

Dissertation

Kai Geva

Metrologische Charakterisierung einer  
Drehmoment-Normalmesseinrichtung  
im MN·m-Bereich

ISSN 2941-1297  
ISBN 978-3-944659-45-9

DOI 10.7795/110.20250509





# Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dissertationen

**PTB-Diss-13**

Braunschweig, Mai 2025

Kai Geva

**Metrologische Charakterisierung einer  
Drehmoment-Normalmesseinrichtung  
im MN·m-Bereich**

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-45-9

DOI 10.7795/110.20250509

## **Empfohlene Zitierweise/recommended citation**

Geva, K., 2025. *Metrologische Charakterisierung einer Drehmoment-Normalmesseinrichtung im MN·m-Bereich*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. PTB-Bericht Diss-13. ISBN 978-3-944659-45-9. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20250509>

### **Herausgeber:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21  
Telefax: (05 31) 592-92 92  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

# **Metrologische Charakterisierung einer Drehmoment-Normalmesseinrichtung im MN·m-Bereich**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Kai Geva

geboren in (Geburtsort): Kirchen (Sieg)

eingereicht am: 12.09.2024

mündliche Prüfung am: 14.04.2025

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Michael Müller

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich

Gutachter: Dr. Christian Schlegel

2025

## In eigener Sache

An dieser Stelle möchte ich gerne all jenen danken, die jeder und jede auf ihre Weise dazu beigetragen haben, dass ich diese Dissertation niederschreiben konnte.

Ich danke Prof. Rainer Tutsch für die Betreuung meiner Arbeit und danke ihm für die geduldige Unterstützung und für die zahlreichen Ratschläge, die mir bei meiner Arbeit geholfen haben. Ebenso danke ich Prof. Thomas Fröhlich für die Bereitschaft, ein zweites Gutachten zu erstellen.

Ich danke Dr. Karin Kniel und Dr. Daniel Heisselmann, die mir die Möglichkeit gegeben haben, meine Dissertation im Endspurt mit gegebener Sorgfalt vollenden zu dürfen. Darüber hinaus danke ich für die fortlaufenden Besprechungen und für die vielen Tipps.

Ich danke Dr. Rolf Kumme, Dr. Dirk Röske und Dr. Christian Schlegel für die Korrekturen meiner Dissertation und die fachlichen Ratschläge. Darüber hinaus danke ich Dr. Christian Schlegel für das Gutachten zur Dissertation.

Ich danke Holger Kahmann für die guten Ratschläge zur Konstruktion und zum Verständnis der Normalmesseinrichtung, die mir erst die vorliegende Arbeit ermöglicht hat.

Ich danke Kai Mienert für die Hilfe bei der softwaretechnischen Auswertung der Daten, für die elektrotechnische Expertise und für die Anmerkungen zu meiner Arbeit. Ich danke Christian Keilholz und Stefan Augustat für die Unterstützung bei der Durchführung der Messkampagnen. Außerdem danke ich Stefan für die vielen Anekdoten von Homer Simpson, die den Alltag erleichtert haben.

Ich danke meinen beiden Schwiegereltern für die Durchsicht meiner Arbeit und für das Aufdecken vieler Grammatik- und Rechtschreibfehler. Gabi danke ich insbesondere den fachfremden Blick auf die Dissertation und bei der Strukturierung der Arbeit.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mich immer unterstützt haben und für die vielen ruhigen Tage, an denen ich mich in der alten Heimat voll auf die Arbeit konzentrieren konnte.

Zuletzt und ganz besonders möchte ich mich bei meiner Frau Linda und meinen beiden Söhnen Tjark und Leif bedanken. Meine Kinder gaben mir die benötigte kreative Pause während der Schreibphase. Meiner Frau danke ich für ihren Blick für die Details und für die unerschütterliche Unterstützung, ob Tag oder Nacht, beim Verfassen der Arbeit. Meine Frau hat mir die notwendige Kraft gegeben, um diese Arbeit abzuschließen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Thema und Motivation . . . . .	6
1.2	Ziele der Arbeit und Umsetzung nach Arbeitspaketen . . . . .	7
1.2.1	Beschreibung der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung . . . . .	8
1.2.2	Herleitung und Analyse der Modellgleichung . . . . .	8
1.2.3	Erstellung der Messunsicherheitsbilanz . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und theoretische Grundlagen</b>	<b>10</b>
2.1	Rückführung und Messunsicherheitsbestimmung . . . . .	10
2.1.1	Prinzip der metrologischen Rückführung . . . . .	10
2.1.2	Grundlagen der Messtechnik und der Messunsicherheitsbestimmung . . . . .	10
2.1.3	Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM . . . . .	13
2.2	Kraft- und Drehmomentmesstechnik . . . . .	14
2.2.1	Grundlagen der Technischen Mechanik . . . . .	14
2.2.2	Überblick zur Erfassung mechanischer Größen . . . . .	18
2.2.3	Grundlagen der Dehnungsmessstreifen . . . . .	18
2.2.4	Herleitung der Wheatstoneschen Brückengleichung . . . . .	19
2.2.5	Messverstärker . . . . .	21
2.3	Drehmoment-Normalmesseinrichtungen . . . . .	22
2.3.1	Rückführungen von Drehmomentsensoren . . . . .	22
2.3.2	Aufbau von Drehmoment-Normalmesseinrichtungen (D-NME) . . . . .	23
2.3.3	Beispiele . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Aufbau der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung</b>	<b>26</b>
3.1	Schwingfundament . . . . .	27
3.2	Aktorseite . . . . .	28
3.3	Messseite . . . . .	30
3.4	Kalibriergegenstand . . . . .	33
3.5	Steuerung und Regelung . . . . .	34
3.6	Messdatenerfassung . . . . .	37
3.7	Lasertracker . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Herleitung und Analyse der Modellgleichung</b>	<b>39</b>
4.1	Bestimmung des Drehmoments $M_z$ der Kalibrierung . . . . .	39
4.1.1	Aufstellung der Modellgleichung . . . . .	39
4.1.2	Messunsicherheitseinflüsse . . . . .	41
4.2	Finite Elemente Analyse der Messseite . . . . .	43
4.2.1	FE-Setup . . . . .	44
4.2.2	Reaktionskräfte und -momente . . . . .	45

4.2.3	Verformungen und Winkelstellungen . . . . .	47
4.2.4	Temperaturänderung . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Messunsicherheit der Referenzkraftaufnehmer</b>	<b>54</b>
5.1	Beschreibung und Einsatz des Kraftaufnehmers . . . . .	54
5.2	Kraftkalibrierungen der DM-Referenzkraftaufnehmer . . . . .	56
5.3	Kalibrierkurve und Nullpunkte . . . . .	57
5.4	Messunsicherheit der Referenzkraftaufnehmer . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Messunsicherheit der Momentnebenschlüsse</b>	<b>62</b>
6.1	Analyse der Nebenschlüsse im Kalibrierbetrieb . . . . .	62
6.2	Messverfahren zur Bestimmung der Nebenschlüsse . . . . .	65
6.2.1	Bestimmung der Steifigkeitskoeffizienten . . . . .	66
6.2.2	Messung des Torsionswinkels während einer Kalibrierung . . . . .	90
6.3	Quantifizierung der Nebenschlüsse und Messunsicherheitsbetrachtung . . . . .	96
6.3.1	Tangentialkraft . . . . .	96
6.3.2	Torsionsmomente . . . . .	97
6.3.3	Biegemomente . . . . .	98
<b>7</b>	<b>Messunsicherheit der Messhebellänge</b>	<b>100</b>
7.1	Messablauf . . . . .	100
7.2	Auswertung und Modellgleichung . . . . .	102
7.3	Analyse der Unsicherheitsbeiträge . . . . .	105
7.4	Messunsicherheitsbudget der Messhebellänge . . . . .	109
<b>8</b>	<b>Weitere Messunsicherheitseinflüsse</b>	<b>111</b>
8.1	Umwelteinflüsse . . . . .	111
8.2	Anzeigegerät . . . . .	112
8.2.1	Kalibrierung des Brückennormals K3607 . . . . .	112
8.2.2	Kalibrierung der Messverstärker des PCS8000 . . . . .	113
8.2.3	Messunsicherheit des Messverstärkers . . . . .	115
8.2.4	Einfluss des Messverstärkers auf Messunsicherheit von $M_z$ . . . . .	116
8.3	Weitere Messunsicherheitseinflüsse . . . . .	118
<b>9</b>	<b>Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets</b>	<b>119</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>123</b>
10.1	Zusammenfassung . . . . .	123
10.2	Ausblick . . . . .	125
<b>Anhang</b>		<b>128</b>
A.1	Referenzkraftaufnehmer . . . . .	128
	Kalibrierschein DM1 Kraftaufnehmer (Zug) . . . . .	128
	Kalibrierschein DM1 Kraftaufnehmer (Druck) . . . . .	135

Kalibrierschein DM2 Kraftaufnehmer (Zug) . . . . .	141
Kalibrierschein DM2 Kraftaufnehmer (Druck) . . . . .	147
A.2 Nebenschluss . . . . .	153
Steifigkeitskoeffizient nach ODR für Lastfall 1 und Messstränge BM2 und BM3 . .	153
Steifigkeitskoeffizient nach ODR für Lastfall 2 und Messstränge BM1 und BM3 . .	153
Kalibrierschein des 6-Komponentenaufnehmers MKA . . . . .	155
A.3 Messhebellänge . . . . .	161
Technische Zeichnung des Messhebels . . . . .	161
A.4 Umweltbedingungen . . . . .	163
Jahresverlauf 2023 der Lufttemperatur und -feuchte in der Messhalle . . . . .	163
A.5 Messverstärker . . . . .	164
Relative Linearitätsabweichung der DM-Messverstärker . . . . .	164
Kalibrierschein des Brückennormals K3607 . . . . .	164
<b>Nomenklatur</b>	<b>169</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>175</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Thema und Motivation

Ein erklärtes Ziel der Europäischen Union ist die Einhaltung der Klimaneutralität bis 2050 [1]. Die Bundesrepublik Deutschland hat darüber hinaus im Bundes-Klimaschutzgesetz beschlossen, die Klimaneutralität bereits 2045 zu erreichen [2]. Die dafür erforderliche Transformation betrifft alle Bereiche technischer Anwendung, insbesondere die Energiewirtschaft. Zur Ausnutzung von sauberen und erneuerbaren Energiequellen bildet der Ausbau der Windenergieanlagen (WEA) zu Land und zu Wasser einen zentralen Baustein. Viele Forschungsanstrengungen der letzten Jahrzehnte zielten auf die Optimierung von Windenergieanlagen hinsichtlich Effizienzsteigerung und Sicherheit [3].

Ein wichtiger Bestandteil bei der Bestimmung der Effizienz von Windenergieanlagen sind die Gondelprüfstände. In Deutschland gibt es zwei Prüfstände dieser Art: Das Center for Wind Power Drives (CWD) an der RWTH Aachen [4] und das Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES) in Bremerhaven [5]. Beide Prüfstände dienen dazu, typische Windlasten zu simulieren, indem rotatorische Drehmomente und Axialkräfte sowie Biegemomente in einen Antriebsstrang-Prototypen eingeleitet werden. Die Gondel im Prüfstand erzeugt aus den simulierten Windlasten elektrische Leistung. Der Wirkungsgrad wird berechnet, indem die erzeugte elektrische Leistung durch die eingeleitete mechanische Leistung dividiert wird. Für die Berechnung der mechanischen Leistung sind zwei Messgrößen entscheidend: Drehzahl und Drehmoment. Während Drehzahlsensoren in diesem Bereich problemlos rückgeführt werden können, stellt sich die Rückführung für Drehmomentsensoren in diesem Drehmomentbereich schwieriger dar.

Neu installierte Onshore-Windenergieanlagen weisen eine typische Nennleistung von 4 MW bis 5 MW auf, im Offshore-Bereich geht der Bereich von 8 MW bis 10 MW [6, 7]. Laut dem Bundesverband WindEnergie werden bis 2025 größere Anlagen von 9,5 MW bis 15 MW geplant [6]. Damit geht der Trend zu Anlagen mit größerer Nennleistung. Wenn eine Drehzahl von 10 U/min angenommen wird, kann pro Nennleistungseinheit 1 MW mit einer Drehmomenteinheit von 1 MN·m gerechnet werden. Das würde bei derzeitigen WEA-Leistungen Drehmomenten von 5 MN·m bis 10 MN·m entsprechen.

Der Gondelprüfstand am CWD erzeugt ein Drehmoment bis 1,6 MN·m, der Prüfstand beim IWES bis 15 MN·m. Das Drehmoment wird über ein prüfstandinternes Messsystem gemessen. Für die Rückführung von Drehmomentsensoren gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder kann der Sensor des Prüfstands in einem akkreditierten Labor kalibriert werden oder es findet vor Ort eine Kalibrierung des Sensors über ein TransfERNormal statt. In beiden Fällen besteht das Problem der Kalibriermöglichkeit. Die bis dahin größte Drehmomentnormalmessenrichtung befindet sich an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und erzeugt ein rückgeführtes Drehmoment bis 1,1 MN·m. Da die maximalen Drehmomente der Prüfstände deutlich über diesen 1,1 MN·m liegen, besteht eine Lücke von mehreren MN·m, innerhalb derer Drehmomentsensoren derzeit

nicht rückgeführt werden können. Laut Gnauert [8] liegen die Anforderungen der Industrie an die Unsicherheit des Wirkungsgrads bei 0,5 % bis 1 %.

Der Bedarf an einer Rückführung von Drehmomentsensoren zeigt sich an der Bedeutung der Effizienzmessung. Eine exakte Effizienzbestimmung einer WEA steigert die Zuverlässigkeit bei der Vorhersage der Energieausbeute. Durch den Skaleneffekt kann eine Abweichung von wenigen Prozentpunkten in der Effizienz zu einer erheblichen Unsicherheit der Prognose für die jährlichen Stromerzeugung führen.

Um die Lücke in der Drehmomentrückführung zu schließen, wurde 2016 das Projekt „Torque measurement in MN·m range“ im Rahmen des „European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR)“ gestartet [9]. Ziel war es, Ansätze zur Kalibrierung von Drehmomentsensoren im MN·m-Bereich zu finden. Außerdem wurde ein 5 MN·m-Drehmomentsensor gefertigt, der sich im Teilbereich von 0,1 MN·m bis 1,1 MN·m in der 1,1 MN·m-Drehmomentnormalmesseinrichtung kalibrieren lässt. Eine Extrapolationsmethode ermöglicht Messungen über 1 MN·m. Das Projekt zeigt jedoch auch Limitierungen, da eine Extrapolation die Rückführung nicht ersetzen kann [10]. Aus diesem Grund wurde das Projekt „Aufbau eines Kompetenzzentrums für Windenergie“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz mit 5 Mio. € gefördert und startete 2016.

Das Kompetenzzentrum WIND umfasst mehrere Bereiche, in denen die Windenergieindustrie durch metrologische Infrastruktur unterstützt werden kann. Darunter fallen ein Koordinatenmessgerät zur Vermessung von Großverzahnungsnormalen, ein Strömungsnormals zur Kalibrierung eines LiDAR-Systems zur bodennahen Bestimmung von Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe und eine Drehmomentnormalmesseinrichtung zur Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern bis 5 MN·m. Darüber hinaus wurde die Maschine im Rahmen des Projektes für einen Ausbau auf 20 MN·m vorbereitet.

Die Messeinrichtung wurde 2022 zum ersten Mal in den Probetrieb genommen. Im Jahr 2023 konnte erstmals ein Drehmoment von 5 MN·m aufgebracht werden. Damit ist die Messeinrichtung in der Lage, eine Kalibrierung für Drehmomentsensoren nach DIN 51309 anzubieten [11].

Zur Kalibrierung des Drehmoments ist es notwendig, die Messunsicherheit des Drehmomentsensors anzugeben. Die DIN 51309 gibt eine statische Auswertung eines festgelegten Kalibrierverfahrens an, um die messtechnischen Eigenschaften des Aufnehmers zu ermitteln. Für eine vollständige Angabe der Messunsicherheit ist eine Messunsicherheit des Kalibriermoments erforderlich.

## 1.2 Ziele der Arbeit und Umsetzung nach Arbeitspaketen

Das Ziel der Arbeit ist die metrologische Charakterisierung der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung. Zu dieser metrologischen Charakterisierung sind verschiedene Aufgabenpakete identifiziert worden. Zunächst wird die 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung beschrieben, um die Versuchsbedingungen bei einer Drehmomentkalibrierung zu verstehen. Die nächste Aufgabe besteht darin, die Modellgleichung zur Bestimmung des anliegenden Drehmoments aufzustellen und zu analysieren. Diese Modellgleichung ist die Basis für die Bestimmung der Messunsicherheit des Drehmoments nach dem „Guide to Uncertainty in Measurement (GUM)“ [12]. Die Darstellung erfolgt in einem Messunsicherheitsbudget, in dem die relativen Anteile der Mess-

unsicherheitsbeträge beschrieben werden. Die genannten Aufgaben werden im Folgenden näher erläutert.

### 1.2.1 Beschreibung der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung

Die primäre Aufgabe der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung besteht darin, Aufnehmer bis zu einem maximalen Drehmoment von 1 MN·m bis 5 MN·m zu kalibrieren. Ferner sollen Drehmomentkalibrierungen durch Biegemomente und Axialkräfte überlagert werden können. In Zukunft soll die Messeinrichtung durch einen Umbau in der Lage sein, ein Drehmoment bis 20 MN·m aufzubringen.

Das Ziel der Arbeit ist es, die Funktionsweise der Maschine zu beschreiben, die zum Verständnis der Drehmomentkalibrierung erforderlich ist. Dazu gehört eine Beschreibung des Aktorsystems, dessen Aufgabe die Erzeugung des Drehmoments ist. Die messtechnische Erfassung des Drehmoments geschieht auf der Messseite. Die Funktionsweise der Messsysteme zur Ermittlung des Drehmoments werden erläutert. Der für die Arbeit vorliegende Drehmomentaufnehmer dient als TransfERNormal für die Vergleichsmessung mit der 1,1 MN·m-Drehmomentnormalmesseinrichtung und wird ebenfalls beschrieben. Der Ablauf zur Montage eines Prüflings wird skizziert, um den Ausgangszustand der Kalibrierung zu erfassen. Des Weiteren werden das Messdatenerfassungssystem und die Regelung der Anlage dargestellt.

### 1.2.2 Herleitung und Analyse der Modellgleichung

Die Grundlage der Messunsicherheitsbestimmung des Kalibrierdrehmoments bildet die Modellgleichung. Für die Modellgleichung wird die statische Drehmomentbilanz an einer geeigneten Position in der Anlage aufgestellt. Das Ziel der Drehmomentbilanz ist es, alle Bestandteile des anliegenden Drehmoments zu ermitteln und die exakte Größe des Kalibrierdrehmoments zu bestimmen.

Aufbauend auf der Modellgleichung werden alle Unsicherheitseinflüsse zur Bestimmung der Messgröße Drehmoment identifiziert. Zusätzlich werden die messtechnischen Voraussetzungen zur Erfassung der Erwartungswerte aller Bestandteile der Modellgleichung und deren Unsicherheitseinflüsse erläutert.

Zur Analyse der Drehmomentbilanz an verschiedenen Laststufen wird eine Finite Elemente Analyse erstellt. Das Ziel der Analyse ist es, Erwartungswerte für eine Drehmomentbilanz zu ermitteln. Die ermittelten Werte dienen als Vergleichsdatensatz für die spätere experimentelle Erfassung der Werte. Außerdem werden die Anforderungen an die Messtechnik zur Ermittlung der auftretenden Messgrößen notiert.

### 1.2.3 Erstellung der Messunsicherheitsbilanz

Aufbauend auf den Ergebnissen der Analyse der Modellgleichung werden die notwendigen Messungen festgelegt, die zur Ermittlung der Messunsicherheitseinflüsse notwendig sind. Die Methoden und notwendigen Messinstrumente bzw. Kalibrier- und Prüfeinrichtungen zur Durchführung der Messungen werden beschrieben. Die experimentellen Ergebnisse werden dargestellt und diskutiert. Für jede Messung erfolgt eine Messunsicherheitsbestimmung nach dem GUM.

Nach Darstellung der einzelnen Messunsicherheitsbeiträge wird die Messunsicherheitsbilanz des

Kalibrierdrehmoments der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung aufgestellt. Die Messunsicherheitsbudgets werden für verschiedene Drehmomentstufen aufgestellt. Die Drehmomentbereiche mit der maximalen Messunsicherheit werden identifiziert. Die Messunsicherheitsbudgets werden anschließend analysiert und Verbesserungspotentiale diskutiert.

# 2 Stand der Technik und theoretische Grundlagen

## 2.1 Rückführung und Messunsicherheitsbestimmung

### 2.1.1 Prinzip der metrologischen Rückführung

Laut dem Einheiten- und Zeitgesetz [13] obliegt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt die Aufgabe der Darstellung und Weitergabe der gesetzlichen Einheiten. Die Zielsetzung der PTB lautet, ein nationales geschlossenes Einheitensystem aufzubauen. Des Weiteren setzt sich die PTB für die Kompatibilität zu internationalen Einheitensystemen ein [14]. Das internationale Wörterbuch der Metrologie (International Vocabulary of Metrology, kurz: VIM) [15] bezeichnet im Punkt 2.41 die metrologische Rückführung als „Eigenschaft eines Messergebnisses, wobei das Ergebnis durch eine dokumentierte, ununterbrochene Kette von Kalibrierungen, von denen jede zur Messunsicherheit beiträgt, auf eine ‚Referenz‘ bezogen werden kann“. Im VIM [15] wird angemerkt, dass „für diese Definition eine Referenz, eine Maßeinheit durch praktische Realisierung, ein Messverfahren einschließlich der Maßeinheit für eine nicht ordinale Größe oder ein Normal sein kann“.

Für die metrologische Rückführbarkeit ist laut VIM [15] eine Kalibrierhierarchie notwendig. Die Kalibrierhierarchie wird vom VIM [15] im Punkt 2.40 definiert als „Abfolge von Kalibrierungen ausgehend von einer Referenz zu einem schließlich benutzten Messsystem.“ Zur Bestätigung der Rückführbarkeit sind „eine metrologische Rückführungskette auf ein internationales oder nationales Normal, eine dokumentierte Messunsicherheit, ein dokumentiertes Messverfahren“ notwendig.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Grundlagen der Messtechnik und stellen die wichtigsten Dokumentationen bereit. Darüber hinaus wird die Darstellung der Messunsicherheit beschrieben und die Folgen zur Rückführung der Drehmomentmessung dargestellt.

### 2.1.2 Grundlagen der Messtechnik und der Messunsicherheitsbestimmung

#### Grundbegriffe der Messtechnik

Laut Puente León [16] ergeben sich die einfachsten Messsysteme beim direkten Messverfahren, bei denen der gesuchte Messwert durch unmittelbaren Vergleich mit einer Referenz derselben Messgröße gewonnen wird. In einfachsten Fall besteht die Messkette aus einem Aufnehmer, einem Messumformer und der Signalverarbeitung. Der Aufnehmer (auch Sensor oder Fühler genannt) erfasst zu Beginn der Kette die zu messende Größe  $u$  und erzeugt in Korrelation zur Eingangsgröße in den meisten Fällen ein elektrisches Ausgangssignal. In der Regel wird ein Messumformer benötigt, um das Ausgangssignal des Aufnehmers in ein normiertes elektrisches Signal zu überführen, welches für die Weiterverarbeitung (bspw. Digitalisierung, Filterung, Übertragung, Speicherung) verwendet wird. Die Signalverarbeitung dient dazu, den informationstragenden Parameter aus

dem Signal (bspw. Amplitude oder Frequenz) zu ermitteln und daraus das Messergebnis abzuleiten. In einem modernen Messsystem kommt für diese Signalverarbeitung ein Digitalrechner oder Microcontroller zum Einsatz. Um die Messergebnisse sinnvoll interpretieren zu können, muss über eine Modellbildung ein mathematischer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße der Messkette hergestellt werden [16].

### **Messabweichung**

In der DIN 1319-1:1995-01 [17] ist die Differenz zwischen dem Messergebnis und dem wahren Wert einer Messgröße als Messabweichung definiert. Die relative Messabweichung bezieht sich auf den wahren Wert und wird meist in Prozent angegeben. Um die Messabweichung abzuschätzen, gibt es zwei Möglichkeiten: Vergleich mit einem Präzisionsmessgerät oder Vermessung eines Normals (Maßverkörperung). Grundsätzlich gilt, dass jede Messung fehlerbehaftet ist. Messabweichungen entstehen durch die Eigenschaften des Messgegenstandes, durch die Unvollkommenheit der Messeinrichtung und des Messverfahrens, durch Umwelteinflüsse oder durch den Bediener.

Es werden zwei Klassen von Messabweichungen unterschieden: systematische und zufällige Abweichungen. Bei systematischen Abweichungen sind Ursache und Art der Wirkung bekannt und lassen sich prinzipiell kompensieren. Zufällige Abweichungen weisen unter wiederholten Messungen bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen unterschiedliche Werte und Vorzeichen auf (bspw. beim Rauschen). Ob eine Abweichung als systematisch oder zufällig gewertet wird, obliegt dem Systemverständnis des Betrachters. Häufig kann es passieren, dass eine zufällige Messabweichung als systematisch identifiziert wird, wenn die zuvor unbekanntes Zusammenhänge festgestellt werden.

Der Hersteller eines Messsystems ist verpflichtet, in der Spezifikation die Randbedingungen und Umwelteinflüsse festzuhalten, unter denen eine maximale Messabweichung garantiert wird. Folgende Angaben gehören zur Beschreibung der Normalbedingungen: Messbereich, Messunsicherheit, Betriebsbedingungen, Einbauvorschriften, Energieversorgung und Abmessungen. Die sich bei einem stationären Zustand einstellenden Messabweichungen werden als statisch bezeichnet. Statische Messabweichungen werden innerhalb und außerhalb der spezifizierten Normalbedingungen gesondert betrachtet. Statische Abweichungen unter Normalbedingungen sind konstant oder auf null zu halten, wohingegen statische Abweichungen außerhalb von Normalbedingungen als zusätzliche Abweichung auf die Messgröße festzustellen sind [16].

### **Stationäre Kennlinie**

Laut Puente León [16] besteht eine der Hauptaufgaben in der Messtechnik darin, „eine Messgröße im stationären Zustand zu erfassen“. Der Zusammenhang zwischen Messwerten und den Anzeigewerten im stationären Zustand wird durch eine physikalische Kennlinie beschrieben. Die Grenzen des Messbereichs werden als Messbereichsanfang und -ende bezeichnet und gelten entsprechend für den Anzeigebereich. Die Steigung der Kennlinie ist die Sensitivität. Für viele Zwecke wird ein Messsystem vereinfacht, indem Messbereichsanfang und -ende durch eine Gerade verbunden werden. Dadurch entsteht eine idealisierte Kennlinie mit konstanter Steigung (idealer Sensitivität). Ein Messsystem in idealisierter Form wird in den meisten Fällen erst nach einem Abgleich oder einer Justierung effektiv nutzbar. Laut Puente León [16] versteht man darunter „einen physikalischen Eingriff in das Gerät oder seine Maßverkörperung mit dem Ziel, den Messbereich auf

den vorgesehenen Bereich der Ausgabereinrichtung, des Ausgangssignals oder der Anzeige abzubilden“. Ein Abgleich für lineare Kennlinien kann auf zwei Arten geschehen: entweder durch eine additive Verschiebung (Offset) oder durch multiplikative Drehung (Anpassung der Sensitivität). Die zwei gebräuchlichsten Verfahren sind die Fixpunktjustierung und die Toleranzbandjustierung. Bei der Fixpunktjustierung wird die Kennlinie durch den Anfangs- und Endpunkt gelegt, so dass die Abweichung am Anfang und am Ende null ist. Bei der Toleranzbandjustierung wird die Fixpunktjustierung um eine zusätzliche Offset-Verschiebung erweitert. Das Ziel der Justierung ist, die maximale Abweichung durch Anpassen der Sensitivität zu minimieren. In der Folge ist die Abweichung beim Anfangs- und Endpunkt nicht mehr null. Alle systematischen Abweichungen, die nach Justage eines Messsystems bestehen bleiben, werden als Kennlinienabweichung bezeichnet. Bezieht man die Messgröße  $u_m$  auf den Messbereichsanfang  $u_a$ , kann die relative Kennlinienabweichung  $F_r$  mit

$$F_r = \frac{u_i - u_m}{u_m - u_a} \quad (2.1)$$

angegeben werden, wobei  $u_i$  den Anzeigewert darstellt. Die relative Kennlinienabweichung kann aber auch auf den Anzeigebereich, den Sollwert oder den Endwert bezogen werden.

Bei einigen Messvorgängen kann es vorkommen, dass ein Messwert nach einer Steigerung oder abermaligen Absetzen nicht auf seinen ursprünglichen Wert zurückfällt. Dieses Phänomen wird durch die Hysterese beschrieben. Die Hysterese wird ermittelt, in dem die Messgröße vom Messbereichsanfang bis zum -ende gesteigert wird und langsam auf den Messbereichsanfang zurückgenommen wird. Die größte dabei auftretende Differenz der Messgröße zwischen den richtungsabhängigen Kennlinien wird auf den gesamten Messbereich bezogen. [16]

### Stochastische Grundlagen

Der zeitliche Verlauf von Eingangs- und Ausgangsgröße eines Messsystems ist für gewöhnlich deterministisch. Der Verlauf von Störgrößen oder von Messgrößen, die mit Störsignalen überlagert werden, ist hingegen zufällig. Daher muss die Beschreibung von überlagernden Störgrößen mit Werkzeugen aus der Stochastik erfolgen [16]. Allgemein kann ein Signalwert einer Messung als Zufallsexperiment behandelt werden, wobei die Störgröße beziehungsweise die Messgröße eine mögliche Ergebnismenge eines solchen Zufallexperiments darstellt. Zur quantitativen Beschreibung wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function, PDF) herangezogen [12]. Laut Puente León [16] wird „jede auf der Ergebnismenge eines Zufallexperiments definierte reelle Funktion als Zufallsvariable bezeichnet“. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ordnet jedem Messergebnis eine solche Zufallsvariable zu. Mittels der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung berechnet werden. Die Kenngrößen einer Dichtefunktion sind der Erwartungswert und die Standardabweichung. Der Messwert ist erst aussagekräftig, wenn der Erwartungswert und die Standardabweichung genannt werden [16]. Häufig wird neben der Standardabweichung auch das Vertrauensintervall (auch Konfidenzintervall) angegeben.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariablen gibt die Wahrscheinlichkeit an, „mit der ein Funktionswert von  $x$  kleiner oder höchstens  $x$  ist“ [16]. Mit der Angabe einer statistischen Sicherheit und dem Vertrauensintervall kann angegeben werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich der wahre Messwert in dem Intervall befindet [15]. Durch das Integral der Gaußschen Fehlerfunktion lässt sich die Wahrscheinlichkeit eines Vertrauensintervalls numerisch ermitteln [16]. In

der Praxis werden die Konfidenzintervalle als Vielfache der Standardabweichung angegeben. Das Konfidenzintervall einer Normalverteilung mit der Breite einer Standardabweichung ( $k = 1$ ) hat eine Wahrscheinlichkeit von 68,27 %. Bei einem Erweiterungsfaktor von  $k = 2$  sind es 95,45 % und bei  $k = 3$  99,73 %. In den meisten Fällen wird ein Konfidenzintervall bei zweifacher Standardabweichung angegeben [16].

Für die Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM ist das Bayes-Theorem über die bedingte Wahrscheinlichkeit von zentraler Bedeutung. Dieses Theorem macht eine Aussage über die Wahrscheinlichkeitsdichte der Zufallsvariablen  $x$  unter der Voraussetzung, dass das Ereignis  $y = y$  eingetreten ist

$$f_{x|y} = \frac{f_{xy}(x, y)}{f_y(y)}. \quad (2.2)$$

Sind  $x$  und  $y$  voneinander stochastisch unabhängig, so ist das Eintreten von  $x = x$  nicht von der Bedingung  $y = y$  abhängig. Die bedingte Wahrscheinlichkeit wird dann zu

$$f_{x|y}(x, y) = f_{x|y}(x | y) \cdot f_y(y) = f_{y|x}(y | x) \cdot f_x(x). \quad (2.3)$$

Diese Vereinfachung erlaubt es, die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangsgrößen unabhängig voneinander zu betrachten und deren Unsicherheit zu bestimmen. Mit dem Bayes-Theorem können diese einzelnen Informationen über die Unsicherheiten der Eingangsgrößen zusammengefasst werden und es kann daraus eine Unsicherheit für die eigentliche Messgröße ermittelt werden. Die Informationen über die Messgröße können wiederum in einer anderen Auswertung verwendet werden [16, 18].

### 2.1.3 Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM

Laut VIM Punkt 2.26 [15] ist die Messunsicherheit ein „nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist“. Zu unterscheiden sind hier systematische Messabweichungen und die Messunsicherheit. Das VIM [15] definiert eine systematische Messabweichung als „Komponente der Messabweichung, die bei wiederholten Messungen konstant bleibt oder sich in vorhersagbare Weise ändert“. Erst nach Korrektur einer Beobachtung um die systematische Abweichung kann eine sinnvolle Aussage zum Messergebnis erfolgen. Das Messergebnis wird durch den Messwert und die Messunsicherheit gekennzeichnet und beinhaltet den wahren Wert [19].

Um die Messunsicherheit zu bestimmen, wurde der „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) vom Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) entwickelt. Es gilt als Standardwerk zur Bestimmung der Messunsicherheit. Zentraler Bestandteil der Bestimmung der Messunsicherheit ist die Auflistung aller Einflüsse auf die Messunsicherheit und die Quantifizierung der einzelnen Unsicherheitseinflüsse durch eine Erwartungsgröße und eine eigene Messunsicherheit.

Ein mathematisches Modell fasst alle Größen zusammen, die mit einem signifikanten Anteil zur Unsicherheit des Messergebnisses beitragen. Die Funktion gibt den Schätzwert einer Messung sowie dessen kombinierte Standardmessunsicherheit wieder. Diese Vorgehensweise erlaubt eine weitere Verwendung des Messergebnisses und der Messunsicherheit [19]. Im Vorfeld der Berechnung nach GUM muss die Messung beschrieben und ein mathematisches Modell der Messung erstellt werden.

Das mathematische Modell erfasst die quantitativen Zusammenhänge zwischen den Unsicherheitsinflüssen und der Messgröße. Alle Eingangsgrößen des Modells, die einen signifikanten Beitrag zur Messunsicherheit leisten, werden aufgeführt. Die Übersicht aller Einflussgrößen wird häufig in einem Ishikawa-Diagramm dargestellt. Über die Eingangsgrößen des Modells werden alle zur Verfügung stehenden Informationen hinzugezogen. Dabei wird nach Eingangsgrößen des Typs A und Typs B unterschieden. Typ A Eingangsgrößen sind Größen, deren Informationen aus einer wiederholten Messung gewonnen werden. Diese Messung wird durch einen Erwartungswert und eine Standardabweichung charakterisiert. Typ B Eingangsgrößen besitzen Angaben aus anderen Informationsquellen, etwa aus einem Kalibrierschein oder aus einem Hersteller-Datenblatt [19].

Mit dem mathematischen Modell und den vorliegenden Informationen der Eingangsgrößen gibt der GUM ein Verfahren an die Hand, um das Messergebnis einheitlich darzustellen. Zunächst werden die Standardunsicherheiten aller Eingangsgrößen ermittelt. Im Anschluss wird das Messergebnis und dessen Standardunsicherheit errechnet. Für die Bestimmung der Standardunsicherheit des Messergebnisses wird der Empfindlichkeitskoeffizient aus der partiellen Ableitung der Modellgleichung nach der jeweiligen Eingangsgröße benötigt. Hierbei muss unterschieden werden, ob die Eingangsgrößen untereinander korrelieren. Unkorrelierte Größen können separat ermittelt werden. Bei korrelierten Größen ist die Lösung des entstehenden Integrals häufig nicht mehr trivial und wird in den meisten Fällen mit einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Im letzten Schritt wird die erweiterte Messunsicherheit berechnet.

Auch wenn die Standardabweichung mit der Erwartungsgröße eine Zufallsvariable vollständig definiert, ist häufig eine Angabe eines Überdeckungsintervalls gewünscht, die den wahren Messwert mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit abdeckt. Häufig wird ein Intervall angegeben, in der dieser wahre Messwert mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 95 % enthalten ist. Für eine Normalverteilung entspricht das Konfidenzintervall mit dieser Wahrscheinlichkeit einem Erweiterungsfaktor von  $k = 2$  (siehe Abs. 2.1.2). Diese Angabe wird als erweiterte Messunsicherheit bezeichnet.

## 2.2 Kraft- und Drehmomentmesstechnik

### 2.2.1 Grundlagen der Technischen Mechanik

Die physikalische Größe Kraft ist als Ursache für Wirkungen definiert, die man unter anderem in Bewegungen oder Formänderungen beobachten kann. Eine Kraft ist vollständig beschrieben, wenn Betrag, Wirkungslinie und Richtungssinn bekannt sind. Diese Eigenschaften machen die Kraft zu einem sogenannten gebundenen Vektor. [20, 21]

Assmann und Selke [20] beschreiben die für Kräfte geltenden Lehrsätze:

#### **Gleichgewichtssatz**

Zwei Kräfte sind im Gleichgewicht, wenn sie gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sind und die gleiche Wirkungslinie (kollinear) besitzen.

**Reaktionssatz**

Kräfte treten immer paarweise als Aktions- und Reaktionskraft auf. Diese Kräfte sind gleich groß, entgegengesetzt und haben die gleiche Wirkungslinie.

**Verschiebungssatz**

Eine äußere Kraft darf entlang ihrer Wirkungslinie verschoben werden, ohne dass sich ihre Wirkung ändert.

Eine Kraft  $F$ , die einen Abstand  $d$  von ihrem Angriffspunkt zu einem bestimmten Bezugspunkt besitzt, erzeugt ein Drehmoment  $M$  auf einen Körper. Je länger der Abstand des Kraftangriffspunkts zum Bezugspunkt bzw. Drehpunkt ist, desto größer ist das Drehmoment und führt zu der Beziehung

$$M = F \cdot d, \quad (2.4)$$

wobei  $d$  der Wirkabstand senkrecht zum Kraftvektor ist und in der Ebene der Kraft liegt. Den Durchstoßpunkt der Drehachse durch die Ebene, in der die Kraft liegt, nennt man Pol [20].

Die bisher genannten Gleichungen sind nur für den ebenen Fall gültig. Zur Berechnung des allgemeinen Falls eines Kraftvektors im Raum mit einem beliebig gewählten Drehpunkt wird das Vektorprodukt herangezogen

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}. \quad (2.5)$$

Das Vektorprodukt bildet ein Rechtssystem. Der Richtungssinn eines Moments kann mittels der Rechten-Hand-Regel festgestellt werden. Der Daumen zeigt in Richtung des Hebelarms  $r$  und der Zeigefinger in Richtung der Kraft  $F$ , der Mittelfinger stellt dann die Richtung des Moments dar [22].

Wirken zwei gleich große Kräfte in entgegengesetzte Richtung bei paralleler Wirkungslinie, entsteht ein sogenanntes Kräftepaar [23]. Ein Kräftepaar erzeugt ein querkraftfreies Moment. Gesetzt den Fall, dass die Kraft  $F_1$  einen Hebelarm der Länge  $d_1$  und die Kraft  $F_2$  den Hebelarm der Länge  $d_2$  besitzt, wobei  $d_2 = d_1 - d$  ist, berechnet sich das Moment des Kräftepaars für den ebenen Fall zu

$$M = F_1 d_1 - F_2 d_2 = F d_1 - F(d_1 - d) = F d. \quad (2.6)$$

Aus der Gleichung wird ersichtlich, dass das Moment vom Drehpunkt unabhängig ist und sich nur aus dem Abstand der beiden Angriffspunkte errechnet [21]. Ein durch ein Kräftepaar erzeugtes Moment besitzt folgende kennzeichnende Eigenschaften. Es hat eine verschwindende Kräfteresultierende und ist damit die Verkörperung eines reinen Moments [20]. Es beeinflusst nicht die Kräftebilanz eines starren Körpers, wohl aber die Summe der Momente an einem Körper [20]. Darüber hinaus kann ein Kräftepaar mitsamt seiner Wirkungslinie parallel verschoben werden [20], man bezeichnet es daher gelegentlich auch als „freies Moment“, da das Moment unabhängig von der Lage des Pols ist [20].

Ein allgemeines räumliches Kräftesystem lässt sich immer auf eine resultierende Kraft und ein resultierendes Kräftepaar (Moment zu einem beliebigen Drehpunkt) reduzieren. Ein starrer Körper befindet sich dann im Gleichgewicht, wenn die resultierende Kraft und das resultierende Moment zu null werden [21]. Ein starrer Körper besitzt im Raum sechs Freiheitsgrade. Damit können in einem statisch bestimmten System genau sechs unbekannte Auflagerreaktionen ermittelt werden.

Wenn allerdings mehr oder weniger Auflagerreaktionen vorhanden sind, wird das System statisch unbestimmt und eine eindeutige Lösung ist nicht mehr möglich. Um dennoch eine Aussage über die unbekanntes Auflagerreaktionen zu erhalten, müssen die Belastungen im Körperinneren und die resultierenden Verformungen berücksichtigt werden.

Maßgebend für die Belastungen in einem Bauteil ist nicht die Größe der wirkenden äußeren Kraft, sondern die Verteilung der Kraft auf die Querschnittsfläche eines freigeschnittenen Körpers [21]. Eine auf die Flächeneinheit  $A$  bezogene Kraftgröße nennt man Spannung. Ist der Kraftvektor parallel zur Flächennormalen spricht man von einer Normalkraft und die resultierende Normalspannung ist definiert durch

$$\sigma = F_N/A. \quad (2.7)$$

Wenn die Flächennormale und der Kraftvektor in die gleiche Richtung weisen, wird die Normalspannung auch als Zugspannung bezeichnet. Im gegenteiligen Fall spricht man von einer Druckspannung.

Um die Verformung eines Bauteils unter Last zu ermitteln, wird zunächst der Begriff der Dehnung eingeführt. Wird ein Stab mit konstanter Querschnittsfläche und der Länge  $l$  durch eine Zugkraft belastet, tritt eine Längenänderung  $\Delta l$  auf. Die Dehnung errechnet sich in diesem einfachen Beispiel zu

$$\varepsilon = \Delta l/l \quad (2.8)$$

und ist dimensionslos. Wenn der Stab deformiert wird, erfahren die Querschnitte Verschiebungen, die mit  $u$  bezeichnet werden. Sie hängen vom Ort des Querschnitts ab:  $u = f(x)$ . Die lokale Dehnung ist somit die örtliche Ableitung der Verschiebung  $u$

$$\varepsilon(x) = \frac{du}{dx}. \quad (2.9)$$

Die Verschiebung und die Dehnung sind kinematische Größen und beschreiben die Geometrie der Verformung. [24]

Parallel zur Längsdehnung tritt bei einer Zugbelastung eines Stabes mit konstantem Querschnitt eine Querdehnung auf. Analog zur Längsdehnung definiert sich die Querdehnung als Dickenänderung pro Ursprungsdicke. Empirisch belegt ist, dass die Querdehnung  $\varepsilon_q$  proportional zur Längsdehnung ist [24]

$$\varepsilon_q = -\nu\varepsilon. \quad (2.10)$$

Das Verhältnis  $\nu$  von Längsdehnung zur Querdehnung wird als Poisson-Zahl bezeichnet. Für Metalle ist die Poisson-Zahl nahezu konstant und beträgt 0,3. Bekannter ist der Kehrwert der Poisson-Zahl, der als Querkontraktionszahl bezeichnet wird und für Stahl 0,3 beträgt.[23]

Ähnlich wie bei den Normalspannungen bewirken Schubspannung ebenfalls eine Verformung. Eine durch eine Schubspannung verursachte Verschiebung zweier Schnittufer um  $\Delta l$  wird über den Abstand  $l$  der Schnittufer zueinander normiert. Der Zusammenhang kann geometrisch interpretiert werden und bildet den Tangens des Schubwinkels  $\gamma$ . Da der betrachtete Abstand  $l$  gegenüber der Ausgangslänge  $l_0$  in der Regel sehr klein ist, gilt folgende Beziehung [23]

$$\tan \gamma \approx \gamma = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (2.11)$$

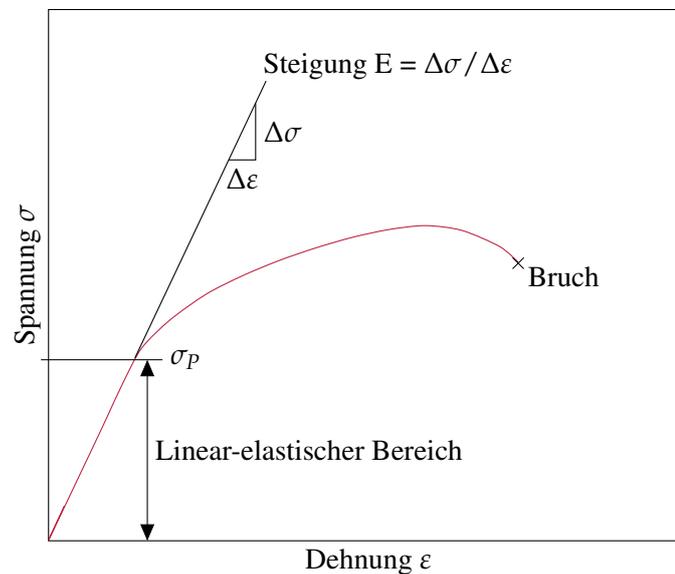


Abbildung 2.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm nach Hennecke et al. [25]

Unter Verzerrungen sind sowohl Dehnungen als auch Gleitungen zu verstehen und durch kinematische Beziehungen an die Verschiebungen geknüpft [24]. Um einen Zusammenhang zwischen Verzerrung und Spannungszustand zu erhalten, müssen die sogenannten Stoffgesetze herangezogen werden [24].

Abbildung 2.1 zeigt einen Spannungs-Dehnungsverlauf für eine Baustahlprobe in einem Zugversuch. Die Dehnungen steigen mit der Spannung zunächst linear an, bis die sogenannte Proportionalitätsgrenze  $\sigma_P$  erreicht wird. Eine Zugprobe, die unterhalb der Proportionalitätsgrenze belastet und danach wieder entlastet wird, nimmt ihre ursprüngliche Länge wieder an und die Dehnung wird null. Dieses Verhalten wird als elastisch bezeichnet und beschreibt einen Großteil der in technischen Anwendungen vorkommenden metallischen Werkstoffe. Für diesen linear-elastischen Bereich gilt das Hooke'sche Gesetz, das im Falle des obigen Zugversuchs wie folgt beschrieben werden kann [24]

$$\varepsilon = \frac{1}{E}\sigma. \quad (2.12)$$

$E$  ist eine Materialproportionalitätskonstante und wird als Elastizitätsmodul beschrieben. Ebenso gibt es für den Zusammenhang zwischen Schubspannung und Gleitung eine Materialkonstante namens Schubmodul  $G$ . Zwischen  $E$ ,  $G$  und  $\nu$  besteht ein Zusammenhang

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (2.13)$$

Zur Lösung statisch unbestimmter Probleme müssen die Gleichungen für Gleichgewicht, Kinematik und Elastizitätsgesetz gleichzeitig betrachtet werden [24].

### 2.2.2 Überblick zur Erfassung mechanischer Größen

Hering und Schönfelder [26] listen die angewandten physikalischen Prinzipien in der Kraftsensorik auf. Darunter fallen der piezoelektrische und der piezoresistive Effekt und die Messung über eine elektromagnetische Kraftwirkung oder einen Schwingkreis.

Für den piezoelektrischen Effekt werden zwingend nichtleitende Materialien, wie piezoelektrische Kristalle oder Keramiken, benötigt. Eine externe Kraft verschiebt das Kristallgitter, so dass eine Ladungstrennung entsteht und als Spannungsänderung messbar wird. Die Spannungsänderung ist proportional zur Kraft. Diese Umwandlung erweist sich als günstig, wenn schnelle periodische Kraftschwankungen gemessen werden sollen. Ein entscheidender Nachteil ist der prinzipbedingte Drift, da der Ladungsaustausch in langsamerer Form ohne Entlastung des Sensors auftritt [27].

Piezoresistive Sensoren arbeiten mit einem metallischen Leiter, der durch eine externe Kraft einer Verformung unterworfen wird. Die Verformung bewirkt eine spezifische Widerstandsänderung, die als Spannungsänderung proportional zur wirkenden Kraft messbar wird [26]. Die wichtigsten Vertreter piezoresistiver Sensoren sind die Dehnungsmessstreifen (DMS).

Zur Erfassung kleiner Kräfte findet das Prinzip der elektromagnetischen Kraftwirkung nur in spezifischen Messaufgaben Verwendung [26].

Bei dem Einsatz von Kraftaufnehmern als Transfer- oder Referenznormal für statische Messaufgaben werden bevorzugt piezoresistive Sensoren basierend auf der Technologie der Dehnungsmessstreifen verwendet.

Das VIM definiert ein Normal als „Realisierung der Definition einer Größe, mit angegebenem Größenwert und beigeordneter Messunsicherheit, benutzt als Referenz“ [15]. Darüber hinaus wird angemerkt, dass „ein Normal häufig als Referenz beim Ermitteln von Messwerten und beigeordneten Messunsicherheiten für andere Größen der gleichen Art benutzt [wird. Es] ... stellt dadurch metrologische Rückführbarkeit durch Kalibrierung anderer Normale, Messgeräte oder Messsysteme her“. Damit kommen auf Kraft- und Drehmomentnormale spezielle Anforderungen zu.

Zu den wichtigsten Vorteilen des DMS-Messprinzips gehören die Möglichkeit zur Kompensation von Störeinflüssen, eine hohe Genauigkeit bei vergleichbar geringen Kosten und ein großer realisierbarer Messbereich [28]. Besonders durch die Möglichkeit zur Kompensation von Temperatur-, Linearitäts- und Biegemomenteneinflüssen eignen sich DMS-basierte Aufnehmer zu Kalibrierzwecken [27]. Moderne Kraftaufnehmer erreichen sehr hohe Genauigkeiten (bis 200 ppm Einzelfehler), was den Einsatz als Referenznormal gegenüber anderen Sensoren begünstigt [27].

Für die Drehmomentsensorik können ebenfalls piezoelektrische und piezoresistive Effekte genutzt werden. Hinzu kommen noch magnetoelastische und optische Verfahren. Auch im Bereich der Drehmomentmesstechnik haben sich DMS-basierte Aufnehmer als Transfer- und Referenznormal durchgesetzt.

### 2.2.3 Grundlagen der Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen finden heute in vielen technischen Bereichen Verwendung und sind hervorragend zum Kraft- und Drehmomentaufnehmerbau geeignet. Ein entscheidender Vorteil von Dehnungsmessstreifen liegt in der Umwandlung einer Dehnungsmessung in eine elektrische Größe. Mittels der Wheatstoneschen Brückenschaltung können die Spannungsänderungen gemessen werden. Sie bieten darüber hinaus noch Möglichkeiten zur Kompensation von Störeinflüssen. [29]

Das grundlegende Prinzip eines DMS besteht darin, dass die an der Oberfläche eines Messobjekts stattfindende Dehnung direkt an einen elektrischen Leiter übertragen wird. Dehnungsmessstreifen gleichen sich mehr oder weniger im Aufbau. Auf eine Trägerfolie (Dicke: 25  $\mu\text{m}$ ) werden Metalldrähte geätzt (Dicke: 5  $\mu\text{m}$ ) und mit einer Abdeckschicht versiegelt (12 Dicke :  $\mu\text{m}$ ). Das Messgitter ist eine mäanderförmig verlaufende Leiterschleife, in deren Längsrichtung die höchste Empfindlichkeit bezüglich der Dehnung auftritt. DMS können durch diese Abmaße sehr kompakt gestaltet werden und finden auch bei begrenztem Bauraum Verwendung. Die Trägerfolie hat einerseits die Aufgabe, die Dehnung der Messobjektoberfläche unverfälscht auf das Messgitter zu übertragen. Andererseits sorgt der Träger für eine Isolierung des elektrischen Leiters zum Messobjekt. In den meisten Fällen kann der Träger mit einem Klebstoff auf die zu messende Stelle appliziert werden. Der häufigste Messgitterwerkstoff ist Konstantan. Die Hauptanforderung an den Werkstoff ist die Herstellung eines linearen und reproduzierbaren Zusammenhangs zwischen der mechanischen Dehnung und der Widerstandsänderung. Darüber hinaus soll die Hysterese so klein wie möglich gehalten werden. Die Abdeckschicht sorgt ebenfalls für eine Isolation und schützt die Leiterfolien vor äußeren Einflüssen, die ebenfalls eine Widerstandsänderung hervorrufen könnten. [29]

Die Empfindlichkeit des DMS beschreibt das Verhältnis von mechanischer Dehnung zur erzeugter Widerstandsänderung. Dieser Zusammenhang wird als k-Faktor zusammengefasst. Bei der Bestimmung geht man von einem schlanken Leiter mit dem Querschnitt  $A$  und der Länge  $l$  aus, dessen Widerstand  $R$  sich aus

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.14)$$

berechnet, wobei  $\rho$  den spezifischen Widerstand darstellt. Die Herstellerangaben zu einem k-Faktor beziehen sich meistens auf Raumtemperatur. Im linearen Bereich ist die Temperaturabhängigkeit  $\alpha_k$  des k-Faktors durch

$$\frac{\Delta k}{k} = \alpha_k \Delta T \quad (2.15)$$

beschrieben. Die Temperaturabhängigkeit des k-Faktors besitzt im Aufnehmerbau eine wichtige Rolle [29].

