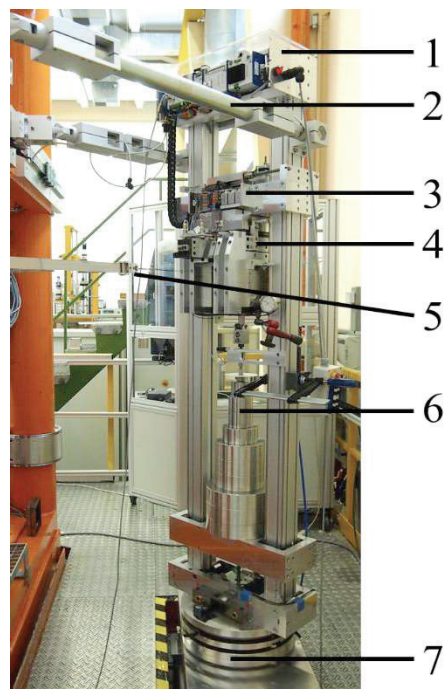


Abb. 2: MS<sub>2</sub>: 1 – SPS-Steuerung, 2 – Abstützelemente, 3 – Motoren für Verschiebung und Neigung, 4 – Luftlagerkopf mit Rotor, 5 – Metallband, 6 – Belastungsmassen, 7 – Rotations- und Lineartisch

$g_{\text{lok}}$  und einem Term für die Luftauftriebskorrektur. Ein Stapel umfasst Belastungsmassen für folgende Gewichtskräfte

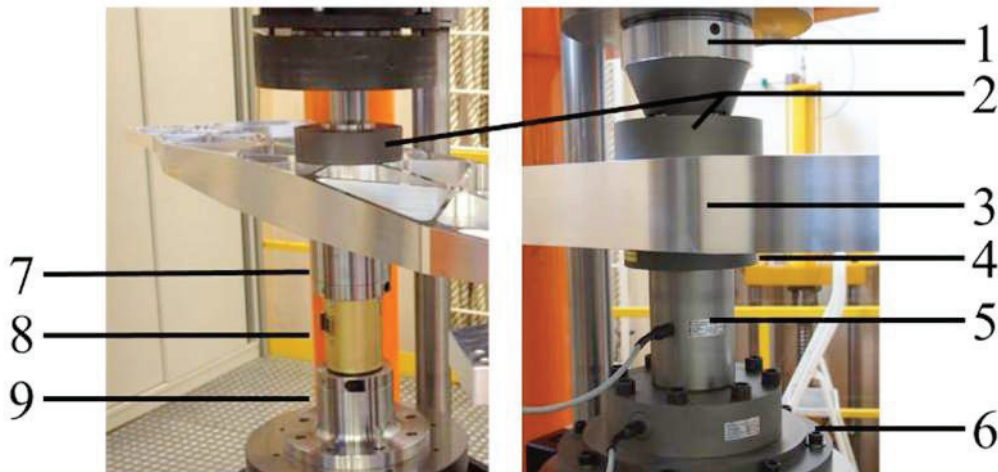


Abb. 3: Adapter-Sensor-Systeme. 1 – Druckstück zur Axialkrafteinleitung, 2 – Druckfuß, 3 – Hebelarm, 4 – oberes Adaptionstück, 5 – Mehrkomponentensensor, 6 – unteres Adaptionstück, 7 – obere hydraulische Spannbuchse, 8 – Drehmomentsensor, 9 – untere hydraulische Spannbuchse

1 × 10 N, 2 × 20 N, 1 × 50 N, 3 × 100 N und 3 × 200 N. Der Luftlagerkopf dient in erster Linie zur Kraftumlenkung. Die Richtung der senkrecht gerichteten Gewichtskraft  $F_g$  wird durch die reibungsarme Umlenkung des Metallbandes im Luftlagerkopf in eine horizontal gerichtete Kraft umorientiert. Im Inneren befinden sich zwei Luftlagerschuhe, welche zusammen mit einem Rotor das Luftlager zur Kraftumlenkung darstellen. Die Luftlagerwelle besitzt mittig eine Ausfräsung, welche an Tiefe und Breite mit dem Metallband übereinstimmt. Durch die Ausfräsung wird das Metallband geführt. So wird ein unkontrolliertes Gleiten verhindert. Der Stator besteht aus zwei Luftlagerschuhen. Die Innenfläche der Luftlagerschuhe besteht aus einem porösen Material, welches eine gleichmäßige Lufteströmung gewährleistet. Um das Setzen des Adapter-Sensor-Hebelsystems unter Axialkraftbelastung durch die 1-NM-K-NME zu kompensieren, kann der komplette Luftlagerkopf bis zu 9 mm in der Höhe verfahren werden. Schrittmotoren und Neigungs-, Laser- und Induktivsensoren dienen zur notwendigen Stabilisierung der Rotorposition und somit der Kraftflussrichtung.