Bei langanhaltender Dehnung treten Relaxationseffekte im Trägerwerkstoff auf. Damit werden die Rückstellkräfte der Messgitter entspannt und dieser Effekt wird als Kriechen bezeichnet. Da das Kriechen besonders an den Übergangsstellen der Trägerfolien auftritt, macht sich der Effekt bei kürzeren DMS stärker bemerkbar. Eine Verringerung des Kriechens kann durch eine Umgestaltung der Übergangsstellen erfolgen. [30]

Die an DMS beobachtete Hysterese erfolgt immer unter Einbeziehung aller an der Messstelle beteiligten Komponenten (einschließlich der Abdeckung). Die Hysterese geht auf elastoplastische Verformung des Trägermaterials zurück, die bei Rückgang der Verformung auf null beim Messgitter eine bleibende Stauchung verursacht. Des Weiteren können Eigenspannungen an den DMS auftreten, die erst nach mehrmaliger Dehnung abgebaut werden.

## 2.2.4 Herleitung der Wheatstoneschen Brückengleichung

Die Wheatstonesche Brückenschaltung wurde vor etwa 200 Jahren von den Naturwissenschaftlern Samuel Hunter Christie und Charles Wheatstone entwickelt, um Widerstände bei instabiler Spannungsversorgung zu bestimmen.

Die Wheatstonesche Brückenschaltung ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Innerhalb dieser Schaltung sind vier Widerstände in einem Viereck angeordnet. Speist man eine Spannung an zwei gegenüberliegenden Eckpunkten, ergibt sich an den verbleibenden Eckpunkten eine Ausgangsspannung, die von der Eingangsspannung und von den Widerstandsverhältnissen abhängt. Sind alle vier Widerstände gleich, so wird die Ausgangsspannung null. Ändert sich ein Widerstand innerhalb der Schaltung, ergibt sich eine Änderung an der Ausgangsspannung, die auch Brückenverstimmung genannt wird. Dieser Effekt kann genutzt werden, um unbekannte Widerstände mit bekannten Widerständen zu vergleichen oder um eine Messgröße indirekt über die Widerstandsänderung in Relation zu setzen. Letzteres ist beim Messen mit Dehnungsmessstreifen der Fall, in dem die Dehnung an einem Bauteil mit einer Widerstandsänderung und der damit verbundenen Änderung der Ausgangsspannung in Bezug gesetzt wird. [29]

Die Herleitung der Wheatstoneschen Brückengleichung vereinfacht sich, wenn das Verhältnis von Brückenausgangsspannung  $U_M$  zur Brückenspeisespannung  $U_B$  verwendet wird.  $U_M$  ändert sich zu  $U_B$  proportional und zu Beginn der Herleitung werden die Widerstandsverhältnisse betrachtet [29]. Aus der Kirchhoffschen Maschenregel erhält man die Gleichung

$$\frac{U_M}{U_B} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4}. \quad (2.16)$$

In einer Brückenschaltung geht man in der Regel davon aus, dass alle Ausgangswiderstände zu Beginn gleich groß sind ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ). Die Widerstände der Schaltung können sich je nach Dehnung um einen kleinen Betrag  $R_i = \Delta R_i + R_i$  ändern. Die Änderung  $\Delta R_i$  ist gegenüber  $R$  sehr klein, so dass die vereinfachte Brückengleichung wie folgt abgebildet werden kann

$$\frac{U_M}{U_B} = \frac{1}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4). \quad (2.17)$$

Nach Hoffmann[31] ergibt sich die relative Änderung des Widerstands  $\Delta R/R$  aus der Bildung des totalen Differentials der Gleichung 2.14

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta d}{d}. \quad (2.18)$$

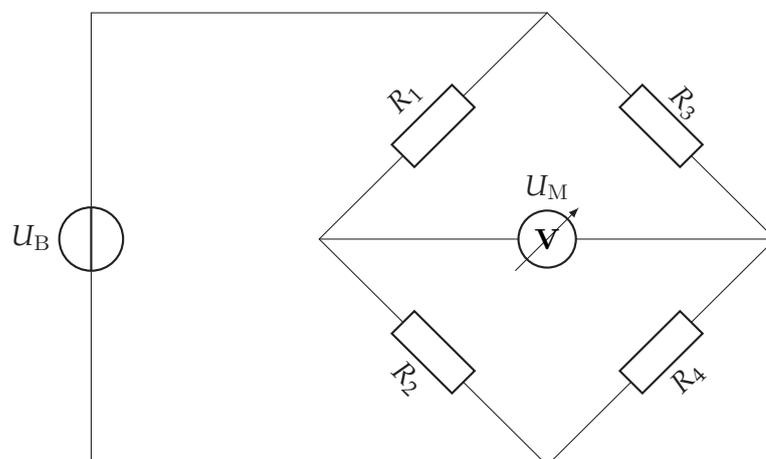


Abbildung 2.2: Schema der Wheatstoneschen Brückenschaltung

Normiert man die rechte Seite der Gleichung auf die Länge  $l$  ergibt sich die Gleichung

$$\frac{\Delta R}{R} = \underbrace{\left( \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} + 1 - 2 \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} \right)}_{k\text{-Faktor}} \cdot \underbrace{\frac{\Delta l}{l}}_{\varepsilon}. \quad (2.19)$$

Der Term  $\Delta l/l$  ist aus Gleichung 2.8 bekannt als Dehnung  $\varepsilon$ . Der Term in der Klammer vor der Dehnung ist konstant und wird als k-Faktor bezeichnet.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.20)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichung 2.20 und der Annahme, dass alle Brückenfaktoren  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$  gleich sind, kann die vereinfachte Brückengleichung Gleichung 2.17 auch in Abhängigkeit der Dehnung angegeben werden

$$\frac{U_M}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (2.21)$$

Wenn sich alle Widerstände gleichmäßig ändern, gibt es keine Auswirkungen auf die Ausgangsspannung. Dieser Effekt wird zur Kompensation von Störeinflüssen, insbesondere durch Temperaturschwankungen, ausgenutzt [29]. Eine erhebliche Verstärkung des Ausgangssignals wird erreicht, wenn Widerstandsänderungen benachbarter Zweige ein entgegengesetztes Vorzeichen besitzen. Im Aufnehmerbau ist es gängige Praxis, die gegenläufige Dehnung der gleichen Messgröße zu messen, um die Empfindlichkeit zu steigern. Ein Beispiel ist die Messung am Biegebalken auf der Zug- und Druckseite [29].

Die Gleichung 2.17 kann näherungsweise als linear betrachtet werden, insofern die Widerstandsänderung  $\Delta R_i$  im Vergleich zum Grundwiderstand  $R$  sehr klein ist [29]. Je nachdem wie viele Widerstände zur aktiven Messung der Dehnung beitragen, wird nach Viertel-, Halb- und Vollbrückenschaltung unterschieden.

Die unterschiedlichen Störeinflüsse, Fertigungstoleranzen der Komponenten und inhomogene Materialeigenschaften sorgen dafür, dass jede Brückenschaltung individuelle Kennwerte besitzt, die nur unzureichend berechnet werden können. Daraus folgt, dass jede Brückenschaltung kalibriert werden muss, um eine ausreichende Messgenauigkeit zu erzielen.

### 2.2.5 Messverstärker

Die bei Brückenschaltungen mit DMS typischen Ausgangsspannungen sind sehr klein, so dass eine nachgelagerte Einrichtung zur unverfälschten Verstärkung der Signale notwendig ist, um eine technische Verwertung zu ermöglichen, sei es zur Übertragung und/oder zur Anzeige der Signale. Die Anforderungen an einen solchen Verstärker werden durch das zeitliche Verhalten der Messgröße, die Anzahl der Messstellen und die weitere Messsignalverarbeitung bestimmt. Bei Messungen statischer Größen werden zusätzlich hohe Präzision und Langzeitstabilität gefordert [29].

Ein Messverstärker hat die Aufgabe, die angeschlossene Wheatstonesche Brückenschaltung mit einer Speisespannung zu versorgen und das analoge mV-Signal in den Voltbereich anzuheben. Die

erste Funktionseinheit ist die Erzeugung eines Kalibriersignals, um die korrekte Einstellung des Verstärkermessbereichs zu ermöglichen. Beim Nullabgleich kann vor allem bei selbst installierten DMS eine „Null“ gesetzt werden, da die Brücken meist nicht abgeglichen sind. Die Messbereichseinstellung stellt den Verstärkungsfaktor ein. Der Verstärkermessbereich wird durch einen Messbereichsendwert eingestellt. Erreicht ein Aufnehmer diesen Messbereichsendwert, führt das zur Vollaussteuerung des Verstärkers. Ein nachgeschalteter Tiefpass filtert überlagerte, höherfrequente Störungen aus. In der Endstufe wird ein analoges Ausgangssignal ausreichender Leistung zur Weiterverwertung versorgt. Ein Analog-Digital-Umsetzer digitalisiert das Signal und stellt es einem Rechner über ein Interface zur Verfügung [29].

Grundsätzlich stehen Messverstärker mit zwei verschiedenen Verfahren zur Verfügung: Gleichspannungs- und Trägerfrequenzverfahren. Beim Gleichspannungsverfahren erhält die Brückenschaltung eine stabile Gleichspannungsversorgung und gibt ein Gleichspannungssignal ab. Das Trägerfrequenzverfahren speist die Brückenschaltung mit einer Wechselspannung, dessen Frequenz und Amplitude stabilisiert sind. Der Ausgang ist entsprechend auch eine Wechselspannung [29].

Beim Trägerfrequenzverfahren werden nur Störsignale zugelassen, die im Bereich der Trägerfrequenz liegen. Übliche Frequenzen sind Nichtvielfache von 50 Hz (bspw. 225 Hz). Thermospannungen an Lötstellen oder Gleichspannungsstörungen werden somit vollständig unterdrückt. Trägerfrequenzmessverstärker haben ein kleineres thermisches Grundrauschen als Gleichspannungsverstärker, so dass eine höhere Auflösung möglich ist.

Gleichspannungsverstärker können gleichphasige Störungen, wie etwa elektromagnetische Felder, vollständig unterdrücken (Gleichtaktunterdrückung). Gegenphasige Einstreuungen, wie magnetische Felder, werden ungebremst zugelassen. Ebenso können Netzimpulse oder Impulsspannungen in Messleitungsnähe zu Störquellen werden. Auch Thermospannungen und galvanische Spannungen können beim Gleichspannungsverfahren zum Problem werden [29].

Liegt die Frequenz einer Messgröße unterhalb der Grenzfrequenz eines Trägerfrequenzverstärker, sollte einem Trägerfrequenzverfahren gegenüber dem Gleichspannungsverfahren der Vorzug gegeben werden.

## 2.3 Drehmoment-Normalmesseinrichtungen

### 2.3.1 Rückführungen von Drehmomentsensoren

Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben ist zur Rückführung auf das nationale Normal eine dokumentierte, unterbrochene Kette von Kalibrierungen und deren Messunsicherheiten erforderlich. Zur Rückführung von Drehmomentsensoren werden diese in sogenannten Drehmomentnormalmesseinrichtungen kalibriert.

Die einfachste Messkette besteht aus einem Aufnehmer, einem Messumformer und einer Signalauswerteeinheit (siehe Abschnitt 2.1.2). Bei einer Messung mit DMS ist die Brückenschaltung am Messobjekt der Aufnehmer für die Dehnung. Der Messverstärker bildet den Messumformer, der das Signal von der mV-Ebene auf die V-Ebene zur Weiterverarbeitung anhebt. Die Signalauswertung geschieht heutzutage meistens am Rechner.

Die Messung ist nur dann valide, wenn der am Ende der Messkette stehende Messwert in Betrag, Vorzeichen und Einheit mit der zu messenden Größe in Korrelation steht und diese Informa-

tion dem Anwender zur Verfügung gestellt wird [29]. Um den Zusammenhang zwischen Messwert (mV/V-Signal) und Messgröße (Dehnung  $\epsilon$  am Messobjekt) zu erhalten, ist eine Kalibrierung notwendig.

Die DIN 1319-1 [17] definiert die Kalibrierung als „einen Messprozess zur Feststellung und Dokumentation der Abweichung von Anzeigewerten eines Messgerätes oder einer Maßverkörperung gegenüber denjenigen von einem anderen Gerät oder einer anderen Maßverkörperung, die in diesem Fall als Normal bezeichnet werden“. Der VIM [15] erweitert die Definition und schreibt vor, die Korrelation zwischen Anzeigewert und Messgröße anzugeben.

Bei der vorliegenden Messkette mit DMS-basierten Aufnehmern ist es sinnvoll, die Messkette als Einheit so zu kalibrieren, wie sie im Einsatz ist, um mögliche Unsicherheitseinflüsse durch den Austausch von Komponenten der Messkette zu vermeiden. In der Praxis wird der Aufnehmer mit seiner bestimmungsgemäßen mechanischen Größe belastet, wie etwa einer Kraft oder einem Drehmoment. Anschließend wird der Anzeigewert am Ende der Messkette (meist das mV/V-Signal) des Aufnehmers mit dem eines im Kraft-/ Momentenfluss integrierten Präzisionsmessgerät (Transfernormal) oder mit einer Messeinrichtung (Primärnormal) verglichen.

Die Kennlinie eines Aufnehmers wird durch verschiedene Störeinflüsse verändert. Wie in Abschnitt 2.1.2 erwähnt, wird für den Abgleich einer Kennlinie zwischen der multiplikativen und additiven Anpassung unterschieden. Zum Abgleich werden verschiedene Einflüsse berücksichtigt. Dazu gehören die Konstanz des Nullsignals, der Temperatureinfluss, die Empfindlichkeit, die Reproduzierbarkeit und die Hysterese [29].

Zur Durchführung der Kalibrierungen existieren Drehmomentnormalmesseinrichtungen in unterschiedlichen Ausführungen. Die Klassifizierungen und zwei Messeinrichtungen an der PTB werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

### 2.3.2 Aufbau von Drehmoment-Normalmesseinrichtungen (D-NME)

Es wird bei Drehmomentnormalmesseinrichtungen eine Unterscheidung zwischen unbewegten und rotatorischen sowie statischen und dynamischen Momenten getroffen. Die für diese Arbeit relevanten Einrichtungen beschränken sich auf das statische und unbewegte Drehmoment. In diesem Fall werden Drehmomentnormalmesseinrichtungen nach Direktbelastungsanlagen, Referenzdrehmomentmaschinen und kraftmessenden Einrichtungen unterschieden [32]. Für Schraubwerkzeuge und Drehmomentschlüssel existieren gesonderte Bauformen.

Direktbelastungseinrichtungen zählen wie bei den Kraftmesseinrichtungen zu den genauesten Anlagen. Ein drehbar gelagerter Hebel mit definierter Länge wird mit kalibrierten Massen durch deren Gewichtskraft belastet. Luftlagerungen für den Hebel bieten minimale Reibmomente und die Gewichtskräfte sind langfristig stabil, was die hohe Genauigkeit erklärt und relative Messunsicherheiten bis  $2 \cdot 10^{-5}$  ermöglicht. An der PTB existieren Direktbelastungseinrichtungen von  $1 \text{ mN}\cdot\text{m}$  bis  $20 \text{ kN}\cdot\text{m}$ .

Referenzdrehmomentanlagen sind weniger aufwändig zu konstruieren und häufig im industriellen Einsatz zu finden. Eine Referenzanlage verwendet einen kalibrierten Drehmomentaufnehmer als Normal. Das Normal und der zu kalibrierende Aufnehmer werden mechanisch in Reihe geschaltet und mit dem gleichen Drehmoment belastet. Hier spricht man von einem Vergleichsver-



(a) 1 kN·m-D-NME



(b) 1,1 MN·m-D-NME

Abbildung 2.3: Beispiele für Drehmoment-Normalmesseinrichtungen an der PTB

fahren. Die PTB besitzt solche Einrichtungen von  $0,01 \text{ N}\cdot\text{m}$  bis  $5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ . Die erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) geht bis  $2 \cdot 10^{-4}$ .

Für größere Drehmomente sind die technischen und finanziellen Hürden für Direktbelastungseinrichtungen sehr hoch. Eine kraftmessende Einrichtung stellt einen Kompromiss hinsichtlich Messunsicherheit und Kosten dar. Zwei Antriebe erzeugen über einen Antriebshebel ein Drehmoment, das in den Kalibriergegenstand eingeleitet wird. Von dort aus wird das Moment in einen Messhebel geleitet, an dessen Ende die Hebelkräfte mit Referenzkraftaufnehmern gemessen werden können. Hierbei ist es wichtig, die Lage des Messhebels so einzustellen, dass Querkräfte und Biegemomente vermieden werden. Damit kann auf größere Belastungsmassen verzichtet werden. Ein Kräftepaar wird direkt erzeugt und die Lagerung entfällt. Die Messunsicherheit liegt bei Verwendung von Präzisionskraftaufnehmern bei  $0,1\%$ . [32]

### 2.3.3 Beispiele

#### 1 kN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung

Die  $1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ -Drehmoment-Normalmesseinrichtung der PTB ist ein luftgelagertes Hebel-Masse-System und in Abbildung 2.3a dargestellt. Durch den Einsatz von kalibrierten Massescheiben wird es als Direktbelastungseinrichtung klassifiziert. Die Messeinrichtung deckt einen Drehmomentbereich von  $100 \text{ N}\cdot\text{m}$  bis  $20 \text{ kN}\cdot\text{m}$  ab. Die Einrichtung erreicht eine erweiterte relative Messunsicherheit von  $2 \cdot 10^{-5}$  [33].

#### 1,1 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung

Die  $1,1 \text{ MN}\cdot\text{m}$ -Drehmoment-Normalmesseinrichtung der PTB ist in Abbildung 2.3b dargestellt. Die Messeinrichtung deckt Bereiche größerer Drehmomente von  $220 \text{ kN}\cdot\text{m}$  bis  $1,1 \text{ MN}\cdot\text{m}$  ab. Die

Drehmomentachse ist vertikal ausgerichtet. Im unteren Teil befindet sich die Antriebsseite der Einrichtung. Das Moment wird über zwei Elektromotoren erzeugt. Diese bringen eine Kraft über eine Spindel auf einen zweiseitigen Hebel auf und übertragen das Moment auf den Kalibriergegenstand. Das Moment wird im oberen Teil der Anlage durch ein kraftmessendes Hebelsystem erfasst. Dazu sind an einem zweiseitigen Hebel zwei Kraftaufnehmer angebracht. Die Einrichtung erreicht eine erweiterte relative Messunsicherheit von  $1 \cdot 10^{-3}$  im Bereich von 20 kN·m bis 100 kN·m und  $8 \cdot 10^{-4}$  im Bereich von 100 kN·m bis 1,1 MN·m [34].

# 3 Aufbau der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung

Die 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung soll das nationale Normal der Bundesrepublik Deutschland für die Größe Drehmoment im Bereich 1,1 MN·m bis 5 MN·m darstellen. Eine Übersicht ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Die Messeinrichtung wurde bereits bei der Konstruktion für eine Bereichserweiterung auf 20 MN·m vorbereitet. Die Messeinrichtung wurde bereits in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben [35, 36, 37, 38]

Die Anlage ist als kraftmessende Drehmomenteinrichtung klassifiziert, deren Rückführung über die Drehmoment-Referenzkraftaufnehmer (DM-Referenzkraftaufnehmer, siehe Abb. 3.1) realisiert wird. Der Drehmomentvektor ist horizontal orientiert und ein Aktorhebel erzeugt mit servohydraulischen Antrieben (DM-Servozyylinder, siehe Abb. 3.1) ein Kräftepaar für ein querkraftfreies Drehmoment. Für weitergehende Untersuchungen kann das Drehmoment mit einer Axialkraft oder einem Biegemoment über horizontale Biegemoment-Servozyylinder (BM-Servozyylinder, siehe Abb. 3.1) überlagert werden. In der aktuellen Ausbaustufe ist eine Axialkraft bis 400 kN, ein Biegemoment um die x-Achse bis 600 kN·m und ein Biegemoment um die y-Achse bis 900 kN·m möglich. Perspektivisch sollen nach einer Umrüstung der Maschine auch dynamische Drehmoment überlagerungen mit einer maximalen Amplitude von 100 kN·m und einer maximalen Frequenz von 3 Hz gemessen werden können.

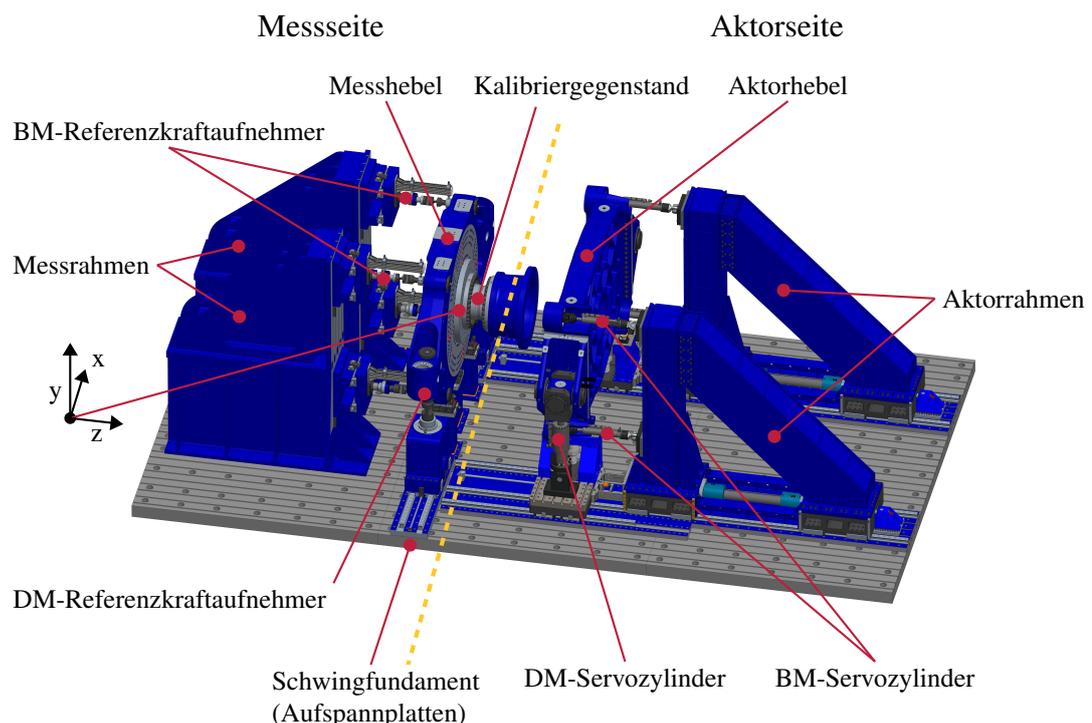


Abbildung 3.1: Übersicht der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung.

Die Messeinrichtung gliedert sich in die Bereiche Schwingfundament, Aktorseite (Aktorhebel, Aktorraahmen und Servozyylinder, siehe Abb. 3.1) und Messseite (Messrahmen, Messhebel und Referenzkraftaufnehmer, siehe Abb. 3.1). Der Kalibriergegenstand wird zwischen Aktor- und Messseite eingebaut (siehe Abb. 3.1). Das globale Koordinatensystem der Messeinrichtung ist in Abbildung 3.1 links eingezeichnet. Die rote Linie zeigt auf den Koordinatenursprung im Mittelpunkt des Messhebels. Normal zur Messhebelflanschfläche verläuft die z-Achse. Die z-Achse ist positiv in Richtung der Aktorseite (siehe Abb. 3.1). Diese Achse bildet die Drehachse des Kalibrierdrehmoments. Die y-Achse befindet sich senkrecht dazu und verläuft parallel zum Erdschwerefeld. Zusammen mit der entsprechend orientierten x-Achse spannen die Achsen ein rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem auf. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten detailliert ausgeführt.

### 3.1 Schwingfundament

Die Messeinrichtung befindet sich auf dem PTB-Gelände in direkter Nachbarschaft zu hochempfindlichen Messeinrichtungen. Um diese vor Vibrationen zu schützen, wurde die Anlage auf einem Schwingfundament errichtet, das aus einer seismischen Masse von 1629 t besteht. Die gesamte Abmessung des Fundaments beträgt 17 m x 9 m. Das Fundament ist auf 60 Luftfedern gelagert (siehe Abb. 3.2, vergleiche Abb. 3.1 Bereich unter Aufspannplatten). Drei Luftfedersysteme steuern die Neigung in einer Drei-Punkt-Auflage über Lagesensoren. Die Luftfedern können bei Bedarf ihren Druck ändern, um die Neigung und Position des Fundaments zu regulieren. Durch die Änderung des Betriebsdrucks ist eine Änderung zwischen zwei Resonanzfrequenzen möglich, abhängig vom Kalibrierbetrieb. Die Oberfläche des Fundaments wurde mit insgesamt 27 T-Nutenaufspannplatten versehen. Zwei Nuten an den Außenseiten dienen als Referenznuten mit einer Geradheitsabweichung von weniger als 80 µm auf 17 m Länge. Diese Nuten sind die Ausrichtbezüge beim Aufbau der Messeinrichtung. Die Ebenheitsabweichung der gesamten Oberfläche beträgt weniger als 0,1 mm.

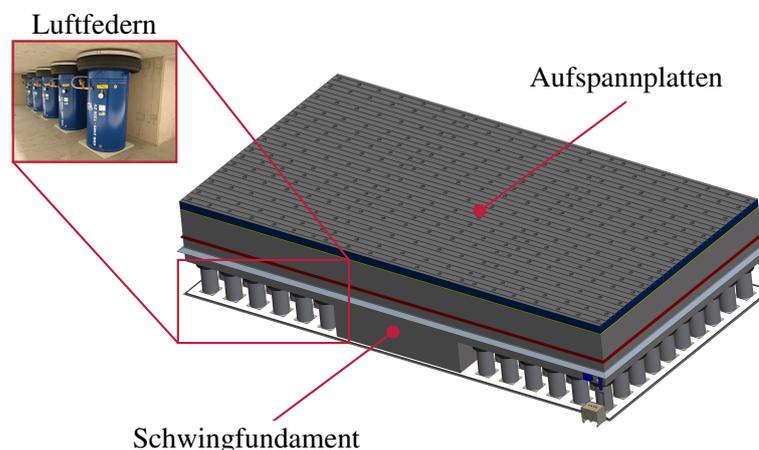


Abbildung 3.2: Aufbau des Schwingfundaments

## 3.2 Aktorseite

Die Aktorseite besteht aus den Aktoren, dem Aktorhebel und dem Aktorraahmen (siehe Abb. 3.1 auf der rechten Seite und Abb. 3.3). Die Aktoren erzeugen die Kräfte, mittels des Aktorhebels werden die Aktorkräfte in Momente umgewandelt bzw. zur Axialkraft zusammengefasst und in den Kalibriergegenstand eingeleitet (siehe Abb. 3.4). Der Aktorraahmen stützt die Aktorkräfte in globaler z-Richtung ab.

Die Aktoren bestehen aus acht doppeltwirkenden Gleichgangzylindern mit Servoventilen. Zwei vertikale Servozylinder mit einer Nennkraft von 1200 kN werden als Drehmomentzylinder bezeichnet (DM-Zylinder, siehe Abb. 3.5 und Abb. 3.4). Diese greifen am Aktorhebelende an und erzeugen ein Kräftepaar für ein querkräftfreies Drehmoment. Vier horizontale Servozylinder mit einer Nennkraft von 100 kN ermöglichen ein Biegemoment um die x- und y-Achse (BM-Zylinder, siehe Abb. 3.4). Deren Befestigungspunkte am Aktorhebel spannen ein Rechteck von 4,5 m Breite in x-Richtung und 3 m Höhe in y-Richtung auf. Zur besseren Positionierung und zur Vermeidung von unerwünschten Querkräften sind auf der Unterseite des Hebels zwei entgegengesetzte Servozylinder parallel zur x-Richtung angebracht, ebenfalls mit einer Nennkraft von 100 kN (QK-Zylinder, siehe Abb. 3.4).

Der Aufbau aller verwendeten Servozylinder unterscheidet sich je nach Kategorie durch Nennkraft, Kolbenstangenlänge und Gelenk. Die Volumenströme in und aus den Zylinderkammern werden durch ein MOOG D761-Servoventil gesteuert. Die Zylinder werden durch ein Hydraulikaggregat aus einem benachbarten Raum mit einem Betriebsdruck von 250 bar versorgt. Alle Zylinder sind gedichtet und können den Druck mit minimaler Leckage halten. Die rahmenseitigen Gelenke aller Zylinder bestehen aus einem Kugelkopfgelenk mit einstellbarem Spiel. Die Querkraft-Servozylinder (QK-Servozylinder) besitzen zusätzlich zu den rahmenseitigen Kugelkopfgelenken baugleiche Gelenke an der Hebelseite. Die BM-Zylinder haben zur Reduktion der Reibung hebelseitig Kardangelenke mit Wälzlagern. Die Kopfgelenke der DM-Zylinder sind kardanisch und mit Wälzlagern ausgeführt. Diese Gelenke sind eine PTB-eigene Konstruktion zur kompakten Anbindung an den Aktorhebel. Jeder Aktor verfügt über einen Kraftaufnehmer zur Überwachung der erzeugten Zylinderkraft.

Der Aktorraahmen besteht aus zwei separaten Zügen, deren äußere Streben ein Dreieck bilden. Dieser Maschinenrahmen dient maßgeblich dazu, die Kräfte der BM-Zylinder in z-Richtung aufzunehmen und in das Fundament zu leiten. Um genügend Montage- und Einbauräumlichkeiten zu ermöglichen, ist der Aktorraahmen verfahrbar. Die beiden Aktorraahmenzüge sind auf vier Sockeln gelagert, die an ein Linearführungssystem gekoppelt sind. Zwei synchron gesteuerte Servomotoren bewegen die gesamte Aktorseite. Das Linearführungssystem ist auf einem Führungsbett installiert, das zu den im Abschnitt 3.1 erwähnten Referenznuten ausgerichtet ist. Im Kalibrierbetrieb sorgen vier hydraulische Feststelleinheiten mit zwei Kolbenstangen für eine Klemmung des Aktorraahmens, die über ein Gegenlager mit dem Führungsbett verbunden sind. Die DM- und QK-Zylinder werden über ein gesondertes Drehmomentgegenlager abgestützt.

Der Aktorhebel nimmt sämtliche Kräfte der Zylinder auf und überträgt daraus resultierende Kräfte und Momente auf den Kalibriergegenstand. Der Abstand der Drehmomentzylinder zueinander beträgt sechs Meter.

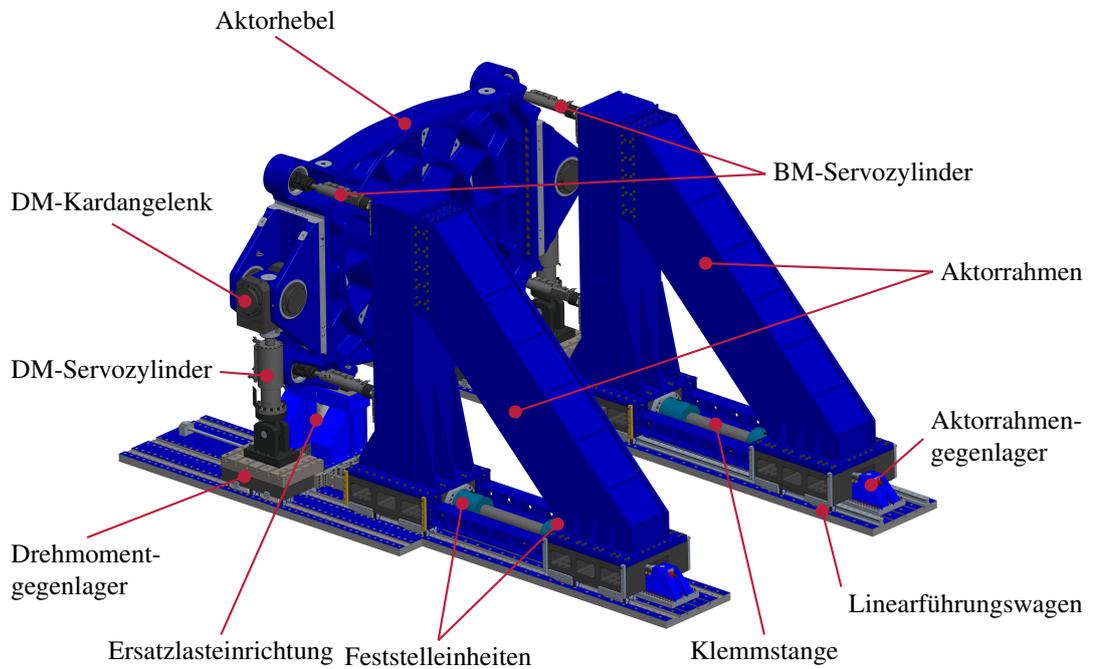


Abbildung 3.3: Aktorseite einschließlich Aktorrahmen, Aktorhebel und Aktoren (Zylinder). Der Aktorhebel ist von hinten zu sehen.

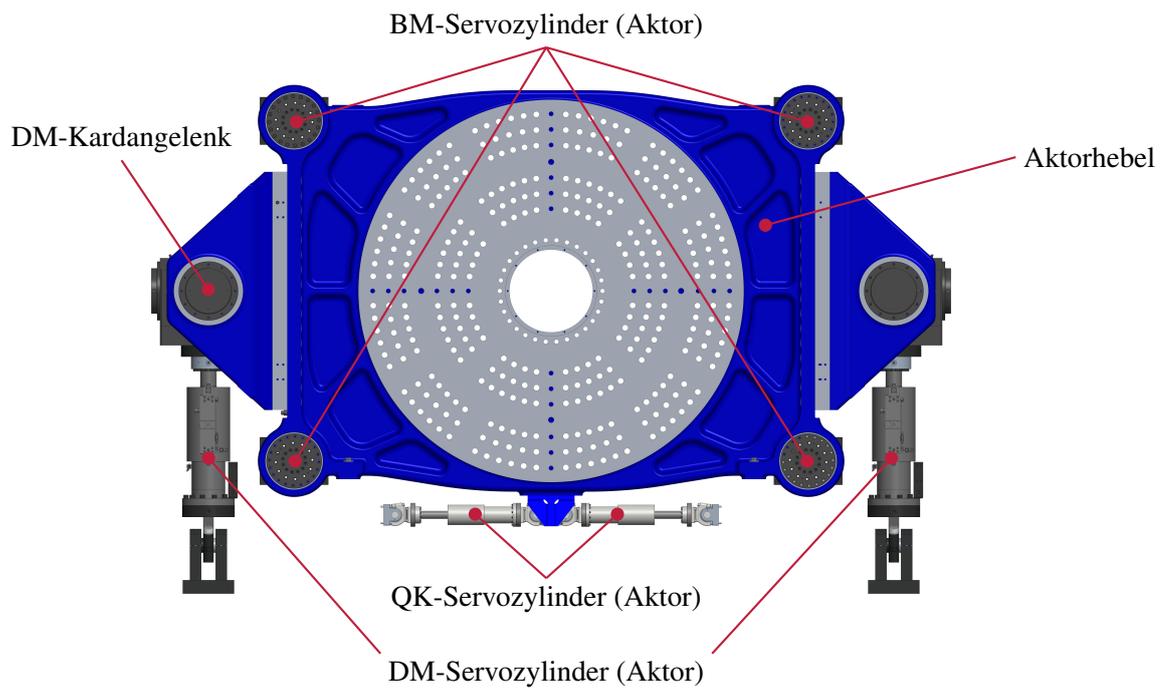


Abbildung 3.4: Vorderansicht des Aktorhebels mit Aktoren

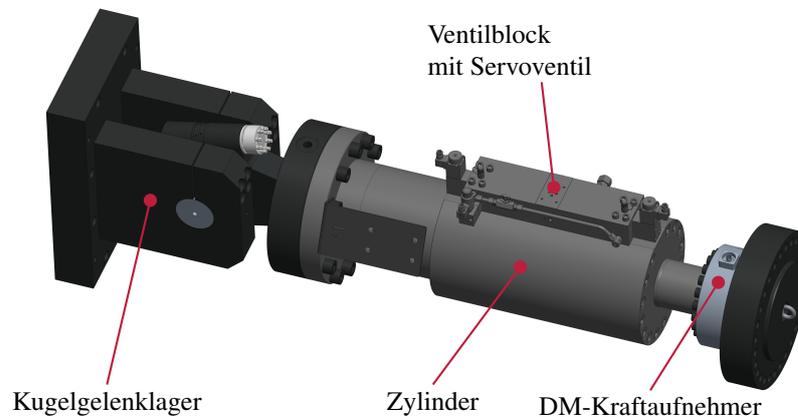


Abbildung 3.5: Drehmoment-Servozyylinder mit Anbindungselementen (DM-Servozyylinder)

### 3.3 Messeite

Die Messeite beinhaltet die Gruppen Messstränge, Messhebel und Messrahmen (siehe Abb. 3.1 auf der linken Seite und Abb. 3.6). Die Messstränge messen die resultierenden Hebelkräfte mit den integrierten Referenzkraftaufnehmern. Der Messhebel nimmt die Momente und Kräfte aus dem Kalibriergegenstand auf und leitet diese zu den Messsträngen weiter (siehe Abb. 3.7). Der Messrahmen stützt die Messstränge ab.

Bei den Messsträngen wird zwischen den Biegemoment-Messsträngen (BM-Messstrang, siehe Abb. 3.8) normal zur Messhebelebene und den Drehmoment-Messsträngen (DM-Messstrang, siehe Abb. 3.9) in der Messhebelebene unterschieden.

Ein wichtiges Bauteil der Messstränge sind die Festkörpergelenke, die einfache oder zweifache rotatorische Freiheitsgrade mit geringen und reproduzierbaren Rückstellkräften ermöglichen. Die Gelenke, auch Biegefeder (BF) genannt, ermöglichen die Freiheitsgrade durch die halbkreisförmige Verjüngung des Querschnitts zu beiden Seiten. Aufgrund der Mehrkomponentenbelastungen sind zwei Paare der Halbkreisaussparungen hintereinander angesetzt, wobei die Achsen der Halbkreisaussparungen orthogonal zueinander angeordnet sind. Die Festkörpergelenke ermöglichen die Bewegung eines Körpers innerhalb eines Freiheitsgrads ohne den Einfluss von Reibung. Die Verjüngung wirkt sich nachteilig auf die Festigkeit des Gelenks aus und die Gelenke erlauben nur geringe Verschiebungen. Die Reaktionskräfte und -momente resultierend aus den Kalibrierlasten überschreiten den linearelastischen Bereich nicht und sind im Gegensatz zu Reibkräften gut reproduzierbar.

Die zwei vertikalen DM-Messstränge besitzen eine Biegefeder mit zweifachem Rotationsfreiheitsgrad auf der Hebelseite und mit einfachem Rotationsfreiheitsgrad auf der Gegenlagerseite. Die Messstränge sind am Hebel über einen Flansch verschraubt, während das Gegenlager mit einer Kugelschale/Kugelmutter-Kombination eine biegemomentfreie Ausrichtung ermöglicht. Die vier horizontalen BM-Messstränge besitzen je eine Biegefeder mit zweifachem Rotationsfreiheitsgrad. Zusätzlich ist rahmenseitig eine Eigengewichtskompensation installiert. Diese sorgt für eine orthogonale Ausrichtung zur Messhebelebene entlang des gesamten Messstrangachsenverlaufs. Zum einen werden durch die Eigengewichtskompensation Fluchtungsfehler des Aufnehmers zur Hebel-

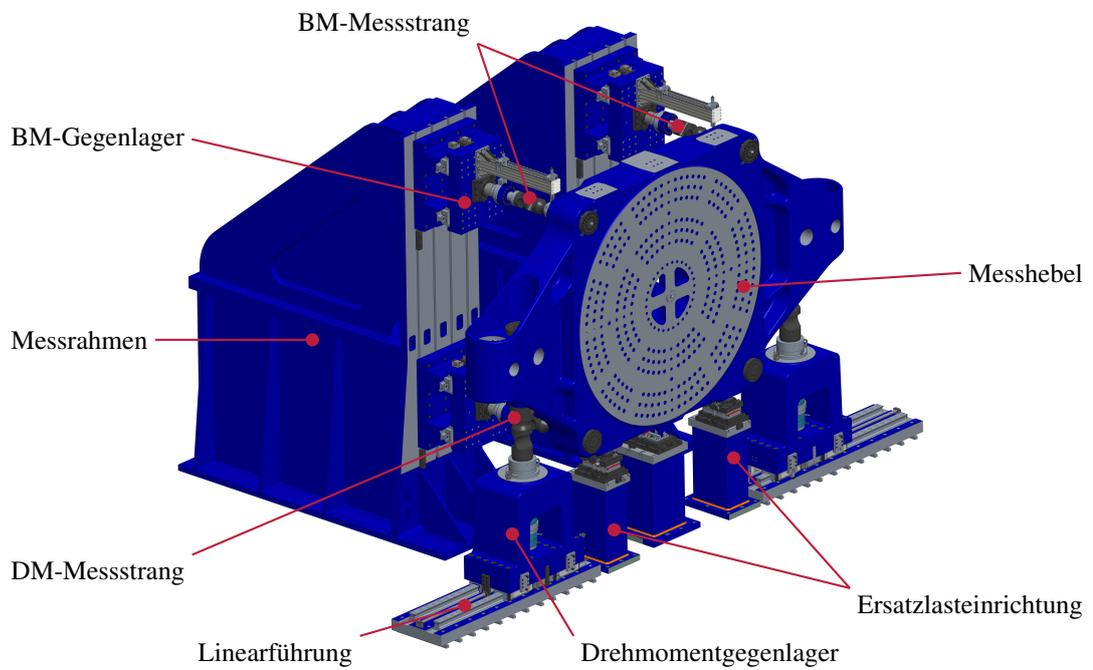


Abbildung 3.6: Messseite mit Messrahmen, Messhebel und Messsträngen

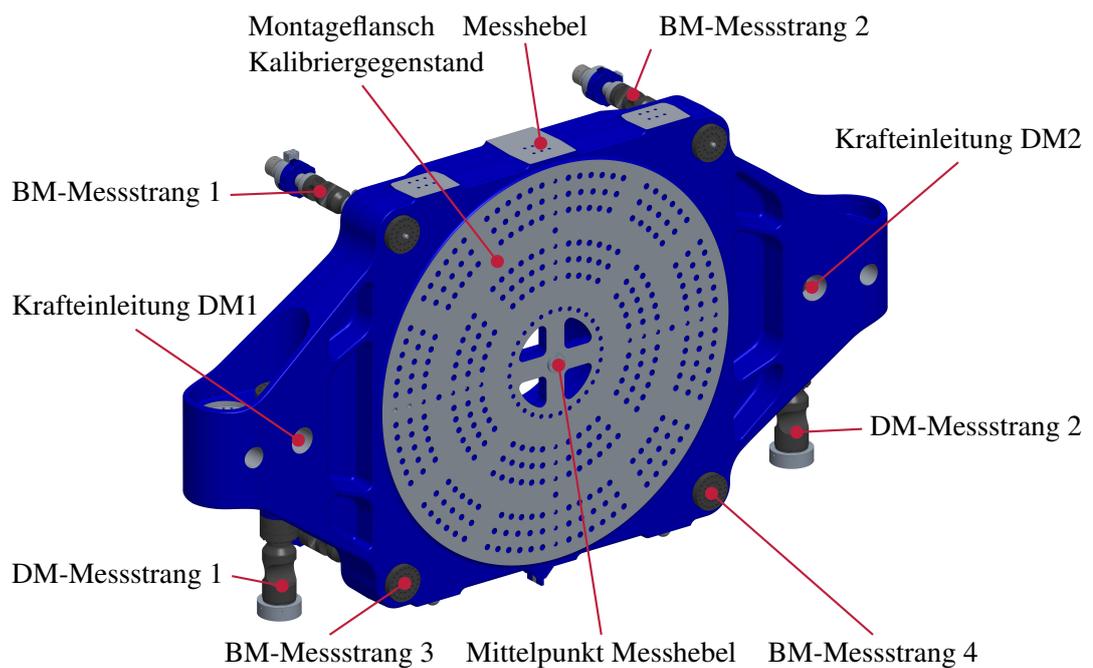


Abbildung 3.7: Messhebel mit Drehmoment- und Biegemoment-Messsträngen

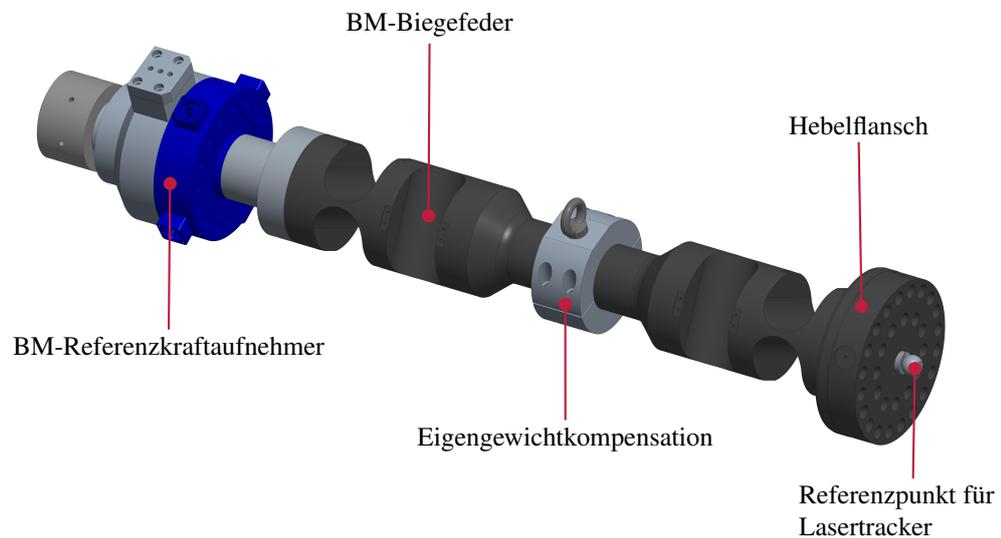


Abbildung 3.8: Biegemoment-Messstrang

kraftmessung vermieden und zum anderen werden Querkräfte zur Erhöhung der Bauteilfestigkeit kompensiert.

Die Referenzkraftaufnehmer sind Zug- und Druckkraftaufnehmer der Firma INTERFACE und arbeiten nach dem Scherkraftprinzip [39]. Diese Aufnehmer zeichnen sich durch eine kompakte und steife Bauweise aus. Für die DM-Messstränge werden Aufnehmer des Typs 1258 mit einer Nennkraft von 1200 kN und für die BM-Messstränge des Typs 1248 mit einer Nennkraft von 500 kN verwendet. Zusammen mit dem Hebel bilden die DM-Referenzkraftaufnehmer das Primärnormal, das zur Kalibrierung herangezogen wird. Die Referenzkraftaufnehmer werden in den PTB-internen Kraftmesseinrichtungen kalibriert und somit auf die nationalen Normale rückgeführt.

Der Messhebel ist ein Gussbauteil mit einem Gewicht von 30,4 t. Der Kalibriergegenstand ist am Flansch mit dem Messhebel verbunden und leitet die Kalibrierlasten der Aktorseite in den Messhebel. Im statischen Momentengleichgewicht wirken bei einem eingeleiteten Drehmoment hauptsächlich die Zug- bzw. Druckkräfte am Messhebelende. Durch die zusätzlichen BM-Messstränge entstehen Kraft- und Momentnebenschlüsse.

Der Messrahmen stützt die Axialkräfte der BM-Messstränge ab und leitet diese ins Schwingfundament. Die DM-Messstränge werden mit einem Gegenlager befestigt und ausgerichtet. Das DM-Gegenlager kann auf einem Linearführungssystem mit einem Servomotor bewegt werden, um den Ausbau des Messstrangs und damit die Rekalibrierung der Referenzkraftaufnehmer zu ermöglichen.

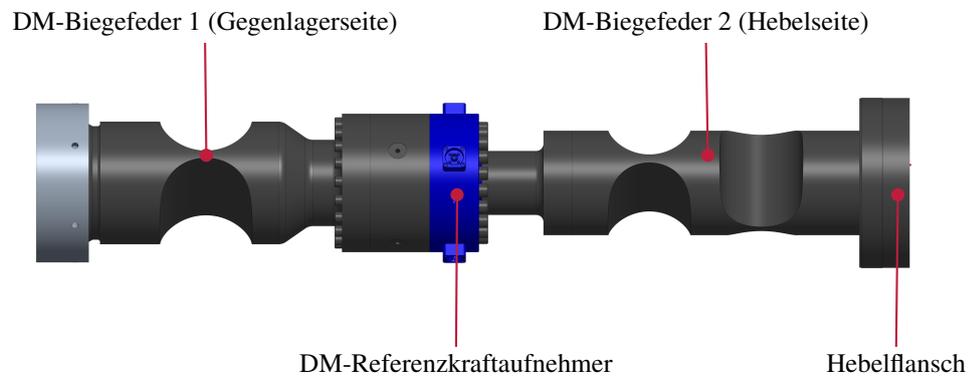


Abbildung 3.9: Aufbau eines Drehmoment-Messtrangs bestehend aus Biegefedern und Referenzkraftaufnehmer

### 3.4 Kalibriergegenstand

Es können verschiedene Kalibriergegenstände in der Messeinrichtung kalibriert werden. Der in dieser Arbeit zur Kalibrierung verwendete Aufnehmer ist ein Messflansch der Firma HBK (ehemals HBM, siehe Abb. 3.10). Der Aufnehmer ist eine Sonderanfertigung mit einem Nennmoment von  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$  und wird durch zwei  $M_z$ -Messbrücken gemessen [40]. Zusätzlich können Biegemomente um die  $x$ - und  $y$ -Achse sowie Axial- und Querkräfte erfasst werden. Der Aufnehmer

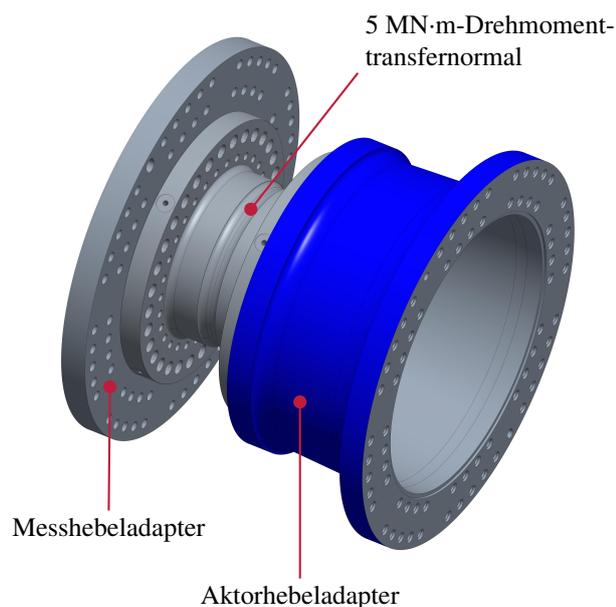


Abbildung 3.10: Baugruppe des Kalibriergegenstands mit  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$ -Drehmomenttransfornormal und Gussadaptern

ist so dimensioniert, dass er für eine Vergleichsmessung sowohl in der 1,1 MN·m- als auch der 5 MN·m-Messeinrichtung kalibriert werden kann. Da die 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung einen weiten Drehmomentbereich abdecken soll, gibt es große Differenzen zwischen den Teilkreisdurchmessern des Hebels und des Aufnehmers. Aus diesem Grund befindet sich zwischen Aufnehmer und Aktorhebel bzw. Messhebel ein Gussadapter, um die Differenz der Teilkreisdurchmesser zu überwinden.