### 3 Adapter-Sensor-Systeme

Nach der Montage beider Belastungsmassestapel in die 1-MN-K-NME erfolgt der Einbau eines Adapter-Sensor-Systems in den Druckeinbauraum der NME. Die Messeinrichtung kann reines Drehmoment  $M_z$ , eine reine Axialkraft  $F_z$  oder eine Kombination der beiden Größen generieren. Entsprechend kann es sich bei den Sensoren um einen reinen

Drehmomentsensor oder einen Mehrkomponentensensor handeln. Die Bedingung für den Einbau ist das Vorhandensein entsprechender spezieller angefertigter Adaptionsteile. Die Abb. 3 zeigt zwei Adapter-Sensor-Systeme im montierten Zustand, links ist ein reiner Drehmomentsensor, Typ TT1 (8), zu sehen und rechts ein Mehrkomponentensensor (5). Die Art der Adaption unterscheidet sich, der Mehrkomponentensensor kann mit einer oberen (4) und einer unteren (6) Adaptionplatte direkt mit dem Hebelarm (3) und der unteren Druckplatte verschraubt werden. Für eine Montage des Drehmomentsensors werden hydraulische Spannbuchsen (7, 9) mit definierten Innen- und Außendurchmessern verwendet.

### 4 Messunsicherheitsbudget

Es wird ein für die Zusatzvorrichtung spezifisches Messunsicherheitsbudget vorgestellt. Dieses umfasst ein Modell, Abb. 4, welches physikalische und geometrische Einflussfaktoren berücksichtigt. Dieses beinhaltet unter anderem Umwelteinflüsse, Geometriemerkmale oder die Einflüsse des Belastungsstapels. Es wurden Untersuchungen durchgeführt zum Einfluss unterschiedlicher einzelner Faktoren auf die Messunsicherheit und die Signalstabilität, z.B. Reibung im Luftlager. Für den Anwendungsfall müssen außerdem die Ausrichtung der Belastungsmassen, Ebenheitsfehler von Adaptionsteilen und Winkelabweichungen Berücksichtigung finden. Das Modell (1) umfasst daher eine Betrachtung des Systems

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{l} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_y l_z - F_z l_y \\ F_z l_x - F_x l_z \\ F_x l_y - F_y l_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

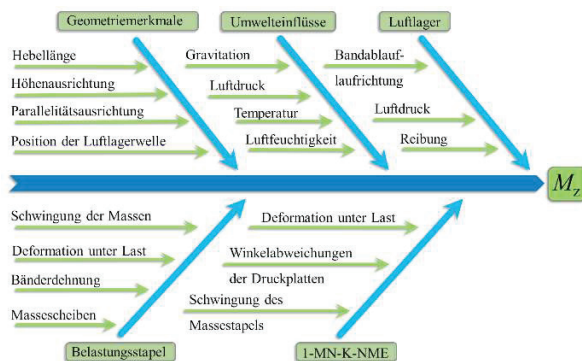


Abb. 4: Überblick über wirkende Einflussfaktoren in Form eines Ishikawa-Diagramms für  $M_z$

nach den vektoriellen Komponenten und die Analyse der Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit. In dem verwendeten Koordinatensystem ist  $M_z$  das Drehmoment,  $l_y$  die Hebellänge und  $F_x$  die eingeleitete Kraft. Im Idealfall liegen Hebelarm und Kraftvektor in der x-y-Ebene und sind orthogonal zueinander ausgerichtet. Eine zusätzliche Axialkraft  $F_z$  kann durch die 1-MN-K-NME in das System eingebracht werden. Tab. 1 zeigt identifizierte Faktoren und ihre prozentuale Gewichtung für die 20 N·m und 2000 N·m Belastungsstufe. Für jede Belastungsstufe wurde ein eigenes Messunsicherheitsbudget aufgestellt. Nach dem physikalischen Modell liegt die Messunsicherheit ( $k=2$ ) bei der kleinsten Belastungsstufe von  $M_z = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$  bei  $5,9 \cdot 10^{-5}$  und für die maximale Belastung von  $M_z = 2000 \text{ N}\cdot\text{m}$  bei  $4,2 \cdot 10^{-5}$ .

## 5 Störgrößen

Wirkende Störgrößen können zu einer Änderung der Kennlinie des Sensors führen. Als Störgrößen werden die Querkraft  $F_y$ , eine zusätzliche Axialkraft  $F_z$  und die Biegemomente  $M_x$  und  $M_y$  angesehen. Das Signalübersprechen in Abhängigkeit von diesen Größen ist oft nur schwer zu beschreiben [5]. Angestrebt ist ein Sollwert von Null für alle Störgrößen. Maßgeblich bedingt durch Abweichungen in der Geometrieausrichtung ergibt sich allerdings für jede Größe eine Unsicherheit für den Sollwert. Die Berechnung der Messunsicherheit erfolgt separat für jede Drehmomentlaststufen und muss entsprechend für jedes Adapter-Sensor-System

Tab. 1: Messunsicherheitsbudget für 20 N·m und 2000 N·m Belastungsstufe

Einflussfaktoren	Prozentuelle Anteil am MUB	
	20 N·m	2000 N·m
Normalfallbeschleunigung	0,06 %	0,12 %
Luftdruck	< 0,01 %	0,01 %
Luftfeuchtigkeit	< 0,01 %	< 0,01 %
Temperatur	4,92 %	9,73 %
Gewicht der Massescheiben	1,36 %	0,41 %
Überlapp Metallband	< 0,01 %	< 0,01 %
Hebellänge	45,24 %	89,53 %
Reibung Luftlager	48,31 %	0,01 %
Dicke Metallband	0,06 %	0,11 %
Höhendifferenz	< 0,01 %	< 0,01 %
Parallelitätsfehler	0,04 %	0,07 %
Winkelfehler Druckplatte	< 0,01 %	< 0,01 %
Winkelfehler Adaption-Sensor	< 0,01 %	< 0,01 %

neu berechnet werden. Für das in Tab. 1 zugrunde liegende System gilt, ergibt sich bei 2000 N·m für  $M_x = 0 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 0,4 \text{ N}\cdot\text{m}$  und für  $M_y = 3,49 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 1,01 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Die Abweichung vom Sollwert für  $M_y$  ergibt sich aus der wirkenden Kraft  $F_x$  und einer effektiven Hebellänge  $l_z$  in Abhängigkeit von der Neigungsabweichung des Hebelarms. Durch Adaptionsteile mit geringeren Ebenheitsfehlern lässt sich der Neigungsfehler des Hebelarms und die resultierenden Biegemomente deutlich reduzieren. Die Störgrößen  $F_y$  und  $F_z$  werden ebenfalls aus den Geometrieabweichungen berechnet. Es ergibt sich für das System bei der maximalen Laststufe von 2000 N·m für  $F_y = 0 \text{ N} \pm 2,6 \text{ N}$  und für  $F_z = 0 \text{ N} \pm 0,3 \text{ N}$ .

Mit wenig technischem Aufwand lassen sich die beiden Belastungsmassestapel der ZE auch separat getrennt verfahren, so dass die Empfindlichkeit eines Sensors für eine Störgröße abgeschätzt werden kann.

## 6 Zusammenfassung

Die Messunsicherheit ( $k=2$ ) der 1-MN-K-NME der PTB liegt bei  $2 \cdot 10^{-5}$ . Das Modell liefert für die Zusatzmesseinrichtung zur Drehmoment-erzeugung eine erweiterte relative Messunsicherheit bei 20 N·m von  $5,9 \cdot 10^{-5}$  und bei maximaler Belastung von 2000 N·m einen

Wert von  $4,2 \cdot 10^{-5}$ . Vergleichsmessungen offenbaren eine größere Abweichung als vom Modell vorhergesagt, diese wurden mit unterschiedlichen Drehmomentreferenzsensoren durchgeführt. Es ergibt sich eine Messunsicherheit von  $3,5 \cdot 10^{-4}$ . Für viele Sensoren ist schon eine Messunsicherheiten  $< 1 \cdot 10^{-3}$  ausreichend. Die Zielvorgabe von  $< 2 \cdot 10^{-4}$  wurde damit nicht erreicht, dennoch ist dies ein hervorragendes Ergebnis und es wird weiter daran gearbeitet die Messunsicherheit zu reduzieren. Die Aufnahme der Messeinrichtung in das Qualitätsmanagementsystem der PTB steht noch aus. Einer Nutzung der Messeinrichtung zu Forschungszwecken steht allerdings nichts im Wege.

## 7 Literatur

- [1] W. Weiler, M. Peters, H. Gassmann, H. Fricke, W. Ackerschott, "Die 1-MN-Normalmeßeinrichtung der PTB Braunschweig.", *VDI-Z 120, 1978, pp. 1-6*
- [2] D. Röske, "Metrological Characterization of a Hexapod for a Multi-Component Calibration Device", *Proc. XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croatia, 2003, pp. 347-351*
- [3] C. Ferrero, Li Qing Zhong, C. Marinari and E. Martino "New Automatic Multicomponent Calibration System with Crossed-Flexure Levers", *Proc. of ISMCR'93 - IMEKO TC-17, Torino, Italy, 1993.*
- [4] A. Robinson, „The Commissioning of the First UK National Standard Static Torque Calibration Machine“, *19th Conference on Force, Mass and Torque Measurement, Cairo, Egypt, 2005 pp.1-6*
- [5] A. Brüge, D. Röske, D. Mauersberger, K. Adolf "Influence of cross forces and bending moments on reference torque sensors for torque wrench calibration", *XIX IMEKO World Congress, Lisbon (Portugal), Sept. 6-11, 2009*