### 3.5 Steuerung und Regelung

Die Entwicklung der Steuerung und Regelung wurde extern an den servohydraulischen Prüfmaschinenhersteller WALTER UND BAI AG vergeben. Ziel der Regelung ist es, eine statische Last für eine Minute mit einer Toleranz von 0,1 % zu halten. Dadurch ist eine Vorgabe einer konkreten Trajektorie nicht notwendig.

Jeder Servozylinder kann mit der Kraft oder mit dem Weg als Regelgröße geregelt werden. Dafür verfügt der Servozylinder über einen Kraftaufnehmer an der Kolbenstange (gleiche Bauart wie auf der Messseite, siehe Abs. 3.3) und einen magnetostriktiven Wegaufnehmer am Kolben. Die Zylinderkraft oder die Kolbenposition wird über den Volumenstrom am Servoventil gesteuert.

Das Servoventil erhält sein Stellsignal aus den Regelgeräten PCS8000 der Firma WALTER UND BAI, auch Controller genannt. Diese Controller können verschiedene digitale und analoge Signale (DMS-Messbrücken, Wegsignale) verarbeiten und synchronisieren sich mit einer Taktfrequenz bis zu 14 kHz mit anderen PCS8000. Die Eingangssignale können entweder direkt als Sollwerte für das analoge Ausgangssignal verwendet oder mathematisch weiter verarbeitet und in virtuellen Kanälen für die Regelung zur Verfügung gestellt werden.

Die Einstellung der Kalibrierlasten in sechs globalen Freiheitsgraden wird über die Definition von acht verschiedenen Regelkreisen erreicht. Für jede globale Last, die in einer Laststufe vorgegeben wird, sind bestimmte Aktoren zugeordnet. Tabelle 3.1 zeigt die Zuordnung. Bei der Zuordnung des Aktors zu einer globalen Regelgröße muss beachtet werden, dass eine positive Änderung der Zylinderkraft ebenfalls eine positive Änderung der Regelgröße zur Folge hat. Die Zylinder, die eine globale Lastgröße überwachen, werden als nicht-redundant bezeichnet (Zylinder 1–6 in Tab. 3.1). Die zwei redundanten Servozylinder BM4 und QK2 (Zylinder 7–8 in Tab. 3.1) haben lediglich eine unterstützende Funktion und orientieren sich an den Servozylindern BM1 und QK1. Für jeden nichtredundanten Servozylinder wird eine globale Last direkt als Regelgröße vorgegeben. Der sich ergebene Regelkreis wird mit einem PI-Regler versehen.

Die Einstellung der PI-Regler erfolgt experimentell. Dafür wird ein Regelkreis im laufenden Betrieb optimiert, während die anderen Servozylindern ihre Zylinderkraft bei Ausgangslage konstant halten. Für die zu optimierende Größe wird im Wechsel eine Auf- und Abwärtsrampe mit geringer Sprunghöhe als Sollkurve eingestellt. Während der Fahrt wird die Istwert-Kurve mit der Sollwert-Kurve abgeglichen. Durch vorsichtige Anpassung der P- und I-Werte kann jeder Regelkreis für sich optimiert werden. Für den Kalibrierbetrieb ist es vorteilhaft, die Regelkreise simultan zu betreiben. Wird im System eine Größe verändert, wirkt dies als Störgröße auf die anderen Regelkreise.

Um ein Auswandern der übrigen Lastgrößen gegenüber der Nullpunktlage zu verhindern und eine Beeinflussung des Kalibrierdrehmoments  $M_z$  zu vermeiden, regeln alle übrigen Regelkreise

Tabelle 3.1: Regelkreise und zugeordnete Aktoren

Nummer	Regelgröße	Aktuator	Sollwert bei $M_z$ -Kalibrierung
Nicht-redundante Zylinder			
1	$F_x$	QK1	0,0 kN
2	$F_y$	DM1	-49,2 kN
3	$F_z$	BM2	0,0 kN
4	$M_x$	BM3	16,2 kN·m
5	$M_y$	BM1	0,0 kN·m
6	$M_z$	DM2	Kalibrierstufe $M_z$
Redundante Zylinder			
7	-	BM4	- Istwert BM1
8	-	QK2	0,0 kN

auf ihren Ausgangswert zu Beginn der Kalibrierung. Die Sollwerte bei einer  $M_z$ -Kalibrierung sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Die Sollwerte, die nicht null sind, ergeben sich aus der Montage des Prüfstrangs und sind nachfolgend erklärt. Zu Beginn der Regelung muss ein Referenzpunkt festgelegt werden, der die Ausgangssituation und die Endsituation jeder Kalibrierung abbildet. Im Idealfall sollte der Aufnehmer lastfrei eingestellt werden. Der lastfreie Zustand lässt sich leider nicht zweifelsfrei über den Kalibriergegenstand feststellen, da der Aufnehmer durch die Montage und sein eigenes Gewicht beeinflusst wird. Stattdessen wird der Referenzzustand durch Erfassung der Lastsituation auf der Messseite vor Einbau des Kalibriergegenstands ermittelt. Der Einbau eines Drehmomentaufnehmers und die Wechselwirkung mit der Maschine bzw. dessen Kompensation zur Einstellung des zuvor ermittelten Referenzzustandes ist in Tabelle 3.2 beschrieben. Der Ablauf ist dabei nach bestimmten Arbeitspunkten eingeteilt, an denen sich eine Änderung der Messseite einstellt.

Tabelle 3.2: Arbeitspunkte während des Einbaus

Arbeitspunkt	Arbeitsschritt	Beeinflussung der Messseite
AP0	Entlastung der DM-Referenzkraftaufnehmer	Für eine Rekalibrierung muss die untere DM-Messstrangverspannung gelöst und der Messhebel angehoben werden. Die Referenzkraftaufnehmer sind bis auf das Gewicht der unteren Biegefeder lastfrei.
AP1	Absetzen des Messhebels und Montage des DM-Messstrangs	Der Messhebel wird ausgerichtet. Das DM-Gegenlager wird ausgerichtet und die Kontermutter am DM-Messstrangfuß verspannt. Das Hebelgewicht verteilt sich gleichmäßig auf die DM-Kraftaufnehmer. Dieser Zustand wird als lastfrei für den Hebel gekennzeichnet.
AP2	Montage des Kalibriergegenstands an die Messseite	Die Kalibriergegenstands-Baugruppe wird an die Messseite montiert. Das gesamte Gewicht der Baugruppe wird auf die DM-Referenzkraftaufnehmer verteilt. Zusätzlich überlagert ein Biegemoment die Messseite.
AP3	Montage des Kalibriergegenstands an die Aktorseite	Der Aktorhebel wird auf Referenzposition gefahren. In dieser Position sind die Hebel parallel zueinander ausgerichtet und beide Hebelmittelpunkte sind deckungsgleich. Die Aktorseite wird in Richtung Messseite gefahren und mit einer definierten Kraft angedrückt. In dieser Phase wird die Baugruppe montiert. Anschließend verteilt sich das Gewicht auf Mess- und Aktorseite.
AP4	Einstellung des Referenzpunkts	Die Aktorseite wird so eingestellt, dass sich das Gewicht der Baugruppe zu gleichen Teilen auf Mess- und Aktorseite verteilt. Das Biegemoment im Kalibriergegenstand muss nahezu null sein. Dafür wird auf Basis des Schwerpunkts ein Biegemomentverlauf abgeschätzt und das Biegemoment auf der Mess- und Aktorseite als Referenzpunkt gewählt.

### 3.6 Messdatenerfassung

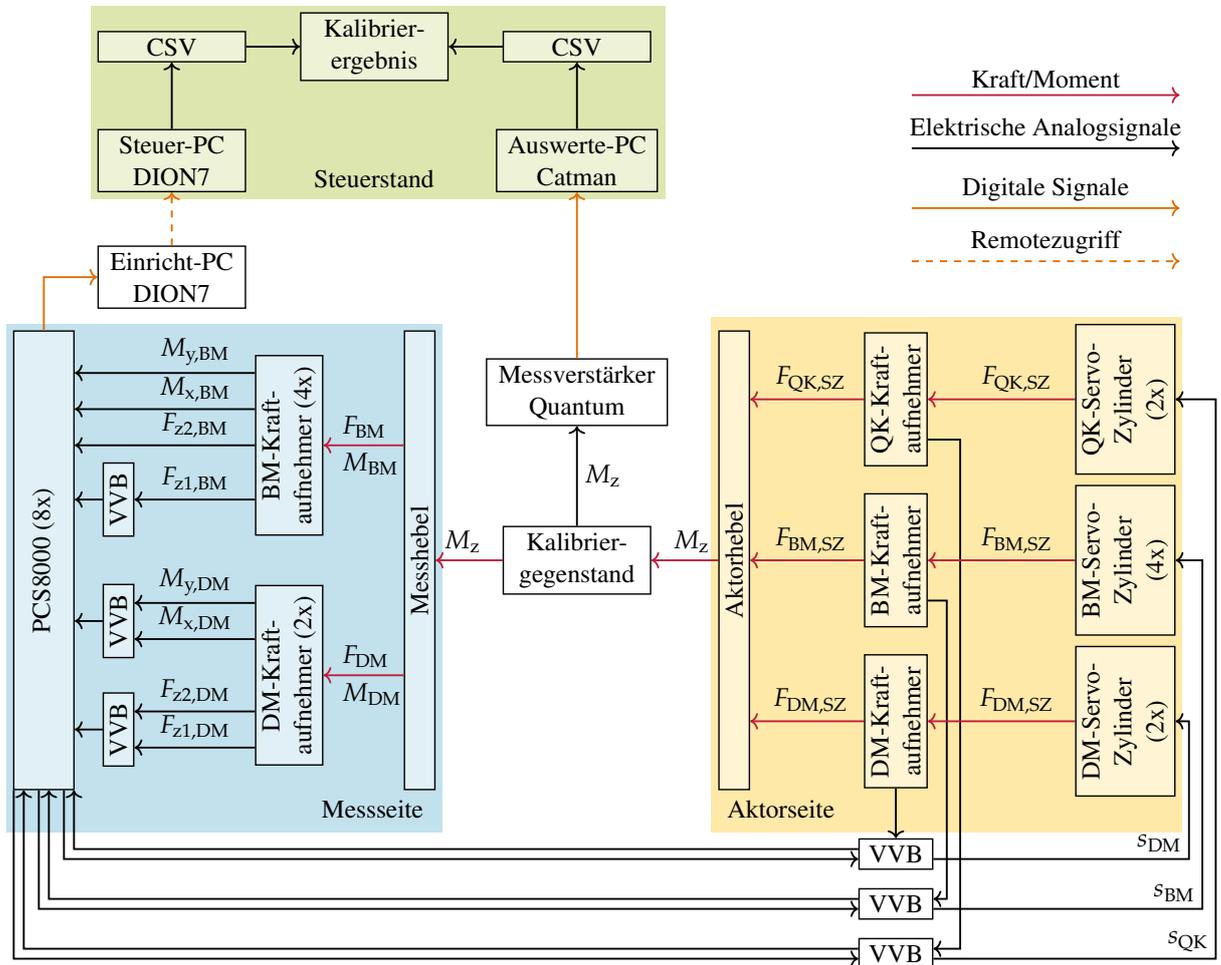


Abbildung 3.11: Messdatenerfassung der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung

Die Messdatenerfassung wird sowohl für die aktive Regelung als auch für die Auswertung der Kalibrierung verwendet (siehe Abb. 3.11). Die DMS-Messbrücken aller Referenzkraftaufnehmer der Messseite liefern ein mV/V-Signal an die acht PCS8000 (pro Servozylinder (SZ) ein Controller). Die Messverstärkerkarten erfassen die Signale und stellen sie zur weiteren Verwendung im PCS8000 zur Verfügung. Insbesondere die Aufnehmer, die direkt zur Drehmoment- bzw. Biegemoment- oder Axialkraftberechnung eingesetzt werden, verwenden Vorverstärkerboxen (VVB), um die Messkabelänge zu reduzieren. Das resultierende Kalibriermoment berechnet sich aus einem feststehenden Zusammenhang, welcher die tatsächliche Messhebellänge als auch die Momentnebenschlüsse berücksichtigt. Die Berechnung dazu folgt in Kapitel 4. Insgesamt ergeben sich 24 Kanäle aus den DMS-Signalen für sämtliche Messbrücken der Referenzkraftaufnehmer.

## 3.7 Lasertracker

Zum Aufbau der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung wurde ein Lasertracker verwendet, um große Bauteile auszurichten, zu positionieren und bestimmte dimensionale Eigenschaften zu prüfen. Des Weiteren wird der Lasertracker verwendet, um die Länge des Messhebels zu ermitteln. Der verwendete Lasertracker AT960 LR der Firma LEICA hat eine MPE-Angabe (maximum permissible error) von  $\pm 15 \mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m}/\text{m}$  angegeben [41, 42].

Laut Marxer, Bach und Keferstein [43] ist ein Lasertracker ein Theodolit, der mit einem Laserinterferometer ausgestattet ist. Der Laserinterferometer ist auf einem Stativ angebracht und dessen Laserstrahl wird über zwei Elektromotoren um zwei Achsen gedreht. Die Drehachsen werden mit einem hochgenauen Winkelmesssystem erfasst. Ein Reflektor wird auf einem Werkstück platziert und von dem Laserstrahl erfasst. Anhand der Distanzmessung des Laserinterferometers und der Winkelmesssysteme kann die Koordinate des Reflektors im Raum festgestellt werden. Darüber hinaus verfügt der Lasertracker über ein Kamerasystem, um eine Positionsänderung des Reflektors zu detektieren und den Laserstrahl mit den Drehachsen nachzuführen.

# 4 Herleitung und Analyse der Modellgleichung

Für die metrologische Charakterisierung der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung ist eine Analyse der Messgröße  $M_Z$  der Kalibrierung notwendig. Im nachfolgenden Kapitel wird die Modellgleichung zur Bestimmung des Moments  $M_Z$  betrachtet. Die mechanische Analyse wird anschließend um eine FE-Analyse erweitert.

## 4.1 Bestimmung des Drehmoments $M_Z$ der Kalibrierung

Die Aufstellung der Modellgleichung basiert auf der Berechnung des statischen Drehmomentgleichgewichts am Messhebel. Die darin auftretenden mechanischen Größen werden im Anschluss näher beschrieben, um den Einfluss auf das anzugebende Kalibriermoment zu charakterisieren und um die Analyse in den nachfolgenden Kapiteln 5 bis 8 vorzubereiten.

### 4.1.1 Aufstellung der Modellgleichung

Die messtechnische Aufgabe der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung besteht darin, das am Kalibriergegenstand anliegende Drehmoment zu bestimmen. Dieses lässt sich aus dem statischen Momentengleichgewicht der Messeinrichtung ermitteln. Das eindimensionale Drehmoment ist das Ergebnis des Kreuzprodukts der Vektoren Hebelarm und Hebelkraft, die in derselben Ebene liegen. Daher genügt es für das Gleichgewicht, die Kräfte und das Moment in der Ebene zu betrachten.

Die Wahl der Ebene entscheidet über den messtechnischen Aufwand zur Ermittlung des Moments. Die eingangs gestellte Aufgabe, dass die Drehmomentbelastung am Kalibriergegenstand anliegen soll, legt den Schluss nahe, die Ebene entweder durch den Drehmomentaufnehmer oder an dessen Grenzen zum Aktorhebel oder Messhebel zu legen. Die messtechnischen Möglichkeiten innerhalb eines geschlossenen Aufnehmers sind nicht gegeben. Prinzipiell kann das Drehmoment am Aktorhebel ermittelt werden, allerdings treten dort größere Verschiebungen gegenüber dem Messhebel auf, so dass mit größeren Winkeländerungen der Aktorkräfte zu rechnen ist. Damit ist eine größere Unsicherheit des Kraftvektors verbunden. Hinzu kommt, dass der Ort der Krafteinleitung durch die Verwendung der Gelenke undefiniert ist. Somit ist die Flanschebene des Messhebels die geeignete Stelle zur Berechnung der Drehmomentbilanz. Die Mittelpunkte der Krafteinleitung in die einzelnen Messstränge liegen in der Mittelebene des Messhebels, was eine Verfälschung der tatsächlich wirkenden Kräfte in der Ebene gegenüber den gemessenen Kräften reduziert.

Das statische Drehmomentgleichgewicht des anliegenden Drehmoments  $M_Z$  am Messhebelflansch

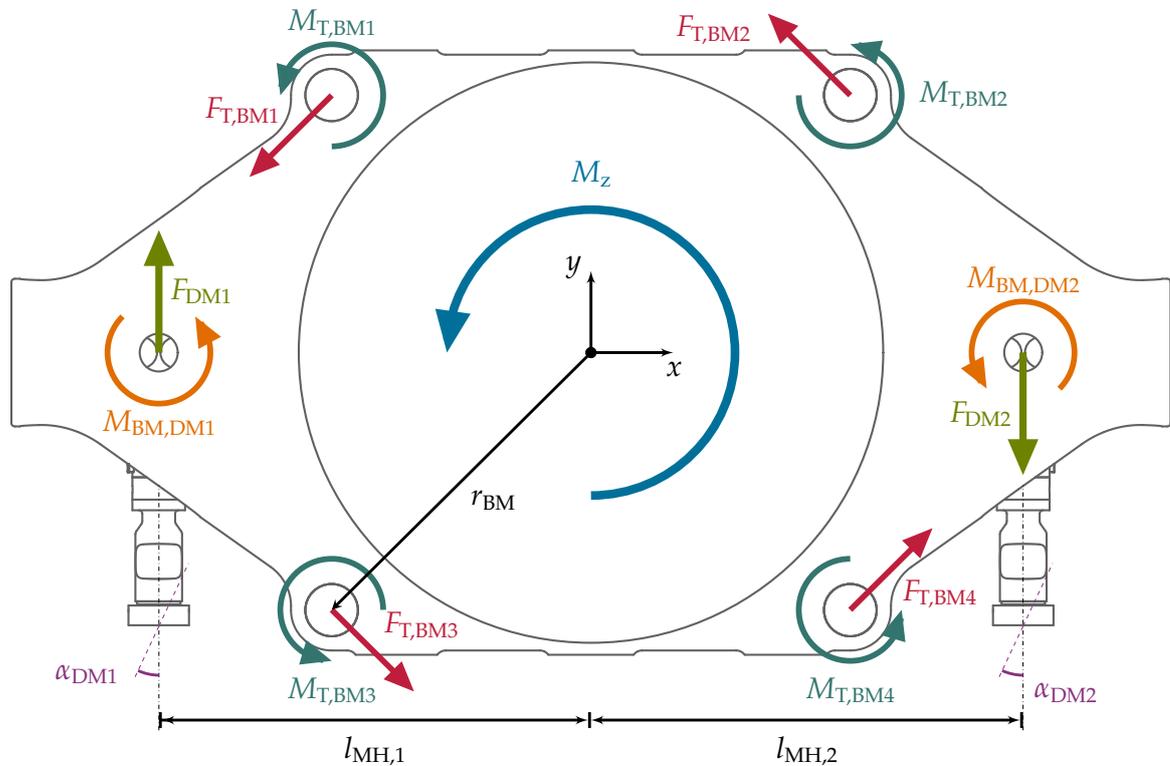


Abbildung 4.1: Anteile der Drehmomentbilanz am Messhebel

berechnet sich gemäß der Darstellung in Abbildung 4.1 wie folgt:

$$\begin{aligned}
 M_z = & [l_{MH,2} \cdot (F_{DM2} + a_{S,DM2,Zug/Druck} \cdot \Delta S_{MV,DM2}) \cdot \cos(\alpha_{DM2}) - \\
 & l_{MH,1} \cdot (F_{DM1} + a_{S,DM1,Zug/Druck} \cdot \Delta S_{MV,DM1}) \cdot \cos(\alpha_{DM1})] \cdot (1 + \alpha_T \cdot \Delta T) \\
 & + \sum_{i=1}^4 F_{T,BMi} \cdot r_{BMi} + \sum_{i=1}^4 M_{T,BMi} + \sum_{j=1}^2 M_{BM,DMj}
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Die Hauptanteile des Drehmoments bilden die Kräfte  $F_{DM}$ , die von den Drehmoment-Referenzkraftaufnehmern (DM-Referenzkraftaufnehmer) gemessen werden.  $F_{DM}$  ist der Anzeigewert des Aufnehmers in kN, der mittels einer Kalibrierkurve aus dem mV/V-Signal berechnet wird. Zur Abschätzung der Messverstärkerunsicherheit ist die Eingangsgröße  $\Delta S_{DMi}$  eingeführt worden, deren Einfluss auf das Kraftsignal über den Fit-Parameter  $a_{S,DMi,Zug/Druck}$  bestimmt wird. Der Winkel  $\alpha_{DM}$  bezeichnet die Abweichung zur idealen orthogonalen Ausrichtung der DM-Messstränge zum Messhebel. Die Hebelarmlängen  $l_{MH,j}$  beschreiben die Distanz zwischen dem Kräfteinleitungspunkt bei  $F_{DM,j}$  und dem Mittelpunkt des Messhebels (MH).  $\alpha_T$  ist der thermische Ausdehnungskoeffizient des Messhebels.  $\Delta T$  ist die Abweichung der Temperatur zum Zeitpunkt der Kalibrierung des Messhebels von der Temperatur zum Zeitpunkt der Messung. Das Drehmoment bewirkt eine Drehung des Hebels um einen Punkt. Durch die Anbindung der Messstränge an den Messhebel ergibt sich eine erzwungene Bewegung der Biegemoment-Messstränge (BM-Messstränge). Diese Bewegung erzeugt eine tangentialer Rückstellkraft  $F_T$  und ein Rückstelltorsionsmoment  $M_T$  der BM-Messstränge und ein Biegemoment  $M_B$  der DM-Messstränge. Diese werden auch als parasitä-

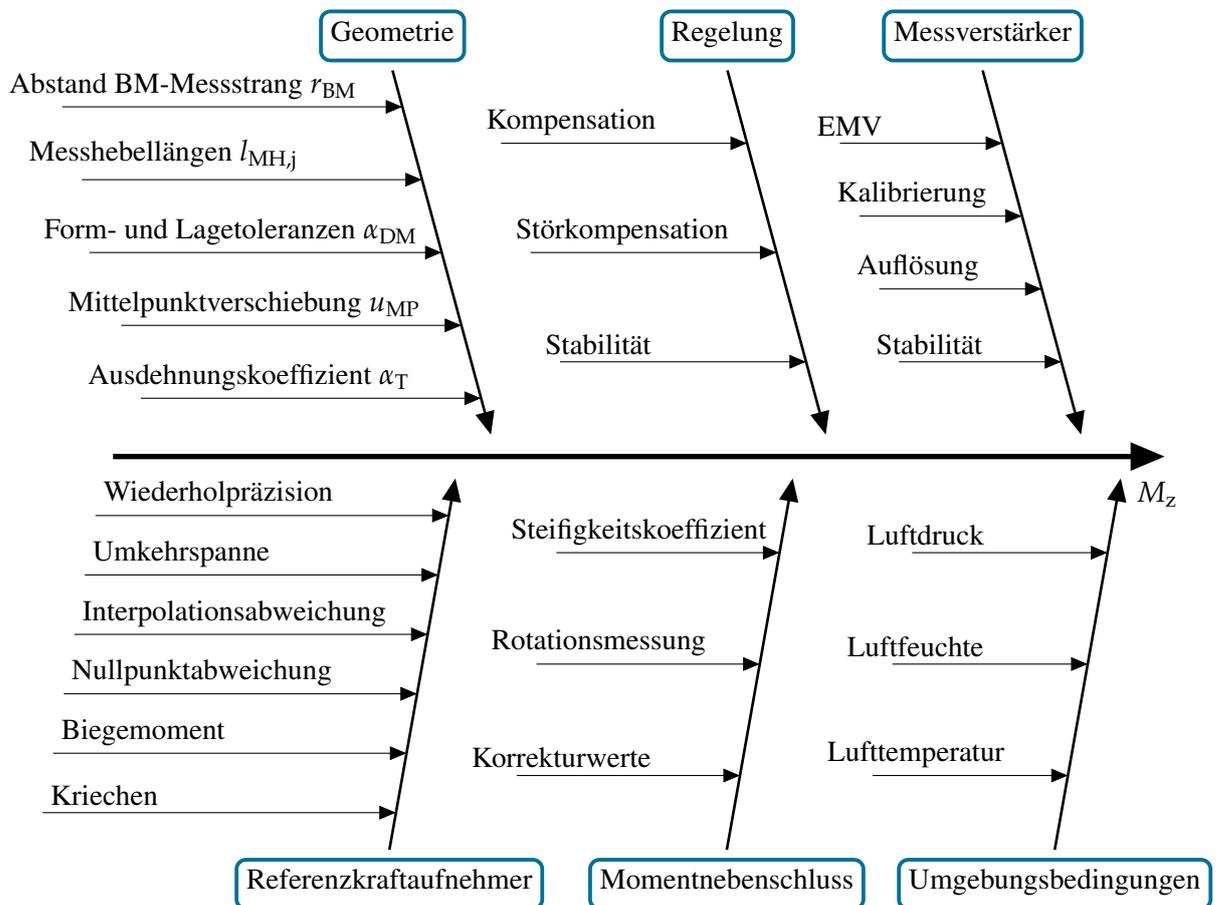


Abbildung 4.2: Übersicht der Messunsicherheitseinflüsse im Ishikawa-Diagramm (EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit)

re Kräfte bzw. Momente oder als Nebenschlüsse bezeichnet und dürfen bei der Bestimmung des Drehmoments nicht vernachlässigt werden.

### 4.1.2 Messunsicherheitseinflüsse

Abbildung 4.2 zeigt die Übersicht aller Messunsicherheitseinflüsse in einem Ishikawa-Diagramm. Die einzelnen Kategorien werden in den nachfolgenden Abschnitten behandelt. Das Ziel dieses Abschnitts ist es, eine Übersicht über alle Messunsicherheitseinflüsse zu geben, diese zu gliedern und eine Basis für die Quantifizierung der Messunsicherheitsbeiträge in den nachfolgenden Kapiteln 5 bis 8 zu geben.

#### Referenzkraftaufnehmer

Die Messunsicherheit der Referenzkraftaufnehmer lässt sich durch eine DIN EN ISO 376-Kalibrierung bestimmen [44]. Für die Kalibrierung der DM-Kraftaufnehmer bis 1200 kN stehen im Kraftlabor der PTB die 1 MN- und die 2 MN-Kraft-Normalmeseinrichtung zur Verfügung. Beide Direktbelastungseinrichtungen erreichen eine erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) von

$2 \cdot 10^{-5}$ . Der Aufnehmer ist sowohl im Druckbereich bis 1200 kN als auch im Zugbereich bis 850 kN mehrfach kalibriert worden.

Das Kalibrierverfahren nach DIN EN ISO 376 ermittelt statistische Kennwerte, die zur Messunsicherheit beitragen. Dazu gehören die Kurzzeitstabilität (Wiederholpräzision), die Vergleichspräzision, die Belastungsrichtung (Umkehrspanne) und die Nullpunktabweichung. Zusätzlich ist es möglich, den Drift des Aufnehmersignals unter Vollast und nach Wegnahme der Last zu bestimmen, das sogenannte Kriechen. Das Kriechen ist gegenüber den anderen Einflussgrößen klein und wird daher vernachlässigt. Das Kalibrierergebnis wird in Form einer Kalibrierkurve dargestellt. In diesem Fall wird der Zusammenhang zwischen dem mV/V-Signal des jeweiligen Aufnehmers und der Druck- oder Zugbelastung als Polynom dritten Grades dargestellt. Die maximale Abweichung der Kalibrierkurve zu den kalibrierten Stützstellen ist eine Messunsicherheitsgröße und wird als Regressionsabweichung bezeichnet.

### Geometrische Merkmale

Unter geometrische Merkmale sind sämtliche Messunsicherheitsbeiträge zusammengefasst, in denen eine dimensionale Größe, wie eine Distanzmessung oder die Orientierung der Kraftvektoren im Raum, einen Einfluss auf das wirkende Drehmoment haben. Dazu gehört die Messhebelarmlänge (Abstand der DM-Messstränge zueinander), die Ausrichtung der DM-Messstränge in der Messhebelebene und die Abstände der BM-Messstränge zum Messhebelmittelpunkt.

Die Messhebellänge ist der Abstand der beiden Krafteinleitungspunkte, der durch den Mittelpunkt des Stegs der oberen Biegefeder im DM-Messstrang markiert wird. Die Erfassung der Messhebellänge erfolgt mit dem Lasertracker. Für das Verfahren werden die Biegefedern angefasst und die Krafteinleitungspunkte bei DM1 und DM2 bestimmt. Die Messstrategie bestimmt maßgeblich die Messunsicherheit. Darüber hinaus ergibt sich eine Längenänderung des Messhebels unter Last. Ein weiterer Punkt ist die thermisch bedingte Längenausdehnung des Messhebels. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist ebenfalls als Messunsicherheitsbeitrag aufzuführen.

Die Orientierung der DM-Kraftvektoren sind sowohl von den Fertigungstoleranzen der einzelnen Bauteile und deren Montage als auch von der anliegenden Last abhängig. Durch die Rotationsbewegung des Hebels wird der Krafteinleitungspunkt verschoben, so dass sich zwangsweise eine Winkelabweichung ergibt.

Die Reaktionskraft  $F_{T,BM_i}$  eines BM-Messstrangs in tangentialer Richtung wirkt auf den Hebelarm  $r_{BM}$ . Dieser Hebelarm ist der Abstand eines BM-Messstrangs zum Drehpunkt des Messhebels. Die Wirkung aus Tangentialkraft mal Hebelarm  $r_{BM}$  führt zu einem Momentnebenschluss. Die Länge des Hebelarms wird mithilfe des Lasertrackers gemessen und ist Teil der Messunsicherheitsbetrachtung.

### Nebenschluss

Die Kraft- und Momentnebenschlüsse gehen direkt in die Momentenbilanz ein und tragen somit zum globalen Messunsicherheitsbudget bei. Die Kombination aus hohen Axialkräften und niedrigen Nebenschlüssen ergibt ein schlechtes Signal-zu-Übersprech-Verhältnis. DMS-basierte Aufnehmer sind aus diesem Grund für dieses Einsatzgebiet ungeeignet. Ein alternativer Weg stellt die Verformungsmessung der Biegefedern dar. Ist die Steifigkeit der Biegefedern für die auftretenden

Lastfälle bekannt, so können die wirkenden Kräfte und Momente gemessen werden. Zur Ermittlung der Steifigkeit ist ein Prüfstand notwendig, der die Belastungen an den Biegefedern im Kalibrierbetrieb widerspiegelt und die auftretende Verformung ermittelt. Die Verformungsmessung und die Ermittlung des Steifigkeitskoeffizienten tragen zur Messunsicherheit des Kalibriermoments bei.

### **Umgebungsbedingungen**

Die Umgebungsbedingungen, bestehend aus Luftdruck, Luftfeuchte und Lufttemperatur, haben unterschiedliche Auswirkungen auf das Kalibrierergebnis. Zum einen bewirkt eine Temperaturänderung eine Ausdehnung des Messhebels. Zum anderen zeigen DMS-basierte Aufnehmer (Kalibriergegenstand und Referenzkraftaufnehmer) eine Abhängigkeit von Luftdruck, -feuchte und -temperatur. Die Messhalle ist klimatisiert und die Umgebungsbedingungen werden überwacht. Die Klimazone ist nur im Bereich des Kalibriergegenstands und der Referenzkraftaufnehmer spezifiziert. Hier ist eine Langzeitüberwachung der Anlage notwendig, um die statistische Stabilität der erwartbaren Temperaturschwankung festzustellen. Der Luftdruck kann Auswirkungen auf die Messung mit DMS-basierten Aufnehmer haben und kann über die Änderung der Luftdichte eine Änderung der Auftriebskraft von Bauteilen bewirken. Der Einfluss des Luftdrucks wird als wesentlich geringer gegenüber den anderen Einflüssen abgeschätzt und daher vernachlässigt.

### **Anzeigergerät und Regelung**

Zur Verstärkung und Anzeige der Kraftaufnehmersignale werden Messverstärker verwendet. Die Kalibrierung der Referenzkraftaufnehmer erfolgt mit einem vom Kalibrierbetrieb unterschiedlichen Anzeigergerät. Die für die Kalibrierung zur Verfügung stehenden Messverstärker werden jährlich mit einem Präzisionswiderstandsnetzwerk (auch Brückennormal) kalibriert und sind daher rückgeführt. Die Messverstärker an der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung dienen sowohl zur Regelung der Anlage als auch zur Erfassung des Kalibriermoments. Diese Messverstärker sind Gleichspannungsverstärker und reagieren empfindlich auf elektromagnetische Störungen. Die Messunsicherheit ergibt sich hier vor allem aus der Stabilität, die sich mittels eines Kalibriernormals feststellen lässt.

Für die Kalibrierung in der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung muss die Regelung der servohydraulischen Zylinder in der Lage sein, das global anliegende Drehmoment auf dem Kalibriergegenstand für eine Minute stabil zu halten. Dabei sind dynamische Regeltoleranz (Überschwingweite), Drift oder Schwingungen zu unterbinden, da diese ansonsten in die Messunsicherheit eingehen würden. Genauso sind elektromagnetische Störungen im Vorfeld zu vermeiden, um einen Einfluss auf die Messunsicherheit auszuschließen.

## **4.2 Finite Elemente Analyse der Messseite**

Wie aus Gleichung 4.1 ersichtlich, handelt es sich beim Momentengleichgewicht um ein statisch überbestimmtes mechanisches System. Aufgrund der geometrischen Komplexität der einzelnen Bauteile ist das Problem analytisch nicht mit vertretbarem Aufwand darstellbar. Um dennoch eine Analyse der auftretenden Kräfte, Momente und Verformungen durchführen zu können, ist

es gängige Praxis, eine Finite-Elemente-Analyse (FE-Analyse) zu erstellen. Die in dieser Arbeit verwendete FE-Software ist ANSYS in der Version 2022 R1.

### 4.2.1 FE-Setup

Das Ziel der Simulation ist es zu bestimmen, welche Reaktionskräfte, Reaktionsmomente und Verformungen auftreten. Es wird eine ideale Drehmomentbelastung vorausgesetzt. Dieser Idealzustand dient als Referenzzustand für die erhobenen Versuchsdaten.

Für die FE-Analyse in ANSYS wird die Simulationsart „Statisch-Mechanische Analyse“ verwendet. In dieser Analyseart werden nur mechanische Systeme behandelt, die sich im statischen Gleichgewicht befinden. Dynamische Kräfte können nicht berücksichtigt werden. Findet eine zu hohe Verschiebung gegenüber der Ausgangslage aufgrund unzureichender Lagerbedingungen statt, die nicht alle Freiheitsgrade abdecken, wird die Berechnung abgebrochen. Das Pre- und Postprocessing und die Auswahl des Solvers finden in der grafischen Benutzeroberfläche ANSYS MECHANICAL statt. Für die FE-Analyse werden die während der Konstruktion entstandenen 3D-Konstruktionsmodell-Daten (Computer-aided design, CAD) verwendet.

Bei der mechanischen Analyse der Messsysteme beschränkt sich das FE-Modell auf den Messrahmen, die Messstränge, den Messhebel und den Aufnehmer. Die Einschränkungen der betrachteten Bauteile führen zu einer erheblichen Reduktion der zu berechnenden Elemente und damit zu schnelleren Simulationsergebnissen.

Die Aktorseite mit den Servozylindern wurde von der FE-Simulation ausgeschlossen. Das Gewicht des Kalibriergegenstands und des Aktorhebels führt zu einer konstanten Überlagerung durch ein Biegemoment. Dieses Biegemoment müsste, wie im realen Kalibrierbetrieb, durch die Servozylinder kompensiert werden. Die Ansteuerung in ANSYS MECHANICAL nachzubilden wäre eine große technische Herausforderung, deren Nutzen im Hinblick auf die Ergebnisse auf der Messseite relativ gering wäre. Lediglich der Aufnehmer wird als Momenteinleitungspunkt belassen, da sonst singuläre Ereignisse an der Hebelflanschfläche auftreten. Das Eigengewicht der Bauteile wird in der FE-Analyse nicht berücksichtigt.

ANSYS MECHANICAL lässt zur Verbindung von verschiedenen Bauteilen unterschiedliche Optionen offen, die sich in lineare und nicht-lineare Kontakte einteilen. Auf der Messseite existieren zwei verschiedene Verbindungsarten: Schraubverbindungen und Linearführungen.

Fast alle Bauteile werden durch eine Schraubverbindung montiert. Schraubverbindungen werden in ANSYS MECHANICAL klassischerweise dadurch hergestellt, indem die Schraubenkopfunterlage als Reibkontakt und das Gewinde als Bonded-Kontakt eingestellt werden. Anschließend wird eine Schraubenvorspannkraft aufgeprägt, die unter Last eine Restklemmkraft berechnet. Fällt die Restklemmkraft auf null, können sich Kontakte von verspannten Bauteilen lösen, wodurch eine neue Kontaktsituation entsteht und der Reibkontakt diese neue Situation durch eine iterative Berechnung ermittelt. Daher gehört der Reibkontakt und damit die Schraubverbindung zu den nichtlinearen Kontakten. Die dazugehörige Iteration erhöht den Rechenaufwand. Da die Schraubverbindungen im Vorfeld mit ausreichender Sicherheit ausgelegt wurden, ist mit einer Kontakttrennung zwischen zwei Bauteilen oder einer Verschiebung bestimmter Bauteile zueinander nicht zu rechnen. ANSYS MECHANICAL bietet alternativ die Möglichkeit, den Kontakt „Bonded“ auszuwählen. Damit wird eine starre Verbindung zwischen den einzelnen Kontaktflächen erzeugt, so dass

Verschiebungen zu 100 % weitergegeben werden. Diese Kontaktart gehört zu den linearen Kontaktgruppen, die wesentlich leichter zu berechnen sind und daher ausgewählt werden. Nachteilig an der Kontaktabbildung ist, dass die Verbindung steifer ist als in der Realität und Verformungen im Gesamtsystem damit kleiner als in der Realität ausfallen können.

Die Verbindung zwischen Drehmomentgegenlager und Linearführung stellt eine nicht-lineare Kontaktgruppe dar. Zum Verfahren sind diese auf Linearführungen montiert und während des Kalibrierbetriebs geklemmt. Die Linearführungswagen basieren auf einer Art Wälzlagerung, so dass sich mehrere verteilte Punktkontakte auf der Führungsschiene wiederfinden. Die dadurch entstehenden Verschiebungen sind allerdings zu vernachlässigen, da die zu untersuchenden Verformungen im Bereich des Messhebels stattfinden und diese durch die Linearführungswagen nicht beeinflusst werden. Daher ist auch hier ein Bonded-Kontakt zulässig.

ANSYS MECHANICAL stellt für die Vernetzung einen Solver zur Verfügung, der die Vernetzungsarbeit erheblich vereinfacht. Der Elementtyp wird nicht vorgegeben, da sich auf der Messseite viele verschiedene Geometrien befinden. Daher ist ein Großteil der Bauteile softwaregesteuert mit Tetraedern vernetzt worden. Als Standardeinstellung wird eine Elementgröße von 50 mm vorgegeben. Diese Voreinstellung wird lokal an bestimmten Bauteilen überschrieben, da die Geometriemerkmale dort feiner ausfallen. Darunter fallen die Messstränge und die Rippenstruktur des Messhebels, die mit 10 mm verfeinert werden. Insgesamt besteht das Modell aus circa 7,4 Mio. Elementen mit 12 Mio. Knoten.

Als Lagerbedingungen werden an den Unterseiten beider Messrahmentteile und des Führungsbetts der „Fixed Support“ ausgewählt. Das führt dazu, dass die Verschiebungen der betreffenden Knoten auf null gesetzt werden. Eventuell auftretende singuläre Spannungsspitzen würden die Verformungssituation am Messhebel nicht beeinflussen. Die Analyse beschränkt sich auf ein reines Drehmoment um die z-Achse, das auf dem aktorseitigen Flansch des Kalibriergegenstands aufgebracht wird. Für eine maximale Abschätzung von Reaktionslasten und -verformungen werden hier 5 MN·m in positiver Richtung angenommen.

Der Solver für die Berechnung des FE-Modells wird automatisch von ANSYS gewählt. Das ist in diesem Fall ein iterativer Solver, da für einen direkten Solver nicht genügend Arbeitsspeicher zur Verfügung steht. Als Solver wurde der „preconditioned conjugate gradient solver“ verwendet. „Große Verformungen“ werden als zusätzliche Option ausgewählt, damit das Kräfte- und Momentengleichgewicht auch am verformten Körper seine Gültigkeit behält.

### 4.2.2 Reaktionskräfte und -momente

Tabelle 4.1 stellt die Reaktionskräfte und -momente aus der FE-Analyse dar. Die hier festgestellten Ergebnisse sollen später als Referenz für die Versuchsdaten dienen, um deren Plausibilität zu überprüfen. Außerdem helfen diese Daten, die Versuchsanordnung zur Erfassung der Nebenschlüsse festzulegen.

Da hier die Kräfte und Momente aus Sicht des Hebels betrachtet werden, ist das Vorzeichen zu beachten. Das eingeleitete Moment ist positiv um die z-Achse. Alle Reaktionsmomente wirken dem Moment entgegen und werden gemäß dem globalen Koordinatensystem positiv oder negativ eingetragen. Die Tangential- und Radialkräfte der BM-Messstränge sind in einem lokalen Koordinatensystem eingetragen. Diese Koordinatentransformation vereinfacht die Betrachtung der

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Reaktionskräfte und -momente der FE-Analyse

Bezeichnung	Kräfte/Momente	Drehmoment	Rel. Anteil
$F_{DM1}$	$9,9950 \cdot 10^5$ N	$-2,5 \cdot 10^6$ N·m	49,971 %
$F_{DM2}$	$-9,9949 \cdot 10^5$ N	$-2,5 \cdot 10^6$ N·m	49,970 %
$F_{T,BM1}$	-214,7 N	-455,5 N·m	0,009 %
$F_{Z,BM1}$	17396,0 N	0 N·m	
$F_{T,BM2}$	-191,6 N	-406,4 N·m	0,008 %
$F_{Z,BM2}$	-17395,0 N	0 N·m	
$F_{T,BM3}$	-193,9 N	-411,3 N·m	0,008 %
$F_{Z,BM3}$	-17381,0 N	0 N·m	
$F_{T,BM4}$	-217,5 N	-461,3 N·m	0,009 %
$F_{Z,BM4}$	17382,0 N	0 N·m	
$M_{T,BM1}$	-134,7 N·m	-134,7 N·m	0,003 %
$M_{T,BM2}$	-134,7 N·m	-134,7 N·m	0,003 %
$M_{T,BM3}$	-116,9 N·m	-116,9 N·m	0,002 %
$M_{T,BM4}$	-116,9 N·m	-116,9 N·m	0,002 %
$M_{B,DM1}$	-162,1 N·m	-162,1 N·m	0,007 %
$M_{B,DM2}$	-123,7 N·m	-123,7 N·m	0,007 %
<b>Summe</b> $M_{z,out}$		$-5,0 \cdot 10^6$ N·m	
$M_{z,out} - M_{z,in}$		-1,48 N·m	

Momentanteile der tangentialen Nebenschlüsse. Die lokalen x-Achsen sind in Richtung des eingeleiteten Moments ausgerichtet (siehe Abb. 4.3).

Aus der Tabelle 4.1 wird ersichtlich, dass der Hauptanteil des zu messenden Drehmoments von den DM-Referenzkraftaufnehmern erfasst wird. Die Summe der resultierenden Momente aus den beiden Hebelkräften  $F_{DM1}$  und  $F_{DM2}$  machen 99,94% des eingeleiteten Drehmoments aus. Bei idealer Momenteinleitung ohne Überlagerung zeigt sich, dass die Krafteinleitung annähernd symmetrisch ist. Der Unterschied zwischen  $F_{DM1}$  und  $F_{DM2}$  liegt bei weniger als 100 N.

Die Tangentialkräfte an den BM-Messsträngen verteilen sich punktsymmetrisch. Diametral zueinander ergeben sich bei  $F_{T,BM1}$  und  $F_{T,BM4}$  circa  $-215$  N und bei  $F_{T,BM2}$  und  $F_{T,BM3}$  circa  $-190$  N. Addiert man die resultierenden Drehmomente links (BM1 und BM3) und rechts (BM2 und BM4), bleibt die Verteilung symmetrisch, entsprechend der Verteilung der DM-Hebelkräfte. Die Torsionsmomente an den oberen BM-Messsträngen  $M_{T,BM1}$  und  $M_{T,BM2}$  sind etwa  $-135$  N·m. Bei den unteren beiden BM-Messsträngen  $M_{T,BM3}$  und  $M_{T,BM4}$  sind etwa  $-117$  N·m zu erwarten. Die unteren und oberen BM-Biegefedern verfügen über ein Mittelstück mit unterschiedlichen Durchmessern. Dadurch wird die höhere Nachgiebigkeit des Messrahmens bei einem Biegemoment um die x-Achse im oberen Bereich kompensiert. Der höhere Durchmesser der oberen Biegefeder erklärt die Unterschiede in den Torsionsmomenten.

Die Biegemomente der DM-Messstränge liegen bei  $-162$  N·m bzw.  $-124$  N·m. Der Unterschied von  $40$  N·m lässt sich auf die minimalen Unterschiede bei den Hebelkräften zurückführen.

Zur Veranschaulichung der Problematik der messtechnischen Erfassung der Nebenschlüsse sind die Axialkräfte auf die BM-Messstränge in Tabelle 4.1 eingetragen. Diese liegen betragsmäßig

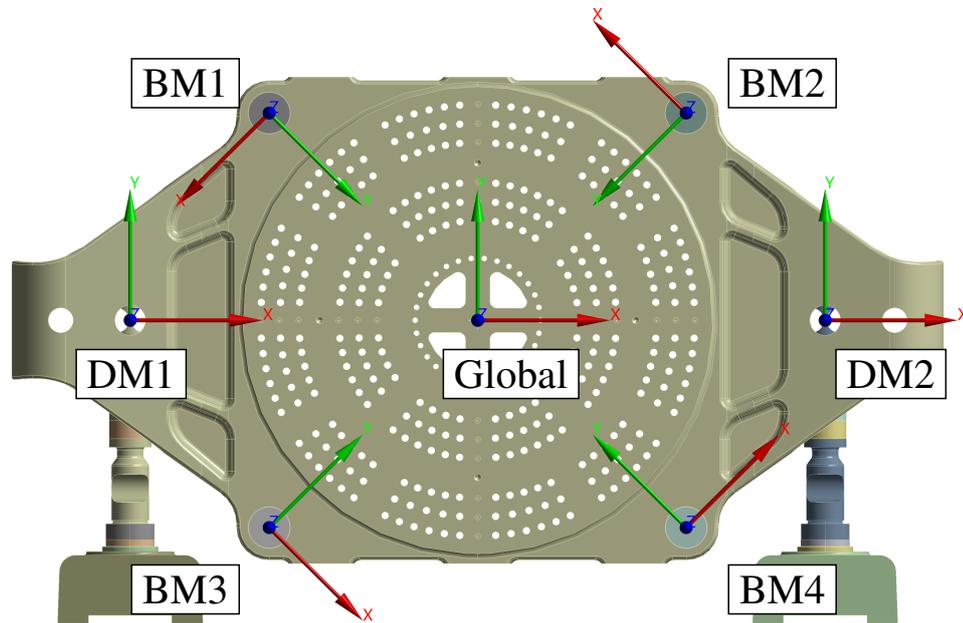


Abbildung 4.3: Lokale Koordinatensysteme der BM- und DM-Messstränge und das globale Koordinatensystem. Farbkodierung der Achsen: rot = x-Achse, grün = y-Achse, blau = z-Achse

mit 17,5 kN um den Faktor  $10^2$  höher als die Tangentialkräfte. Das Übersprechen resultierend aus diesem Kräfteverhältnis erschwert, wie im Abschnitt 4.1.2 zuvor angedeutet, die Messung der Kräfte mit DMS-Technik erheblich. Der prozentuale Anteil der Kraft- und Momentnebenschlüsse am Gesamtmoment  $M_z$  beträgt lediglich 0,05 %. Davon entfällt mehr als die Hälfte auf die Tangentialkräfte. So klein die Anteile sind, können diese jedoch nicht vernachlässigt werden, was aus der späteren Messunsicherheitsbetrachtung in Abschnitt 9 hervorgeht.

Zur Überprüfung der Plausibilität der Ergebnisse werden die Momente aufsummiert. Die Summe  $M_{z,out}$  wird mit dem Eingangsmoment  $M_{z,in}$  (in FE-Analyse mit exakt 5 MN·m vorgegeben) abgeglichen. Die Differenz beträgt lediglich  $-1,48 \text{ N}\cdot\text{m}$ .

### 4.2.3 Verformungen und Winkelstellungen

Dieser Abschnitt beschreibt die entstehenden Verschiebungen auf der Messseite. Einige Verschiebungen, die als Messunsicherheitseinflüsse in der Messunsicherheitsbilanz des Kalibriermoments betrachtet werden, liegen nur als Berechnung in der FE-Analyse vor. Der experimentelle Nachweis ist bei diesen Verschiebungen entweder nicht durchführbar oder dessen Unsicherheitsbeitrag rechtfertigt den Aufwand eines Experiments nicht. Dazu gehören die Messhebellängenänderung unter Last, die Winkelstellung der DM-Messstränge und die Mittelpunktverschiebung. Die Betrachtung der Kopplungspunktverschiebung der BM-Messstränge greift der Untersuchung der Steifigkeitsmessung in Kapitel 6 vor. Diese Verschiebungen dienen der experimentellen Steifigkeitsermittlung als Referenzwerte.

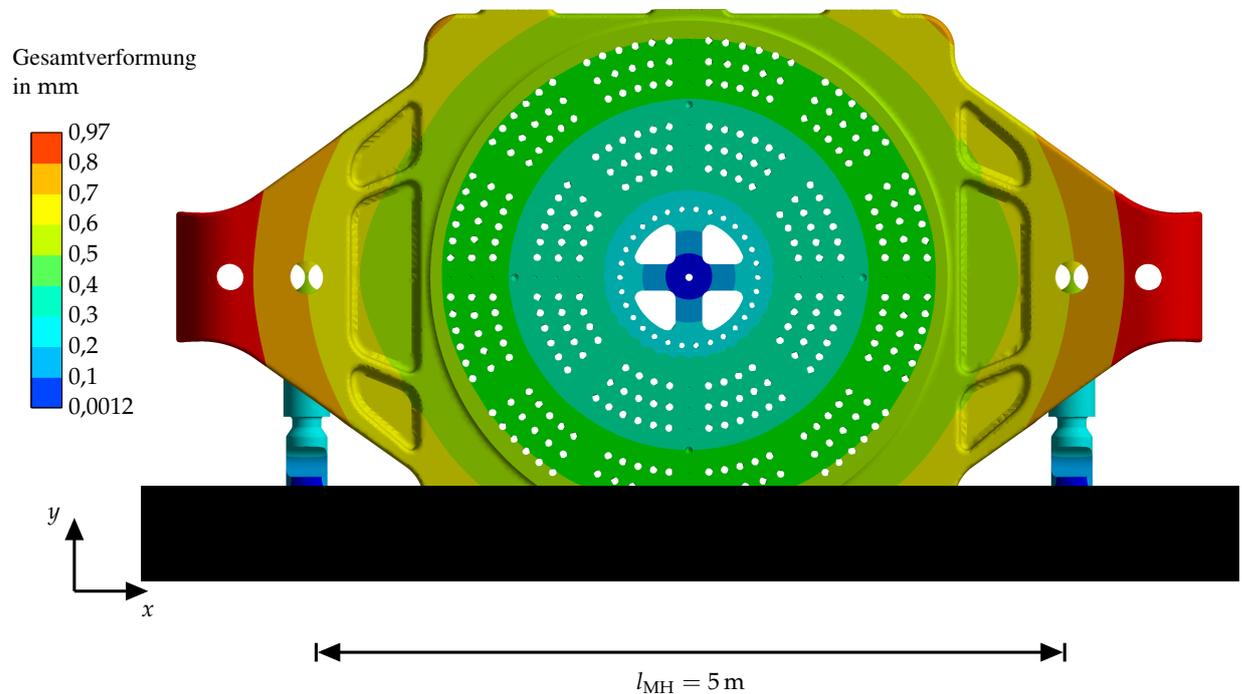


Abbildung 4.4: Darstellung der Gesamtverformung des Messhebels bei  $5\text{ MN}\cdot\text{m}$  als Ergebnis der FE-Analyse

Abbildung 4.4 zeigt die Gesamtverformung der Messseite bei einer Last von  $5\text{ MN}\cdot\text{m}$ . Die Gegenlager und der Messrahmen verschieben sich nur minimal. Die maximalen Verschiebungen ergeben sich durch die Rotationsbewegung an den Hebelenden. An den Kopplungspunkten der DM-Messstränge ergeben sich Verschiebungen im Bereich von  $0,6\text{ mm}$ . Die gleichmäßige Rotationsbewegung an dem gesamten Hebel ist gut zu erkennen. Der Mittelpunkt der Rotation liegt im Hebelzentrum. Die Mittelpunktverschiebung wird im späteren Abschnitt 4.2.3 näher beleuchtet.

### Änderung der Messhebellänge unter Last

Die Änderung der Messhebellänge ändert sich mit der Relativverschiebung vom Kräfteinleitungspunkt DM1 zu DM2. Diese Punkte sind durch den Mittelpunkt der Biegefederstege definiert. Innerhalb der FE-Analyse kann der Mittelwert der Verschiebung ermittelt werden, in dem ein Pfad durch die Mitte des Stegs ausgewertet wurde. Entlang eines Pfades zwischen zwei definierten Punkten wird die Verformung ausgewertet. Die Auswertung der Pfadverschiebung im Steg ist in Abbildung 4.5 exemplarisch dargestellt. Tabelle 4.2 listet die Verschiebungen entsprechend dem Koordinatensystem auf. Durch die dominierende Rotationsbewegung des Hebels in der x-y-Ebene ist der z-Anteil sehr gering und liegt bei wenigen  $\mu\text{m}$ . Der Großteil der Bewegung ist in y-Richtung tangential zur Hebelrotation. In Abschnitt 4.1 ist die Symmetrie der Kraftverteilung bereits gezeigt worden. Diese Symmetrie spiegelt sich hier bis auf wenige  $\mu\text{m}$  ebenfalls wider. In x-Richtung ist eine minimale Verschiebung von knapp  $15\ \mu\text{m}$  in negativer Richtung festzustellen. Alle drei Achs-Komponenten zeigen, dass sich die Lage der Kräfteinleitungspunkte maximal um wenige  $\mu\text{m}$  zueinander ändern. Wie später bei der Vermessung der Messhebellänge in Abschnitt 7 zu sehen

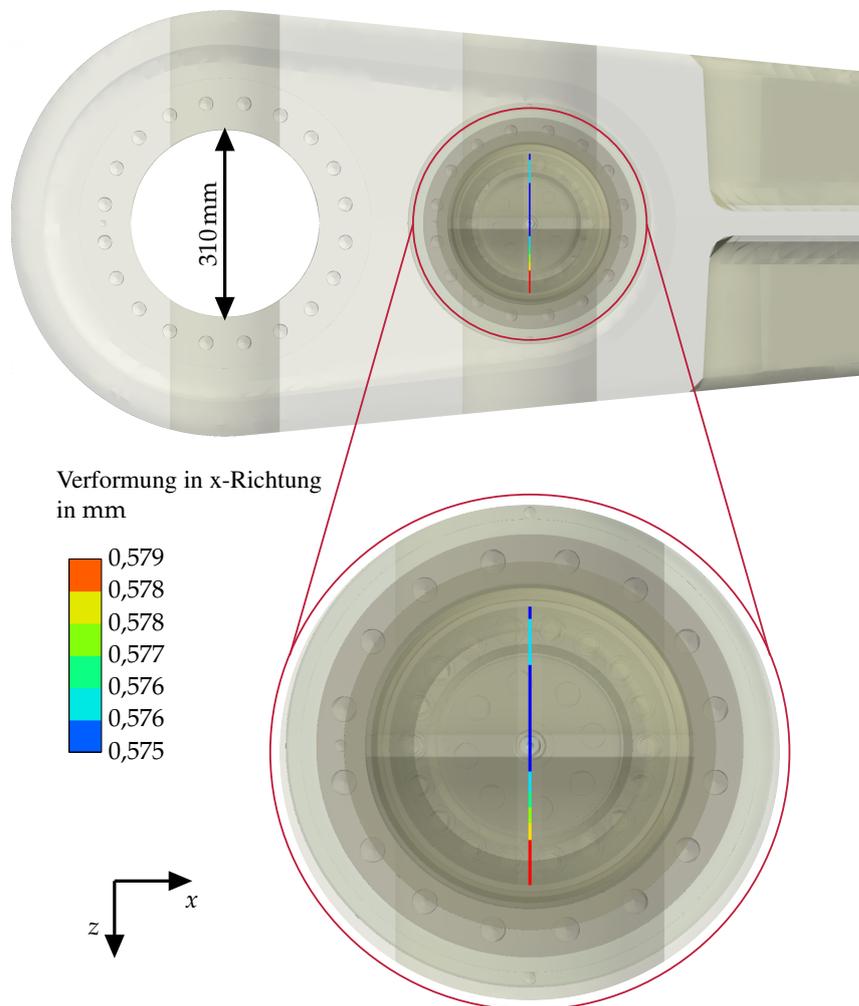


Abbildung 4.5: Pfadauswertung der DM1-Biegefeder-Stegverschiebung

sein wird, ist die Unsicherheit der Messhebellänge wesentlich größer. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Messhebellängenveränderungen unter Last vernachlässigt werden können.

### Winkelstellung DM-Messstrang unter Last

Mit den vorhandenen Messmitteln ist es nur sehr schwer möglich, die Neigung der DM-Messstränge während des Kalibrierbetriebs festzustellen. Daher soll eine Abschätzung mittels der FE-Analyse erfolgen. Abbildung 4.6 stellt die Verschiebung der DM-Messstränge entlang der Achse vom Gegenlager bis zum Hebelflansch dar. Hierbei wird nur die Verschiebung in x-Richtung betrachtet.

Tabelle 4.2: Verschiebung der DM-Biegefederstege

BF-Steg	$u_x$ in mm	$u_y$ in mm	$u_z$ in mm
DM1	$-1,38 \cdot 10^{-2}$	$-0,57584$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
DM2	$-1,43 \cdot 10^{-2}$	$-0,57619$	$3,4 \cdot 10^{-3}$

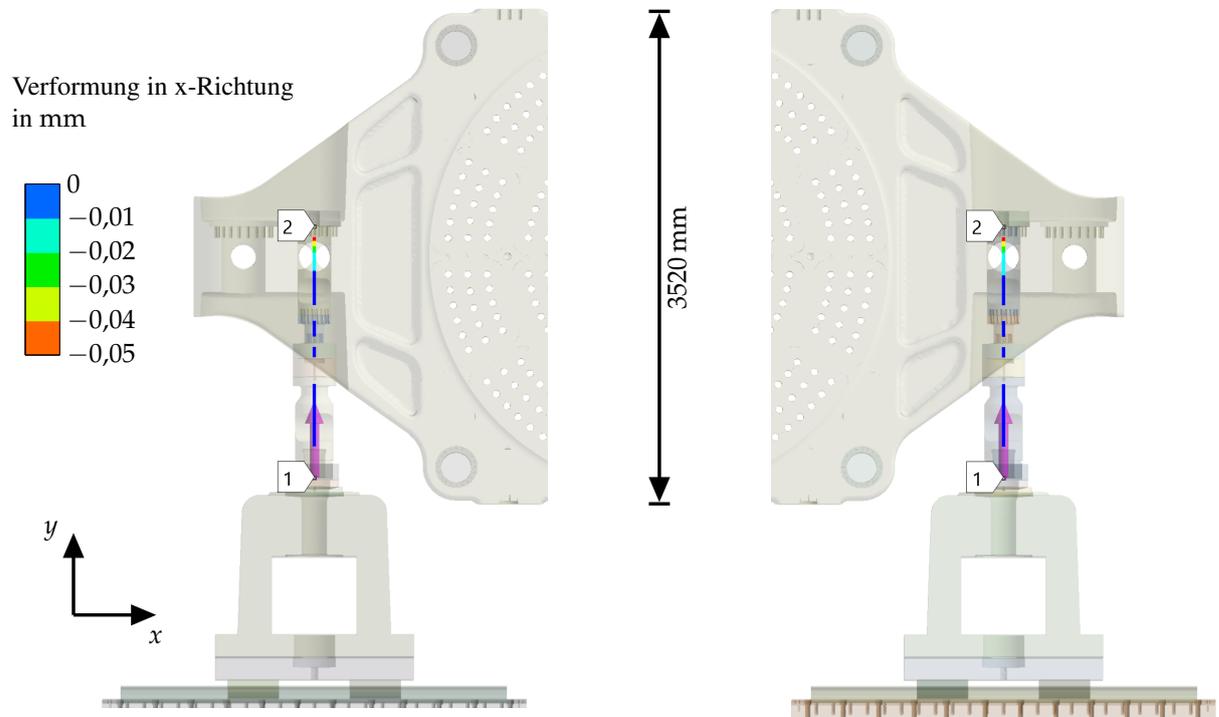


Abbildung 4.6: Darstellung der Winkelverstellung an beiden DM-Messträngen

Wie aus Tabelle 4.2 ersichtlich ist, bewegt sich der Hebel in z-Richtung nur um wenige  $\mu\text{m}$ . Die Verschiebung in y-Richtung trägt nicht zu einer Schiefstellung bei, so dass die Beschränkung auf die x-Richtung gerechtfertigt ist. Bei Betrachtung von Abbildung 4.6 lässt sich feststellen, dass die maximale Bewegung am oberen Biegefedersteg maximal 0,02 mm beträgt. Die Entfernung zum untersten Biegefedersteg beträgt 1216,3 mm, so dass sich auf beiden Seiten eine maximale Winkeländerung unter Last von  $0,000924^\circ$  ergibt. In der Analyse des Messunsicherheitsbudgets in Kapitel 5 wird gezeigt, dass der fertigungsbedingten Winkelfehler eine wesentlich höhere Unsicherheit mit sich bringt und der Winkelfehler durch Lastaufbringung daher vernachlässigt werden kann.

### Mittelpunktverschiebung

Mit der FE-Analyse kann die Frage beantwortet werden, ob es für die Messunsicherheitsbetrachtung zu einer relevanten Verschiebung des Messhebelmittelpunkts kommt. In einem angenommenen idealen System mit einem perfekt wirkenden Kräftepaar fallen Momentanpol und Hebelmittelpunkt zusammen. Dies erleichtert die Vermessung der Hebelarme. Wenn sich der Momentanpol verschiebt, ändert sich die tatsächliche Hebelarmlänge und die zuvor erfolgte Vermessung wird ungültig.

Tabelle 4.3 zeigt die Verschiebungen des Hebelmittelpunkts entlang des globalen Koordinatensystems. Die Verschiebungen in y- und z-Richtung sind im Bereich  $2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$ , also im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich. Sie liegen damit im Bereich der numerischen Unsicherheit der FE-Analyse. In x-Richtung

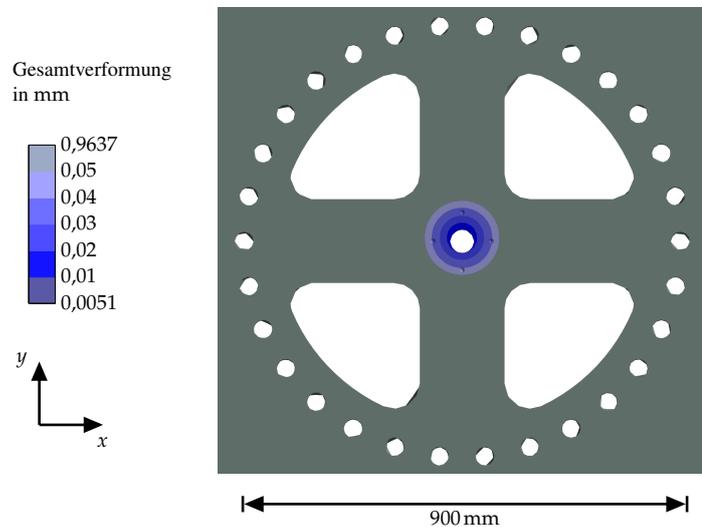


Abbildung 4.7: Verschiebung des Mittelpunkts des Messhebels

verschiebt sich der Mittelpunkt um  $1 \cdot 10^{-2}$  mm. Abbildung 4.7 stellt die Gesamtverformung des Messhebels dar und hebt den Bereich mit Verschiebungswerten unter  $5 \cdot 10^{-2}$  mm hervor. Der dunkelblaue Bereich markiert den Bereich der minimalen Gesamtverformung, dem Momentanpol. Der Bereich des Momentanpols weist eine maximale Verschiebung von  $1 \cdot 10^{-2}$  mm auf, die identisch mit der x-Verschiebung ist. Wenn die Gesamtverformung um diese Verschiebung in x-Richtung bereinigt wird, fallen der Momentanpol und der Hebelmittenpunkt zusammen. Je weiter sich eine betrachtete Verschiebung außerhalb des Momentanpols befindet, desto größer sind die Verformungen, die sich tangential um den Pol bewegen und zu dem konzentrischen Muster in Abbildung 4.7 führen.

### Kopplungspunkte zu Messsträngen

Die Bestimmung der Kraft- und Momentnebenschlüsse setzt, wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, den Steifigkeitskoeffizienten und die Verformungsmessung voraus. Für die Planung und Durchführung der Steifigkeitsermittlung und der Verformungsmessung ist es notwendig, die Verformungswerte an den Messstrangflanschen zu evaluieren. Tabelle 4.4 zeigt die Verschiebungen an den Kopplungspunkten von Messhebel und BM-Messsträngen. Da hier nur die tangentialen Verformungswege wichtig sind, sind lokale Koordinatensysteme an den BM-Messsträngen eingeführt worden, die in x-Richtung tangential zur Hebelrotation ausgerichtet sind und in y-Richtung radial zum Mittelpunkt zeigen. Die Koordinatensysteme sind in Abbildung 4.3 abgebildet. In Tabelle 4.4 werden die Verschiebungen als  $u_T$  für die tangentiale Verschiebung und als  $u_R$  für die radiale Verschiebung

Tabelle 4.3: Verschiebung des Mittelpunkts des Messhebels bei 5 MN·m

Dimension	Mittlere Verschiebung in mm
$u_x$	$1,3633 \cdot 10^{-2}$
$u_y$	$-1,7 \cdot 10^{-4}$
$u_z$	$-1,2 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 4.4: Verschiebung des BM-Messstrangs (Positionsangaben aus Sicht des Kalibriergegenstands auf die Messseite, siehe Abb. 4.3)

BM-Messstrang	Position	$u_T$ in mm	$u_R$ in mm
BM1	Links oben	0,645	$-7,84 \cdot 10^{-4}$
BM2	Rechts oben	0,645	$-5,76 \cdot 10^{-4}$
BM3	Links unten	0,653	$-5,76 \cdot 10^{-4}$
BM4	Rechts unten	0,653	$-7,31 \cdot 10^{-4}$

bezeichnet. Die Tangentialbewegungen  $u_T$  liegen bei den oberen BM-Messsträngen bei 0,645 mm und bei den unteren bei 0,653 mm. Aufgrund der symmetrischen Kreisbahn der Kopplungspunkte werden die radialen Bewegungen  $u_R$  vernachlässigt. In der FE-Analyse ist ersichtlich, dass der Zusammenhang zwischen globalen  $M_z$  und Reaktionskräfte bzw. -Momente und daraus resultierend die Verformungen an den BM-Messsträngen linear ist.

Die Verformung am DM-Messstrang in x-Richtung und damit in Richtung Hebelmitte liegen bei  $-6,5 \cdot 10^{-2}$  mm. Demgegenüber stehen die großen Verformungen durch die Axialkraft von etwa 1 MN auf den DM-Messstrang.

#### 4.2.4 Temperaturänderung

Für die thermische Untersuchung wird eine separate FE-Berechnung erstellt, die sich nur auf den Messhebel beschränkt. Im ersten Schritt wird dem Messhebel in einer thermo-statischen Analyse eine Temperatur von 22 °C aufgeprägt. Diese Temperatur entspricht der oberen Grenze der Hallenklimatisierung von  $(21 \pm 1)$  °C. Im zweiten Schritt kann diese Temperaturprägung in einer statisch-mechanischen Analyse importiert werden und um mechanische Randbedingungen erweitert werden. Das Ziel der mechanischen Randbedingungen ist es, die Lagersituation des Hebels abzubilden. Der Messhebel wird durch die Messstränge gelagert. Die BM- und DM-Messstränge schränken unterschiedliche Freiheitsgrade ein. Die BM-Messsträngen schränken im Wesentlichen die Bewegung in z-Richtung ein. Ein „Bonded-Kontakt“ kann hierfür verwendet werden, da nicht nur die z-Verschiebung, sondern auch alle anderen Verschiebungen eingeschränkt werden. ANSYS MECHANICAL bietet hierfür die Möglichkeit der „externen Verschiebung“, indem nur die Bewegungsrichtung vorgegeben wird. In diesem Fall wird für die z-Verschiebung der Wert null vorgegeben. Die Bewegung des Hebels wird durch die DM-Messstränge in y-Richtung ebenfalls durch eine externe Verschiebung eingeschränkt.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, die thermische Bewegung in x-Richtung zuzulassen, um die Messhebellängenänderung zu messen und gleichzeitig den Messhebel in allen sechs Freiheitsgraden zu sichern. Dazu wurde eine gedachte Aufhängung in der Hebelmitte eingeführt. Der

Tabelle 4.5: Verschiebung des DM-Messstrangs

DM-Messstrang	Position	$u_x$ in mm	$u_y$ in mm
DM1	Links	$-6,45 \cdot 10^{-2}$	-0,651
DM2	Rechts	$-6,48 \cdot 10^{-2}$	0,651

Gesamtverformung  
in mm

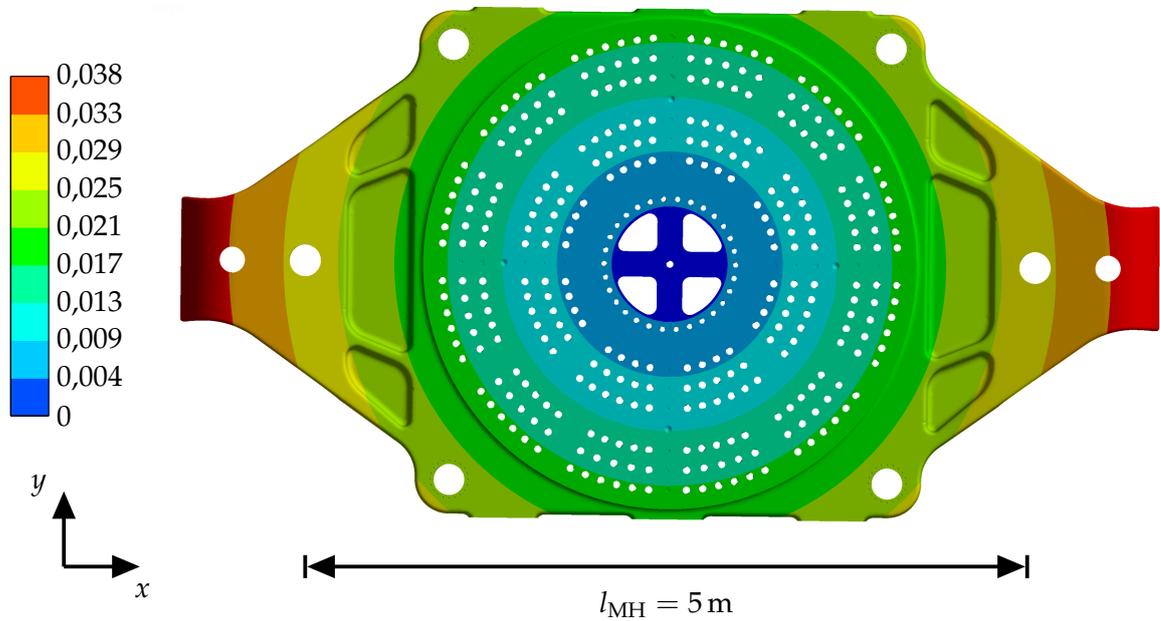


Abbildung 4.8: Ausdehnung des Messhebels durch Temperaturänderung um 1 K während einer Kalibrierung

Mittelpunkt des Hebels wird mittels einer externen Verschiebung in allen sechs Freiheitsgraden eingeschränkt. Die Überlegung ist gerechtfertigt, da sich der Hebel bei einer Ausdehnung in die Breite im Mittel nicht ändern wird.

Abbildung 4.8 zeigt die Ausdehnung des Messhebels durch eine Temperaturänderung um 1 K. Es zeigt eine gleichförmige Ausdehnung, die radial vom Hebelmittelpunkt zu nimmt. Eine Stichprobe an den kreisförmigen Ausschnitten der DM-Messtränge ergibt eine Verschiebung des Mittelpunkts von 0,0275 mm bei DM1 in  $x$ -Richtung und von 0,0275 mm bei DM2. In Summe entspricht das einer Messhebellängenänderung von 0,055 mm. Eine Überprüfungsrechnung mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  für ein Bauteil mit 5 m Länge ergibt eine Ausdehnung von 0,055 mm. Damit ist die Plausibilität der FE-Rechnung belegt.

# 5 Messunsicherheit der Referenzkraftaufnehmer

## 5.1 Beschreibung und Einsatz des Kraftaufnehmers

Die Referenzkraftaufnehmer sind Zugdruckkraftaufnehmer der Firma INTERFACE (siehe Abb. 5.1). Der Aufnehmertyp ist ein Scherkraftaufnehmer der Baureihe 1258 FLANGE PRECISION LOWPROFILE. Bei dem Aufnehmer handelt es sich um einen kompakten Aufnehmer mit hoher Steifigkeit und hoher Unempfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen. Der Aufnehmer ist sowohl kriech- als auch temperaturkompensiert im Bereich  $-15^{\circ}\text{C}$  bis  $45^{\circ}\text{C}$ . Integriert wird der Aufnehmer über eine flanschseitige Montage. Der Sensor ist mit zwei  $F_z$ -Kanälen sowie zwei Biegemomentkanälen  $M_x$ - und einem  $M_y$ -Kanal ausgestattet. Der Aufnehmer hat einen Nennwert von 1200 kN, um sowohl die Hebelarmkraft bei  $5\text{MN}\cdot\text{m}$  als auch das halbe Hebelgewicht messen zu können. Bei 1200 kN beträgt das Messsignal etwa  $2,7\text{mV/V}$ .

Der DM-Referenzkraftaufnehmer ist in der Mitte des DM-Messstrangs eingebaut. Die Ausrichtung der x- und y-Achse für die Biegemomentkanäle wird über Passstiftbohrungen erreicht. Um die Stabilität der Referenzkraftaufnehmer zur Drehmomentmessung zu gewährleisten, ist eine Rekalibrierung der Aufnehmer im Abstand von zwei Jahren angestrebt. Zu diesem Zweck lassen sich die Gegenlager aus der Maschine fahren. Der Messstrang kann anschließend demontiert werden. Zusätzliche Kalibrieradapter sorgen dafür, dass eine Rekalibrierung innerhalb der PTB ermöglicht wird.

Für die Hebelkraft ist neben dem Messwert der Kraftaufnehmer die Ausrichtung des Kraftvektors entscheidend. Da es sich um ein ebenes Problem handelt, reicht die Betrachtung der Winkelabweichung  $\alpha_{\text{DMj}}$  von der idealen orthogonalen Wirklinie zum Hebelarm aus (siehe Abb. 4.1). Die sich einstellende Winkelabweichung ist ein Ergebnis der Aufsummierung der Ebenheits- und Parallelitätsabweichungen aller Bauteile des DM-Messstrangs, die vom Gegenlager bis zum Hebelansch gehen (siehe Abb. 3.9). Für eine maximale Abschätzung werden die für die Fertigung angegebenen Toleranzen herangezogen und über die Bauteildurchmesser in eine Winkelangabe umgerechnet. Die Summe aller Winkelabweichungen ergibt die gewünschte maximale Winkelabweichung  $\alpha_{\text{DMj}}$  von  $0,0205^{\circ}$ .

Die gesamte Last des Messhebels liegt auf beiden DM-Messsträngen. Das bedeutet, dass beide DM-Referenzkraftaufnehmer eine dauerhafte Vorbelastung in Höhe von etwa 180 kN erfahren. Je

Tabelle 5.1: FE-Analyse der Referenzkraftaufnehmer

Komponente	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
Einheit	in N	in N	in N	in N·m	in N·m	in N·m
DM1	-12,9	$9,995 \cdot 10^5$	9,8	139,5	-1,4	85,2
DM2	22,0	$-9,995 \cdot 10^5$	-7,2	150,2	-2,0	94,9

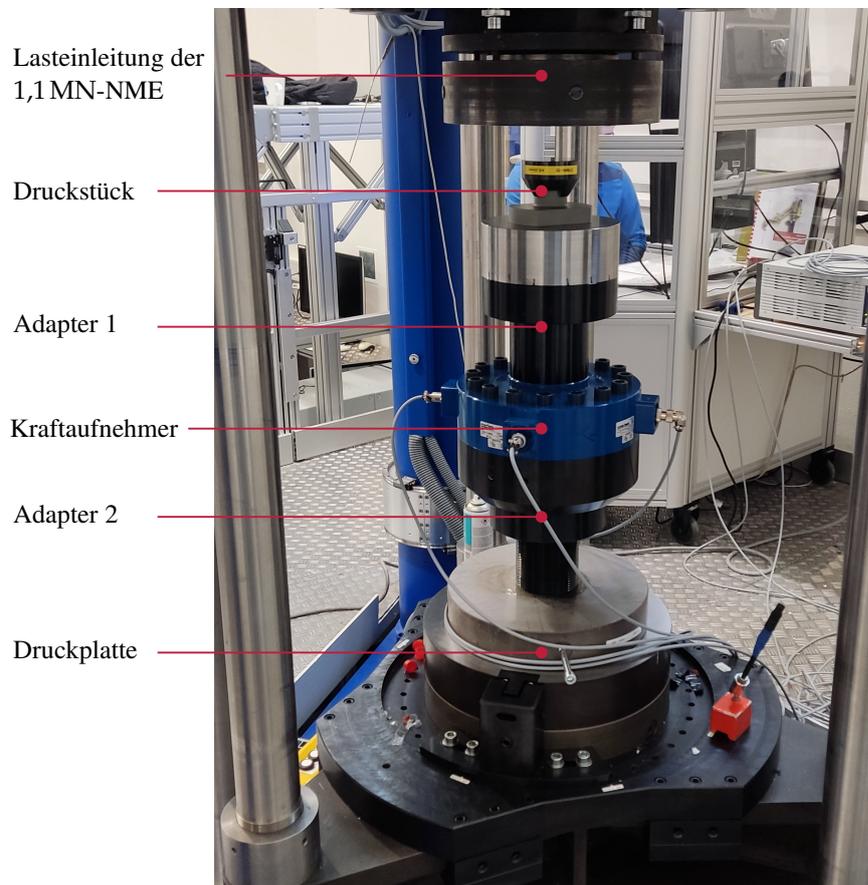


Abbildung 5.1: Foto eines BM-Referenzkraftaufnehmers vor der Kalibrierung in der 1 MN-Kraft-Normalmesseinrichtung

nachdem, ob ein Links- oder Rechtsdrehmoment kalibriert wird, wechselt einer der beiden Aufnehmer in den Zug- oder in den Druckbereich. Während des Betriebes kommt es zu Störeinflüssen auf den Aufnehmer, weshalb die Biegemomentmessbrücken zur Überwachung im Betrieb eingesetzt werden.

Aufbauend auf der FE-Analyse aus Abschnitt 4.2 kann die Belastungssituation der DM-Kraftaufnehmer analysiert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 für DM1 und DM2 dargestellt. Querkräfte sind bei den Referenzkraftaufnehmern nur im verminderten Bereich vorhanden und können vernachlässigt werden. Die Torsionsmomente sind ebenfalls klein. Bei den Biegemomenten werden um die  $x$ -Achse etwa  $150 \text{ N}\cdot\text{m}$  und um die  $y$ -Achse etwa  $90 \text{ N}\cdot\text{m}$  erwartet (siehe Abschnitt 4.2). Die lokalen Achsen im FE-Modell sind parallel zu den globalen Achsen ausgerichtet. Die Achsen des Aufnehmers stimmen nicht mit den Achsen des globalen Koordinatensystems überein, so dass die  $x$ -Achse parallel zur globalen  $z$ -Achse und die  $y$ -Achse parallel zur globalen  $x$ -Achse liegt.

Tabelle 5.2: Übersicht der DM-Kraftaufnehmerkalibrierungen

Bezeichnung	Kraftaufnehmer	Datum	Richtung	Messeinrichtung
22054-01	DM1	08.07.2022	Druck	2 MN-K-NME
22054-02	DM1	30.06.2022	Zug	1 MN-K-NME
22054-03	DM1	01.07.2022	Zug	1 MN-K-NME
22054-04	DM1	04.07.2022	Druck	1 MN-K-NME
22054-05	DM2	18.07.2022	Druck	2 MN-K-NME
22054-06	DM2	25.07.2022	Zug	1 MN-K-NME
22054-07	DM2	26.07.2022	Zug	1 MN-K-NME
22054-08	DM2	27.07.2022	Druck	1 MN-K-NME

## 5.2 Kraftkalibrierungen der DM-Referenzkraftaufnehmer

In Tabelle 5.2 sind alle Kalibrierungen nach DIN EN ISO 376 im Vorfeld der ersten Inbetriebnahme der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung gelistet [44].

Beide Referenzkraftaufnehmer sind je zweimal im Druckbereich und im Zugbereich kalibriert worden. Die Druckkalibrierung erfolgte in den Kraft-Normalmesseinrichtungen (K-NME) 1 MN-K-NME und 2MN-KMNE. In der 1 MN-K-NME sind die Aufnehmer in 10 %-Schritten bis 1000 kN, in der 2 MN-K-NME in 10 %-Schritten bis 1200 kN kalibriert worden. Die Zugkalibrierung erfolgte nur in der 1 MN-K-NME bis 850 kN, ebenfalls in 10 %-Schritten. Durch die Wiederholungen der Kalibrierungen werden die Aufnehmer mehrfach auf Nennlast belastet. Aus Erfahrung ist bekannt, dass die Messergebnisse der Aufnehmer zunächst schlechter sind, bis sich ein stabiles Niveau bei hoher Genauigkeit etabliert. Dieses Verhalten lässt sich gut an der Verbesserung der Klassifizierung für die Zugkalibrierung in Tabelle 5.4 erkennen. Im Gegensatz zur Druckkalibrierung ist die Klassifizierung vergleichbar, da hier die gleichen Kraftbereiche und die gleichen Kraft-Normalmesseinrichtungen verwendet wurden.

Die Aufnehmer werden nach der DIN EN ISO 376 in vier Klassen (2/1/0,5/00) eingeteilt. Die Klasse 00 stellt die genaueste Klasse dar. Die Klasseneinteilung ist in den DIN EN ISO 376 nach den Fällen A bis D sortiert und bezieht sich auf die Einstufung der einzelnen Unsicherheitsparameter. Die Wahl der Klasse ist dem Anwender überlassen und hängt vom späteren Verwendungszweck ab. Die Fälle A bis D sind in Tabelle 5.3 gelistet und zeigen die Unsicherheitsparameter, die für jeden Fall zu berücksichtigen sind. Für die Definition der Unsicherheitsparameter sei auf die DIN EN ISO 376 verwiesen.

Die Referenzkraftaufnehmer messen im Einsatz Kräfte, die nicht mit den eingestellten Laststufen während der Kalibrierung übereinstimmen. Zur Ermittlung beliebiger Kräfte außerhalb der Stützstellen der Kalibrierung wird im Kalibrierschein eine Kalibrierkurve angegeben. Die Unterschiede zwischen Kalibrierkurve und Stützstellen werden als Interpolationsabweichung in der Messunsicherheit berücksichtigt. Im Kalibrierbetrieb werden Drehmomentstufen sowohl in Aufwärts- als auch Abwärtsreihen gefahren, so dass die Kraftaufnehmer ebenfalls zunehmende und abnehmende Kräfte erfassen müssen. Die dadurch entstehende Unsicherheit wird als relative Umkehrspanne bezeichnet. Die Berücksichtigung der beiden Parameter Umkehrspanne und Interpolationsabwei-

Tabelle 5.3: Fallunterscheidung nach DIN EN ISO 376

Fall	Diskrete Kraftstufen	Kriechabweichung	Umkehrspanne	Interpolationsabweichung
A	x	x	-	-
B	x	-	x	-
C	-	x	-	x
C+	-	x	x	x
D	-	-	x	x

Tabelle 5.4: Klassifizierung der Zugkalibrierung nach Fall D

Aufnehmer	DM1	DM2	DM1	DM2
Datum	30.06.2022	25.07.2022	01.07.2022	26.07.2022
80 kN bis 850 kN	0,5	0,5	0,5	0,5
160 kN bis 850 kN	0,5	0,5	0,5	00
240 kN bis 850 kN	0,5	00	00	00
320 kN bis 850 kN	0,5	00	00	00
400 kN bis 850 kN	00	00	00	00

chung führt zu einer Betrachtung der Klassifikation nach Fall D. Die Klassifikation nach Fall D ist in Tabelle 5.4 dargestellt. Die beiden linken Spalten zeigen jeweils die erste Kalibrierung, die beiden rechten Spalten die zweiten und aktuell gültigen Zugkalibrierungen. Besonders deutlich zeigt sich die Verbesserung der Klassifizierung bei DM1, da in der ersten Kalibrierung nahezu alle Kraftbereiche die Klasse 0,5 aufweisen. In der zweiten Kalibrierung wird nur ab einem Bereich von 160 kN bis 850 kN die Klasse 0,5 erreicht.

## 5.3 Kalibrierkurve und Nullpunkte

Das Ergebnis der Kalibrierung ist die Zuordnung des mV/V-Signals zur eingestellten Kalibriergröße, in diesem Fall einer Kraft. Die Regressionsanalyse liefert eine Kurve, die den Zusammenhang zwischen dem Spannungs- und Kraftsignal darstellt und als Kalibrierkurve bezeichnet wird. Die vorliegenden Kalibrierkurven haben die Form eines Polynoms dritten Grades, deren Koeffizienten in Tabelle 5.5 dargestellt sind. Als Kalibrierkurve wird die für den Aufnehmer jeweilige aktuellste Zug- bzw. Druckkalibrierung ausgewählt. Die Erfassung des Aufnehmernullsignals geschieht in der

Tabelle 5.5: Kalibrierpolynom  $f = a \cdot X + b \cdot X^2 + c \cdot X^3 + d$ , F: Kraftsignal in kN, X: Signal in mV/V

Aufnehmer	Richtung	a	b	c	d
DM1	Druck	-444,2869	0,1353	0,028 81	-0,054
DM2	Druck	-443,1958	0,0636	0,008 75	-0,036
DM1	Zug	444,3363	0,1636	-0,0062	-0,0349
DM2	Zug	443,1129	0,2272	-0,0215	-0,0154

Regel vor jeder Messung im unbelasteten Zustand, um einen zum Nullpunkt relativen Kraftwert messen zu können. Durch den Einbau der DM-Kraftaufnehmer in der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung kann die Aufnehmernull nicht direkt vor einer Kalibrierung aufgezeichnet werden, da ein völlig unbelasteter Zustand nicht hergestellt werden kann. Daher werden die Nullwerte aus der Kalibrierung verwendet, in der ein unbelasteter Zustand vorgelegen hat. Aus Abbildung 5.2 geht hervor, dass die Nullwerte für jeden Aufnehmer und vor jeder Kalibrierung unterschiedlich sind. An den ausgewählten Stützstellen im Kalibrierbetrieb der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung kann eindeutig festgestellt werden, ob der Aufnehmer auf Druck oder auf Zug belastet wird. Da die Kalibrierkurve zu einem bestimmten Nullpunkt festgestellt wird, wird die Null nach Art der Belastung festgelegt. Dabei wird in der vorliegenden Arbeit der Nullwert bei Zugbelastung aus der aktuellsten Zugkalibrierung und analog bei der Druckbelastung der Nullwert aus der aktuellsten Druckkalibrierung verwendet.

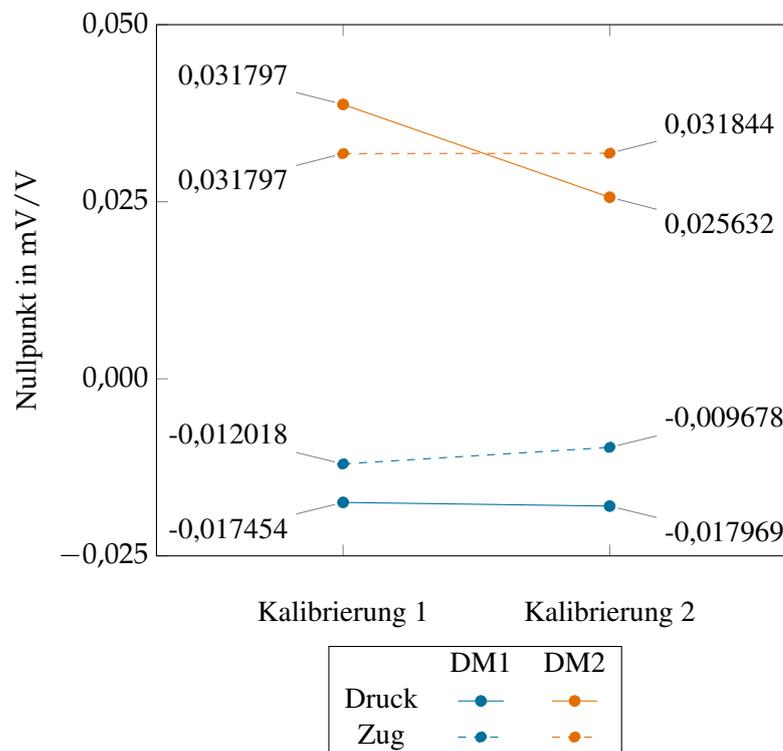


Abbildung 5.2: Festlegung der Nullpunkte als Mittelwert des Zug- und Druckbereichs

## 5.4 Messunsicherheit der Referenzkraftaufnehmer

In den Abbildungen 5.3 und 5.4 werden die erweiterten Messunsicherheiten ( $k = 2$ ) der einzelnen Kalibrierungen dargestellt. Wie im Abschnitt 5.2 bereits erläutert, wird die Messunsicherheit nach Fall D ermittelt. Für alle Kalibrierergebnisse gilt, dass die Messunsicherheiten mit größeren Laststufen abfallen. Das ist insofern schlüssig, da die Aufnehmer zur Erfassung der Kraftwerte im Bereich des Nennwerts optimiert werden. Bei gleichbleibender Auflösung bleiben die absoluten Unsicherheiten bestehen, was bei kleineren Kraftwerten zu höheren relativen Unsicherheiten

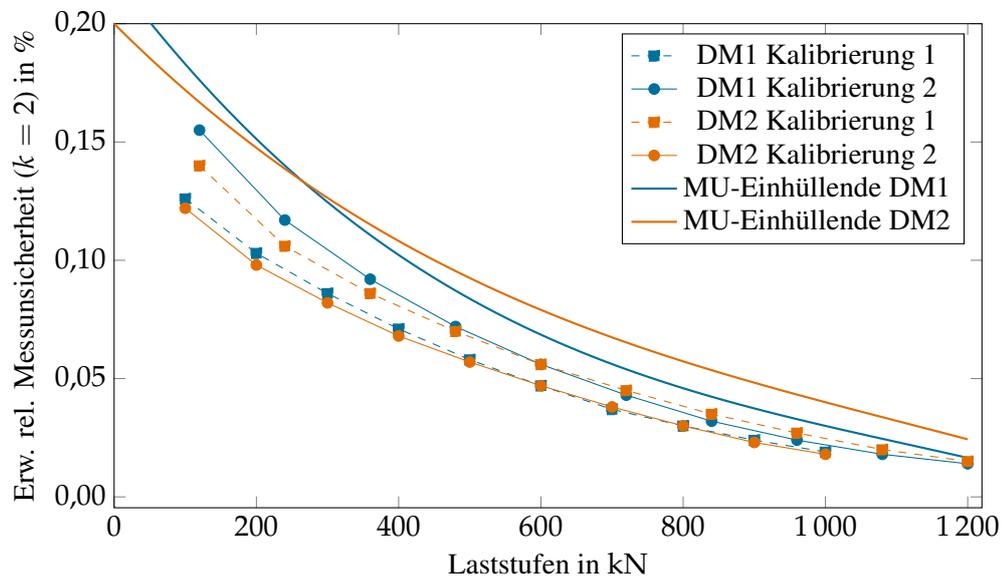


Abbildung 5.3: Erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) der Referenzkraftaufnehmer im Druckbereich

führt. Ebenfalls ist die sinkende Messunsicherheit von der ersten zur zweiten Zugkalibrierung in Abbildung 5.4 als Bestätigung der Ergebnisse aus Tabelle 5.4 zu erkennen. Die Kurven der zweiten Kalibrierung liegen sowohl vom DM1- als auch dem DM2-Aufnehmer unter dem Kurven der ersten Kalibrierung, wobei der Unterschied bei DM1 größer ausfällt.

In Abbildung 5.3 zeigt sich die Verbesserung der Messunsicherheit durch die Wiederholung der Kalibrierung nicht mehr. Hier ist die Vergleichbarkeit allerdings nicht direkt gegeben, da die erste Kalibrierung bei DM1 in der 2 MN-K-NME und die zweite Kalibrierung in der 1 MN-K-NME stattgefunden hat. Bei DM2 ist diese Reihenfolge umgekehrt. Auffällig ist, dass die Messunsicherheiten beider Kalibrierungen unabhängig von der Reihenfolge der Kalibrierung in der 2 MN-K-NME kleiner sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Messunsicherheiten für Zug im Bereich zwischen 80 kN bis 850 kN und für Druck im Bereich zwischen 100 kN bis 1200 kN nie über 0,16 % liegen. Die Angabe von 0,16 % als Messunsicherheit für alle Stufen ist jedoch ungeeignet. Im Bereich des Nennwerts sind die Unsicherheiten wesentlich niedriger. Alternativ kann daher eine einhüllende Messunsicherheitsfunktion aus dem Kalibrierschein angewendet werden, um die Messunsicherheiten für beliebige Kraftwerte abzuschätzen. Diese sind als durchgezogene Linie in den Abbildungen 5.3 und 5.4 dargestellt.

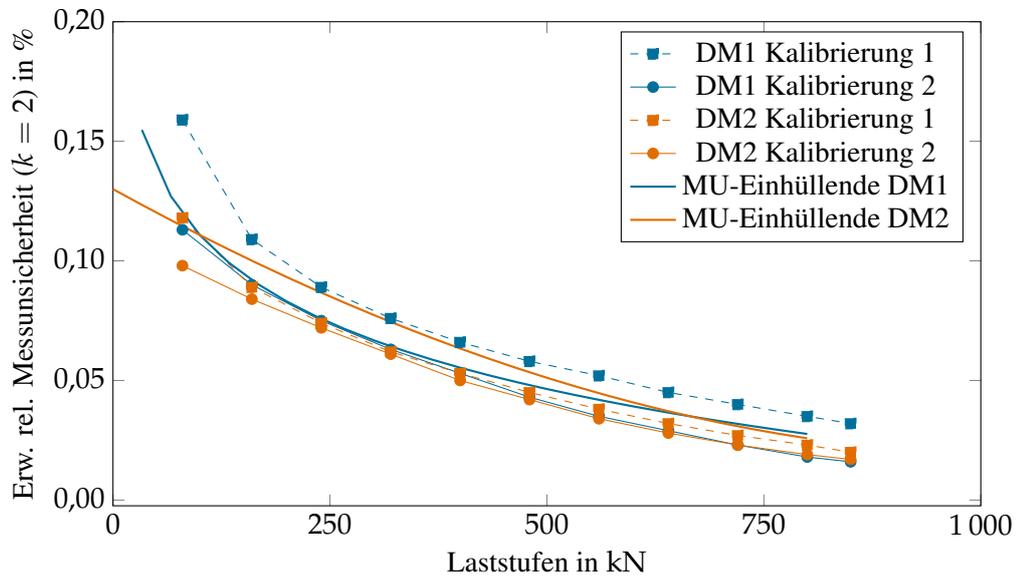


Abbildung 5.4: Erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) der Referenzkraftaufnehmer im Zugbereich

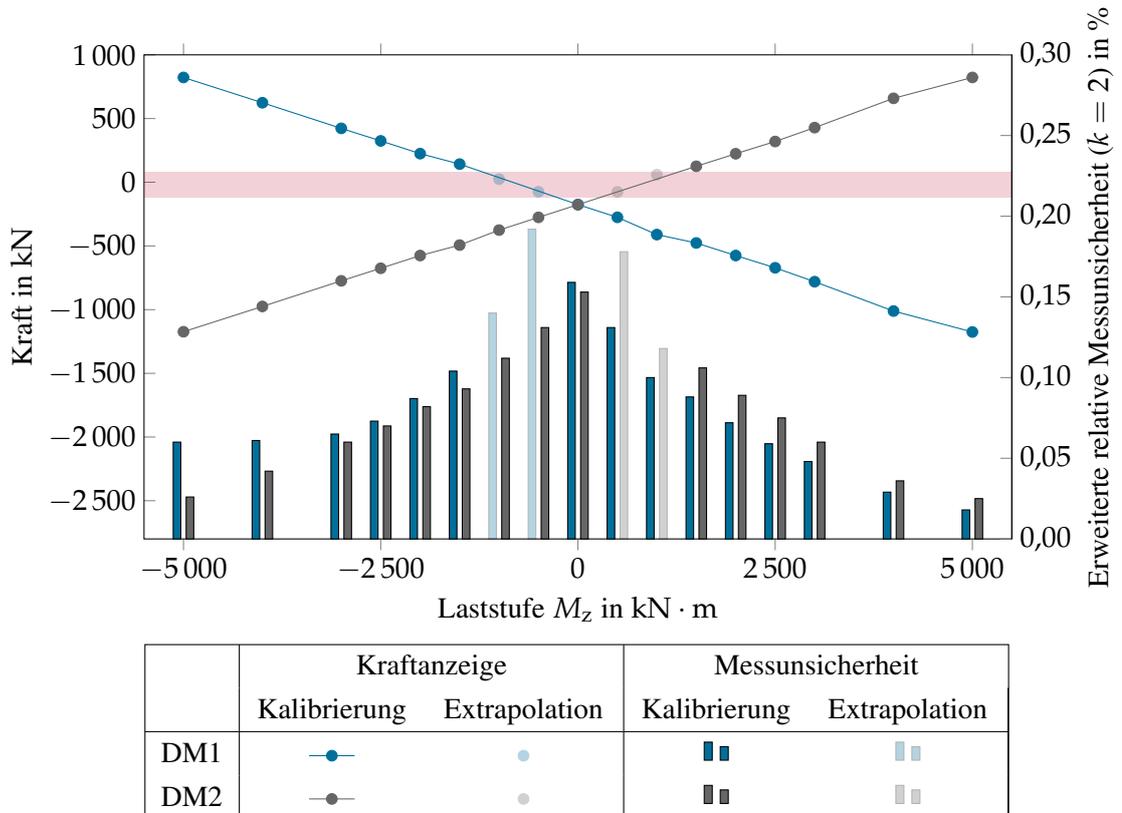


Abbildung 5.5: Erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) über die Laststufen  $M_z$  in kN·m

Des Weiteren stellt sich die Frage, in welchen Bereichen eine bestimmte Messunsicherheit eines Referenzkraftaufnehmers überschritten wird. In Abbildung 5.5 ist der zu erwartende Kraftwert für beide Kraftaufnehmer zu jeder Drehmomentstufe von  $-5\text{ MN}\cdot\text{m}$  bis  $5\text{ MN}\cdot\text{m}$  dargestellt. Hier

ist die Vorlast eines jeden Aufnehmers durch das halbe Hebelgewicht von ca. 180 kN zu beachten. In rot ist der Bereich der Kraftaufnehmerwerte eingetragen, für die keine validen Messunsicherheitsbeiträge vorliegen. Die Kalibrierung der Aufnehmer hat für Zug in einem Bereich von 80 kN bis 800 kN und für Druck im 120 kN bis 1200 kN stattgefunden. Die Kraftwerte, die außerhalb dieses Bereichs liegen, werden daher extrapoliert und sind in Abbildung 5.5 mit dem roten Band hinterlegt. Aus dem Diagramm geht hervor, dass eine Drehmomentkalibrierung mit einer erweiterten Messunsicherheit von unter 0,2% prinzipiell nur im Bereich von 1500 kN·m bis 5000 kN·m möglich ist.

# 6 Messunsicherheit der Momentnebenschlüsse

## 6.1 Analyse der Nebenschlüsse im Kalibrierbetrieb

In Abschnitt 4 wurden die Momentnebenschlüsse bereits identifiziert. Sie bestehen aus

- Drehmomenten resultierend aus Tangentialkraft  $F_T$  der BM-Messstränge,
- Torsionsmomenten  $M_T$  an den BM-Messsträngen und
- Biegemomenten  $M_B$  an den BM-Messsträngen.

Tabelle 6.1 stellt die Lastsituation der BM-Messstränge in einer FE-Analyse bei einer Belastung von  $5\text{ MN}\cdot\text{m}$  dar. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf den beiden Nebenschlüssen  $F_T$  und  $M_T$ . Die Werte sind in einem für jeden BM-Messstrang unterschiedlichen lokalen Koordinatensystem aufgetragen. Dabei wird die x-Achse tangential zur Kreisbewegung des Hebels um den Mittelpunkt ausgerichtet. Die y-Achse zeigt in Richtung Hebelmittelpunkt (siehe Abbildung 4.3). Zur Unterscheidung vom globalen Koordinatensystem wird statt  $F_{x,\text{BMi}}$  die Bezeichnung Tangentialkraft  $F_{T,\text{BMi}}$  eingeführt und statt  $M_{z,\text{BMi}}$  das Torsionsmoment  $M_{T,\text{BMi}}$  verwendet. Aus Tabelle 6.1 lässt sich die Größenordnung der auftretenden Kräfte bzw. Momente und die resultierende Verformung am Messstrang ablesen.  $F_T$  und  $M_T$  gehen bis maximal  $250\text{ N}$  bzw.  $150\text{ N}\cdot\text{m}$ . Verglichen mit den auftretenden Axialkräften  $F_z$ , die bei knapp  $18\text{ kN}$  liegen, sind die Tangentialkräfte sehr klein, was die Messung mit DMS aufgrund des hohen Übersprechens ausschließt. Die auftretenden Radialkräfte  $F_{y,\text{BMi}}$  und die Biegemomente  $M_y$  sind vernachlässigbar klein und wirken sich nicht auf die  $M_z$ -Nebenschlüsse aus. Auffällig sind die Biegemomente um die x-Achse, die bei etwa  $100\text{ N}\cdot\text{m}$  bis  $130\text{ N}\cdot\text{m}$  liegen. Wenn die BM-Messstränge vereinfacht als Balken angesehen werden, ergibt sich die einstellende Biegelinie aus den Lagerkräften und -momenten. Die Kombination aus  $F_T$  und  $M_x$  ist daher entscheidend für die Verformung, die sich am Ende des Messstrangs am Messhebel einstellt. Das Verhältnis

$$\frac{M_x}{F_T} = 0,561 \quad (6.1)$$

ist konstant für alle Laststufen. Dies gilt es bei der Wahl der Verformung als Messgröße zu berücksichtigen, um die wirkende Tangentialkraft zu ermitteln. Die Torsionsmomente  $M_T$  liegen bei  $117\text{ N}\cdot\text{m}$  bzw.  $135\text{ N}\cdot\text{m}$ . Die Unterschiede zwischen den oberen und unteren Momenten bei gleicher Verdrehung sind auf die unterschiedlichen Schaftdicken der Messstränge zurückzuführen.

Tabelle 6.2 stellt analog Lastsituation der DM-Messstränge dar. Hier wird das lokale Koordinatensystem des DM-Messstrangs parallel zum globalen Koordinatensystem ausgerichtet. Die Messstränge unterliegen ebenfalls einer hohen Axialkraft  $F_z$  bis zu  $1\text{ MN}$ , wobei das Verhältnis Axialkraft zu den Querkraften  $F_x$  und  $F_y$  um den Faktor  $1 \cdot 10^3$  höher liegt. Die Querkraft in x-Richtung trägt, ähnlich wie bei den BM-Messsträngen, zu einer Verringerung des Biegemoments entlang der z-Achse des DM-Messstrangs bei. Diese Verringerung liegt bei einer Messstranglänge

Tabelle 6.1: FE-Analyse der Nebenschlüsse am BM-Messstrang bei einer Belastung von 5 MN·m und einem Hebeltorsionswinkel von  $\alpha_Z = 0,019^\circ$ , dargestellt im lokalen Koordinatensystem (siehe Abb. 4.3)

Belastung		BM1	BM2	BM3	BM4
$F_x$ ( $F_T$ )	N	-214,7	-191,6	-193,9	-217,5
$u_T$ ( $u_T$ )	mm	0,675	0,645	0,653	0,654
$k_{FT,FE}$	N/mm	318,2	296,8	296,8	332,8
$F_y$ ( $F_R$ )	N	10,7	-10,2	-14,2	14,5
$F_Z$	N	-17 396	17 395	17 381	-17 382
$M_x$	N·m	-7,5	7,4	9,5	-9,8
$M_y$	N·m	-128,1	-103,6	-104,7	-129,6
$M_z$ ( $M_T$ )	N·m	134,7	134,7	116,9	116,98
$\gamma$	°	0,017	0,017	0,017	0,017
$k_{MT,FE}$	N·m/°	7939,2	7939,8	6867,1	6867,9

von unter 1,5 m bei etwa 15 N·m, was für die spätere Verformungsanalyse vernachlässigt werden kann. Das Biegemoment  $M_x$  bzw.  $M_B$  liegt am Hebelflansch bei etwa 150 N·m. Die Verschiebung fällt mit 0,065 mm gering aus. Sie ist für die DM-Messstränge auf Höhe des Flansches bei positivem Kalibriermoment negativ. Die symmetrische Verschiebung in die gleiche Richtung ergibt sich durch die Position der DM-Hebelflanschebene in y-Richtung über dem Hebelmittelpunkt. Alle Punkte oberhalb des Mittelpunkts erfahren bei einer Rotationsbewegung durch ein positiv wirkendes Drehmoment  $M_Z$  (und somit positivem Torsionswinkel  $\alpha_z$ ) eine negative Verschiebung in x-Richtung. Die Bewegung  $u_{MB}$  in x-Richtung sind an den Referenzpunkten am DM-Hebelflansch somit beide negativ. Die Torsionsmomente und Biegemomente um die x-Achse spielen für die Nebenschlüsse des Kalibriermoments  $M_z$  ebenfalls keine Rollen.

Abbildung 6.1 stellt die Verläufe der Nebenschlüsse und des Messhebelrotationswinkels über ein Kalibriermoment von 1 MN·m bis 5 MN·m dar. Aus den Verläufen ist trotz der Kreisbewegung ein linearer Verlauf zu erkennen, da die resultierenden Verformungswinkel klein genug sind. Aus der FE-Analyse können daher die Steifigkeitskoeffizienten der einzelnen Nebenschlüsse prognostiziert werden, um einen Richtwert für den Vergleich der experimentellen Ergebnisse zu haben. Aus der Tangentialkraft resultiert die Tangentialbewegung  $u_x$  bzw.  $u_T$ . Diese liegt im Maximum bei 0,7 mm. Wird ein linearer Zusammenhang zwischen Tangentialkraft und Tangentialverschiebung vorausgesetzt, kann als Richtwert für die Steifigkeitskoeffizienten  $k_{FT} = F_T/u_T$  von etwa 300 N/mm angenommen werden. Aus den Torsionsmomenten ergibt sich ein Torsionswinkel  $\gamma_T$  von etwa  $0,017^\circ$ . Der Steifigkeitskoeffizient  $k_{MT} = M_T/\gamma_T$  liegt bei etwa 7000 N·m/° bis 8000 N·m/°. Ein Biegemoment auf den Messstrang erzeugt eine Verformung  $u_x$  bzw.  $u_{MB}$  von etwa -0,065 mm. Der Steifigkeitskoeffizientenrichtwert für  $k_{MB} = M_B/u_{MB}$  liegt bei etwa 2000 N·m/mm.

Die FE-Analyse dient als Grundlage bei dem Entwurf eines Messverfahrens zur Ermittlung der genannten Nebenschlüsse und wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

Tabelle 6.2: FE-Analyse der Nebenschlüsse am DM-Messtrang bei einer Belastung von  $5\text{ MN}\cdot\text{m}$  und einem Hebeltorsionswinkel von  $\alpha_Z = 0,019^\circ$ , dargestellt im globalen Koordinatensystem (siehe Abb. 4.3)

Belastung		DM1	DM2
$F_x$	N	-12,8	21,9
$F_y$	N	9,9	-7,1
$F_z$	kN	999,49	999,49
$M_x$	N·m	-13,7	11,1
$M_y$	N·m	-1,4	-2,0
$M_z (M_B)$	N·m	-162,1	-123,7
$u_x$	mm	-0,063	-0,063
$(u_{MB})$			
$M_{z,KA}$	N·m	85,3	94,7
$d_{FL-KA}$	mm	827,0	827,0
$k_{MB,FE}$	N·m/mm	2588,0	1970,4

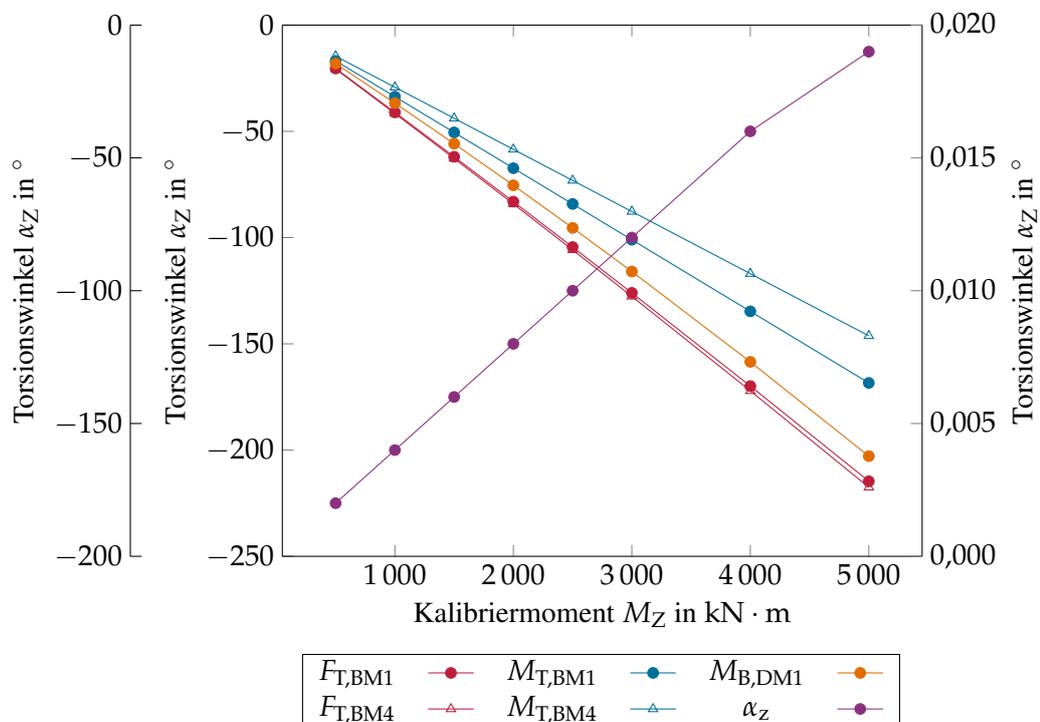


Abbildung 6.1: Linearer Verlauf der Nebenschlüsse und des Messhebeltorsionswinkels  $\alpha_Z$  mit zunehmendem Kalibriermoment  $M_Z$

## 6.2 Messverfahren zur Bestimmung der Nebenschlüsse

Das Messverfahren zur Bestimmung der Nebenschlüsse basiert auf der experimentellen Ermittlung des Steifigkeitskoeffizienten für eine spezifische Lastkombination und der indirekten Messung der Verformung am Messstrang über eine Rotationsmessung des Messhebels. Das Messverfahren kann nur angewendet werden, wenn ein linearer Zusammenhang zwischen Nebenschluss und Verformung existiert. Der Linearitätskoeffizient stellt in diesem Fall den Steifigkeitskoeffizienten dar und die Berechnung der Kräfte bzw. Momente ergibt sich aus:

$$\text{Tangentialkraft: } F_T = k_{FT} \cdot u_T, \quad (6.2)$$

$$\text{Torsionsmoment: } M_T = k_{MT} \cdot \gamma_{MT}, \quad (6.3)$$

$$\text{Biegemoment: } M_B = k_{MB} \cdot u_{MB}. \quad (6.4)$$

Zum Zeitpunkt des Verfassens der Arbeit erlaubten die verfügbaren Hilfsmittel keine simultane Vermessung der einzelnen Verformungen an den BM-Messsträngen. Die FE-Analyse zeigt, dass zwischen dem Torsionswinkel  $\alpha_z$  und dem Kalibrierdrehmoment  $M_z$  ein linearer Zusammenhang besteht. Aus den kinematischen Beziehungen zwischen Torsionswinkel  $\alpha_z$  und den Verformungen der BM- und DM-Messstränge auf der Kreisbahn ergeben sich folgende kinematischen Zusammenhänge

$$u_T = \sin(\alpha_z) \cdot r_{BM}, \quad (6.5)$$

$$\gamma_{MT} \approx \alpha_z, \quad (6.6)$$

$$u_{MB} = (\cos(\alpha_B) - \cos(\alpha_{B,0})) \cdot r_{DM,FI}. \quad (6.7)$$

Eine Übersicht über die durch die Rotationsbewegung entstehenden Verformungen ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

Die Verschiebung  $u_T$  bezeichnet die tangentielle Verschiebung der BM-Messstränge auf einer Kreisbahn um den Messhebelmittelpunkt und kann bei bekanntem Abstand  $r_{BM}$  trigonometrisch hergeleitet werden. Der Torsionswinkel  $\gamma_{MT}$  ist annähernd gleich groß wie der Torsionswinkel  $\alpha_z$  des Messhebels. Der analytische Nachweis ist sehr aufwändig, daher sei an dieser Stelle auf die Ergebnisse der FE-Analyse hingewiesen, die diese Annahme rechtfertigen (siehe Tab. 6.1).

Die Berechnung der Bewegung am DM-Flansch unterscheidet sich zu der am BM-Flansch, weil die Verschiebung nicht tangential zur Kreisbewegung erfolgt, sondern parallel zur globalen x-Achse. Der Anteil der Bewegung in x-Richtung ergibt sich aus dem Cosinus. Da der Flansch oberhalb des Mittelpunkts des Messhebels liegt, ist der Ausgangswinkel  $\alpha_{B,0}$  zu berücksichtigen. Der  $r_{DM,FI}$  ist der Abstand des Flanschmittelpunkts zum Rotationspunkt. Der sich im Betrieb einstellende Winkel  $\alpha_B$  errechnet sich aus dem Anfangswinkel  $\alpha_{B,0}$  und dem Torsionswinkel  $\alpha_z$

$$\alpha_B = \alpha_{B,0} - \alpha_z \quad (6.8)$$

Das Ergebnis  $u_{MB}$  ist die Differenz der beiden Cosinus-Terme (siehe Gl. 6.7).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die Messung der Nebenschlüsse sowohl die Steifigkeitskoeffizienten und als auch der Torsionswinkel bestimmt werden müssen. Die folgenden Ab-

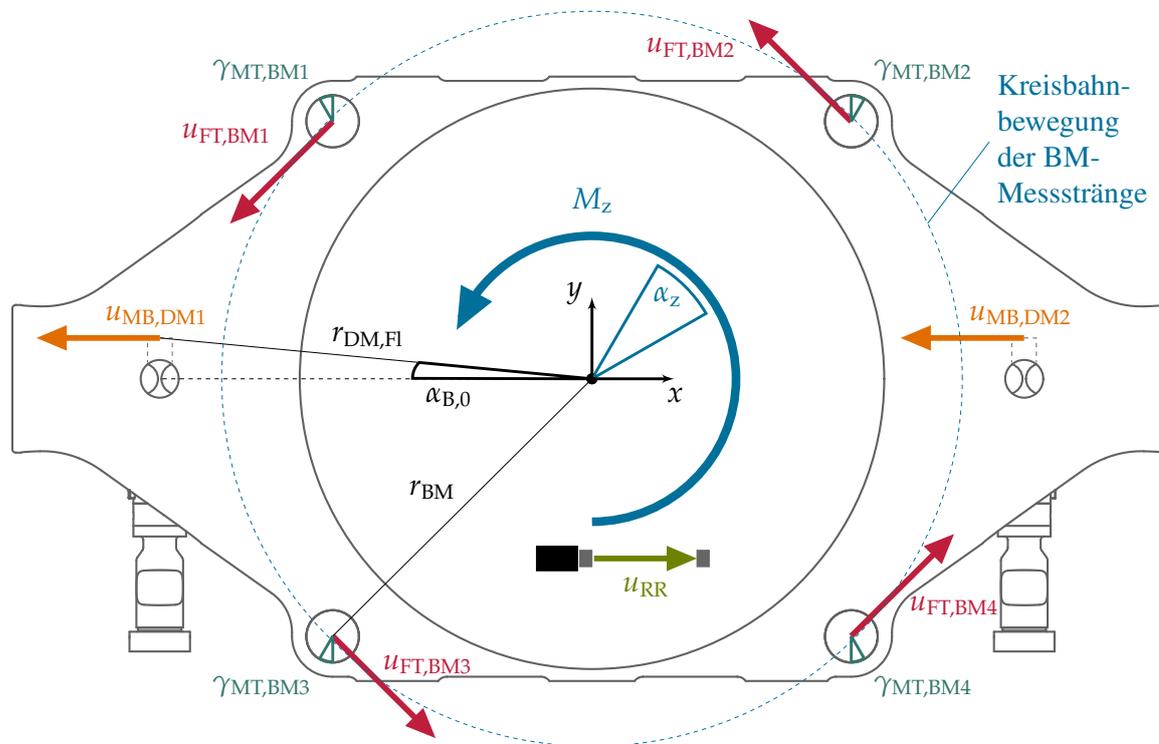


Abbildung 6.2: Übersicht der aus den Nebenschlüssen resultierenden Verschiebungen bei einem positiven Torsionswinkel  $\alpha_z$

schnitte legen die Methode fest, wie die experimentelle Bestimmung des Steifigkeitskoeffizienten und die Rotationsmessung erfolgen.

### 6.2.1 Bestimmung der Steifigkeitskoeffizienten

Nachfolgend wird das Verfahren zur Bestimmung der unterschiedlichen Steifigkeitskoeffizienten beschrieben. Zunächst wird das gewählte Messverfahren erläutert. Anschließend werden die Anforderungen an den Prüfstand und dessen Umsetzung skizziert. Die Durchführung und die Auswertung der Messungen werden nachfolgend beschrieben. Zum Schluss werden die Messergebnisse und die ermittelten Steifigkeitskoeffizienten dargestellt.

#### Messverfahren

Die Berechnung der Steifigkeitskoeffizienten erfolgt nach

$$k_{FT} = \frac{dF_T}{du_T}, \quad (6.9)$$

$$k_{MT} = \frac{dM_T}{d\gamma_{MT}}, \quad (6.10)$$

$$k_{MB} = \frac{dM_B}{du_{MB}}. \quad (6.11)$$

Die Verschiebungen  $u_T$  und  $u_{MB}$  bzw. der Verdrehwinkel  $\gamma_{MT}$  sind abhängig vom Ort der Aus-

wertung entlang der Messstrangachse. Für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist die Festlegung einer Referenzposition notwendig. Sowohl für die BM- und DM-Messstränge wird dafür das Ende des Messstrangs am Hebelflansch gewählt. Zum einen werden dort die höchsten Verformungswerte erwartet, was die Auflösung der Messungen begünstigt. Zum anderen liegen diese Punkte am nächsten auf der Hebelflanschseite und sind somit am besten für optische Messinstrumente wie ein Interferometer zu erfassen.

Für die Ermittlung des Steifigkeitskoeffizienten ist der Verlauf zwischen den Verschiebungen bzw. des Torsionswinkels über eine aufgebrachte Last notwendig. Zu berücksichtigen ist, dass die Lastsituation, so wie in der FE-Analyse beobachtet, reproduziert wird. Es wird daher ein Prüfstand benötigt, der die einzelnen statischen Lastfälle, wie sie im Kalibrierbetrieb auftreten, nachbildet.

### Anforderungen an den Prüfstand

Der Prüfstand muss für die Ermittlung von drei Steifigkeitskoeffizienten drei verschiedene Lastfälle nachbilden können. Die nachfolgende Tabelle 6.3 stellt für alle Lastfälle die notwendigen Anforderungen an den Prüfstand dar.

<b>Allgemeine Anforderungen für alle Lastfälle</b>
Die Kalibrierkraft einer Stufe muss eine Minute stabil gehalten und reproduzierbar angefahren werden. Dies soll über eine reibungsfreie Kraftaufhängung gelingen.
Die Bewegung des Flanschmittelpunkts als Referenzpunkt der Biegelinie muss für eine Interferometermessung direkt oder indirekt erreichbar sein. Das beinhaltet die Zugänglichkeit des Laserstrahls und die Montagemöglichkeit des Reflektors. Außerdem muss der Laserstrahl in Bewegungsrichtung ausgerichtet werden können.
<b>Lastfall 1: Tangentialkraft</b>
Belastung des Messstrangs durch eine Querkraft mit $\pm 250$ N. Für die Richtungsänderung ist Drehung des BM-Messstrangs zulässig. Die Feineinstellung der Krafrichtung sollte möglich sein. Außerdem sollten mehrere Kraftwerte belastet werden können, um ein vollständiges Bild des Steifigkeitskoeffizienten über den gesamten Messbereich zu erhalten.
Wie im Kalibrierbetrieb sollte der Freiheitsgrad in Achsrichtung des Messstrangs gesperrt werden. Die Umsetzung wie im Kalibrierbetrieb ist nicht möglich. Hier ist es ausreichend, die gleichzeitige Belastung von Tangentialkraft und Biegemoment zu realisieren, um damit Verlauf wie in Kalibrierbetrieb nachzubilden. Der Nulldurchgang des Biegemoments liegt in der Mitte der Biegefeder. Der Faktor zwischen eingeleitetem Biegemoment am Flansch und der aufgebrachten Tangentialkraft $M_B/F_T$ muss konstant bleiben und beträgt 0,561 (siehe Abschnitt 4.2).

<b>Lastfall 2 (LF2): Torsionsmoment</b>
Belastung des Messstrangs durch ein Drehmoment mit $\pm 150 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Für die Richtungsänderung ist Drehung des BM-Messstrangs zulässig. Die Feineinstellung der Momentrichtung sollte möglich sein. Außerdem sollten mehrere Momentwerte belastet werden können, um ein vollständiges Bild des Steifigkeitskoeffizienten über den gesamten Messbereich zu erhalten. Eine Überlagerung durch eine Querkraft ist zulässig, da Belastung in der Maschine ähnlich ist.
Die optionale Überlagerung durch eine Axialkraft muss vorgesehen werden, um deren Beeinflussung des Steifigkeitskoeffizienten untersuchen zu können.
Die Rotationsmessung muss durch eine Interferometermessung gewährleistet werden. Dazu muss ein erster Reflektor auf einer Ebene des Flansches platziert werden, da dort die Rotationsbewegung im Kalibrierbetrieb ermittelt wird. Zudem muss die Bewegung des Flanschmittelpunkts als Referenzpunkt der Biegelinie für eine Interferometermessung direkt oder indirekt mit einem zweiten Reflektor erreichbar sein. Damit kann die Rotationsbewegung, die beim ersten Reflektor sichtbar ist, um die Querkraftbewegung bereinigt werden, die beim zweiten Reflektor sichtbar wird.
<b>Lastfall 3 (LF3): Biegemoment</b>
Die Belastung des Messstrangs erfolgt durch ein Biegemoment bis $\pm 150 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Für die Richtungsänderung ist eine Drehung des BM-Messstrangs zulässig.

Tabelle 6.3: Anforderungen zur Umsetzung des Prüfstands

### Aufbau des Prüfstands

Für die Umsetzung der Steifigkeitsbestimmung wurde ein Prüfstand entworfen, der durch einige Adaptionen für alle Lastfälle eine Bestimmung des Steifigkeitskoeffizienten ermöglicht. Die Übersicht über die Umsetzungen der Lastfälle ist in Abbildung 6.3 dargestellt (siehe Geva u. a. [45]).  $F_{\text{Kal}}$  visualisiert die Wirklinie der Gewichtskraft. Trotz der Unterschiede zwischen den umgesetzten Lastfällen gibt es Gemeinsamkeiten, die beschrieben werden sollen, bevor es um die Betrachtung der einzelnen Lastfälle geht:

- Montage und Ausrichtung der Biegefeder:** Für die Montage der Biegefeder ist eine feste Einspannung ähnlich der Einbausituation in der Maschine erforderlich. Aus Gründen der Praktikabilität und um die Problematik mit dem Eigengewicht zu umgehen, wird ein vertikaler Einbau gewählt. Die Loslagereinspannung in horizontaler Lage für die BM-Messstränge ist nicht umgesetzt, da eine Loslagerung, wie in der Einbausituation in der Messeinrichtung, schwierig umzusetzen wäre. Zudem müsste die Biegefederaufhängung nachgebildet werden, die die Einfachheit des Prüfstands massiv verändern würde. Die Position der Biegefeder gegenüber der Krafterzeugung muss flexibel eingestellt werden können. Zudem ist eine bestimmte Ebenheit notwendig, da sich die Neigung der Biegefeder schwer einstellen lässt. Es ist daher naheliegend, das Aufspannplattenfeld der  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$ -Drehmoment-Normalmesseinrichtung mit den T-Nuten zu nutzen. Für die Anbindung an die Aufspannplatten wurde eine Basisplatte konstruiert (siehe Abb. 6.3, Farbe Grau). Innerhalb der Basisplatte ist eine

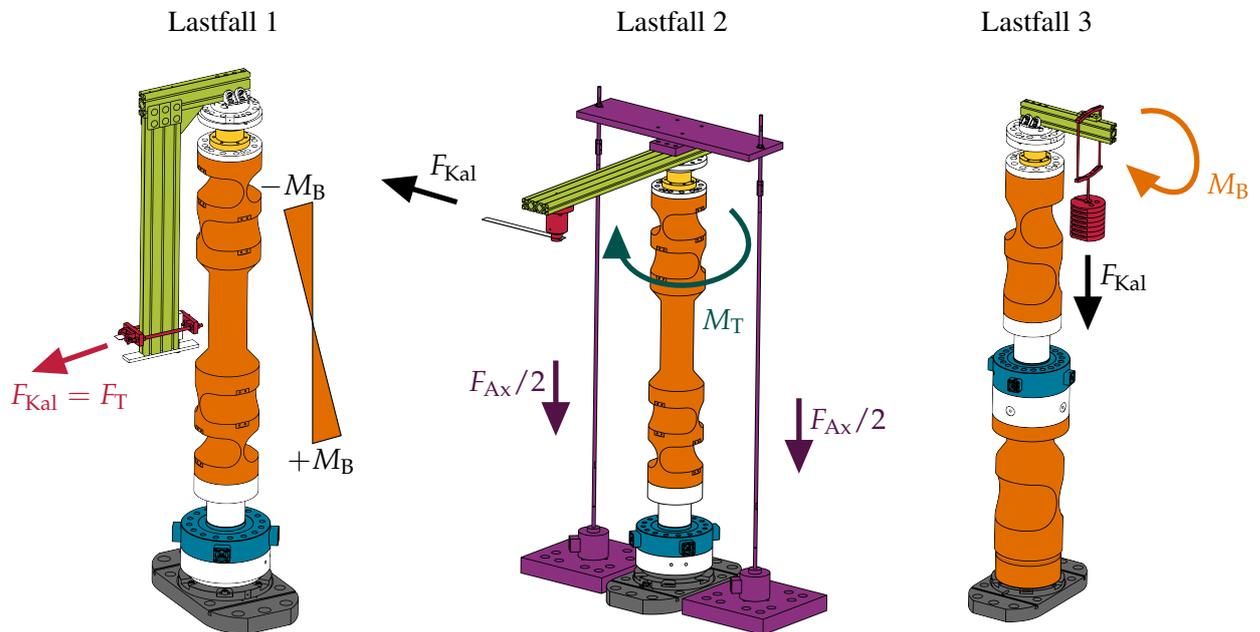


Abbildung 6.3: Umsetzung der unterschiedlichen Lastfälle. Basisplatte und Drehscheibe, BM-/DM-Referenzkraftaufnehmer, BM-/DM-Biegefeder, Mehrkomponentenaufnehmer, Lastfallabhängiger Hebel, Traverse zur Erzeugung einer Axialkraft (nur LF2), Kraft erzeugung und -einleitung

zylinderförmige Vertiefung, in der eine Drehscheibe über Langlöcher montiert werden kann. Sowohl die BM- als auch die DM-Messstränge können auf der Drehscheibe montiert werden. Diese Baugruppe lässt sich in einer Vertiefung in der Mitte rotieren, um die richtige Ausrichtung für eine positive oder negative Lastrichtung zu erreichen. Für die Ausrichtung wird der Lasertracker verwendet (siehe Abs. 3.7).

- **Krafterzeugung:** Eine stabile und reproduzierbare Kraft kann im einfachsten Fall durch eine Gewichtskraft von kalibrierten Massen erzeugt werden. Dafür werden kalibrierte Massescheiben und ein kalibriertes Lastgehänge verwendet (siehe Abbildung 6.5, Farbe Dunkelgrün). Auf dem Lastgehänge werden die Massescheiben aufgelegt, so dass unterschiedliche Kraftwerte zur Verfügung stehen. Die Gewichtskraft wird über eine Spitze des Lastgehänges auf einen kleinen Punkt übertragen.
- **Kraftübertragung:** Die Anbindung der Gewichtskraft der Massescheiben an die Hebelarme geschieht mit Ausnahme von Lastfall 3 über ein Kraftübertragungssystem (siehe Abb. 6.4 und Abb. 6.5). Das Lastgehänge überträgt über die Lastspitze die Kraft auf einen kleinen Lasthaken (siehe Abb. 6.4, Farbe Grün), der mit einer Vertiefung für die Lastspitze versehen ist. Von dem Lasthaken wird die Kraft über eine dünne Folie aus Federstahl in den lastfallabhängigen Hebel eingeleitet (siehe Abb. 6.5, Farbe Blau). Der Vorteil der dünnen Folie ist die Vermeidung von Biegemomenten und die präzise Bestimmung des Kräfteinleitungsortes. Die Anbindung von Bauteilen an die Metallfolie geschieht über eine Klemmung aus Passtiften (siehe Abb. 6.4, Farbe Blau (Lasthaken) und Farbe Gelb (Hebeltraverse)).

Dabei wird die Metallfolie um einen Passstift geschlungen und über Schrauben durch zwei Passstifte an den umschlungenen Passstift festgeklemmt. Auf diese Weise fällt die Position der Kraftübertragung mit dem Mittelpunkt des Umschlingungspassstifts zusammen.

- Umlenkrolle:** Die Gewichtskraft weist in vertikaler Richtung in Richtung Aufspannplattenfeld. Für die beiden ersten Lastfälle wird eine Querkraft benötigt. Die Realisierung des Kraftübertragungssystem ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Die notwendige Änderung der Krafrichtung um  $90^\circ$  erfolgt über eine Umlenkrolle. Dafür wird eine Achse installiert, die von zwei Lagerböcken gehalten wird. Auf der Achse befindet sich eine Kugelführung samt Hülse, auf der das Metallband umgelenkt wird (siehe Abb. 6.5, Farbe Gelb). Die Kugelführung besteht aus Wälzlagerkugeln in einem zylinderförmigen Käfig. Die Rotation der Hülse erfolgt mit der Kugelführung reibungsarm und die Verminderung der Kalibrierkraft ist somit geringfügig. Ein weiterer Vorteil ist die reibungsarme Verschiebung der Umlenkrolle in Achsrichtung. Damit können unerwünschte Querkräfte bei der Krafteinleitung vermieden werden, da sich die Umlenkrolle in Richtung der Querkräfte verschiebt und diese dadurch vermindert. Die Lagerböcke sind auf einer Justierplattform montiert. Die Justierplattform ist auf zwei Linearführungen angebracht, um die Umlenkrolle und damit den Kraftvektor

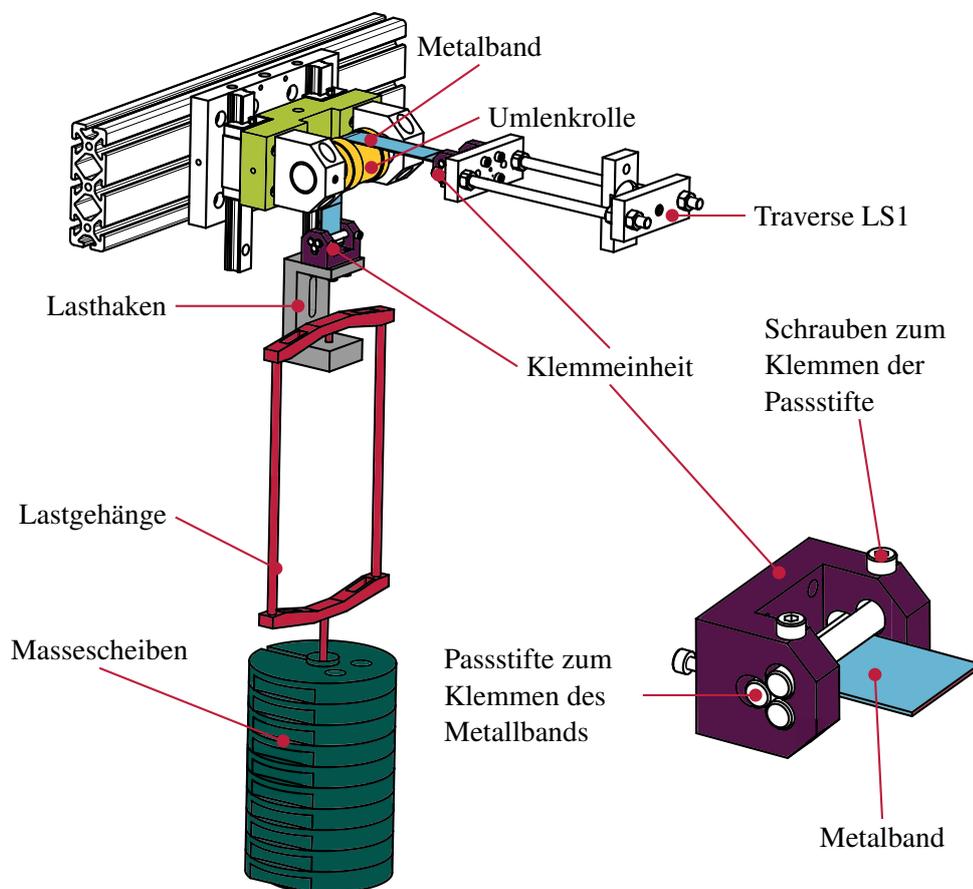


Abbildung 6.4: Kraftübertragungssystem zur Anbindung der Gewichtskraft der Querkraft an den lastspezifischen Hebel (hier für Lastfall 1)

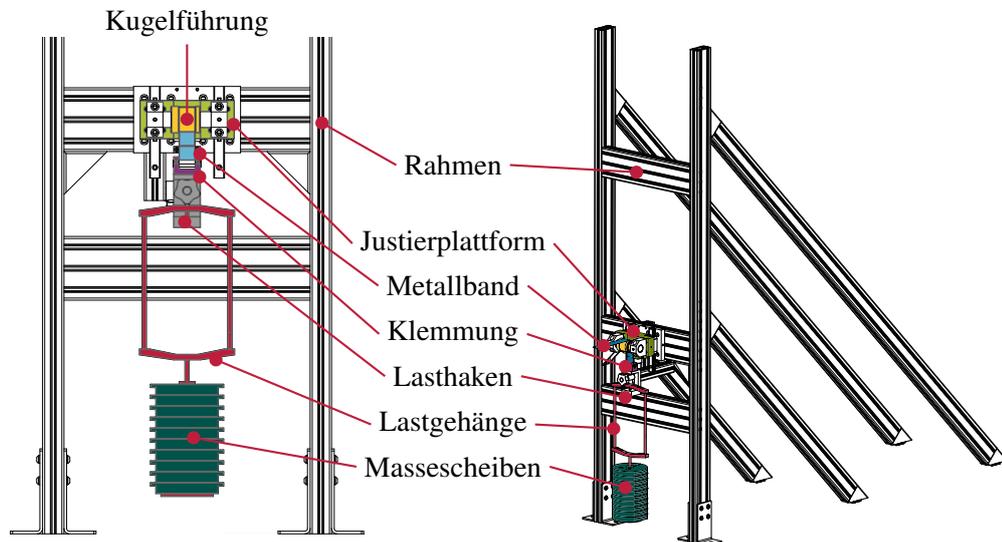


Abbildung 6.5: Lastrahmen und Umlenkrolle des Kalibrierprüfstands

waagrecht auszurichten (siehe Abb. 6.5, Farbe Hellgrün). Für die Ausrichtung wird der Lasertracker verwendet (siehe Abs. 3.7). Die ganze Ausrichteinheit mitsamt der Umlenkrollen kann auf einer unterschiedlichen Höhe im Lastrahmen befestigt werden, um die unterschiedlichen Kräfteinleitungsebenen der Lastfälle abzudecken.

- **Lastrahmen:** Der Lastrahmen wird benötigt, um die auf die Umlenkrolle wirkende Kraft aufzunehmen (siehe Abb. 6.5). Die Kraft auf die Umlenkrolle teilt sich in eine vertikale und horizontale Komponente auf. Wie unter dem Punkt Umlenkrolle erwähnt, muss diese Einheit je nach Lastfall in der Höhe verschoben werden. Der Lastrahmen muss auch für diese Fälle die Kräfte aufnehmen. Aufgrund der Verfügbarkeit und der einfachen Anwendung sind Aluminium-Leichtbau-Profile verbaut worden. Die Schrägabstützungen dienen der zusätzlichen Versteifung. Für einen möglichen Last- oder Lastfallwechsel und um Schwingungen des Massestapels zu unterbinden, ist eine Klemmung des Lasthakens an den Lastrahmen integriert.
- **Mehrkomponentenaufnehmer:** In [45] wird Kalibrierkraft analytisch berechnet. In dieser Berechnung werden viele geometrische Randbedingungen und Reibung berücksichtigt, was zu einer hohen Messunsicherheit führt. Daher wurde zu einem späteren Zeitpunkt ein kalibrierter Sechs-Komponenten-Aufnehmer der Firma GTM integriert, um die Kalibrierlast zu messen und eine Unsicherheit der Last anzugeben [46]. Die Spezifikationen des Mehrkomponentenaufnehmers sind in Tabelle 6.4 dargestellt und die Unsicherheiten stammen aus einer Werkskalibrierung (siehe Anhang A.7).
- **Verformungsanalyse** Für die Verformungsmessung wird ein zweikanaliger SIOS-Interferometer verwendet und verfügt über eine Unsicherheit von  $1 \cdot 10^{-6}$  mm [47]. Die Messstrecke wird zwischen einem Sensorkopf und einem Tripelreflektor aufgebaut. Sensorkopf und Reflektor

Tabelle 6.4: Spezifikationen und Messunsicherheiten des verwendeten Mehrkomponentenaufnehmers

Kanal	Nennlast	Erw. rel. Messunsicherheit ( $k = 2$ )
$F_x$	3 kN	0,51 %
$F_z$	3 kN	0,51 %
$F_z$	10 kN	0,51 %
$M_x$	200 N·m	0,53 %
$M_y$	200 N·m	0,53 %
$M_z$	200 N·m	0,51 %

werden mit einem Magnetfuß an magnetischen Bauteilen befestigt und parallel zur Bewegungsrichtung ausgerichtet. Außerdem soll der Referenzpunkt abgetastet werden können.

### Umsetzung der Lastfälle

**Umsetzung für Lastfall 1** Der Lastfall 1 wird auf den BM-Messstrang mit dem Ziel angewendet, eine konstante Querkraft mit einem querkraftabhängigen Biegemomentverlauf zu erzeugen. Aus der FE-Analyse ist ersichtlich, dass das Biegemoment im weiteren Verlauf der Achse abnimmt und in der Mitte der Biegefeder zu null wird. Diese Lastsituation wird erreicht, wenn ein abgewinkelter Kragarm an den Flansch montiert wird, dessen Ende genau bis zur Mitte der Biegefeder reicht. Die Länge des Hebelarms beträgt von Flanschebene bis zur Kräfteinleitung 0,561 m, was dem Verhältnis von Tangentialkraft zu Biegemoment entspricht. Der Kragarm besteht aus einem kurzen,

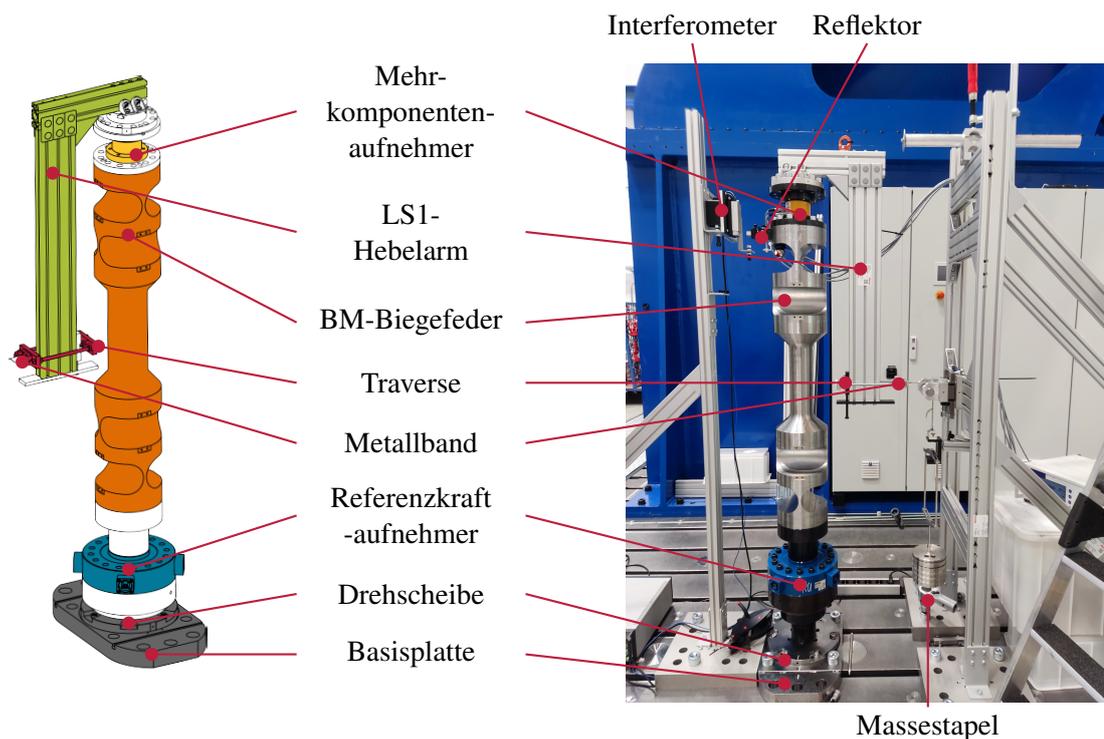


Abbildung 6.6: Aufbau des Biegefederprüfstands für Lastfall 1

horizontalen und einem langen, vertikalen Aluminiumprofil. Diese sind miteinander verschraubt und mit einem Winkel befestigt. Die Umsetzung ist in Abbildung 6.6 in Hellgrün dargestellt.

**Umsetzung für Lastfall 2** Der Lastfall 2 ist wie beim ersten Lastfall auf den BM-Messstrang anzuwenden. Bei einer Drehmomentbelastung wird der entstehende Torsionswinkel an zwei Positionen mit einer Laserstrecke erfasst. Für die Erzeugung eines Drehmoments ist ein einfaches gerades Aluminiumprofil ausreichend. Die überlagerte Querkraft ist akzeptabel, da diese im realen Betrieb ebenfalls entsteht. Für die Torsionswinkel wird, wie bei Lastfall 1 und Lastfall 3, die Verschiebung des Referenzpunkts in Richtung der Querkraft gemessen. Die zweite Reflektorposition wird an dem LF2-Hebel befestigt, da der Reflektor in Flanschnähe nicht so angebracht werden kann, dass die tangentielle Komponente der Rotationsbewegung erfasst werden könnte. Stattdessen wird eine Reflektorposition am Hebel ausgewählt, bei der die Ausrichtung zur Hebelmitte auf 500 mm sehr präzise gemessen werden kann. Der Abstand zum Hebel wirkt sich positiv auf die Auflösung des Torsionswinkels aus. Um Querkräfte in radialer Richtung zu vermeiden, ist das Metallband auf eine Welle geklemmt, die mit einem Axial-Schräggugellager in einem Lagertopf gelagert ist. Die Höhe der Klemmung ist auf die Höhe des Flansches angepasst. Geva u. a. [48] stellen in der FE-Analyse fest, dass die Steifigkeit im Maschinenbetrieb und die Steifigkeitsermittlung im Prüfstand mit einem einfachen Hebelarm zu unterschiedlichen Steifigkeitskoeffizienten führt. Als maßgebliche Größe zur Beeinflussung der Steifigkeit ist die Überlagerung einer Axialkraft in der Größenordnung vom Maschinenbetrieb (etwa 10 kN) identifiziert worden. Um diesen Effekt

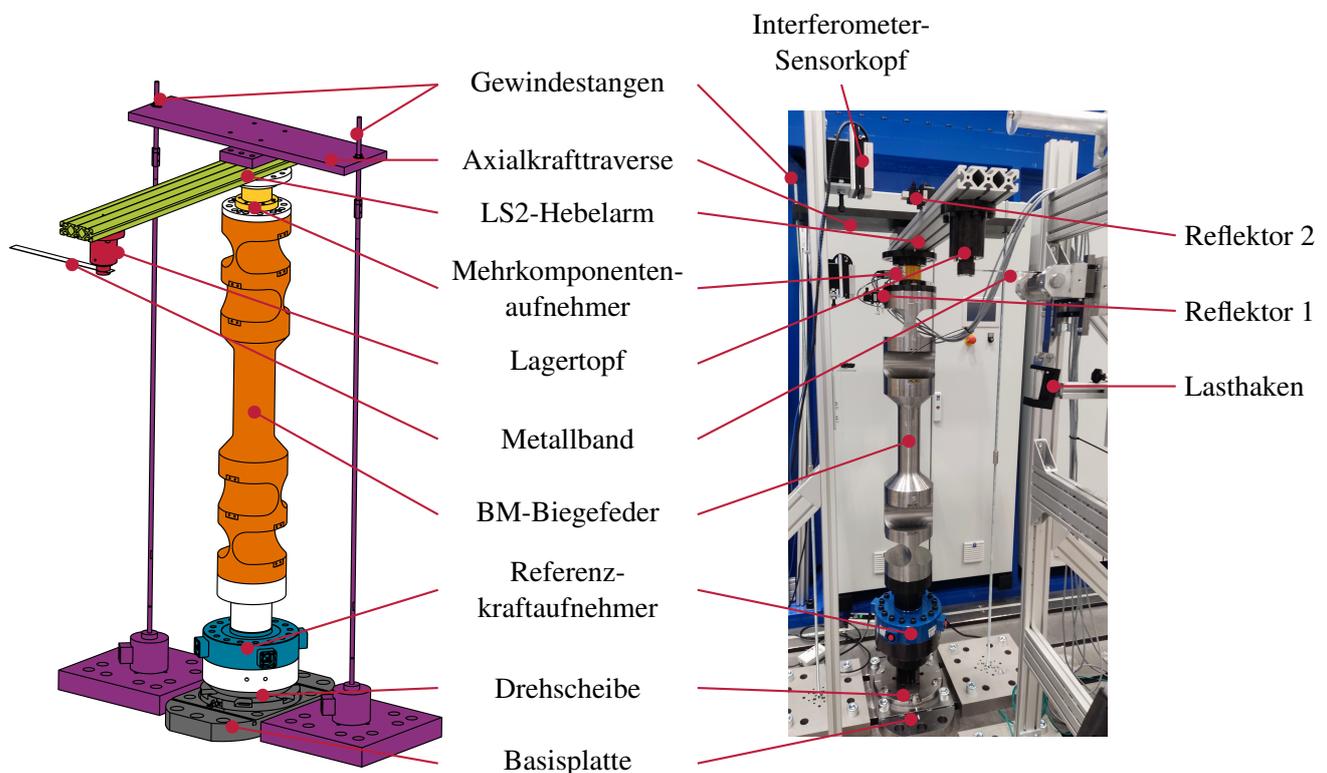


Abbildung 6.7: Aufbau des Biegefederprüfstands für Lastfall 2

zu untersuchen, ist nachträglich eine Axialkrafttraverse installiert worden. Die Axialkraft wird über die Vorspannung von zwei Gewindestangen an beiden Seiten der Traverse realisiert. Sie wird über eine Druckplatte auf den Hebel und anschließend mittig in den Messstrang eingeleitet. Zur Überprüfung der eingeleiteten Kraft sind die Gewindestangen am Fuß über zwei Kraftaufnehmer eingespannt.

**Umsetzung für Lastfall 3** Der Lastfall 3 ist auf einen DM-Messstrang anzuwenden. Der Referenzpunkt liegt auch hier am Hebelflansch. Die Verschiebungsmessung erfolgt ebenfalls mit der Reflektorposition am Zylinderrand in Flanschnähe. Der Hebelarm ist mit 250 mm Länge kurz gewählt, um eine Verformung des Hebels zu vermeiden. Dafür erhöht sich die maximale Gewichtskraft auf 220 N, um auf ein maximales Biegemoment von 55 N·m zu erhalten. Der Querkraftverlauf wie im Kalibrierbetrieb wird vernachlässigt, da es sich um eine Querkraft von ca. 10 N handelt und diese die Verformung nicht maßgeblich beeinflusst. Da auf eine Querkraft verzichtet wird, ist der Lastrahmen und dessen Umlenkrolle nicht mehr notwendig. Die Kraft kann direkt von dem Lastgehänge auf den Hebel übertragen werden.

### Durchführung der Messungen

Der Ablauf zur Ermittlung der Steifigkeitskoeffizienten orientiert sich an der DIN EN ISO 376 bzw. der DIN 51309. Der Aufnehmer wird bei dieser Norm als Blackbox betrachtet. Über statistische Methoden werden die Kennwerte (Nullpunkt drift, Wiederholpräzision, Umkehrspanne)

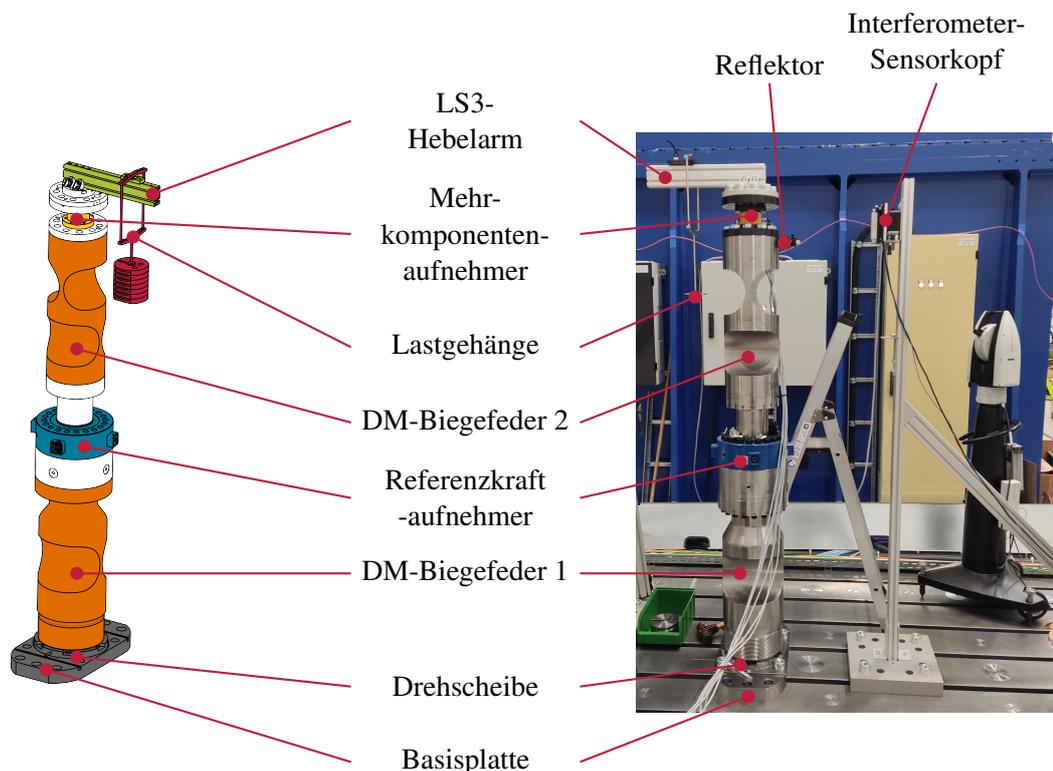


Abbildung 6.8: Aufbau des Biegefederprüfstands für Lastfall 3

des Aufnehmers ermittelt. Für den Aufnehmer wird eine spezifische Kalibrierkurve berechnet. Der gesuchte Steifigkeitskoeffizient ist der lineare Interpolationskoeffizient, der als Ergebnis der Regressionsanalyse bestimmt wird.

Das Auflegen der Massescheiben erfolgt manuell, so dass der Ablauf stark verkürzt werden musste. Die Anzahl der Einbaustellungen wird, um die Steifigkeitskoeffizienten bei einer positiven und einer negativen Last zu ermitteln, auf zwei beschränkt. Es wird nur eine Aufwärts- und Abwärtsreihe pro Einbaustellung gemessen, da die Änderung der Einbaustellung mit großem Aufwand verbunden ist. Stattdessen wird die gleiche Einbaustellung mehrfach hintereinander gemessen. Auf eine zweite Aufwärtsreihe in der ersten Einbaustellung wird verzichtet.

Für LF1 und LF2 werden 8 Laststufen ausgewählt (nur LF1 mit BM2 mit 12 Stufen zu Testzwecken), bei LF3 sind es 12 Stufen. Der Nullpunkt kann am Ende häufig nicht genommen werden, weil das Ankleben des Lasthakens zu instabil für eine Messung abläuft. Für jede Stufe wird eine Haltezeit von 30 s angestrebt.

Es traten während der Messkampagne zur Steifigkeitsermittlung diverse Probleme auf. Aufgrund von Fertigungsproblemen und eines straffen Zeitplans bei der Montage der Maschine war die Steifigkeitskoeffizientenbestimmung für LF1 und LF2 auf zwei Monate beschränkt. Die Möglichkeit zur Wiederholung von Messungen (Stand bei der Verfassung der Dissertation) und einer direkten Auswertung im Anschluss war nicht gegeben. Für LF3 standen nur zwei Wochen zur Verfügung, so dass die Steifigkeit nur für eine DM-Biegefeder bestimmt werden konnte. Die kurzen Messzeiten führten zu einer verringerten Testphase. Daher weisen einige Messungen höhere Messunsicherheiten auf. Außerdem konnte aufgrund des kurzen Zeitplans nicht die gleiche Anzahl an Messungen für jede Steifigkeit durchgeführt werden. Zum Teil wurden auf eine zweite Einbaustellung verzichtet.

Der Ausfall des Mehrkomponenten-Aufnehmers stellte ein größeres Problem dar. Vermutlich durch eine Überbelastung beim Ausbau eines Hebels konnte der Aufnehmer nicht mehr verwendet werden, so dass eine zusätzliche Verminderung der Messzeit eintrat. Firma GTM stellte auf Leihbasis einen Ersatzaufnehmer mit ähnlichen Spezifikationen zur Verfügung.

### Auswertungsmethode

Die Aufbereitung der Last- und Verformungswerte werden nach dem gleichen Verfahren durchgeführt, wie nachfolgend beschrieben. Die Messwerte der Last und der Verformung einer Laststufe werden um den Nullpunkt bereinigt. Der zeitliche Startpunkt einer Laststufe innerhalb der Messreihe wird manuell gesetzt. Der Startpunkt der Laststufe wird nach den Einschwingvorgängen beim Lastwechsel gesetzt. Anschließend wird über die folgenden 100 Werte gemittelt und der Mittelwert stellt den Referenzwert einer Laststufe dar.

Für die Auswertung der Steifigkeitskoeffizienten werden zwei Auswertungsmethoden verwendet. Die erste Methode dient dazu, einen Referenzwert für eine einzelne Messreihe zu ermitteln. Dazu wird eine einfache lineare Regression angewandt [49], die als Ergebnis eine lineare Funktion mit einem linearen Koeffizienten  $k$  und einem Offset  $b$  liefert

$$F = k \cdot u + b. \quad (6.12)$$

$F$  ist die aufgebrachte Last (Kraft oder Moment) und  $u$  ist die gemessene Verformung (gerade

Messstrecke oder Torsionswinkel).  $k$  wird auch synonym als Steifigkeitskoeffizient eines bestimmten Lastfalls verwendet, weil es die ausschlaggebende Größe der Funktion darstellt. Die erste Auswertungsmethode dient dazu, die Steifigkeitskoeffizienten untereinander zu vergleichen und größere Abweichungen einer Messreihe festzustellen. Diese werden für die weitere Auswertung nicht weiterverwendet.

Die zweite Auswertungsmethode zielt darauf ab, einen Referenzwert für eine Biegefeder zu einem bestimmten Lastfall zu ermitteln, der in dem Messunsicherheitsbudget für das Kalibrierdrehmoment  $M_z$  Verwendung findet. Die Last wird als  $y$ -Wert und die Verformung als  $x$ -Wert dargestellt. Für jede Laststufe wird der  $x$ -Wert und der  $y$ -Wert gemittelt. Die gemittelten  $x$ - und  $y$ -Werte besitzen eine Standardunsicherheit, die wie folgt aufgeschlüsselt wird

$$w_{\text{Verformung}} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 w_{\text{Verformung},i}^2} \quad \text{und} \quad (6.13)$$

$$w_{\text{Last}} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 w_{\text{Last},i}^2} \quad (6.14)$$

Die relative Unsicherheit der Verformung einer Laststufe besteht aus den relativen Unsicherheiten der Auflösung des Interferometers  $w_{\text{Verformung},1}$ , der Nullpunktabweichung  $w_{\text{Verformung},2}$  und der Standardunsicherheit der Verformungswerte  $w_{\text{Verformung},3}$ . Die Unsicherheit durch die Auflösung berechnet sich aus

$$w_{\text{Verformung},1} = \frac{r}{u_{\max} \cdot \sqrt{6}} \quad (6.15)$$

$r$  bezeichnet dabei die Auflösung des Interferometers umgerechnet in **mm**. Hier muss die Auflösung in zweifacher Weise berücksichtigt werden, da Unsicherheit der Auflösung sowohl beim Ablesen des Werts im belasteten und unbelasteten Zustand auftritt. Für die Auflösung wird eine Rechteckverteilung angenommen. Die Nullpunktabweichung wird berechnet aus

$$w_{\text{Verformung},2} = \frac{u_f - u_0}{u_{\max}} \quad (6.16)$$

$u_0$  bezeichnet den Verformungsnullwert zu Beginn einer Messreihe,  $u_f$  den Nullwert am Ende einer Messreihe. Falls die Nullwerte aus verfahrenstechnischen Gründen nicht vorhanden sind, werden stattdessen die Verformungswerte der nächsthöheren Stufe gewählt.  $u_{\max}$  ist der Höchstwert, der in einer Messreihe erreicht wird. Die Standardunsicherheit der wiederholten Messung berechnet sich nach GUM aus der Standardabweichung  $s$  der Messungen  $u_k$  durch die Wurzel der Anzahl der Messungen  $n$ . Der mathematische Zusammenhang lautet

$$w_{\text{Verformung},3} = \frac{s(u_k)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (u_k - \bar{u})^2} \quad (6.17)$$

Die relative Unsicherheit der Last wird aus der relativen Unsicherheit des Mehrkomponentenaufnehmers  $w_{\text{Last},1}$  und der Standardunsicherheit  $s$  der wiederholten Messung  $F_k$  gebildet. Die relative Messunsicherheit ( $k = 2$ )  $w_{\text{Last},1}$  des Aufnehmers wird bei der Querkraftmessung  $F_T = F_y$  (LF1) und bei der Drehmomentmessung  $M_T = M_z$  (LF2) mit 0,51 %, das Biegemoment  $M_B = M_y$  wird

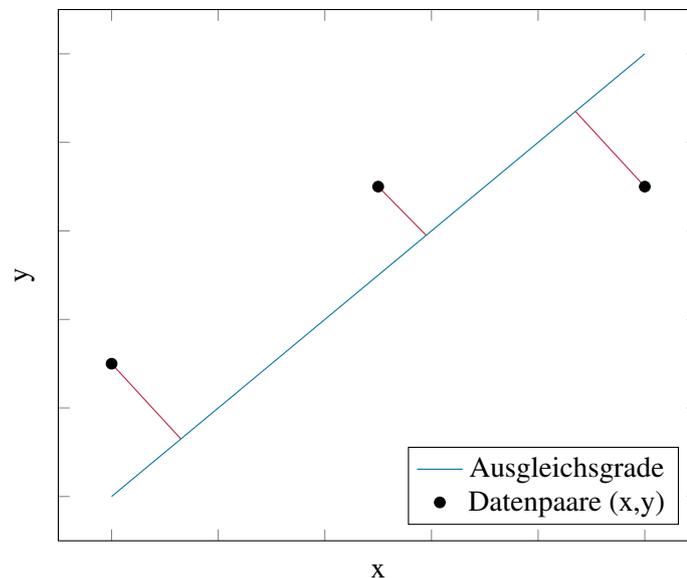


Abbildung 6.9: Darstellung ODR-Regression mit zu minimierenden Abständen

mit 0,53 % angegeben. Die Standardunsicherheit  $w_{\text{Last},2}$  der wiederholten Lastmessung wird analog zur Verformungsmessung (siehe Gl. 6.17) nach GUM berechnet

$$w_{\text{Last},2} = \frac{s(F_k)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (F_k - \bar{F})^2}. \quad (6.18)$$

Das Ziel ist es, eine Ausgleichsgerade für die Datenpaare  $(x_i, y_i)$  zu finden. Die Messunsicherheiten der einzelnen x- und y-Werte unterscheiden sich in jeder Laststufe. Es liegt nahe, die Datenpunkte mit der kleinsten Unsicherheit stärker bei einer Regression zu gewichten. Damit scheidet eine einfache lineare Regression, wie in der ersten Auswertungsmethode, aus. Das Verfahren nach Methode der kleinsten Fehler kann ebenfalls nicht zur Anwendung kommen, da nur die Residuen in y-Richtung für die Regression verwendet werden. Stattdessen wird die Steifigkeitskalibrierkurve durch die „Orthogonale Regression“ (engl. Orthogonal Distance Regression, ODR) gebildet.

Im Unterschied zu anderen Regressionsmodellen werden nicht die Abstände in x- oder y-Richtung angewendet, sondern der orthogonale Abstand zur Ausgleichsgerade [49]. Auf diese Weise können Ausgleichsrechnungen behandelt werden, in denen sowohl x als auch y einer Unsicherheit unterliegen. Ausgehend von der linearen Gleichung  $y = m \cdot x + b$  hat eine orthogonale Linie die Steigung  $-(1/m)$ . Die Gleichung für die senkrechte Linie lautet

$$y' = -\frac{x}{m} + b'. \quad (6.19)$$

Trifft die Linie auf einen ausgewählten Datenpunkt  $(x_0, y_0)$ , wird die Gleichung zu

$$y' = -\frac{x}{m} + \left(\frac{y_0}{m} + x_0\right). \quad (6.20)$$

Die orthogonale Linie schneidet die Ausgleichsgerade am Punkt  $(x_i, y_i)$ , so dass diese Punkte

definiert werden können mit

$$y_i = (y_0 + m \cdot x_0 - m \cdot b) / (m^2 + b), \quad x_i = m \cdot y_i + b. \quad (6.21)$$

Damit wird der orthogonale Abstand vom Datenpunkt  $(x_0, y_0)$  zum nächsten Punkt der Ausgleichsgerade  $(x_i, y_i)$  zu

$$\text{Abstand} = \sqrt{(y_0 - y_i)^2 + (x_0 - x_i)^2}. \quad (6.22)$$

Die Summe aller Abstände wird als Zielgröße der Minimierungsfunktion verwendet, um die Parameter  $m$  und  $b$  zu ermitteln. Die Herleitung der orthogonalen Regression ist in Pallavi u. a. [50] zu finden. Ein Vorteil dieser Regression ist, dass x- und y-Punkte mit unterschiedlichen Messunsicherheiten innerhalb der Distanzberechnung unterschiedlich gewichtet werden können:

$$\text{Abstand (gewichtet)} = \sqrt{\frac{1}{w_{y,i}^2} \cdot (y_0 - y_i)^2 + \frac{1}{w_{x,i}^2} \cdot (x_0 - x_i)^2} \quad (6.23)$$

mit der Messunsicherheit in x-Richtung  $w_{x,i} = w_{\text{Verformung},i}$  aus Gleichung 6.17 und der Messunsicherheit in y-Richtung  $w_{y,i} = w_{\text{Last},i}$  aus Gleichung 6.18 zu der Laststufe  $i$ . Die Durchführung der Regression erfolgt mit der Python-Bibliothek `SCI-PY` und dem mitgelieferten `ODR`-Package [51]. Neben den Parameterwerten werden die Unsicherheiten der Parameter mitangegeben. Da es sich um eine Fehlerfortpflanzung der eingangs ermittelten Unsicherheiten handelt, können diese als Standardunsicherheiten der Koeffizienten angesehen werden.

### Ergebnisse der Steifigkeitskoeffizientenermittlung

**FE-Analyse des Prüfstands** Zur Untersuchung der Verformungen im Prüfstand sind für jeden Lastfall FE-Analysen in `ANSYS` erstellt worden. Für die Analyse werden die untersuchten Biegefedern mit den lastspezifischen Hebeln gekoppelt und mit der Kalibrierkraft belastet. Für die Vernetzung werden alle zylindrischen Innen- (Biegefederarsparungen) und Außenflächen (Adapter, Aufnehmer, Biegefederschaft) sowie die Aluminiumprofile per `ANSYS`-Einstellung „Flächenvernetzung“ mit 2 mm automatisch erstellt. Das Modell in Lastfall 1 besitzt 1 Million Knoten mit 615.000 Elementen. Das in Lastfall 2 benutzte Modell hat 430.000 Knoten mit 270.000 Elementen. In Lastfall 3 beinhaltet das Modell 2,26 Millionen Knoten mit 1,46 Millionen Elementen. Die Bauteile sind über den „Bonded-Kontakt“ verbunden. Die M42-Schraubverbindung, die die Basisplatte mit der Biegefeder verbindet, ist als Schraubverbindung modelliert. Die einzelne Schraubverbindung wird untersucht, um ein etwaiges Lösen der Schraubverbindung zu detektieren. Der Kraftaufnehmer wird vereinfacht als Vollmodell integriert. Die Basisplatte wird mittels einer fixierten Lagerung festgehalten. Das Ergebnis der FE-Analysen sind die lastspezifischen Verschiebungen an den Hebelenden und an den Referenzpunkten. Dazu werden die Gesamtverformungen (siehe Abb. 6.10a, Abb. 6.10b und Abb. 6.10c) aller Bauteile für alle Lastfälle, der Pfad entlang der Messstrangs (siehe Abb. 6.11a und Abb. 6.11c) oder der Pfad entlang des Hebels (siehe Abb. 6.11b) und entlang einer Koordinatenrichtung ausgewertet.

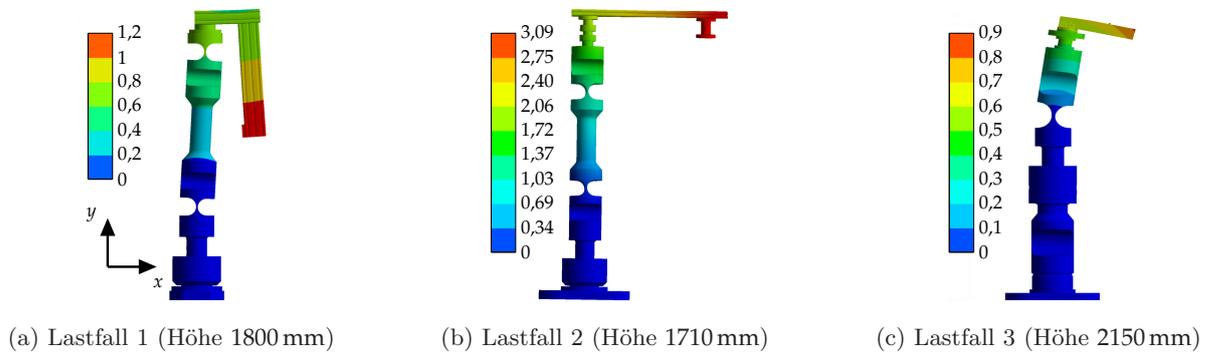


Abbildung 6.10: Gesamtverformung der FE-Analysen für die drei Steifigkeitskoeffizienten-Lastfälle in mm

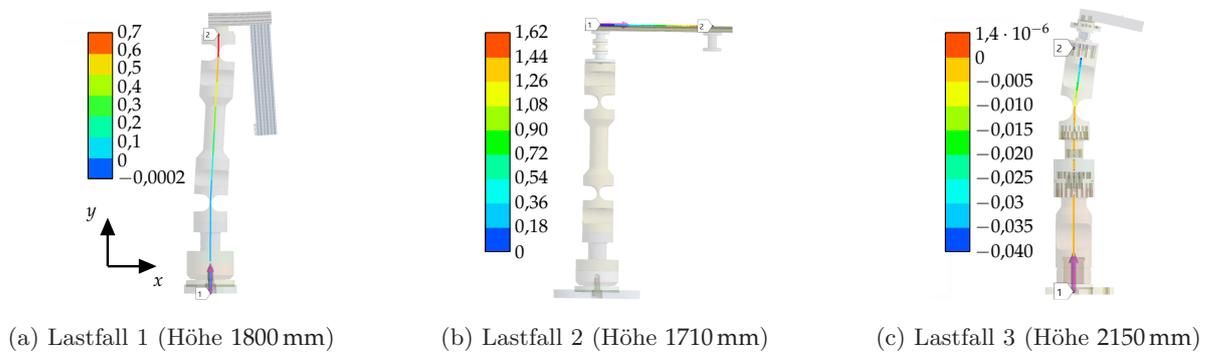


Abbildung 6.11: Gesamtverformung der FE-Analysen für die drei Steifigkeitskoeffizienten-Lastfälle in mm

**Lastfall 1** Die Abbildung 6.12 vergleicht die Kraft-Verschiebung-Verläufe der oberen und unteren Biegefedern mit denen der FE-Analyse. Der prognostizierte lineare Verlauf der Kurven ist gut zu erkennen. BM2 wurde als Test-Biegefeder zu Beginn mit mehr Laststufen bis 220 N statt bis 135 N belastet. Die Kurve der FE-Analyse besitzt ebenfalls einen linearen Verlauf. Der Steifigkeitskoeffizient der FE-Analyse ist jedoch kleiner als der gemessene Steifigkeitskoeffizient. Die Unterschiede lassen sich mit der Modellierung in der FE-Analyse begründen. Zum einen werden Verschraubungen teilweise vereinfacht abgebildet oder sogar vernachlässigt. Zum anderen geben importierte Modelle, wie etwa die des Kraftaufnehmers, den tatsächlichen Aufbau nur ungenügend wieder. Die Unterschiede sind allerdings nicht auffällig. Die Referenzdaten der FE-Analyse sind ein Indiz für die Zuverlässigkeit der Messdaten.

Abbildung 6.13 zeigt die für jede einzelne Messreihe ausgewertete Steifigkeit nach der ersten Auswertungsmethode (siehe Abs. 6.2.1). Die Steifigkeiten sind chronologisch für je eine Biegefeder und eine Einbaustellung aufgetragen. Hierbei wird eine Unterscheidung zwischen positiver und negativer Einbaustellung vorgenommen. Die Einbaustellungen unterscheiden sich dadurch, dass diese um  $180^\circ$  zueinander gedreht sind.

Auffällig ist, dass die Steifigkeitskoeffizienten innerhalb einer Messreihe (gleiche Einbaustellung und Belastungsrichtung) relativ konstant sind. Die Standardabweichung für BM1 und BM3 beträgt  $5,3 \text{ N/mm}$  (aufgrund höherer Unsicherheiten einzelner Messungen) und für BM2 und BM4 bei etwas unter  $2 \text{ N/mm}$ . Die Reproduzierbarkeit für eine Einbaustellung und Belastungsrichtung ist damit gegeben.

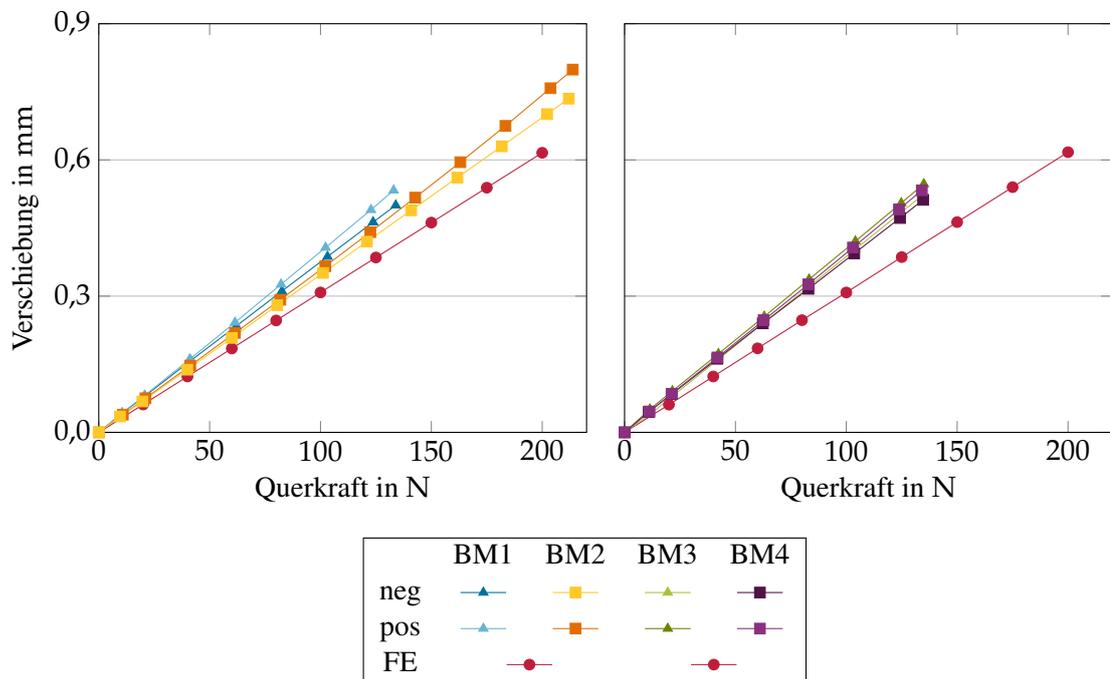


Abbildung 6.12: Verlauf von  $u_{FT,oben}$  über die Querkraft. Im linken Diagramm befinden sich die oberen Biegefedern, im rechten Diagramm die unteren Biegefedern. Zum Vergleich sind in beiden Diagrammen die Ergebnisse der FE-Simulation eingefügt.

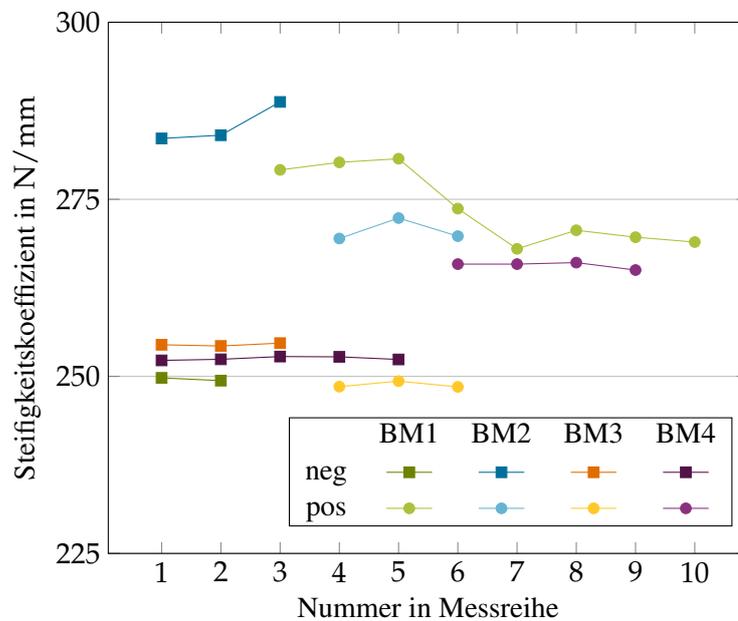


Abbildung 6.13: Ermittelte Steifigkeitskoeffizient  $k_{FT}$  über die Messkampagne

Die Abweichungen der einzelnen Biegefedern zwischen zwei Einbaustellungen fallen unterschiedlich aus. Die maximale Abweichung mit 30 N/mm zwischen positiver und negativer Belastungsrichtung tritt bei BM1 auf. Die minimale Abweichung tritt bei BM3 mit 6 N/mm auf. Aufgrund der ähnlichen Bauweise der Biegefedern ist eine kleinere Spannweite erwartet worden. Es stellt

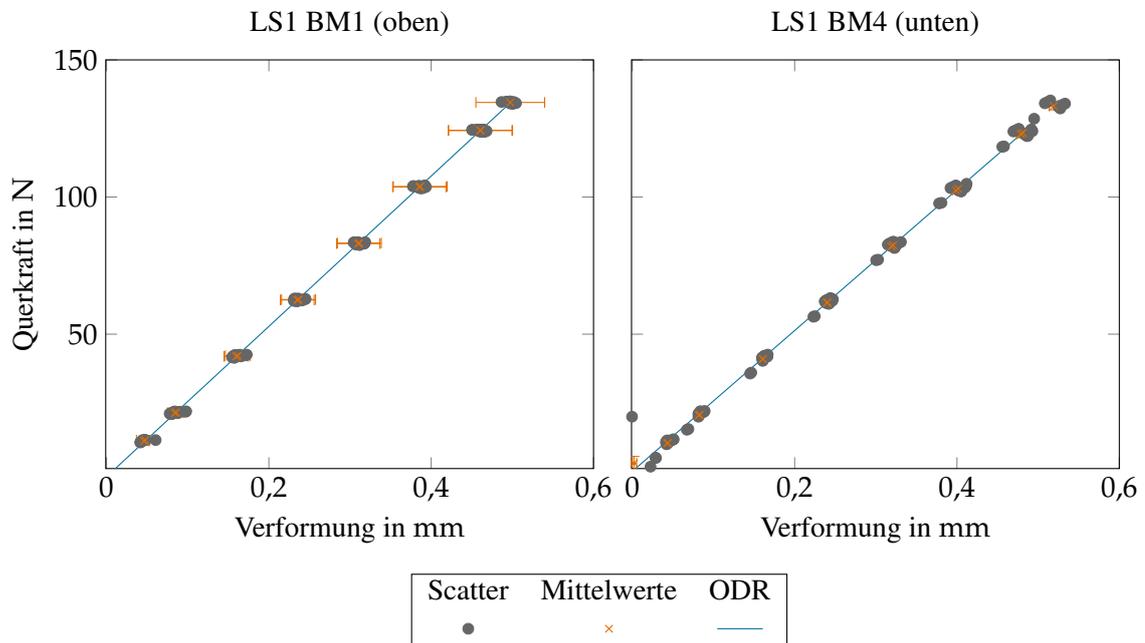


Abbildung 6.14: Bildung der Kalibrierkurve des Steifigkeitskoeffizienten  $k_{FT}$  durch Orthogonal Distance Regression. Exemplarisch für die oberen Biegefedern ist BM1 im linken Diagramm dargestellt, für die unteren Biegefedern ist BM4 im rechten Diagramm dargestellt

sich hier die Frage, ob die Spannweiten zwischen verschiedenen Einbaustellungen tatsächlich durch die Unterschiede der Biegefeder oder durch die neue Einbausituation hervorgerufen werden. Eine Wiederholung der Einbausituation zur Kontrolle der daraus resultierenden Spannweite war, wie in Abschnitt 6.2.1 erwähnt, aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Aus diesem Grund wird auf eine getrennte Angabe zwischen negativer und positiver Belastungsrichtung einer Biegefeder verzichtet. Nach Ausführung der zweiten Auswertungsmethode wird nur ein Referenzwert pro Biegefeder und Lastfall angegeben.

Aufgrund der unterschiedlichen Schaftdicken der oberen (BM1 und BM2) und unteren (BM3 und BM4) Biegefedern wurden Unterschiede hinsichtlich der Steifigkeitskoeffizienten erwartet. Diese Erwartung spiegelt sich nur teilweise in den Ergebnissen wider. BM1 und BM2 in positiver Einbaustellung liegen mit  $275 \text{ N/mm}$  zwar leicht höher, allerdings liegt BM1 in negativer Einbaustellung in der Nähe der unteren Biegefeder bei  $250 \text{ N/mm}$ . Durch die Schwankungen der unterschiedlichen Einbaustellungen kann keine eindeutige Aussage formuliert werden und es besteht die Vermutung, dass der Einbau und die Ausrichtung einen starken Einfluss haben.

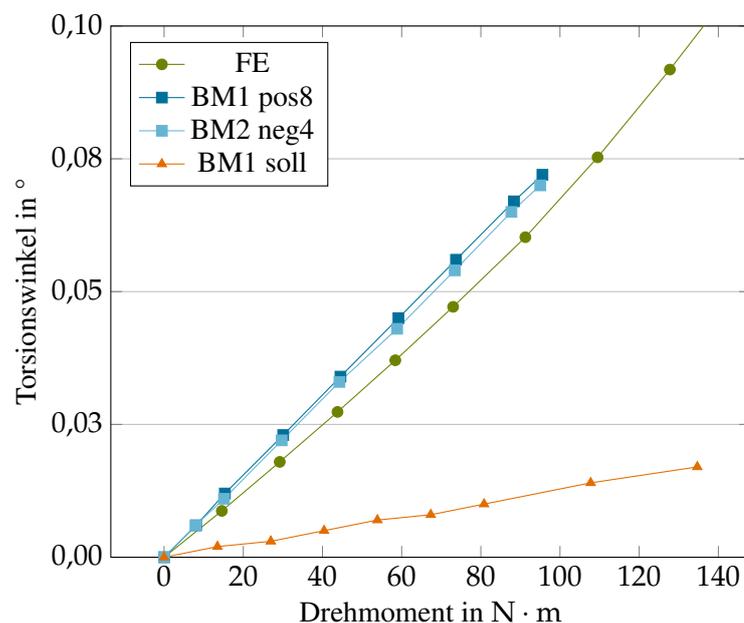
Aus Abbildung 6.13 wird die Schwierigkeit deutlich, nach der ersten Auswertungsmethode einen einzelnen Referenzwert und dessen Messunsicherheit zu bestimmen. Der hier aufgezeichnete Steifigkeitskoeffizient stellt nur die Steigung der Steifigkeitskalibrierkurve dar. Die Schwierigkeit besteht darin, aus der Vielzahl der Kalibrierkurven eine „Referenzkalibrierkurve“ zu ermitteln und die Unsicherheiten der Parameter anzugeben. Die Stärke der zweiten Auswertungsmethode ist es, die Messunsicherheiten auf die Messwerte der einzelnen Laststufen zu beziehen, um anschließend eine Referenzkalibrierkurve zu erzeugen. Die Unsicherheit der Parameter beinhaltet aufgrund der Fehlerfortpflanzung die Unsicherheit der Messungen.

Tabelle 6.5: ODR-Fit-Parameter der Kalibrierkurve  $k_{FT}$  und deren Unsicherheiten

	Steigung		Offset	
	Erwartungswert	Abs. Unsicherheit	Erwartungswert	Abs. Unsicherheit
	N/mm	N/mm	N/mm	N/mm
BM1	274,04	0,30	-1,96	0,10
BM2	268,84	1,38	2,61	0,70
BM3	251,44	0,16	0,06	0,05
BM4	256,64	0,13	0,00	0,02

Für LF1 lässt sich zusammenfassen, dass die ODR-Methode gut funktioniert. Die Streuungen der Messpunkte der Stufen sind verhältnismäßig klein, so dass die Fitparameterunsicherheiten ebenfalls gering ausfallen. Die absoluten Unsicherheiten einer Stufe in x-Richtung steigen mit größer werdender Verformung an. Der Grund liegt in der Dominanz der relativen Nullpunktabweichung, die für größer werdende Verformungen größere absolute Unsicherheiten mit sich bringt. Die erwarteten Unterschiede der Steifigkeitswerte zwischen oberen und unteren Biegefedern werden in der zweiten Auswertungsmethode sichtbar. Während die oberen Biegefedern im Schnitt bei 271,44 N/mm liegen, sind es bei den unteren 254,04 N/mm. Die Spannweite der oberen und unteren Steifigkeitskoeffizienten liegen bei maximal 6 N/mm. Die größere Standardabweichung der Einzelmessungen und die größere Spannweite zwischen positiver und negativer Einbaustellung zwischen BM1 und BM4 macht sich in der ODR-Methode ebenfalls deutlich bemerkbar in Form des größeren Fehlerbalkens.

**Lastfall 2** Abbildung 6.15 vergleicht den gemessenen Drehmoment-Torsionswinkel-Verlauf mit den aus der FE-Analyse berechneten Werten. Während BM1 und BM2 im Versuch einen linearen

Abbildung 6.15: Verlauf  $\gamma_{MT}$  über Torsionsmoment  $M_T$

Verlauf aufweisen, ist in der FE-Analyse des Prüfstands eine leichte Krümmung zu erkennen, was auf einen trigonometrischen Verlauf hindeuten könnte. Die Größenordnung von gemessenem zu errechnetem Winkel stimmt gut überein. Die Bezeichnung BM1 pos8 bezieht sich auf die Ergebnisse der Messreihe 8 für die Biegefeder BM1 in positiver Einbaurichtung. Ebenso bezeichnet BM2 neg4 die Messreihe 4 für die Biegefeder BM2 in negativer Einbaurichtung (um 180° gedreht zur positiven Richtung). Die Namenskonvention wird für andere Messreihen beibehalten und in den nachfolgenden Diagrammen verwendet.

In der FE-Analyse der gesamten Messseite (siehe Abschnitt 4.2) wird ein Moment von 500 kN·m bis 5000 kN·m aufgebracht. Für die betrachteten Messstränge BM1 und BM2 ergeben sich wesentlich niedrigere Torsionswinkel bei vergleichbaren Torsionsmomenten. Werden die experimentell ermittelten Steifigkeitskoeffizienten mit den Sollkoeffizienten, die aus der FE des Betriebs der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung stammen (siehe Tab. 6.1), unterscheiden sich die Koeffizienten um den Faktor 5,9. Diese Unterschiede machen eine Abschätzung der Torsionsmomente am BM-Messstrang unmöglich, so dass eine Neubewertung der Steifigkeitsermittlung erforderlich ist.

Abbildung 6.16 zeigt die drei Korrekturfaktoren, die eingeführt werden, um den tatsächlichen Steifigkeitskoeffizienten abzuschätzen. Der sich daraus ergebende mathematische Zusammenhang zwischen korrigierten und unkorrigierten Steifigkeitskoeffizienten lautet

$$k_{\text{MT,korrigiert}} = k_{\text{HH}} \cdot k_{\text{TS}} \cdot k_{\text{FZ}} \cdot k_{\text{MT,unkorrigiert}} \quad (6.24)$$

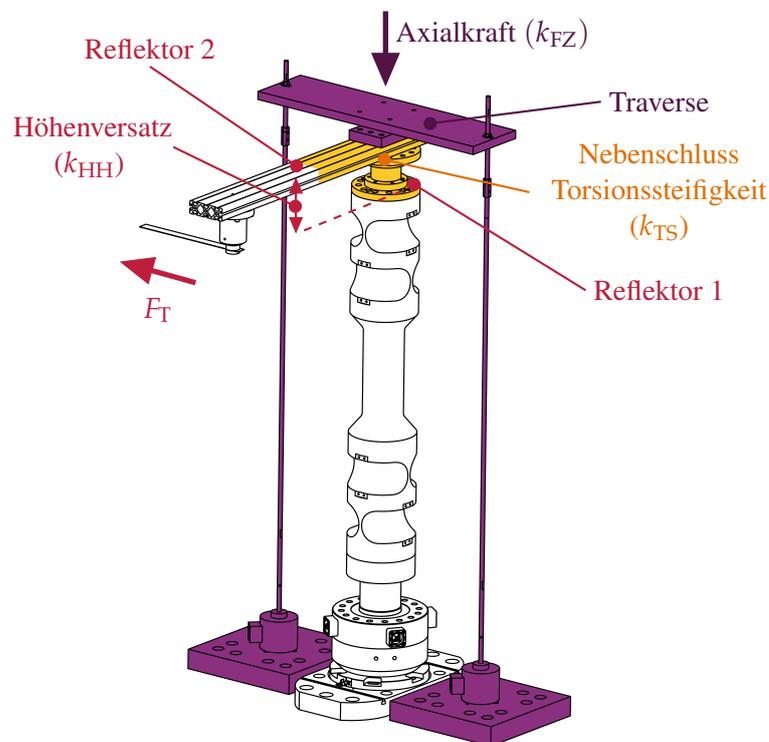


Abbildung 6.16: Übersicht über die Korrekturfaktoren für  $k_{\text{MT}}$ , Beschriftungen und betroffene Komponenten zu  $k_{\text{HH}}$  in Rot, zu  $k_{\text{TS}}$  in Orange, zu  $k_{\text{FZ}}$  in Violett

Die einzelnen Korrekturfaktoren sind in Abbildung 6.16 dargestellt. Nach Analyse der Verschiebungen der Reflektoren wurde ein Verfahrensfehler bei der Durchführung der Messung festgestellt. Die Reflektoren befinden sich auf unterschiedlichen Höhen entlang der BM-Achse (z-Achse). Wie im ersten Lastfall wird der erste Reflektor an dem Außenzylinder der Biegefeder leicht unterhalb des Hebelflansches auf der Höhe  $x_{\text{QK}}$  angebracht (Beschriftungen in Abb. 6.16 mit Bezug zum Korrekturfaktor  $k_{\text{HH}}$  in Rot). Diese Messung dient in erster Linie der Bestimmung der Verschiebung durch die wirkende Querkraft, da an diesem Punkt keine Rotationsüberlagerung gemessen wird. Um die Messstrecke parallel zur Querkraft auszurichten, fehlen die entsprechenden Adapter. Daher wird der zweite Reflektor nicht um  $90^\circ$  auf der gleichen Höhe versetzt, sondern um  $500\text{ mm}$  entfernt vom Drehpunkt auf Höhe des Torsionshebels  $x_{\text{HH}}$  angebracht. Die Oberseite des Hebels befindet sich  $170\text{ mm}$  höher als bei Reflektor 1. Für eine Korrektur der tangentialen Messung auf Höhe des Torsionshebel für die Bestimmung der reinen Rotationsbewegung kann die Messung der Querkraftbewegung auf einer tieferen Höhe nicht verwendet werden. Daher muss die Verschiebung der Querkraftmessung  $u_{\text{QK}}$  zunächst korrigiert werden muss. Abbildung 6.17 stellt den Verlauf der Biegelinie der Biegefeder durch den Querkrafteinfluss dar. Oberhalb der Ebene der Querkrafteinleitung kann von einem linearen Verlauf ausgegangen werden. Nach der Korrektur der Verschiebung  $u_{\text{QK}}$  soll sich die Verschiebung  $u_{\text{QK,Korr}}$  ergeben. Aus dem Strahlensatz ergibt sich

$$\frac{u_{\text{QK,korr}}}{x_{\text{HH}} - x_{\text{H}^*}} = \frac{u_{\text{QK}}}{x_{\text{QK}} - x_{\text{H}^*}} \tag{6.25}$$

$$\frac{u_{\text{QK,korr}}}{u_{\text{QK}}} = \frac{x_{\text{HH}} - x_{\text{H}^*}}{x_{\text{QK}} - x_{\text{H}^*}} = \text{konst.} \tag{6.26}$$

Da das Verhältnis der geometrischen Höhen konstant ist, kann der Faktor zur Korrektur von  $u_{\text{QK,Korr}}$  aus der FE-Analyse ermittelt werden. Der Quotient aus dem Steifigkeitskoeffizienten ohne

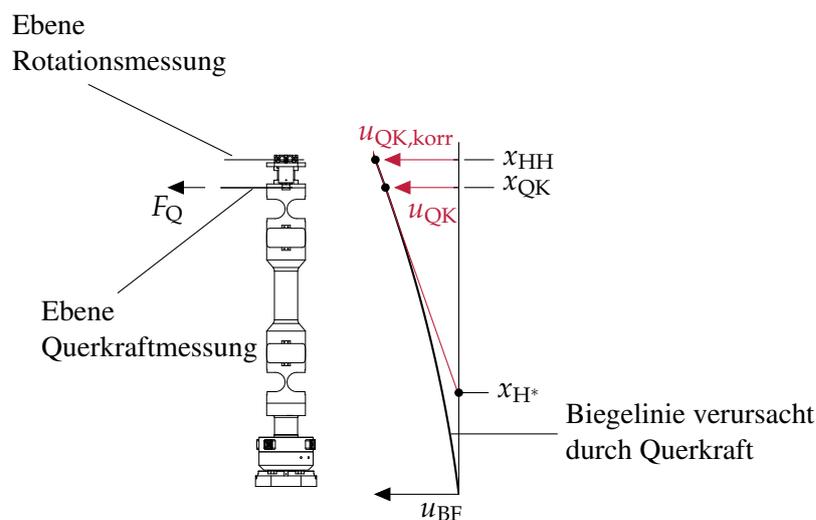


Abbildung 6.17: Korrektur des Höhenunterschieds der Verschiebungsmessung durch die Querkraft

und mit Höhenversatzkorrektur ergibt den Korrekturfaktor

$$k_{\text{HH}} = \frac{k_{\text{MT,KorrekturHöhenversatz}}}{k_{\text{MT,unkorrigiert}}}. \quad (6.27)$$

Der Korrekturfaktor  $k_{\text{HH}}$  berechnet sich zu 1,6170.

Die zweite Korrektur ist notwendig, um den Drehmomentnebenschluss zu berücksichtigen (Beschriftungen in Abb. 6.16 mit Bezug zu Korrekturfaktor  $k_{\text{TS}}$  in Orange). Aufgrund des Höhenversatzes von Reflektor 2 auf den Hebel flossen in die Torsionswinkelmessung nicht nur der Torsionswinkel der Biegefeder, sondern auch die der Anbauteile zwischen Biegefeder und Reflektor 2 ein. Dazu gehören der Kraftaufnehmer, dessen Adapterscheiben und der Hebel für Lastfall 2 bis zur Position des zweiten Reflektors. Um die Korrektur des Momentnebenschlusses zu ermitteln, wird eine weitere FE-Rechnung erstellt, in dem das Moment nicht über den Hebel, sondern direkt in den Flansch der Biegefeder eingeleitet wird, so dass die Anbauteile nicht unter Last stehen. Aus den sich so ergebenden Verschiebungen werden die Torsionswinkel und der Steifigkeitskoeffizient neu berechnet. Der Quotient aus dem Steifigkeitskoeffizienten ohne und mit Nebenschlusskorrektur ergibt den Korrekturfaktor, wobei beim unkorrigierten Wert bereits die Korrektur durch den Höhenversatz berücksichtigt ist:

$$k_{\text{TS}} = \frac{k_{\text{MT,KorrekturNebenschluss}}}{k_{\text{HH}} \cdot k_{\text{MT,unkorrigiert}}}. \quad (6.28)$$

Der Korrekturfaktor  $k_{\text{TS}}$  ergibt sich zu 1,4125.

Die dritte Korrektur betrifft den Einfluss der überlagerten Axialkraft (Beschriftungen in Abb. 6.16 mit Bezug zu Korrekturfaktor  $k_{\text{FZ}}$  in Violett). Geva u. a. [48] haben einen Unterschied bei der Steifigkeitskoeffizientenbestimmung festgestellt, wenn die Biegefeder bei der Drehmomentbelastung zusätzlich um eine Axialkraft  $F_z$  von 17 kN überlagert wird. Die Belastung von 17 kN Axialkraft gleicht der Axialkraft im Kalibrierbetrieb der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung. Der Korrekturfaktor errechnet sich hier zu

$$k_{\text{FZ}} = \frac{k_{\text{MT,KorrekturAxialkraft}}}{k_{\text{TS}} \cdot k_{\text{HH}} \cdot k_{\text{MT,unkorrigiert}}} \quad (6.29)$$

und beträgt 1,8588. Um diesen Einfluss näher zu untersuchen, ist zusätzlich eine Axialkrafttraverse angebaut, um über eine symmetrische Schraubenvorspannung eine Last von 10 kN zu überlagern. Für das vorliegende Größenverhältnis von Axialkraft zu Drehmoment konnte eine Literaturrecherche keinen Einfluss von Axialkraft auf die Torsionssteifigkeit belegen. Der Einfluss konnte weiterhin nicht experimentell nachgewiesen werden. Es ist daher anzunehmen, dass bestimmte numerische Effekte in der FEM für diese Diskrepanz verantwortlich sind. Diese Diskrepanzen konnten im Rahmen der Arbeit allerdings nicht aufgedeckt werden.

Abbildung 6.18 stellt den Einfluss der einzelnen Korrekturen auf den Verlauf des Torsionswinkel dar. Man erkennt, dass die sukzessive Anwendung der Korrekturen den experimentell und FE-ermittelten Steifigkeitskoeffizienten auf eine Größenordnung bringen, die mit der globalen FE-Analyse übereinstimmen.

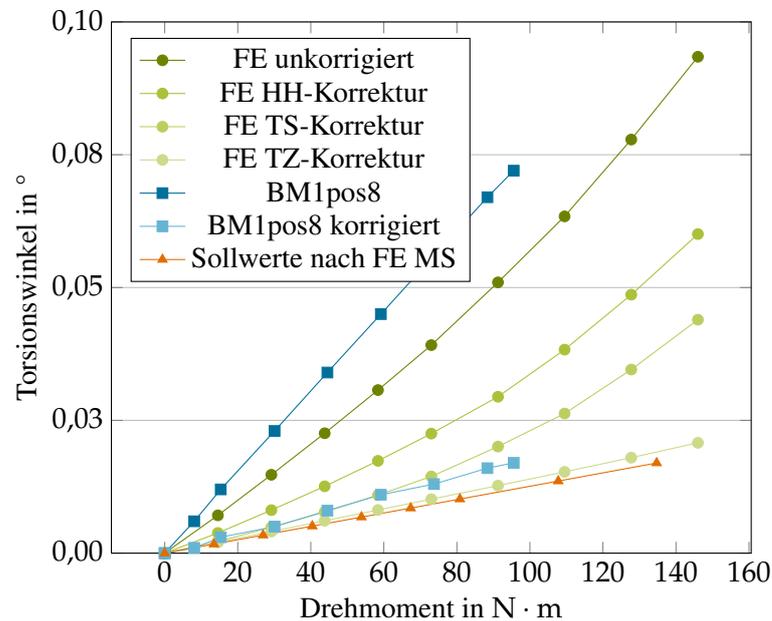


Abbildung 6.18: Auswirkung der Korrektur auf den Verlauf des Torsionswinkel  $\gamma_{MT}$  über das Drehmoment  $M_T$  in Lastfall 2

In Abbildung 6.19 sind die Koeffizienten  $k_{MT}$  für Lastfall 2 in chronologischer Reihenfolge für je eine Messreihe (Biegefeder in positiver oder negativer Einbaustellung) aufgetragen. Es handelt sich hierbei um die unkorrigierten Werte aus dem Versuch, die Korrekturfaktoren aus Gleichung 6.24 werden erst bei der Berechnung der Torsionsmomente in Abschnitt 6.3.2 berücksichtigt. Für BM1, BM2 und BM3 sind aufgrund des Zeitplans keine Messreihen in negativer Einbaustellung durchgeführt worden. Lediglich zur Einordnung der Größenordnung der Spannweiten wurde für BM4 eine zusätzliche Messreihe in negativer Einbaustellung durchgeführt.

Die gute Reproduzierbarkeit der Steifigkeitskoeffizienten in einer Einbaustellung ist in Abbildung 6.19 zu erkennen. Die maximale relative Standardabweichung von 1,32% der Koeffizienten findet sich bei BM4 in negativer Einbaustellung. Für alle anderen Messreihen liegt die relative Standardabweichung unter 1%.

Die baulichen Unterschiede zwischen oberer und unterer Biegefeder treten stärker auf als in Lastfall 1. So weisen BM1 und BM2 Werte um  $1345 \pm 15 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$  auf. Bei BM3 und BM4 liegen die Steifigkeitskoeffizienten bei  $1260 \pm 5 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$ . Die Spannweite zwischen negativer und positiver Einbaustellung ist, wie bereits erwähnt, nur für BM4 überprüft worden. Hier liegen nur geringe relative Abweichungen zwischen den Mittelwerten von 2,73% vor.

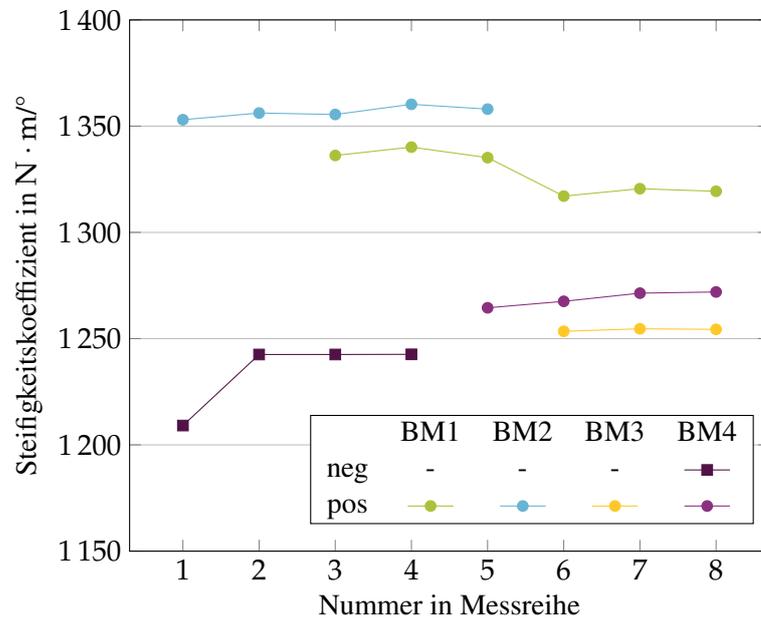


Abbildung 6.19: Ermittelter Steifigkeitskoeffizient  $k_{MT}$  über die Messkampagne

In Abbildung 6.20 werden die Steifigkeitskalibrierkurven dargestellt. Die weiteren Kalibrierkurven von BM1 und BM3 finden sich im Anhang in Abbildung A.6 wieder. In Abbildung 6.20 sind die einzelnen Datenpaare  $(u_i, F_i)$  als Streudiagramm in Grau dargestellt. Die Mittelung der Datenpaare pro Laststufe sind als oranges Kreuz eingetragen. Zusätzlich sind die absoluten Messunsicherheiten einer Stufe in x- und y-Richtung als Fehlerbalken eingezeichnet. Die Ausgleichsgerade durch die ODR ist als blaue Linie dargestellt. Die Belastungen gleicher Größe in der Aufwärts- und Abwärtsreihe werden als eigenständige Laststufe ausgewertet. Daher finden sich pro Laststufe zwei Mittelwerte mit überlappenden Fehlerbalken. Die ermittelten Fitparameter und deren Unsicherheiten sind in Tabelle 6.6 dargestellt.

Die ODR-Methode funktioniert für LF2 ebenso gut wie für LF1. Die Streuungen der Messpunkte der Stufen sind auch hier klein, so dass die Fitparameterunsicherheiten ebenfalls gering ausfallen. Die Streuung bei BM4 ist leicht höher als bei BM2, so dass die Fitparameterunsicherheit von BM2 leicht größer ist. Die absoluten Unsicherheiten sind bei BM2 und BM4 über alle Laststufen konstant.

Der erwartete Unterschied der Steifigkeitswerte zwischen oberen und unteren Biegefedern wird in der zweiten Auswertungsmethode sichtbar. Die oberen Biegefedern haben im Schnitt einen Steifigkeitskoeffizienten von  $1340,11 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$ , die unteren liegen bei  $1251,42 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$ . Die Spannweite der oberen und unteren Steifigkeitskoeffizienten liegt bei maximal  $14 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$ .

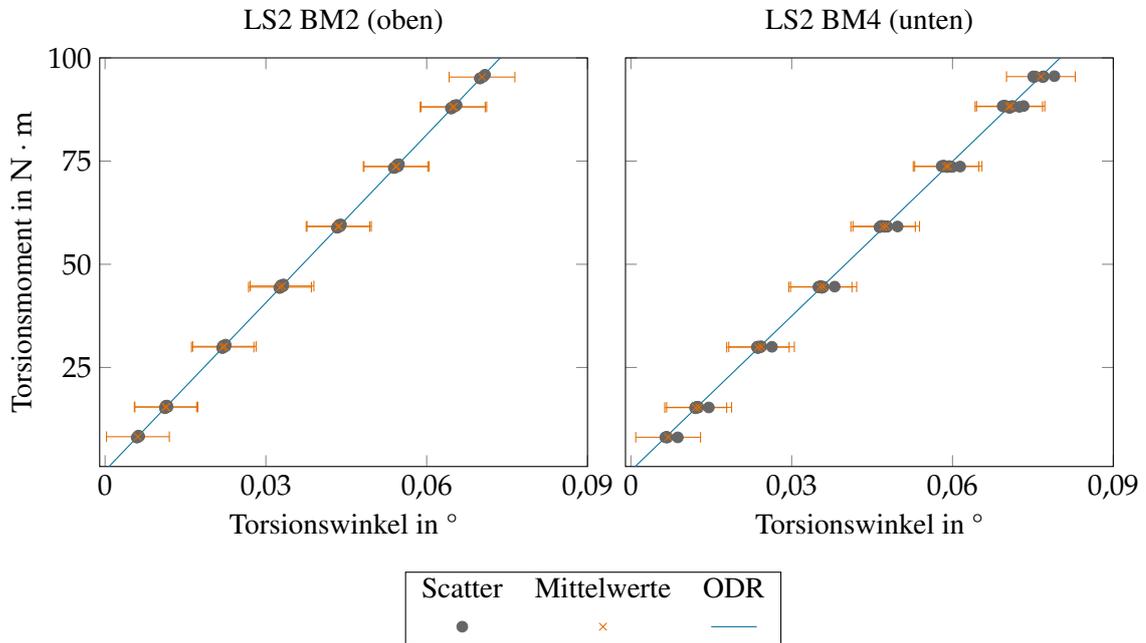


Abbildung 6.20: Bildung der Kalibrierkurve des Steifigkeitskoeffizienten  $k_{MT}$  durch ODR. Exemplarisch für die oberen Biegefedern ist BM1 im linken Diagramm dargestellt, für die unteren Biegefedern im rechten Diagramm.

Tabelle 6.6: ODR-Fit-Parameter der Kalibrierkurve  $k_{MT}$  und deren Unsicherheiten

	Steigung		Offset	
	Erwartungswert	Abs. Unsicherheit	Erwartungswert	Abs. Unsicherheit
	N/°	N/°	N/°	N/°
BM1	1323,53	0,49	0,00	0,00
BM2	1356,69	0,52	0,00	0,00
BM3	1254,19	0,35	0,00	0,00
BM4	1248,64	1,02	0,00	0,00

**Lastfall 3** Abbildung 6.21a zeigt den Vergleich der experimentellen Verschiebung des DM-Messstrangs zur FE-Analyse. Im Gegensatz zu den FE-Berechnungen von Lastfall 1 und 2 für die BM-Messstränge ist der Steifigkeitskoeffizient der Versuche größer als in der FE-Analyse. Die Abweichungen zwischen FE und Versuch liegen circa 38 % höher. In beiden Fällen kann von einem linearen Verlauf gesprochen werden, auch wenn die Linearitätsabweichungen vereinzelt höher liegen als in den Fällen zuvor. Zu beachten ist, dass nur im Teilbereich des Mehrkomponentenaufnehmers bis ca. 50 % gemessen wurde. Zum einen liegt ein Großteil der gemessenen Biegemomente unterhalb der 10%-Grenze des Nennmomentsbereich des Mehrkomponentenaufnehmers, was eine verringerte Genauigkeit zur Folge hat (siehe Tab. 6.4). Zum anderen fallen die Verschiebungswerte kleiner aus, da hier im Maximum nur bis 0,023 mm gemessen wird. Damit fallen Begleiterscheinungen wie Hysterese und Drift stärker ins Gewicht als bei den anderen beiden Lastfällen.

Für die Bestimmung des Steifigkeitskoeffizienten nach Lastfall 3 wurde nur eine Messreihe für

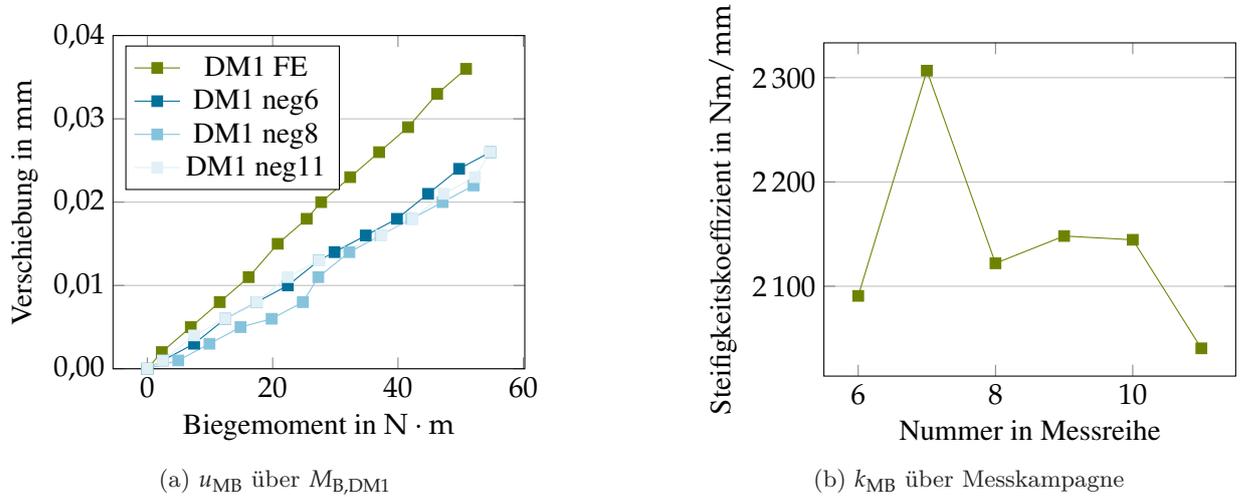


Abbildung 6.21: Ergebnisse  $k_{MB,DM}$  mit Verlauf  $u_{MB}$  über  $M_B$  und Verlauf von  $k_{MB}$  über die Messkampagne

DM1 in negativer Einbaustellung durchgeführt (siehe Abb. 6.21b). Die Standardabweichung der Steifigkeitskoeffizienten liegt aufgrund eines Ausreißers bei Messung Nummer 7 bei 4,29%. Dennoch sind die Messungen reproduzierbar, auch wenn die Streuung der Verformungswerte größer ist. Aus Zeitgründen müssen die Werte von DM1 für DM2 übernommen werden.

In Abbildung 6.22 ist die Steifigkeitskalibrierkurve dargestellt, die über die ODR-Methode ermittelt wurden. Im Diagramm sind die einzelnen Datenpaare ( $u_i, F_i$ ) als Streudiagramm in Grau abgebildet. Die Mittelung der Datenpaare pro Laststufe sind als oranges Kreuz eingetragen. Zusätzlich sind die absoluten Messunsicherheiten einer Stufe in x- und y-Richtung als Fehlerbalken eingezeichnet. Die Ausgleichsgerade durch die ODR ist als blaue Linie dargestellt. Die Belastungen gleicher Größe in der Aufwärts- und Abwärtsreihe sind als eigenständige Laststufe ausgewertet wird. Daher finden sich pro Laststufe zwei Mittelwerte mit überlappenden Fehlerbalken. Die ermittelten Fitparameter und deren Unsicherheiten sind in Tabelle 6.7 dargestellt.

Die ODR-Methode erweist sich hier als robust, trotz der größeren Streuung. Der Mittelwert der Steifigkeitskoeffizienten aus Auswertungsmethode 1 liegt bei etwa 2100 N·m/mm, während der Referenzwert aus der ODR-Methode bei 2247 N·m/mm liegt. Das entspricht einer relativen Abweichung von 7%. Die relative Unsicherheit des Fits liegt bei 3,2% und damit unterhalb der Standardunsicherheit der ersten Auswertungsmethode (1,9%), aber höher als die Fitparameterunsicherheiten bei LF1 und LF2.

Tabelle 6.7: ODR-Fit-Parameter der Kalibrierkurve  $k_{MB}$  und deren Unsicherheiten

	Steigung		Offset	
	Erwartungswert	Abs. Unsicherheit	Erwartungswert	Abs. Unsicherheit
	N·m/mm	N·m/mm	N·m/mm	N·m/mm
DM1	2247,61	26,19	0,98	0,39

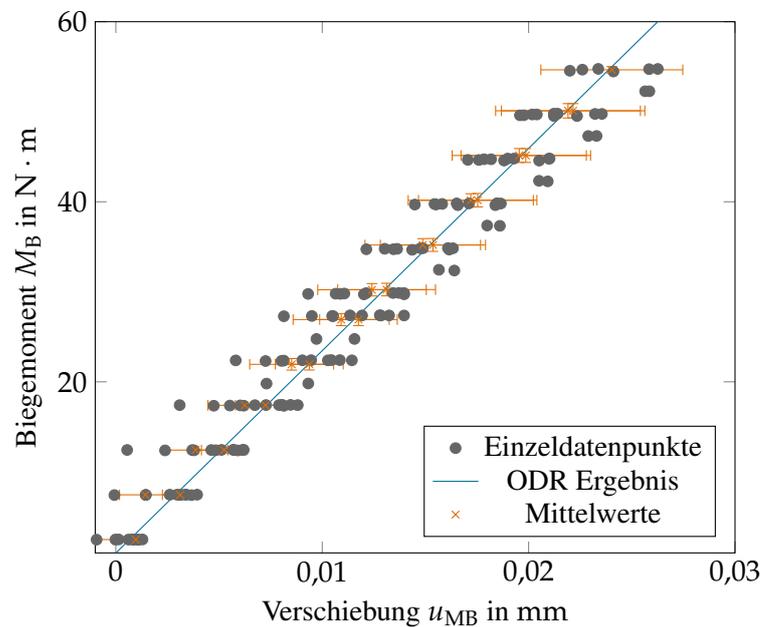


Abbildung 6.22: Bildung der Kalibrierkurve des Steifigkeitskoeffizienten  $k_{MB}$  durch ODR in Lastfall 3.

### 6.2.2 Messung des Torsionswinkels während einer Kalibrierung

Der folgende Abschnitt behandelt die Messung des Torsionswinkels am Messhebel während einer Kalibrierung in der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmessenrichtung. Zunächst wird das Messverfahren beschrieben. Es folgt eine Skizzierung der Umsetzung und der Auswertung der Messung. Zum Schluss werden die Messergebnisse dargestellt.

#### Messverfahren

Bei dem Messverfahren wird angenommen, dass jeder Punkt auf dem Messhebel eine ebene Verschiebung auf einer Kreisbahn erfährt. Dabei wird, wie in der FE-Analyse gezeigt (siehe Abs. 4.2), die translatorische Bewegung des Mittelpunkts innerhalb der betrachteten Ebene vernachlässigt. Um den Torsionswinkel zu bestimmen, reicht es, die Tangentialbewegung eines Punkts zu messen und den Abstand zum Messhebelmittlepunkt als vermuteten Drehpunkt zu bestimmen. Der Torsionswinkel  $\alpha_z$  errechnet sich damit zu

$$\tan \alpha_z = \frac{u_{RR}}{r_{RR}}. \quad (6.30)$$

$u_{RR}$  bezeichnet die Verschiebung des Retroreflektors (RR) und  $r_{RR}$  ist der Abstand des Retroreflektors zum Drehpunkt des Messhebels. Da die Torsionswinkel erwartungsgemäß klein sind, wird ein Interferometer benötigt, um die Verschiebung  $u_{RR}$  im Bereich von unter 1 mm mit einer hinreichend guten Auflösung zu bestimmen. Des Weiteren ist die Ausrichtung des Interferometers in tangentialer Richtung und die Wahl des Punkts hinsichtlich der Abstandsbestimmung zum Messhebel zu beachten.

### Umsetzung

In Abbildung 6.23 ist die Umsetzung der Torsionswinkelmessung  $\alpha_z$  dargestellt. Die Montage des Sensorkopfes und des Reflektors erfolgt vor dem Einbau des Kalibriergegenstands, da nur in diesem Fall der Messhebelmittelpunkt frei zugänglich ist.

Für die Auswahl des Messpunkts sind drei Kriterien entscheidend: Zugänglichkeit, Auflösung und Bestimmung des Faserausgangspunkts am Sensorkopf. Um die Zugänglichkeit zu gewährleisten, ist der Punkt auf den unteren Messhebelflanschbereich eingegrenzt. Dies begünstigt auch eine bessere Auflösung, da die Verschiebungswerte mit dem Abstand zur Messhebelmitte größer werden.

Entlang der vertikalen Achse (globale y-Achse) befinden sich auf dem Messhebelflansch in regelmäßigen Abständen Passstiftbohrungen. Diese Bohrungen dienen der Ausrichtung des Koordinatensystems des Kalibriergegenstands gegenüber dem Koordinatensystem der Messeinrichtung. Sie haben eine H6-Passung und eine Positionstoleranz von weniger als 0,1 mm relativ zum Messhebelmittelpunkt. Mit den genannten Einschränkungen und Vorteilen im unteren Hebelbereich ist die mit einem Nennabstand von 1562,5 mm am weitesten entfernte Passstiftbohrung auf der Unterseite des Hebels ausgewählt (siehe Anhang A.2).

Abbildung 6.24 stellt die Schritte zur Ausrichtung der Interferometers dar. Die tangentielle Ausrichtung der Messstrecke erfolgt über den Umlenkspiegel des Sensorkopfes. Der Umlenkspiegel lenkt den Strahl um  $90^\circ$  um. Der Ort der Umlenkung wird auf der Außenseite des Spiegels markiert. Zunächst muss die Position des Umlenkpunkts auf die Position der gewählten Passstiftbohrung gebracht werden. Dazu ist ein Passstift mit einer h7-Passung gefertigt worden. Dieser Stift ist mit einer Spitze versehen, die deckungsgleich mit dem Mittelpunkt der Passstiftbohrung ist. Diese Spitze wird verwendet, um die Umlenkpunkt per Augenmaß zu positionieren. Da der Sensorkopf mit einem Magnetfuß gesichert ist, lässt sich die Position frei auf der Messhebelfläche einstellen. Die Position kann damit in x-y-Richtung bis auf 1 mm genau positioniert werden (siehe Schritt 1 in Abb. 6.24). Der Messhebelmittelpunkt wird mit einem Kugelreflektor markiert. Der umgelenkte Laserstrahl muss nun durch den Messhebelmittelpunkt gehen und wird angepeilt

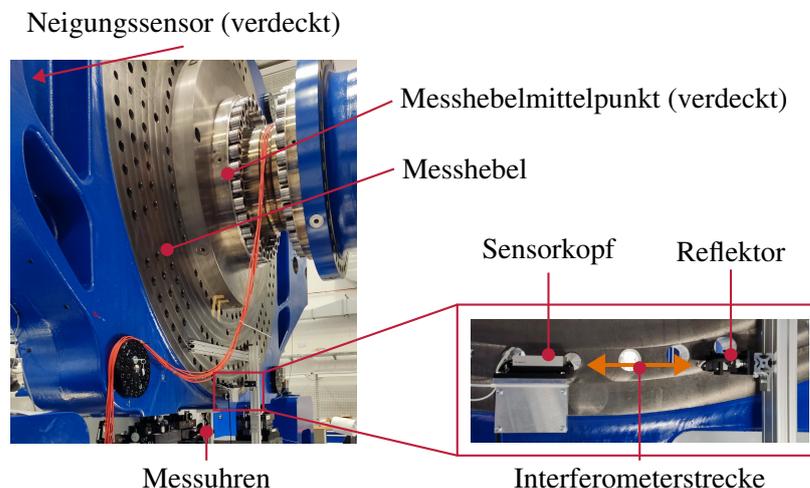


Abbildung 6.23: Umsetzung der Rotationsmessung

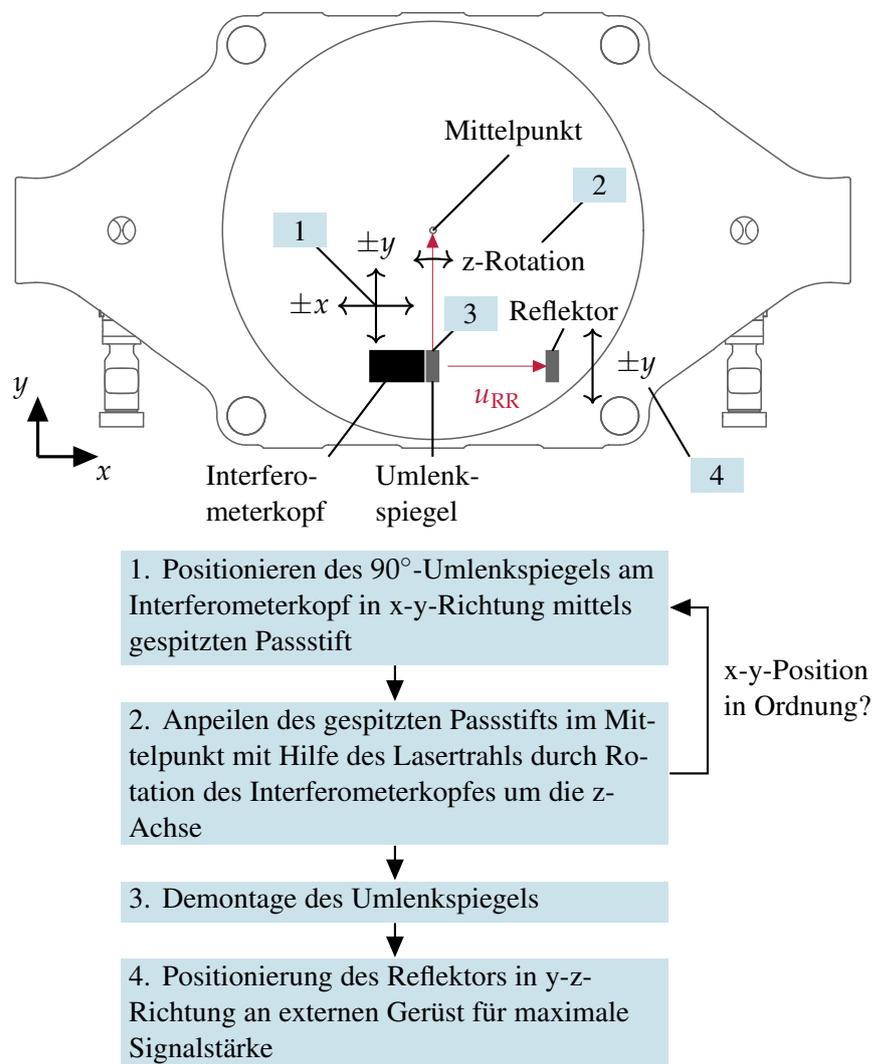


Abbildung 6.24: Ausrichtung des Interferometers

(siehe Schritt 2 in Abb. 6.24). Anschließend wird in einem iterativen Prozess die Passstiftbohrposition auf Überdeckung und die Messhebelmittlepunktpeilung geprüft (Wiederholung Schritt 1 und 2 in Abb. 6.24). Nach der Ausrichtung wird der Umlenkspiegel demontiert (siehe Schritt 3 in Abb. 6.24). Aufgrund der geringen Toleranzen ist der Cosinus-Fehler bei der Ausrichtung vernachlässigbar. Anschließend wird der Reflektor auf einem externen Ständer in y-z-Richtung positioniert, um ein starkes Messsignal des Interferometers zu erhalten (siehe Schritt 4 in Abb. 6.24).

In Abbildung 6.23 ist die Position des Sensorkopfes am Messhebel nach der Ausrichtung zu erkennen. Der Retroreflektor ist an einem zusätzlichen Ständer aus einem Aluminiumprofil montiert und mit dem Fundament verbunden. Der Reflektor lässt sich seitlich und in der Höhe so justieren, dass das Interferometer mit optimaler Signalqualität zu betreiben ist. Um die ermittelten Torsionswinkel gegenzuprüfen und um im Betrieb die Distanzmessung des Interferometers zu überwachen, ist unterhalb des Messhebels ein Aluminiumprofil angebracht. Auf zwei unterschiedlichen Positionen des Profils werden die Tangentialbewegungen von zwei Messuhren erfasst, aus dessen Messwerten sich ebenfalls ein Torsionswinkel berechnen lässt. Der Abstand beträgt

für die obere Messuhr 1820 mm und für die untere Messuhr 2165 mm. Darüber hinaus ist für Montage des Messhebels ein Präzisionsneigungssensor verwendet worden, der auch zur automatisierten Langzeitüberwachung Anwendung findet [52]. Ein Neigungssensor am Boden überprüft die Lage des Fundaments und ein Neigungssensor auf dem DM1-Messstranghebelflansch überwacht die Lage des Hebels. Der Neigungssensor am Messhebel ist in Abbildung 6.23 verdeckt und wird angedeutet. Die Differenz der beiden gemessenen Winkel kann mit dem durch das Interferometer gemessenen Torsionswinkel verglichen werden.

### Auswertungsmethode

Für die Auswertung des Torsionswinkels wird ein Python-Skript verwendet, das automatisiert erkennt, wann die Steigung (Ergebnis einer linearen Regression) null wird. Dann wird die Laststufe entsprechend hochgezählt. Für jede Laststufe erfolgt die Mittelung der Verschiebungswerte. Die Werte der Messuhren sind abgelesen worden. Die Torsionswinkelberechnung geschieht analog zur Interferometermessung über Gleichung 6.30, allerdings werden andere Radien eingesetzt (1820 mm für die obere Messuhr und 2165 mm untere Messuhr). Der Anzeigewert der Messuhr ist während einer Laststufe stabil und benötigt keine Mittelung. Die aus diesen Werten ermittelten Torsionswinkel dienen als Richtwert zur Validierung der Interferometermessung.

### Ergebnisse

In Abbildung 6.25 sind die Winkelmessungen für die unterschiedlichen Sensoren inklusive der FE-Ergebnisse dargestellt. Die Interferometermessung ist für zwei verschiedene Kalibrierungen abgebildet, um die Reproduzierbarkeit der Messung zu evaluieren. Die Messungen mit der Messuhr wurden während der Kalibrierung im Dezember 2023 durchgeführt. Die Messung des Neigungssensors erfolgte im Februar 2024.

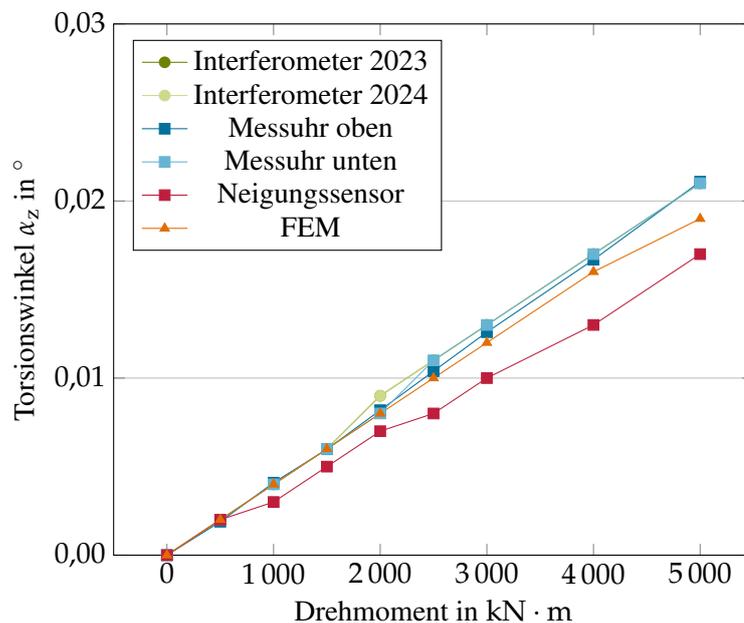


Abbildung 6.25: Torsionswinkel  $\alpha_z$  des Messhebels

Anhand der Laststufenwerte wird eine statische Betrachtung durchgeführt, ähnlich wie in der DIN 51309 zur Kalibrierung von Drehmomentsensoren. Die einzelnen Torsionswinkelwerte bestimmen sich aus den Interferometermesswerten über die Gleichung 6.30. Die Auswertung für die Kalibrierung im Februar 2024 ergab eine Wiederholpräzision von 5,0%, eine Nullpunktabweichung von 0,9% und eine Interpolationsabweichung von 7,0%. Die Wiederholpräzision ist sehr hoch, da die zweite Aufwärtsreihe in der gleichen Einbaustellung die Verformungswerte der ersten Reihe nicht wieder erreicht. Dieser Sachverhalt ist beim Linksdrehmoment ebenfalls vorhanden und die Wiederholpräzision beträgt dort 4,8%.

Die Messung vom Dezember 2023 bestätigt den Effekt, beim Rechtsdrehmoment ist die Wiederholpräzision 3,0%, beim Linksdrehmoment ist sie 3,9%. Interessanterweise sind die Abweichungen der beiden anderen Einbaustellungen im Vergleich zur ersten Aufwärtsreihe nicht so hoch und liegen im Bereich von 0,5%. Die hohe Interpolationsabweichung entsteht bei der ersten Laststufe von 500 kN·m. Die sich daraus ergebende erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) beträgt 15,5% für das Rechtsdrehmoment und 11,4% für das Linksdrehmoment.

Die Interferometerwinkel weichen nur wenig voneinander ab. Die maximalen relativen Abweichungen werden bei 500 kN·m mit 0,64% und bei 5000 kN·m mit 0,39% erreicht. Diese geringen Abweichungen sprechen für eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse einer Kalibrierung, obwohl die Wiederholpräzision bei 5000 kN·m dies nicht vermuten lässt. Die Bestimmung des Torsionswinkels durch die Messuhren spiegeln die Torsionswinkel der Interferometer exakt wider. Die relative Abweichung der Interferometermessung von 2024 gegenüber des Neigungssensors beträgt 20% bei 5000 kN·m. Die FE-Analyse weicht bei 5000 kN·m mit 9,6% ab.

Die relativen Abweichungen lassen sich aus Diagramm 6.26 ablesen. Dabei handelt es sich um

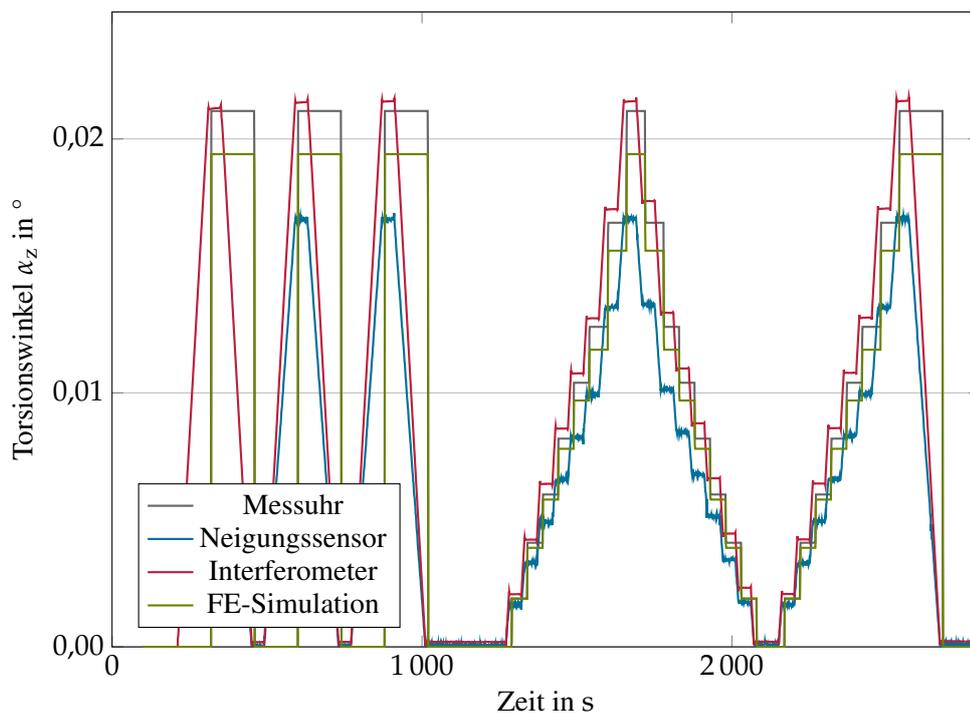


Abbildung 6.26: Ausschnitt der Torsionswinkelmessung  $\alpha_z$ , 1. Einbaustellung, Linksdrehmoment, 06.02.24

Tabelle 6.8: Kalibrierung vom 06.02.2024, Rechtsdrehmoment, Vergleich der Winkelmessungen des Neigungssensor und des Interferometers mit experimentellen Daten und den Daten der FE-Analyse

Laststufe in kN·m	$\alpha_{z,Int,exp}$ in °	$\alpha_{z,NS,exp}$ in °	Abw. exp. in %	$\alpha_{z,Int,FE}$ in °	$\alpha_{z,NS,FE}$ in °	Abw. FE in %
500	-0,002	-0,002	8	-0,002	-0,001	32
1000	-0,004	-0,003	19	-0,003	-0,003	32
1500	-0,006	-0,005	27	-0,004	-0,004	32
2000	-0,008	-0,007	27	-0,006	-0,006	32
2500	-0,011	-0,008	28	-0,008	-0,007	32
3000	-0,013	-0,010	29	-0,010	-0,009	32
4000	-0,017	-0,013	28	-0,012	-0,012	32
5000	-0,021	-0,017	26	-0,016	-0,015	32
Mittl. Abw.			26			32

die Rotationsmessung vom Februar 2024. Zu sehen ist der Ausschnitt des Linksdrehmoments in der ersten Einbaustellung. Die Messuhren werden nicht über die Zeit aufgenommen, sondern während der Kalibrierung bei jeder Stufe abgelesen. Der Wert ändert sich während einer Stufe innerhalb des Auflösungsbereichs nicht. Die Laststufe wird von der Messeinrichtung nach dem Einschwingvorgang einer Stufe gesetzt. Da die Zwischenstufe für die Auswertung herausgenommen worden ist, bleibt der Wert aktiv, bis die nächste Laststufe von der Messeinrichtung gesetzt wird. Das Diagramm zeigt die gute Übereinstimmung zwischen dem Verlauf der Messuhr (graue Linie) und dem Verlauf des Interferometers (rote Linie). Die Abweichung zum Neigungssensor wird ebenfalls ersichtlich.

Die Unterschiede in der Winkelmessung zwischen Neigungssensor und der Interferometermessung liegen an den unterschiedlichen Positionen der Sensoren. Das Interferometer ist an der Flanschfläche des Messhebels platziert. Der Neigungssensor ist auf dem Flansch zur Anbindung des DM-Messstrangs positioniert. Während das Interferometer vor allem die Rotationsbewegung auf dem Messhebel flansch registriert, dominiert beim Neigungssensor die Bewegung der DM-Biegefeder. Aus beiden Verschiebungen des Messstrangs  $u_{DM1,Fl,y}$  in globaler y-Richtung aus der FE-Analyse lässt sich über die Messhebellänge  $l_{MH} = 5 \text{ m}$  die Neigung der DM-Flanschflächen ermitteln

$$\alpha_{z,NS} = \arctan \left( \frac{u_{DM1,Fl,y} - u_{DM2,Fl,y}}{l_{MH}} \right). \quad (6.31)$$

Die Neigungswinkel am DM-Flansch aus der FE-Analyse sind in Tabelle 6.8 dargestellt. Die Ergebnisse sind auf die Rechtsdrehmomente begrenzt. Zum Vergleich werden die FE-Winkel aus der Interferometermessung und die experimentellen Winkel angegeben. Die relative Abweichung  $\alpha_{z,Int}/\alpha_{z,NS} - 1$  berechnet sich zu jeder Laststufe anhand der Versuchs- und FE-Daten. Für die FE-Analyse ergibt sich eine konstante Abweichung von 32 %. Die mittlere Abweichung in den experimentellen Daten beträgt 23 % und liegt nah an den FE-Abweichungen. Damit kann gezeigt werden, dass der Unterschied zwischen Winkelmessung des Neigungssensors und des Interferometers erwartbar ist. Aufgrund dieser Relation der beiden Messgrößen validiert die Messung des Neigungssensors die des Interferometers.

## 6.3 Quantifizierung der Nebenschlüsse und Messunsicherheitsbetrachtung

Aus den ermittelten Steifigkeiten und den Verformungswerten werden im Folgenden die konkreten Momentnebenschlüsse berechnet. Zunächst werden die Verformungswerte für die einzelnen Messstränge dargestellt. Nachfolgend werden die entsprechenden Nebenschlüsse abgebildet und mit der FE-Analyse der gesamten Messseite (siehe Abs. 4.2) abgeglichen. Die Ergebnisse sind nach den drei unterschiedlichen Nebenschlüssen sortiert.

### 6.3.1 Tangentialkraft

Abbildung 6.27 zeigt die über die Rotationsmessung abgeschätzte Tangentialbewegung der BM-Messstränge und den Abgleich mit der FE-Analyse der gesamten Messseite. In beiden Fällen ist ein linearer Verlauf ersichtlich. Darüber hinaus wird in der FE-Analyse festgestellt, dass die reine Rotationsbewegung am Messstrang zum Teil „verfälscht“ wird.

Die Tangentialbewegung kann in der FE-Analyse auf zwei Arten berechnet werden. Die Tangentialbewegung kann direkt am Messstrang ausgelesen werden oder über den Rotationswinkel berechnet werden in Analogie zum Versuch. Der Vergleich beider Berechnung zeigt, dass eine gleichbleibende relative Abweichung zwischen beiden Berechnungsmethoden vorliegt. Daraus folgt, dass die Tangentialbewegung nicht durch eine reine Rotationsbewegung hervorgerufen wird, sondern durch die Wechselwirkung mit den Messsträngen eine „Verfälschung“ auftritt. Diese relative Abweichung muss korrigiert werden. Der Korrekturfaktor berechnet sich aus

$$k_{\alpha, BMi} = \frac{u_{T, BMi, FE}}{\tan \alpha_{z, FE} \cdot r_{BMi}}. \quad (6.32)$$

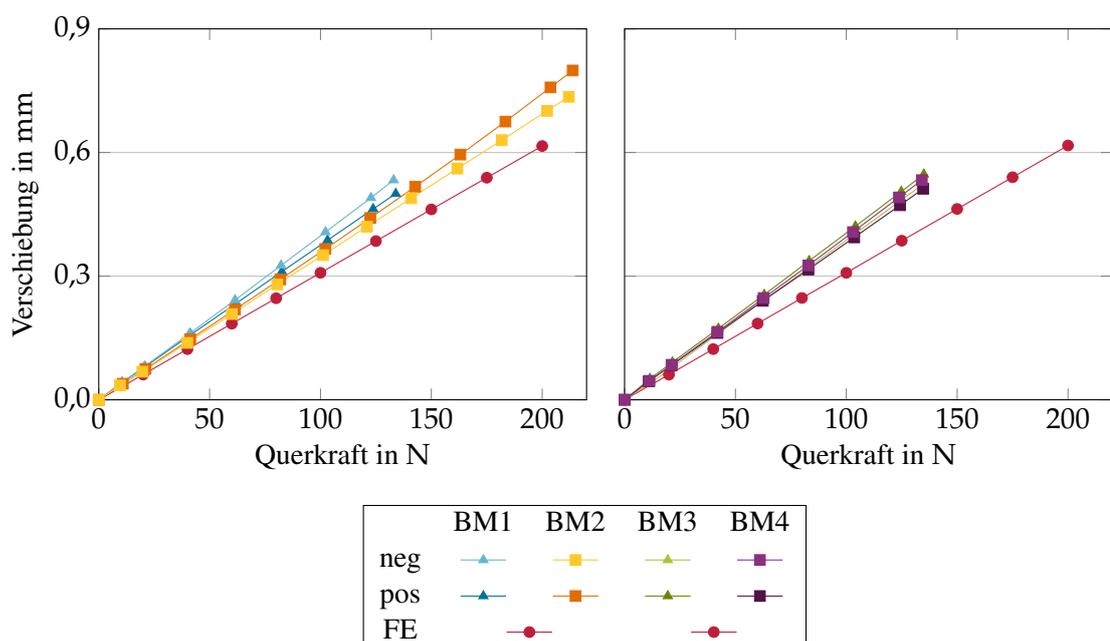


Abbildung 6.27: Tangentialkräfte  $F_{T, BM}$  im Vergleich zur globalen FE-Analyse

Tabelle 6.9:  $u_{FT}$ -Korrekturfaktor aus FE-Analyse

$u_{T,BMi}$ -Korrektur	$k_{\alpha,BM1}$	$k_{\alpha,BM2}$	$k_{\alpha,BM3}$	$k_{\alpha,BM4}$
Wert	0,9775	0,9662	0,9662	0,9775

An allen Laststufen ist das Verhältnis konstant, so dass die Korrektur auch auf die experimentell ermittelten Tangentialbewegungen angewendet worden ist. Die Korrekturfaktoren sind in Tabelle 6.9 aufgelistet. Die Daten in Abbildung 6.27 sind bereits mit diesen Faktoren korrigiert worden. Bei 5000 kN·m und exemplarisch bei BM1 tritt eine maximale Abweichung zwischen Messwert und FE-Wert von 0,09 mm auf, was einer relativen Abweichung von 11,88 % entspricht.

Die Ergebnisse in Abbildung 6.27 spiegeln die Ergebnisse der Verformungswerte  $u_{FT}$  wider. Die unterschiedlichen Verläufe der einzelnen Messstränge sind eine Folge der unterschiedlichen ermittelten Steifigkeitskoeffizienten. Im Vergleich unterscheiden sich die FE-Werte untereinander nur minimal, da diese aus einer direkten Stichprobe in der FE-Analyse ermittelt werden und nicht über Verformungswerte. Die maximale relative Abweichung beträgt bei BM2 9,5 %.

### 6.3.2 Torsionsmomente

Die indirekt bestimmten Torsionswinkel der einzelnen Messstränge sind in Abbildung 6.28a abgebildet. Ähnlich wie bei den Tangentialverschiebungen weichen die Torsionswinkel auch hier von

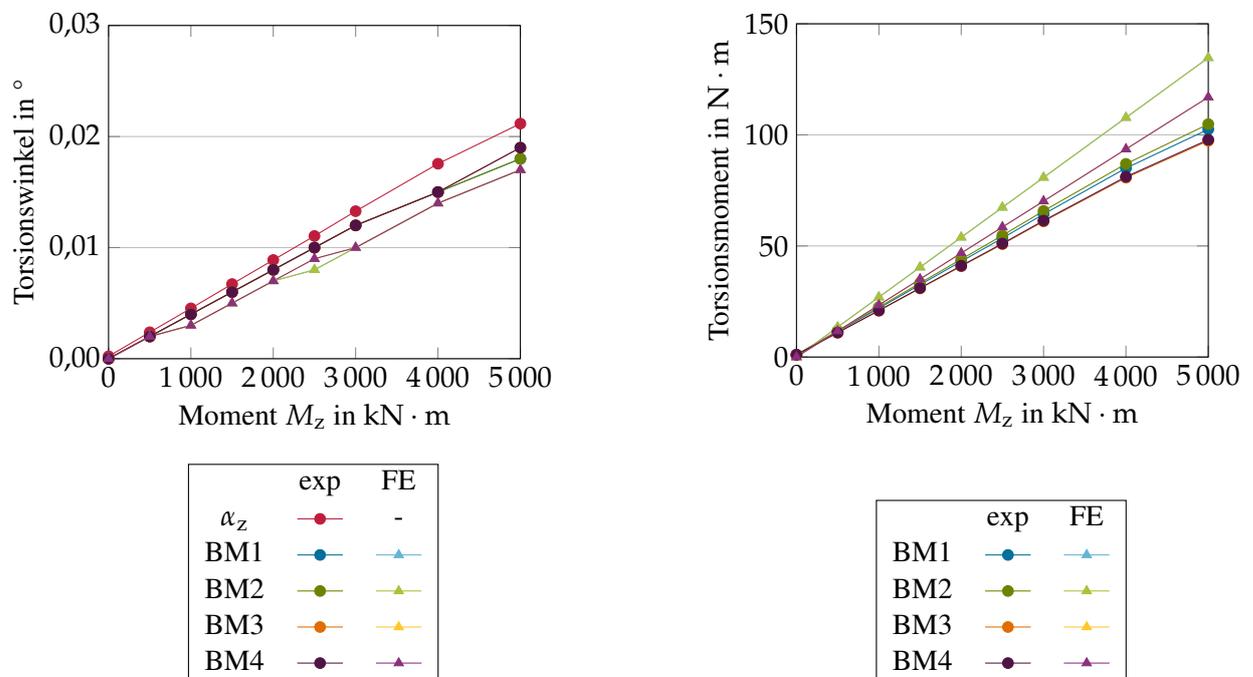
(a) Verformungswerte  $\gamma_{MT}$  im Vergleich zur globalen FE-Analyse(b) Torsionsmomente  $M_{T,BM}$  im Vergleich zur globalen FE-AnalyseAbbildung 6.28: Ergebnisse vom Torsionsmoment  $M_T$

Tabelle 6.10:  $\gamma_{MT}$ -Korrekturfaktor aus FE-Analyse

$\gamma_{BMi}$ -Korrektur	$k_{\gamma,BM1}$	$k_{\gamma,BM2}$	$k_{\gamma,BM3}$	$k_{\gamma,BM4}$
Wert	0,9559	0,9580	0,9559	0,9580

einer idealen Rotation ab. Die Korrekturfaktoren werden ebenfalls über die FE bestimmt

$$k_{fl,BMi} = \frac{\gamma_{BMi,FE}}{\alpha_{z,FE}}. \quad (6.33)$$

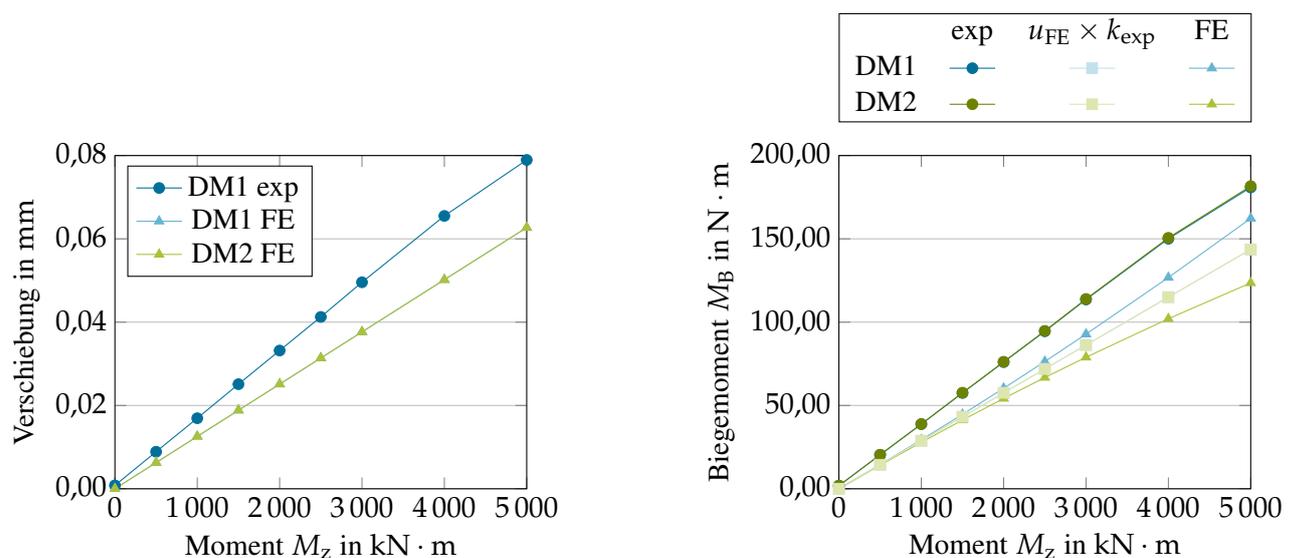
Die Korrekturen sind in Tabelle 6.10 aufgelistet. Bei den Torsionswinkel in Abbildung 6.28a handelt es sich um die bereits korrigierten Werte. Wie bei den Tangentialverschiebungen liegen die FE-Werte für die Torsionswinkel unterhalb der gemessenen Werte.

Die ermittelten Torsionsmomente  $M_T$  sind in Abbildung 6.28b dargestellt. Hier liegen die Torsionsmomente in der FE-Analyse höher als im berechneten Fall. Die relativen Abweichungen sind hier sehr hoch. Für BM1 und BM2 liegen die Abweichungen bei bis zu 32 %. Die Korrekturfaktoren sind mit einer hohen Unsicherheit behaftet, da diese auf FE-Basis errechnet worden sind.

### 6.3.3 Biegemomente

In Abbildung 6.29a sind Verformungswerte an den DM-Messsträngen dargestellt. Für einen Vergleich werden hier die positiven Ergebnisse von FE-Analyse und Versuch beschrieben, auch wenn die Bewegung in negativer x-Richtung erfolgt ist. Zu erkennen ist, dass sich die Verschiebungen von DM1 und DM2, sowohl bei den Messungen als auch in der FE-Analyse, kaum unterscheiden. Die relative Abweichung zur FE beträgt bei beiden Verschiebungen  $-21,5\%$ .

Die ermittelten Biegemomente  $M_B$  sind in Abbildung 6.29b dargestellt. Die Messergebnisse von



(a) Verformungswerte DM im Vergleich zur globalen FE-Analyse

(b) Biegemoment  $M_{B,DM}$  im Vergleich zur globalen FE-Analyse

Abbildung 6.29: Ergebnisse vom Biegemoment  $M_{B,DM}$  (DM1 FE/exp. liegt unter DM2 FE/exp.)

DM1 und DM2 sind identisch, da der Steifigkeitskoeffizient nur für DM1 ermittelt wird und die gemessenen Werte der Verformungen sich kaum unterscheiden. Überraschend ist jedoch, dass in der FE-Analyse ein unterschiedlicher Wert bei 5000 kN·m für die Stichproben bei DM1 (162 N·m) und DM2 (120 N·m) angezeigt werden. Bildet man stattdessen die Biegemomente als Produkt der Verschiebungen in der FE mit den experimentellen Steifigkeitskoeffizienten, liegt das Ergebnis zwischen der reinen FE-Auswertung und den Versuchsergebnissen.

# 7 Messunsicherheit der Messhebellänge

Bei einem Kraft-Hebel-System, wie die 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung, muss neben der Rückführung der Kraftmessung auch die Messung der Messhebellänge rückgeführt werden. In der Vergangenheit erfolgte dies über die Vermessung des eingesetzten Hebelarms in einem rückgeführten Koordinatenmessgerät. So konnte das geometrische Merkmal mit einer Unsicherheit vergeben werden. Die Größe und das Gewicht des Messhebels erschweren die Handhabung und damit die Vermessung in einem Koordinatenmessgerät.

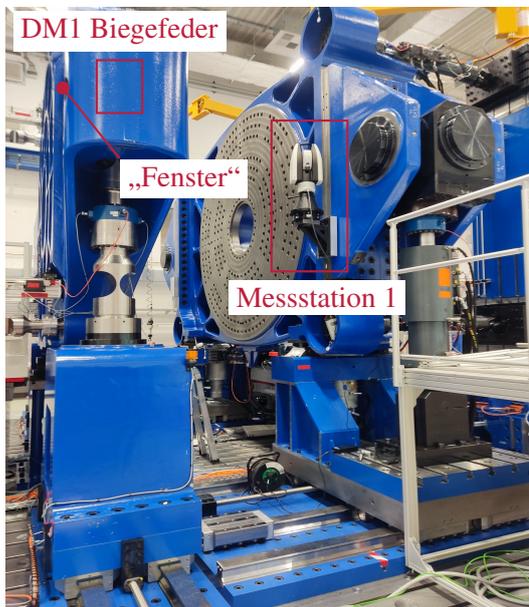
Der Lasertracker ist im Gegensatz zu den Koordinatenmessgeräten der PTB nicht rückgeführt. Zur Überprüfung von Lasertrackern stellt die PTB eine Messeinrichtung zur Charakterisierung mobiler 3D-Messsysteme zur Verfügung. Es handelt sich dabei um eine ebene Anordnung von kalibrierten Längen zwischen 1,5 m bis 5 m mit einer Kalibrierunsicherheit der einzelnen Längen unter 10 µm. Die Messeinrichtung, auch Referenzwand genannt, erlaubt die Überprüfung der maximal zulässigen 3D-Längenmessabweichung nach VDI 2617 Blatt 10/ ISO 10360-10 [53]. Diese Überprüfung ist aber keine Kalibrierung im eigentlichen Sinne, sondern überprüft nur, ob die vom Hersteller angegeben maximalen Prüfabweichungen eingehalten werden. Die Messunsicherheit muss also für die Messaufgabe gesondert betrachtet und durch unterschiedliche Untersuchungen verifiziert werden. Das folgende Kapitel beschreibt die Messaufgabe zur Vermessung der Messhebellänge und hat das Ziel, die Messhebellänge zu ermitteln und eine Messunsicherheit zuzuordnen.

## 7.1 Messablauf

Das Ziel der Messung ist die Bestimmung der Abstände zwischen dem Messhebelmittelpunkt als angenommenen Drehpunkt und den jeweiligen Krafteinleitungspunkten (KE). Die Krafteinleitungspunkte befinden sich in den dünnen Stegen der Biegefedern der DM-Messstränge auf Höhe des Messhebelmittelpunkts. Für die Messung zwischen Reflektor und Lasertracker muss eine freie Sichtlinie bestehen. Die Biegefedern werden zum größten Teil vom Messhebel verdeckt und können nur orthogonal zum Hebel eingesehen werden. Daher muss der Lasertracker auf einer Höhe mit der Biegefeder positioniert werden, damit der Strahl normal zum Hebel ausgerichtet werden kann.

In Abbildung 7.1a ist die Position des Trackers dargestellt. Für den Tracker wird ein unbeweglicher Messplatz benötigt. Mit einem 90°-Winkel und einer magnetischen Sicherung kann der Lasertracker fest an dem Aktorhebel platziert werden (siehe Abb. 7.1a). Das „Fenster“ für die Biegefeder durchläuft das gesamte Hebelmaterial, so dass der Reflektor durch die gegenüberliegende Seite des Messhebels gehalten werden kann, um den Strahl zum Lasertracker nicht zu unterbrechen (siehe Abb. 7.1b). Der gesamte Messablauf ist in Tabelle 7.1 wiedergegeben.

Schritt 0 und 1 sind Empfehlungen des Herstellers, um ein optimales Messergebnis zu erzielen. Mit Schritt 2 beginnt die Einmessung des Koordinatenmesssystems. Als Vorgabe gilt die Umsetzung des globalen Koordinatensystems der Maschine, das für die Kraft- und Momentbilanzen



(a) Lasertracker auf Messstation 1



(b) Sichtlinie des Trackers auf die Biegefeder

Abbildung 7.1: Position des Lasertrackers und der Reflektoren bei der Messhebelvermessung

Tabelle 7.1: Ablauf der Messhebelvermessung

Abschnitt	Schritt	Inhalt
Vorbereitung	0	Tracker Warm-up
	1	Two-Face-Check, Axes-Compensation
Einmessung des Koordinatensystems	2	Aufbau des Trackers auf dem Schwingfundament
	3	Vermessung des Maßstabs als Bezug
	4	Vermessung des Schwingfundament-Oberfläche (x-z-Fläche)
	5	Vermessung des Messhebelflanschfläche (x-y-Fläche)
Vermessung Biegefeder DM1	6	Vermessung des Messhebelmittelpunkts
	7	Aufbau des Trackers auf Messstation 1
	8	Vermessung des Maßstabs und Koordinatentransformation
Vermessung Biegefeder DM2	9	Vermessung Zylinder 1 bei DM1
	10	Vermessung Zylinder 2 bei DM1
	11	Aufbau des Trackers auf Messstation 2
	12	Vermessung des Maßstabs und Koordinatentransformation
	13	Vermessung Zylinder 3 bei DM2
	14	Vermessung Zylinder 4 bei DM2

gültig ist. Zur Erfassung aller notwendigen Geometriemerkmale von einem Standort wird der Lasertracker auf dem Boden des Schwingfundaments an der Seite der Maschine zwischen den beiden Hebeln positioniert (Schritt 2). Zuerst wird der Tracker überprüft, in dem der Maßstab am Messhebel vermessen wird. Anschließend erfolgt der Abgleich mit den im Kalibrierschein angegebenen Längen (Schritt 3). Der Maßstab ist unterhalb des Messhebelmittelpunkts montiert (siehe Abb. 7.2). Die eingemessenen Punkte dienen später als Nominalpunkte, die für einen Trackerstandortwechsel herangeführt werden. Wenn der Lasertracker bewegt worden ist, kann das verschobene Koordinatensystem des Trackers transformiert werden, so dass es deckungsgleich zum alten Koordinatensystem ist. Damit ist man in der Lage, die relativen Positionen von Geometriemerkmale zu erfassen, die aus einer Position nicht gemessen werden können. Der Vorteil bei der Wahl des Maßstabs ist, dass die Punkte zueinander einen kalibrierten Abstand besitzen. Die wiederholte Vermessung des Maßstabs dient zur Überprüfung, ob die Messungen des Trackers weiterhin korrekt sind und ob die Koordinatentransformation erfolgreich ist.

In Schritt 4 wird die Oberfläche des Schwingfundaments eingemessen, die später die x-z-Ebene aufspannen soll. Dazu wird ein Bereich zwischen Mess- und Aktorhebel abgesteckt. Die x-y-Ebene wird in Schritt 5 mittels der Messhebelflanschfläche vermessen. An dieser Fläche wird die Baugruppe des Kalibriergegenstands montiert. Aus Platzgründen kann in dem Bereich nur eine Leiter aufgestellt werden, so dass wie in Abbildung 7.2 angedeutet, nur der untere Teil der Flanschfläche abgetastet worden ist. In Schritt 6 wird der Messhebelmittelpunkt eingemessen und dient später sowohl als Koordinatenursprung als auch als Bezugspunkt für beide Messhebellängen.

Jede Biegefeder hat zwei Zylinderaussparungen. Wird eine Position vor dem Messhebel gewählt, in der die Blickrichtung der negativen globalen z-Achse entspricht, werden die Aussparungen von links nach rechts der Reihe nach durchnummeriert (siehe Abb. 7.2). Zylinder 1 und 2 gehören zur Biegefeder von DM-Messstrang 1 und Zylinder 3 und 4 zur Biegefeder von DM-Messstrang 2 (siehe Abbildung 7.2).

Der Tracker wird in Schritt 7 auf die erste Messstation aufgebaut. Anschließend werden in Schritt 8 die zuvor erwähnten Nominalpunkte für die spätere Koordinatentransformation nach Standortwechsel eingemessen. Danach werden in den Schritten 9 und 10 die Zylinder 1 und 2 der Biegefeder DM1 vermessen. Im nächsten Schritt 11 erfolgt der Umbau auf Messstation 2, so dass die Sichtlinie genau wie Messstation 1 orthogonal zur Messhebelflanschfläche auf Höhe der Biegefeder aufgebaut ist. Hier erfolgt in den Schritten 12 bis 14 die Einmessung des Trackers und die anschließende Vermessung von Zylinder 3 und 4 von Biegefeder DM2. Die Messung erfolgte mithilfe der Software SPATIAL ANALYZER von der Firma NEW RIVER KINEMATICS.

## 7.2 Auswertung und Modellgleichung

Zu Beginn der Auswertung werden die Messpunkte nach den Zylindern eins bis vier sortiert. Für jede dieser Punktgruppe wird ein Zylinderobjekt erstellt. SPATIAL ANALYZER fittet die Zylinderradien und Zylinderachseparameter für jede Punktgruppe derart an, dass der quadratische Residualwert (residual mean square, RMS) für die Zylindergleichung aus jedem Punkt minimal wird. Der gefundene Zylinderradius dient der Überprüfung des Fits, da dieser einen Nennwert von 90 mm aufweist. Die Zylinderachse wird zur Ermittlung der Messhebellänge verwendet.

Um die Zylinderachsen zur Ermittlung des Ortes der Krafteinleitung zu nutzen, sind einige

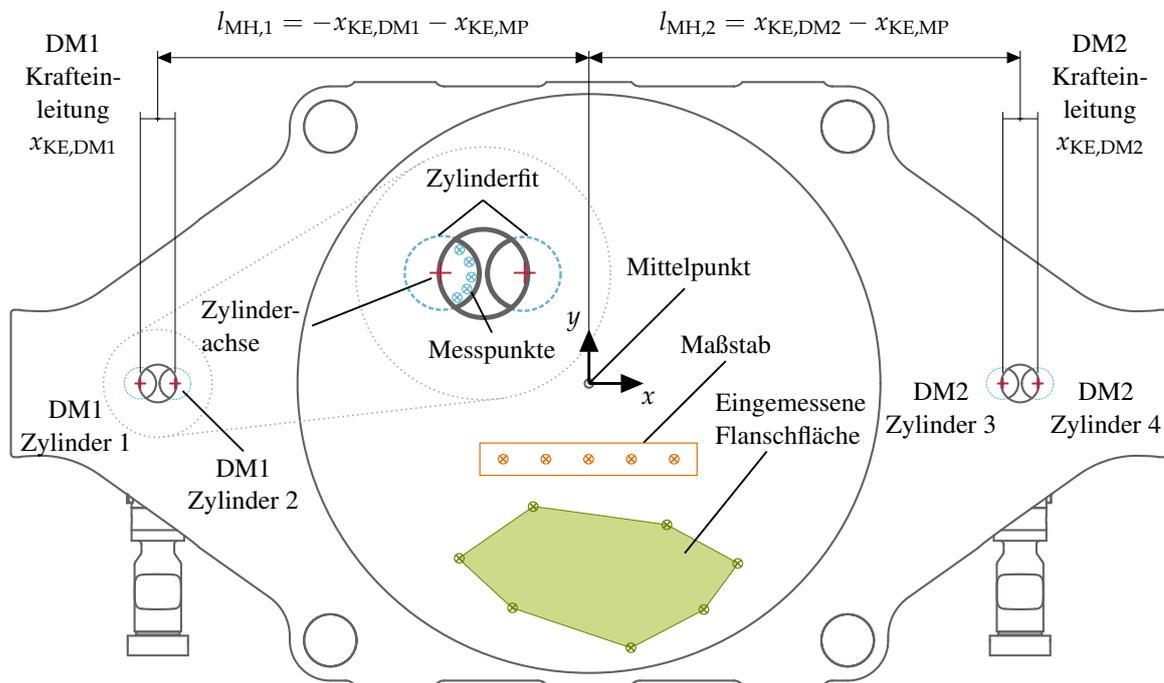


Abbildung 7.2: Ablauf der Messhebelvermessung

Annahmen im Vorfeld notwendig. Als Erstes wird angenommen, dass die Spannungsverteilung am Ort der Kraftereinleitung gleichmäßig ist. In Abbildung 7.3 ist eine Schnittansicht des Hebels von oben in einer Bruchdarstellung zu erkennen. Die Kraftereinleitung erfolgt an dem dünnen Steg, wo der Biegefederquerschnitt die kleinste räumliche Ausdehnung hat. Dieser Querschnitt kann als die kleinstmögliche Eingrenzung des Kraftereinleitungspunkts angesehen werden.

Bei einer gleichmäßigen Spannungsverteilung kann die resultierende Kraft als Ergebnis des Spannungsintegrals über die gezeigte Querschnittsfläche mit dem Flächenmittelpunkt als Angriffspunkt angenommen werden. Diese Annahme ist insofern gerechtfertigt, da eine ungleichmäßige Spannungsverteilung zu Spannungsspitzen innerhalb des Querschnitts führen würde und damit die Festigkeit des Bauteils nicht mehr gegeben wäre. Die Aufgabe vereinfacht sich, weil nun keine Querschnittsfläche ermittelt werden muss, sondern nur noch der Mittelpunkt der Querschnittsfläche.

Die nächsten Annahmen zielen darauf ab, die Lage des Kraftereinleitungspunkts in Bezug zu den gemessenen Zylinderachsen zu setzen. Es wird vorausgesetzt, dass sich der Kraftereinleitungspunkt in der Mittelebene des Messhebels und auf der Mittellinie der Zylinderachse befindet. Die Symmetriemittellinie des DM-Messstrangs fällt am Ankopplungspunkt am Hebelende durch eine Zentrierung mit einer Toleranz von  $0,1 \text{ mm}$  mit der Mittelebene des Hebels zusammen. Bei einem Fluchtungsfehler von maximal  $0,0205^\circ$  über die gesamte DM-Messstranglänge wäre die maximale Abweichung des angenommenen Kraftereinleitungspunkts von der Mittelhebelebene unter  $0,6 \text{ mm}$ . Angesichts der Hebellänge von insgesamt  $5 \text{ m}$  ist die Cosinusabweichung in Höhe von  $3,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$  zu vernachlässigen. Mit dieser Vereinfachung reduziert sich das dreidimensionale Problem auf ein zweidimensionales. Anstatt zwei windschiefe Achsen im Raum zu betrachten, reicht es, die Durchstoßpunkte der gefundenen Zylinderachsen in der Messhebelmittelebene zu vergleichen. Hier wird

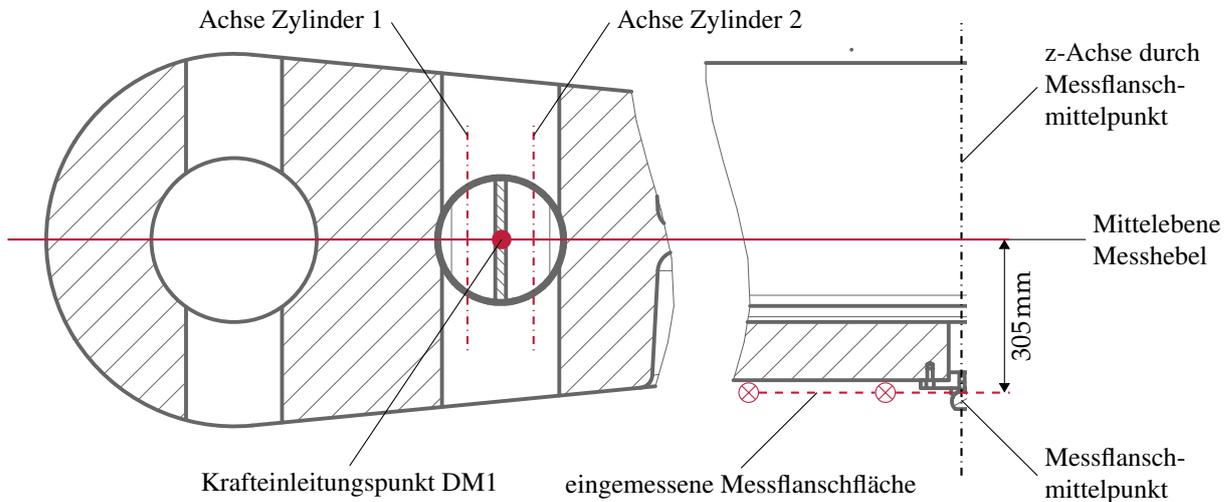


Abbildung 7.3: Annahmen zur Festlegung des Kräfteinleitungspunkts (KE)

nun die Annahme getroffen, dass der Mittelpunkt des Querschnitts mit der schmalsten Stelle der Biegefeder mit dem Mittelpunkt auf einer Geraden zwischen den beiden Durchstoßpunkten zusammenfällt. Der kleinste Querschnitt befindet sich dort, wo der kleinste Abstand der beiden Zylinderkreise in der Ebene ist. Hier müsste eigentlich der Mittelpunkt der Geraden aus den  $x$ - und  $y$ -Koordinaten der jeweiligen Durchstoßpunkte ermittelt werden. In der Modellgleichung reicht es aber aus, nur den Mittelwert der  $x$ -Koordinaten zu bestimmen, weil die resultierende Cosinusabweichung zu vernachlässigen ist. Auf diese Weise wird die  $x$ -Koordinate der Kräfteinleitung für die Biegefedern DM1 und DM2 ermittelt. Die Modellgleichung sieht folgendermaßen aus

$$l_{MH,1} = x_{DM1} - x_{MP} - \frac{x_{loc}}{2}, \quad (7.1)$$

$$l_{MH,2} = x_{DM2} - x_{MP} + \frac{x_{loc}}{2}. \quad (7.2)$$

$l_{MH,j}$  ist die Länge des korrespondierenden Hebelarms.  $x_{DM,j}$  ist die  $x$ -Koordinate des Kräfteinleitungspunkts an den Biegefedern DM1 und DM2 und  $x_{loc}$  beziffert die zusätzliche Unsicherheit durch den Standortwechsel des Lasertrackers. Die Modellgleichungen zur Berechnung der Kräfteinleitungspunkte wird folgendermaßen dargestellt:

$$x_{DM1/2} = \frac{1}{2} \cdot (x_{DM1/2,Zy11/3} + x_{DM1/2,Zy12/4} + \Delta x_{\alpha,Zy11/3} + \Delta x_{\alpha,Zy12/4}). \quad (7.3)$$

Wie bereits beschrieben, ist der Kräfteinleitungspunkt der Mittelwert der Zylinder- $x$ -Koordinaten der einzelnen Biegefedern. Hinzu kommt ein Unsicherheitsbeitrag durch die Messflanschvermessung. Die Höhe der Hebelmittelebene in  $z$ -Richtung verschiebt den Kräfteinleitungspunkt entlang der beiden Zylinderachsen, die wiederum selbst durch eine Unsicherheit überlagert sind.

## 7.3 Analyse der Unsicherheitsbeiträge

Die Unsicherheitsbeiträge durch den Zylinderfit, den Standortwechsel und die Messflanschvermessung werden in den nächsten Abschnitten einzeln aufgeschlüsselt und analysiert. Die Zusammenfassung erfolgt anschließend in einer Messunsicherheitsbilanz.

### Einfluss des Zylinderfits

Die Software SPATIAL ANALYZER stellt ein Tool zur Berechnung des Zylinderfits bereit. In der vorliegenden Arbeit ist die Best-Fit-Methode eingestellt worden und die Optimierungsaufgabe besteht darin, den RMS zu minimieren. Um die fertigungsbedingten Abweichungen zu berücksichtigen, ist der Radius als Fitparameter nicht fest vorgegeben. Zusätzlich werden im Vorfeld Ausreißer aus der Punktgruppe entfernt.

Ein erster Zylinderfit in SPATIAL ANALYZER für jeden der vier Zylinder mit einem vorgegebenen Radius von 90 mm berechnet die RMS-Werte für jeden einzelnen Punkt. Alle Punkte, deren RMS-Wert über 0,01 liegen, werden für die Berechnung nicht weiter berücksichtigt.

Eine Schwierigkeit besteht darin, die Unsicherheit durch den Zylinderfit zu berechnen. Die iterative Bestimmung des Radius und der Lage und Orientierung der Zylinderachse erschwert es, einen mathematischen Zusammenhang zwischen Durchstoßpunktposition und Messpunkten herzustellen.

Um das Problem zu lösen, wird auf die Monte-Carlo-Simulation von SPATIAL ANALYZER zurückgegriffen. SPATIAL ANALYZER erlaubt es, für jeden Messpunkt eine Unsicherheit zu ermitteln, da eine vorgegebene Anzahl an Messpunkten durch eine Monte-Carlo-Simulation erstellt wird. In der Software werden dafür die Eingangsvariablen der Distanzmessung und der beiden Winkelmessungen für den Lasertracker mittels Gauß-Zufallsgenerator nach dem Box-Muller-Verfahren randomisiert. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Randomisierung ist gaußverteilt. Die Standardabweichungen der Variablen sind in Tabelle 7.2 angegeben.

Die Unsicherheitsparameter des Trackers sind in SPATIAL ANALYZER standardmäßig sehr hoch angesetzt, um eine große Bandbreite von Trackern abzudecken. Diese Standardeinstellungen aus SPATIAL ANALYZER werden für die Monte-Carlo-Simulation verwendet. Für jeden Messpunkt werden 1000 Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Bei der Zylindervermessung werden für jeden Zylinder etwa 50 Messpunkte aufgenommen. Aus jeder Monte-Carlo-Simulation wird für jeden Messpunkt ein Punkt aus der Unsicherheitspunktwolke ausgewählt. Aus den 50 gewählten Unsicherheitspunkten wird ein Zylinderfit erstellt. Mit den 1000 Unsicherheitspunkten entstehen damit ebenso viele Zylinder. Um die Unsicherheit des Zylinderfits statisch bewerten zu können, wird für jeden Zylinder der Durchstoßpunkt durch die Messhebelmittelebene berechnet. Die Mittelwerte

Tabelle 7.2: Unsicherheitsparameter des Lasertrackers in SPATIAL ANALYZER

Eingangsvariable	Horizontale Winkelmessung $\theta$	Vertikale Winkelmessung $\phi$	Längenmessung $r$
Unsicherheit (k=1)	$4,48 \cdot 10^{-6}$ rad	$4,48 \cdot 10^{-6}$ rad	2,5 ppm

Tabelle 7.3: x- und y-Koordinaten der Zylinderachsendurchstoßpunkte in der Messhebelmittellinie in mm

Biegefeder	DM1				DM2			
	Zylinder 1		Zylinder 2		Zylinder 3		Zylinder 4	
Koordinate	x	y	x	y	x	y	x	y
Einheit	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Mittelwert	-2599,800	-0,005	2399,864	0,037	2400,052	-0,133	2599,977	-0,136
Standardabweichung	0,008	0,003	0,007	0,002	0,009	0,003	0,007	0,003

der x- und y-Koordinaten der Durchstoßpunkte und deren Standardabweichung sind in Tabelle 7.3 dargestellt.

Insgesamt bleibt die Standardabweichung für jeden Zylinderfit unter 0,01 mm. Die Abweichung von den Nennwerten aus der technischen Zeichnung bleibt unter 0,2 mm, was innerhalb der Fertigungstoleranzen liegt.

### Standortwechsel des Lasertrackers

In SPATIAL ANALYZER werden nach jedem Standortwechsel Koordinatentransformationen durchgeführt, um den verschobenen Lasertracker innerhalb des früheren Koordinatensystems zu positionieren. Die dafür benötigten Bezugspunkte sind in einem fest montierten Maßstab festgelegt. SPATIAL ANALYZER gibt einen Bericht über die durchgeführten Koordinatentransformationen zurück. In dieser Bewertung ist die maximale Abweichung eines Punkts vor und nach der Transformation angegeben. Demnach liegt die maximale Abweichung bei 0,01 mm.

Die aufgenommenen Maßstabswerte im Vergleich zu den kalibrierten Werten stützen die Qualitätseinschätzung durch SPATIAL ANALYZER. In Abbildung 7.4 sind die Abweichungen von der Vermessung des Maßstabs beim Einmessen in das Koordinatensystem dargestellt. Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nachzuweisen, wird zusätzlich bei der Einmessung eine Testmessung durchgeführt. Es ist in Abbildung 7.4 zu erkennen, dass kein Wert über 0,015 mm liegt.

Der Unsicherheitseinfluss wird darüber hinaus durch einen Standortwechsel an der Referenzwand untersucht. Dazu wird ein Versuchsaufbau an der Referenzwand gewählt, der der Messhebelvermessung ähnelt. Die Referenzwand besteht aus mehreren kalibrierten Referenzlängen unterschiedlicher Orientierung. Für die „Simulation“ der Messhebelvermessung wird eine horizontale Referenzlänge von etwa 6 m Länge ausgewählt. Da die Länge in etwa der Länge des Messhebels entspricht und der Lasertracker auf dem Aufstellrohr die Endpunkte der Referenzlänge ohne größere Höhenunterschiede anpeilen kann, ist die Situation bei der Messhebelvermessung gut nachgebildet. Statt eines Maßstabs werden weitere Punkte an der Referenzwand als Bezugspunkte für den Standort ausgewählt.

Die Vermessung der Referenzlänge ist dreimal wiederholt worden. Daraus resultieren drei Abstandsmessungen. Die Unsicherheit der Messpunkte wird mit SPATIAL ANALYZER mittels Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Die erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) liegt in Messstation 1 bei allen Versuchsdurchführungen bei 0,03 mm, Für Messstation 2 liegt die Messunsicherheit bei 0,02 mm.

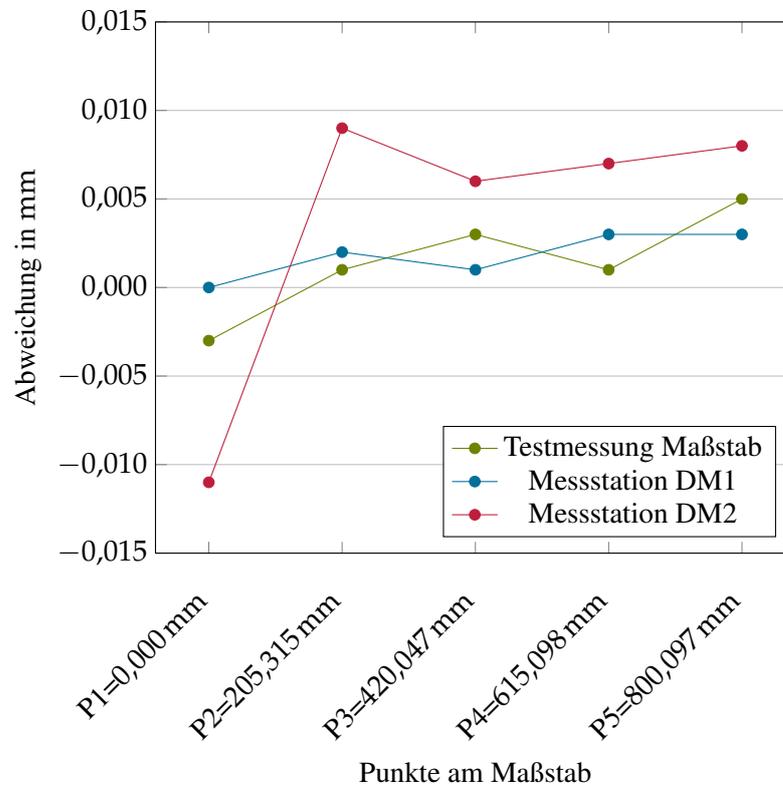


Abbildung 7.4: Abweichung der Maßstabswerte nach Standortwechsel

Für die Unsicherheitsbestimmung der Abstandsmessung addieren sich die Unsicherheiten und insgesamt beläuft sich die erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) auf 0,05 mm.

Abbildung 7.5 zeigt die Ergebnisse der Abstandsmessung 1 bis 3 an der Referenzwand. Die Fehlerbalken markieren die Bereiche, die durch die Messunsicherheit von 0,05 mm abgedeckt werden. Auffällig ist, dass nur eine Abstandsmessung innerhalb des von der Referenzwand definierten Bereichs liegt. Die maximale Abweichung der Trackerabstandsmessung zum Wert der Referenzwand beträgt 0,16 mm. Auch eine Abschätzung mit der MPE-Angabe statt der Messunsicherheit führt dazu, dass die beiden letzten Trackermessungen außerhalb des Bereiches liegen. Bei einer Distanz von Tracker zu Messpunkt von 2 m beträgt der MPE-Wert nach Angabe von LEICA  $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m} \cdot 2 \text{ m} = 27 \mu\text{m}$ . Somit liegt die Vermutung nahe, dass die Unsicherheit für den Standortwechsel höher liegt, als der Report in SPATIAL ANALYZER zur Koordinatentransformation vermuten lässt. Die Unsicherheit des Standortwechsels wird daher im Messunsicherheitsbudget mit 0,15 mm abgeschätzt.

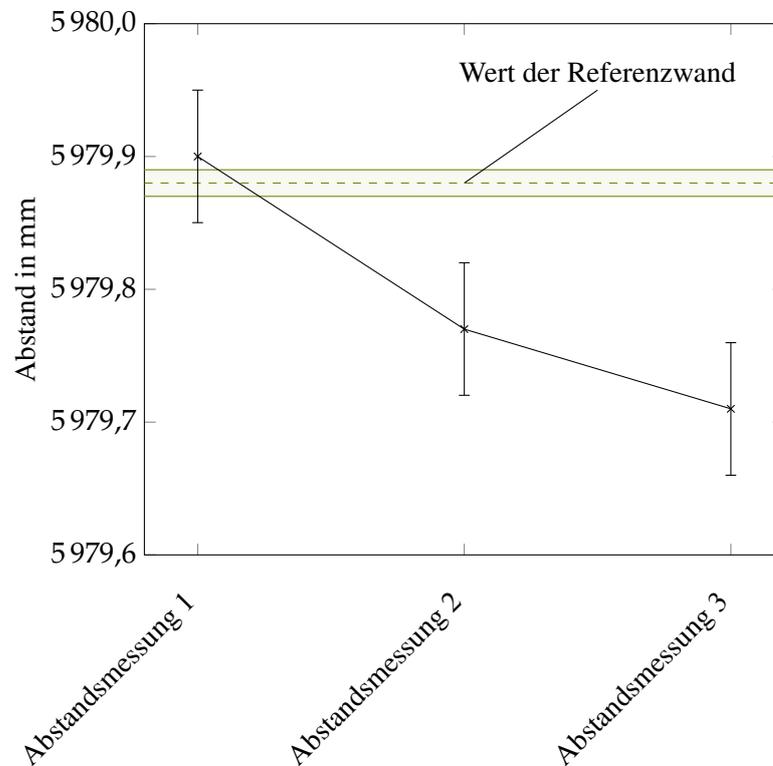


Abbildung 7.5: Abweichung der Trackermessung von Abstandswert der Referenzwand

### Vermessung des Messhebelflanschs

Die Position der Messhebelmittelebene definiert die Position der Durchstoßpunkte und damit die Lage der Krafteinleitungspunkte. Der Abstand zwischen Flansch und DM-Messstrangsmittellinie beträgt 265 mm (siehe Anhang A.8). Hinzu kommen die Platte zur Anbringung des Reflektors an den Messhebel mit 15 mm und der Offset des Reflektors inklusive Reflektornest mit 25 mm. Die Summe dieser Abstände beträgt 305 mm. Zur Erzeugung der Messhebelmittelebene wird eine parallele Ebene gebildet, die um 305 mm zur eingemessenen Messhebelflanschfläche versetzt ist.

Die Fertigungstoleranz der Bohrung für den Messstrang beträgt 0,1 mm. Des Weiteren existiert eine G7/h7-Übergangspassung, was zu einem maximalen Spiel  $\Delta z_{FT}$  von 0,17 mm führen kann. Diese Toleranz ist zur Unsicherheit der Messhebelmittelebene hinzuzufügen. Dazu kommen die Unsicherheiten durch die Vermessung des Messflanschs. Wie in Abschnitt 7.1 erwähnt, konnte der Messflansch nicht vollständig abgetastet werden. Der Flächenschwerpunkt  $r_{SP}$  der eingemessenen Fläche liegt 1002,3 mm unterhalb des Hebelmittelpunkts. SPATIAL ANALYZER berechnet die Unsicherheiten von geometrischen Objekten durch eine Monte-Carlo-Simulation. Die Unsicherheit in z-Richtung  $\Delta z_{Fl,z}$  wird mit 0,02 mm angegeben, die für die Unsicherheit der Rotation um die x-Achse  $\Delta \alpha_{Fl}$  mit  $0,0001^\circ$ . Abbildung 7.6 stellt den Zusammenhang zwischen den Unsicherheitsbeiträgen und der Verschiebung der Messhebelmittelebene auf Höhe des Hebelmittelpunkts  $\Delta z_{Fl}$  dar. Der formeltechnische Zusammenhang lautet

$$\Delta z_{Fl} = \Delta z_{FT} + \Delta z_{Fl,z} + \sin(\Delta \alpha_{Fl}) \cdot r_{SP}. \quad (7.4)$$

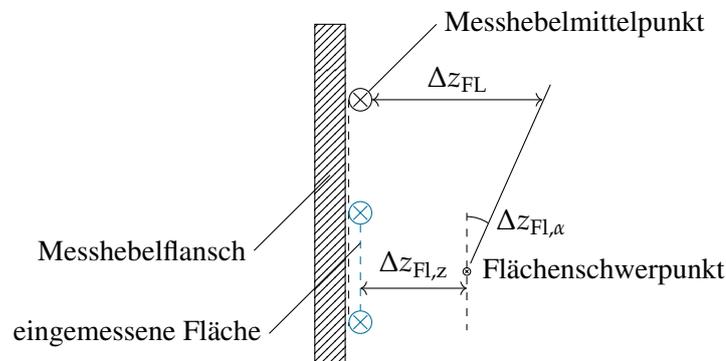


Abbildung 7.6: Auswirkungen auf die Bestimmung der Krafteinleitungsposition durch Messflanscheinmessung

$r_{SP}$  ist der Abstand vom Flächenschwerpunkt bis zu Höhe des Messhebelmittelpunkts.

## 7.4 Messunsicherheitsbudget der Messhebellänge

In Tabelle 7.4 und Tabelle 7.5 sind die Messunsicherheitsbudgets für die Messhebellängen  $l_{MH1}$  dargestellt. Mit knapp 81 % trägt der Standortwechsel am meisten zur Unsicherheit der Messhebellänge bei, da dieser mit 0,15 mm sehr hoch angesetzt ist. Der nächsthöhere Beitrag stellt die Messung des Mittelpunkts  $x_{MP}$  mit knapp 17 % Anteil dar. Die erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) der beiden Messhebellängen  $l_{MH,1}$  und  $l_{MH,2}$  belaufen sich auf  $38 \cdot 10^{-6}$ , das entspricht einer absoluten Unsicherheit von 0,096 mm.

Tabelle 7.4: Messunsicherheitsbudget der Messhebelvermessung,  $l_{MH,1}$ 

Einflussgröße	Schätzwert	Standardunsicherheit	Unsicherheitsbeitrag in mm	Index in %
$x_{MP}$	0 mm	0,0200 mm	-0,0200	17,4
$x_{Loc}$	0 mm	0,0866 mm	-0,0430	81,4
$x_{DM1,Zy11}$	-2599,800 mm	0,0080 mm	-0,0040	0,7
$x_{DM1,Zy12}$	-2399,864 mm	0,0080 mm	-0,0035	0,5
$x_{\alpha,Zy11}$	0 mm	0,0002 mm		
$x_{\alpha,Zy12}$	0 mm	0,0004 mm		
$\alpha_1$	0,4001°	0,0011°	0	
$\alpha_2$	0,9946°	0,0012°	0	
$\Delta x_{Offset,z}$	0 mm	0,02 mm	-0,0002	
$\alpha_{Fl}$	0°	0,0009°	-0,0002	
$\Delta y_{centroid}$	1002,2967 mm	0,0020 mm	0	
$l_{MH,1}$	2499,8320 mm			
Erw. rel. MU	$38 \cdot 10^{-6}$			
Erw. abs. MU ( $k = 2$ )	0,096 mm			

Tabelle 7.5: Messunsicherheitsbudget der Messhebelvermessung  $l_{MH,2}$ 

Einflussgröße	Schätzwert	Standardunsicherheit	Unsicherheitsbeitrag in mm	Index in %
$x_{MP}$	0 mm	0,0200 mm	-0,0200	17,3
$x_{Loc}$	0 mm	0,0866 mm	-0,0430	81,3
$x_{DM2,Zy13}$	2400,052 mm	0,0090 mm	-0,0045	0,9
$x_{DM2,Zy14}$	2599,977 mm	0,0070 mm	-0,0035	0,5
$x_{\alpha,Zy11}$	0 mm	0,0001 mm		
$x_{\alpha,Zy12}$	0 mm	0,0001 mm		
$\alpha_1$	0,1858°	0,0011°	0	
$\alpha_2$	0,1687°	0,0015°	0	
$\Delta x_{Offset,z}$	0 mm	0,02 mm	-0,0001	
$\alpha_{Fl}$	0°	0,0009°	0	
$\Delta y_{centroid}$	1002,2967 mm	0,0020 mm	0	
$l_{MH,1}$	2500,0145 mm			
Erw. rel. MU	$38 \cdot 10^{-6}$			
Erw. abs. MU ( $k = 2$ )	0,096 mm			

# 8 Weitere Messunsicherheitseinflüsse

## 8.1 Umwelteinflüsse

Zur Überwachung der Lufttemperatur und der -feuchtigkeit in der Messhalle werden Sensoren von Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH [54] eingesetzt. Diese sind in einem Rahmen um die Messseite und den Kalibriergegenstand befestigt. In der Messhalle sind die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsgrenzen in einer Klimazone spezifiziert ( $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$ ,  $(45 \pm 5) \%$ ), die einen Bereich um die Messseite und um den Kalibriergegenstand umfasst.

In Abbildung 8.1a und in Abbildung 8.1b ist der Tagesverlauf der Temperatur und der Luftfeuchte an verschiedenen Stützstellen am 11.05.2023 gegeben. Die ausgewählten Stützstellen befinden sich auf der Messseite an den einzelnen BM-Messsträngen entweder am Fuß (Anbindung zum Messrahmen, Bezeichnung GL) oder am Kopf (Anbindung am Messhebel, Bezeichnung HL). Der Verlauf am 11.05.2023 kann als exemplarisch für andere Tage gelten. Die Diagramme, die die Umweltdaten im Jahresverlauf darstellen, belegen diese Annahmen (siehe Anhang A.9a und A.9b). Zum einen ist im Jahresverlauf zu erkennen, dass die Spezifikationen eingehalten werden. Zum anderen deutet der Verlauf an, dass ein Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsniveau über mehrere Tage oder sogar Wochen konstant gehalten wird. Der Tagesverlauf in den Abbildungen 8.1a und 8.1b zeigen, dass einzelne Temperatursensoren die Temperatur im Bereich von 0,2K konstant halten. Sämtliche Temperaturwerte bleiben in einem Bereich von  $20,5^\circ$  bis  $21^\circ$ . Die Werte für die Luftfeuchtigkeit verhalten sich nicht so konstant wie die Temperaturen. In Abbildung 8.1b ist ein steigender Verlauf zu erkennen, der tagesabhängig ist und die Vermutung nahe legt, dass die Luftfeuchtigkeit in der Halle mit den externen Wetterbedingungen korreliert. Aber auch hier gilt, dass die Spezifikationen im Tages- und Jahresverlauf eingehalten werden.

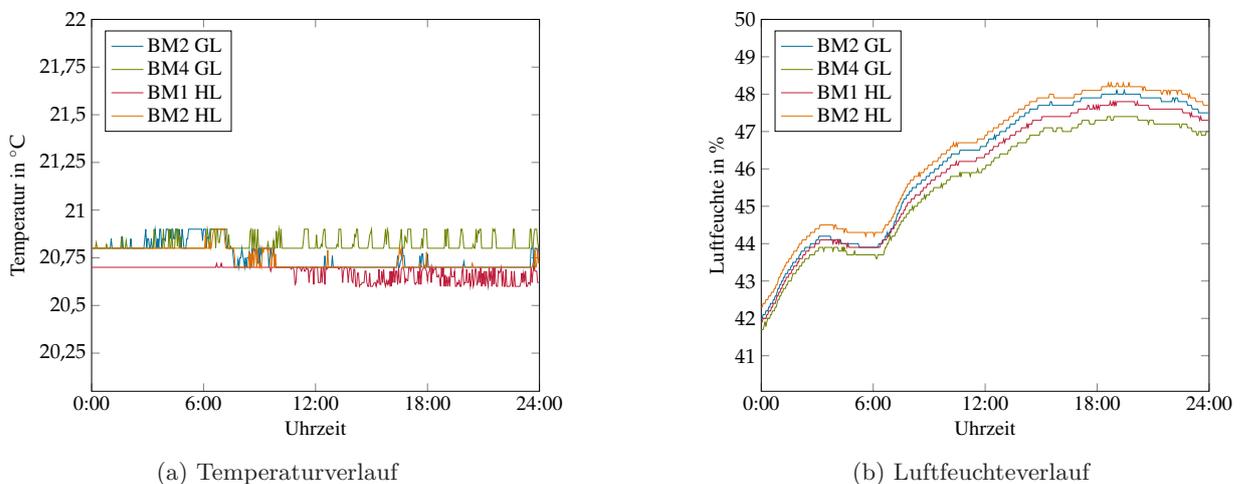


Abbildung 8.1: Typische Klimadaten im Bereich der Messseite (exemplarisch am 11.05.2023). BMi = Biegemomentmessstrang, GL = Gegenlager (Fuß des BM-Messstrangs), HL = Hebel (Hebelkoppelpunkt des BM-Messstrangs). Siehe Positionen der BM-Messstränge in Abb. 4.3.

## 8.2 Anzeigegerät

Das Funktionsprinzip des Messverstärkers ist in Abschnitt 2.2.5 beschrieben. Die Aufgabe eines Messverstärkers besteht darin, das signalschwache mV/V-Signal zu verstärken, zu konditionieren und zu digitalisieren. Das Signal kann so von einer Auswertesoftware ausgelesen und verarbeitet werden. Die externen Einflüsse auf das Analogsignal müssen so gering wie möglich gehalten werden [29].

Die Kalibrierung der DM-Referenzkraftaufnehmer ist nicht mit den Messverstärkerkarten des PCS8000 durchgeführt worden, die im Betrieb der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung verwendet werden. Stattdessen wurde ein hochgenauer und rückgeführter Trägerfrequenzmessverstärker verwendet, dessen Messunsicherheit im Bereich  $10 \cdot 10^{-6}$  liegt. Generell besteht beim Einsatz zweier unterschiedlicher Messverstärker das Problem der Vergleichbarkeit. In diesem Fall muss eine Kalibrierung der Messverstärker die Vergleichbarkeit zwischen den mV/V-Signalen herstellen.

### 8.2.1 Kalibrierung des Brückennormals K3607

Zur Kalibrierung von Messverstärkern stehen sogenannte Brückennormale zur Verfügung. Für die vorliegenden Gleichspannungsmessverstärker besteht das Brückennormal aus einem einstellbaren Präzisionswiderstandsnetzwerk. Das Brückennormal wird anstelle des Aufnehmers angeschlossen und „simuliert“ den Brückenwiderstand eines Aufnehmers. Die Kalibrierung der Messverstärker erfolgte mit einem K3607 der Firma HBK [55]. Dieses Brückennormal ist ebenfalls kalibriert (siehe Anhang A.11).

Aus dem Kalibrierschein geht hervor, welche absoluten Sollwertabweichungen zum angewandten Normal sich an den ausgewählten Stützstellen im Spannungsbereich ergeben. Nach Korrektur der Abweichungen gilt die im Kalibrierschein angegebene erweiterte absolute Messunsicherheit von  $1 \cdot 10^{-4}$  mV/V.

Für die Korrektur der Unsicherheiten wird für den Bereich zwischen  $-2$  mV/V bis  $2$  mV/V eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die Ansatzfunktion ist ein Polynom zehnten Grades. Die absoluten Abweichungen der Kalibrierung des Brückennormals und die Regressionsanalyse sind in Abbildung 8.2 abgebildet.

Das Polynom zur Korrektur der absoluten Abweichungen lautet

$$\begin{aligned}
 S_{\text{Regress,BN}} = & 4,20 \cdot 10^{-4} \cdot x^{10} - 3,10 \cdot 10^{-3} \cdot x^9 - 4,48 \cdot 10^{-3} \cdot x^8 \\
 & + 2,01 \cdot 10^{-2} \cdot x^7 + 1,71 \cdot 10^{-2} \cdot x^6 - 1,03 \cdot 10^{-2} \cdot x^5 \\
 & - 2,84 \cdot 10^{-2} \cdot x^4 - 9,38 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 + 1,89 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 \\
 & + 4,83 \cdot 10^{-2} \cdot x - 2,11 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

Die maximale Regressionsabweichung  $\Delta S_{\text{Regress,max,BN}}$  beträgt  $1,53 \cdot 10^{-5}$  mV/V.

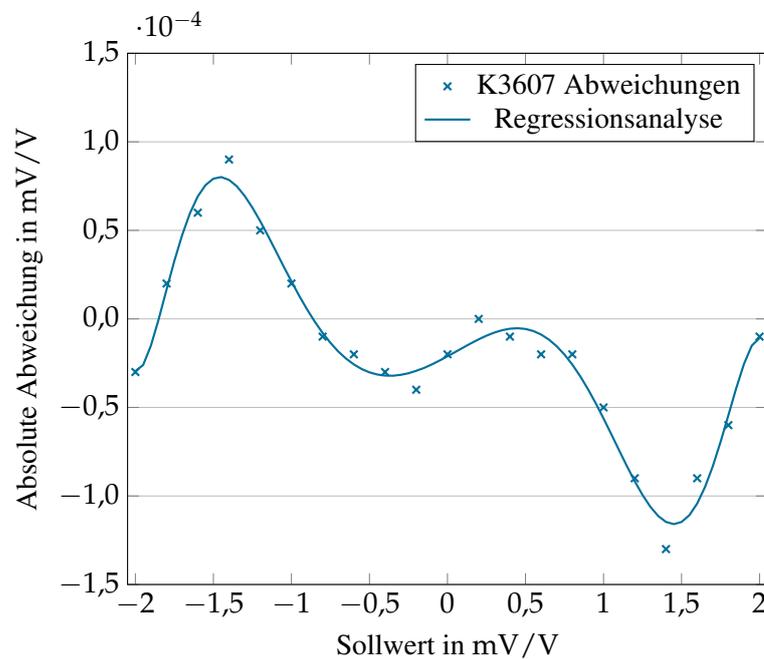


Abbildung 8.2: Absolute Sollwertabweichung im Kalibrierschein des Brückennormals K3607

Die Regressionskurve gilt nur in dem Bereich von  $\pm 2 \text{ mV/V}$ , in dem das Brückennormal kalibriert wurde. Das  $\text{mV/V}$ -Signal des DM-Kraftaufnehmers bei Nennlast beträgt ungefähr  $2,7 \text{ mV/V}$ . Für den Bereich zwischen  $2 \text{ mV/V}$  bis  $2,7 \text{ mV/V}$  sind keine Sollwertabweichungen vorhanden und die Anzeigewerte in diesem Bereich werden nicht korrigiert. Um den Einfluss des Messverstärkers auf die Drehmomentbestimmung weiterhin untersuchen zu können, wird angenommen, dass die später ermittelte Messunsicherheit des Verstärkers für den gesamten Messbereich des Verstärkers gilt.

### 8.2.2 Kalibrierung der Messverstärker des PCS8000

Der Messverstärker wurde am 18.10.2023 und am 16.02.2024 kalibriert. Diese Kalibrierungen dienen als Grundlage für die Messunsicherheitsberechnung in Kapitel 9. Zusätzlich wurde die Nullpunktabweichung an einem vorherigen Zeitpunkt bestimmt (12.12.2022).

Die Auswahl der Messverstärker beschränkt sich auf die beiden  $F_z$ -Messbrücken der DM-Referenzkraftaufnehmer. Das verwendete Brückennormal wird manuell eingestellt. Für jeden Messverstärker werden 20 Stufen in 10%-Schritten in einem Bereich von  $-2 \text{ mV/V}$  bis  $2 \text{ mV/V}$  ausgewählt. Eine Haltezeit von 20 s bis 30 s wird für jede Stufe angestrebt. Die Kalibrierungen erfolgen an der Messeinrichtung. Die Temperaturen in der klimatisierten Halle werden überwacht und betragen am 18.10.23  $20,7^\circ\text{C}$  und am 16.02.24  $20,8^\circ\text{C}$ .

Aus den Kalibrierergebnissen werden die Nullpunktabweichung, die Linearitätsabweichung und die Stabilität des Aufnehmers bestimmt. Anschließend erfolgt eine Korrektur anhand der Nullpunktabweichung und der Linearitätsabweichung. Die Kalibrierung lässt ebenfalls Aussagen auf die Messunsicherheitseinflüsse zu.

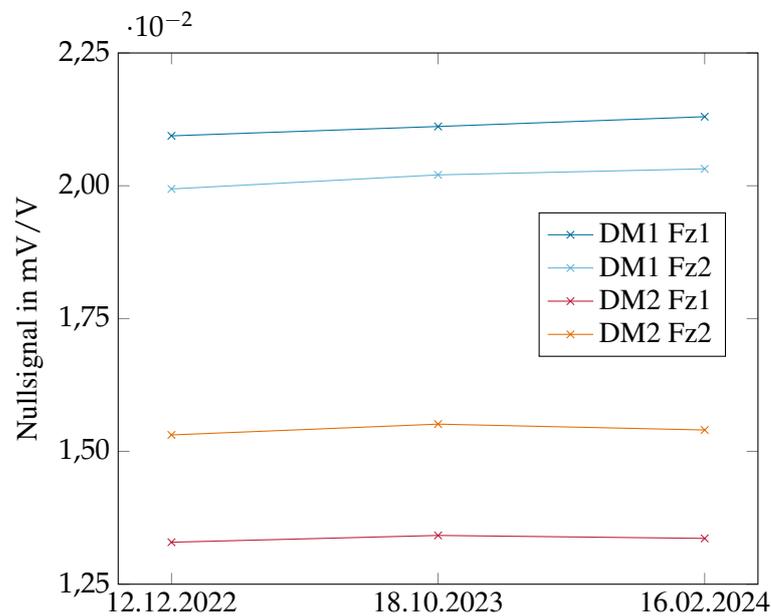


Abbildung 8.3: Nullpunktabweichung der Messverstärker der DM-Referenzkraftaufnehmer zu drei verschiedenen Zeitpunkten in einem Jahreszeitraum

### Nullpunktabweichung und Stabilitätsuntersuchung

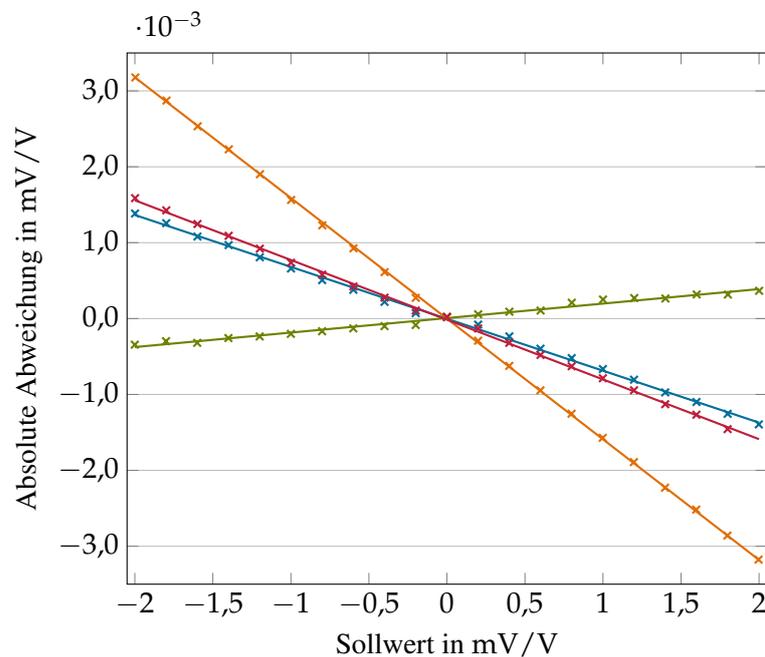
In Abbildung 8.3 sind die Nullpunktabweichungen der Messverstärker zu den zwei genannten Zeitpunkten aufgetragen. Zusätzlich sind die zu Beginn der Inbetriebnahme aufgenommenen Nullpunktabweichungen eingefügt (keine Kalibrierung, nur Aufnahme der Nullpunktabweichung ohne Messung der Temperatur). Die Nullpunktabweichungen sind im Vergleich zu den geforderten Linearitätsabweichungen von  $10^{-4}$  sehr hoch und reichen von 0,8% bis 1,1% (bezogen auf den Bereichsendwert). Diese Abweichungen müssen korrigiert werden. Die niedrigste Linearitätsabweichung wird erreicht, wenn die Anzeigewerte des gesamten Messbereichs um die jeweilige Nullpunktabweichung bereinigt werden:

$$S_{\text{Anzeige,Null}} = S_{\text{Anzeige}} - S_{\text{Nullpunktabweichung}} \quad (8.2)$$

Aus Abbildung 8.3 wird ebenfalls ersichtlich, dass sich der Messverstärker über einen größeren Zeitraum stabil verhält. Die Spannweite aller vier Messverstärker liegt unter  $3,79 \cdot 10^{-4} \text{ mV/V}$ . Bezogen auf den Mittelwert der Nullpunktabweichungen über die drei Zeitpunkte liegt die relative Spannweite unter 1,88%.

### Sollwertabweichungen

Aus der Kalibrierung der vier Messverstärkerkarten mit dem Brückennormal werden die absoluten Sollwertabweichungen des Spannungssignals von Messverstärker und Brückennormal ermittelt. Diese Abweichungen sind in Abbildung 8.4 dargestellt. Die Abweichungen erreichen eine Höhe von bis zu  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ mV/V}$  und müssen, wie die Nullpunktabweichungen, korrigiert werden. Die relativen Linearitätsabweichungen liegen für einige Verstärker und Stützstellen über  $1 \cdot 10^{-4}$ . Eine Korrektur der Sensitivität durch die mittlere Linearitätsabweichung ist unzureichend (siehe



	Daten	Fit	Regressionsformel	Max. Regressionsabweichung
DM1 Fz1	×	—	$-6,84 \cdot 10^{-4} \cdot x - 3,14 \cdot 10^{-6}$	$6,07 \cdot 10^{-5} \text{ mV/V}$
DM1 Fz2	×	—	$1,91 \cdot 10^{-4} \cdot x + 6,42 \cdot 10^{-6}$	$5,36 \cdot 10^{-5} \text{ mV/V}$
DM2 Fz1	×	—	$-1,59 \cdot 10^{-3} \cdot x - 1,03 \cdot 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^{-5} \text{ mV/V}$
DM2 Fz2	×	—	$-7,87 \cdot 10^{-4} \cdot x - 1,52 \cdot 10^{-5}$	$4,21 \cdot 10^{-5} \text{ mV/V}$

Abbildung 8.4: Linearitätsabweichung der Messverstärker der DM-Referenzkraftaufnehmer und lineare Regressionsgrade

Anhang A.10). Daher wird eine ähnliche Vorgehensweise wie bei der Korrektur der Sollwertabweichungen der Brückennormale gewählt. Für die Abweichungen wird eine Regressionsanalyse durchgeführt. In diesem Fall ist eine lineare Funktion ausreichend. Die Koeffizienten der linearen Ausgleichsfunktion sind in der Legende von Abbildung 8.4 dargestellt. Die anschließende Korrektur erfolgt nach folgender Formel

$$S_{\text{korr}} = S_{\text{Anzeige,Null}} - \Delta S_{\text{Linearitätsabweichung,MV}} \quad (8.3)$$

### 8.2.3 Messunsicherheit des Messverstärkers

Nach Korrektur des Anzeigewerts um die Nullpunktabweichung und die Linearitätsabweichung sind das Brückennormal und der Messverstärker miteinander abgeglichen. Der Messverstärker zeigt mit der gleichen Unsicherheit wie das Brückennormal das mV/V-Signal an.

Die Unsicherheit des Brückennormals setzt sich zusammen aus der Angabe des Kalibrierscheins  $W_{\text{Kal,BN}} = 1 \cdot 10^{-4}$  (siehe Abb. A.11) und der Regressionsunsicherheit  $W_{\text{Regress,BN}}$

$$W_{\text{BN}} = \sqrt{W_{\text{Kal}}^2 + W_{\text{Regress,BN}}^2} \quad (8.4)$$

Die Unsicherheit der Regressionsfunktion wird abgeschätzt, indem eine Rechteckverteilung mit einer Spannweite in Höhe der maximalen Regressionsabweichung  $\Delta S_{\text{Regress,max,BN}} = 1,53 \cdot 10^{-5}$  (siehe Abs. 8.2.1) angenommen wird. Daraus folgt

$$W_{\text{Regress,BN}} = \frac{\Delta S_{\text{Regress,max,BN}}}{\sqrt{3}}. \quad (8.5)$$

Die Unsicherheit eines der untersuchten Messverstärkers setzt sich aus der Unsicherheit des Brückennormals  $W_{\text{BN}}$ , der Regressionsabweichung  $W_{\text{Regress,max,MV}}$ , der Auflösung  $W_{\text{Resol}}$  und der Langzeitstabilität  $W_{\text{Stab,MV}}$  zusammen

$$W_{\text{MV}} = \sqrt{W_{\text{BN}}^2 + W_{\text{Regress,max,MV}}^2 + W_{\text{Resol}}^2 + W_{\text{Stab,MV}}^2}. \quad (8.6)$$

Die Unsicherheit der Regressionsfunktion wird analog wie beim Brückennormal angegeben

$$W_{\text{Regress,MV}} = \frac{\Delta S_{\text{Regress,max,MV}}}{\sqrt{3}}. \quad (8.7)$$

Die Unsicherheit der Langzeitstabilität wird über die maximale Spanne der Nullpunktabweichung (siehe Abs. 8.2.2) abgeschätzt. Da keine weiteren Informationen über die Verteilung vorliegen, wird eine Rechteckverteilung angenommen und die Standardunsicherheit berechnet sich zu

$$W_{\text{Stab,MV}} = \frac{\Delta S_{\text{Null,max,MV}}}{\sqrt{3}}. \quad (8.8)$$

Laut Betriebsanleitung des PCS8000 beträgt die Auflösung der Messverstärkerkarten 24 Bit [56]. Daraus ergibt sich eine absolute Auflösung von  $r = 0,477 \cdot 10^{-6} \text{ mV/V}$ . Die absolute Standardunsicherheit der Auflösung des Verstärkers wird bestimmt durch

$$W_r = \frac{r}{2\sqrt{3}} \quad (8.9)$$

und beträgt  $0,138 \cdot 10^{-6} \text{ mV/V}$ . Verglichen mit den anderen Unsicherheitsbeiträgen kann der Beitrag durch die Auflösung vernachlässigt werden.

In Tabelle 8.1 sind die absoluten Standardunsicherheiten der Messverstärker angegeben. Die größten Anteile und Unterschiede zwischen den Messverstärkern ergeben sich aus den Anteilen durch die Langzeitstabilität  $W_{\text{Stab,MV}}$ . Die niedrigsten Unsicherheiten der jeweiligen zugeordneten Aufnehmer ergeben sich demnach bei den Verstärkern DM1 FZ1 und DM2 FZ1. Diese Tatsache gilt es bei der Auswahl der Kraftkanäle zu berücksichtigen. Die Messunsicherheit des Kalibrierdrehmoments wird minimal, wenn diese beiden Kanäle zur Auswertung des wirkenden Drehmoments verwendet werden.

#### 8.2.4 Einfluss des Messverstärkers auf Messunsicherheit von $M_Z$

Der Einfluss des Verstärkers auf die Unsicherheit des Anzeigewerts des Kraftaufnehmers lässt sich nicht direkt durch eine Fehlerfortpflanzung bestimmen. Der Kraftwert wird gemäß dem vorliegenden Kalibrierpolynom aus dem Spannungssignal des Messverstärkers ermittelt. Die zugeordnete Messunsicherheit des Kraftaufnehmers wird, wie in Kapitel 5 beschrieben, durch die Angabe der Messunsicherheitseinhüllfunktion dargestellt. Eine Unsicherheitsfortpflanzung des mV/V-Signals

Tabelle 8.1: Absolute Standardunsicherheiten des Brückennormals und der Messverstärker

Messgerät	Absolute Standardunsicherheit in mV/V
Brückennormal K3607	$1,004 \cdot 10^{-4}$
Messverstärker DM1 FZ1	$2,325 \cdot 10^{-4}$
Messverstärker DM1 FZ2	$2,427 \cdot 10^{-4}$
Messverstärker DM2 FZ1	$1,310 \cdot 10^{-4}$
Messverstärker DM2 FZ2	$1,565 \cdot 10^{-4}$

kann nicht über die Kalibrierkurve erfolgen, da die Unsicherheit der Koeffizienten in der Kalibrierkurve nicht bekannt ist und die Messunsicherheit in einer separaten Funktion bestimmt wird. Um dennoch den nicht geringen Einfluss des Messverstärkers auf das Kalibrierdrehmoment zu bestimmen, wird eine gesonderte Abschätzung vorgenommen.

Ähnlich wie bei der Referenzwertbestimmung des Steifigkeitskoeffizienten in Abschnitt 6.2.1 handelt es sich bei der Funktion um einen Zusammenhang, in der sowohl die x- als auch die y-Werte mit einer Unsicherheit behaftet sind. Zur Bestimmung des Steifigkeitskoeffizienten wird die ODR-Methode verwendet, um eine lineare Regressionsgerade zu bestimmen und die Unsicherheit der Fitparameter zu erhalten (siehe Abs. 6.2.1). Die ODR-Methode lässt sich nur auf lineare Funktionen anwenden, daher besteht die erste Vereinfachung darin, den Zusammenhang zwischen Kraftsignal und Messverstärkersignal zu linearisieren. In einem großen Bereich ist die Annahme einer linearen Funktion gerechtfertigt, da die meisten nichtlinearen Effekte an den Rändern des Messbereichs auftreten. Die x-Werte sind in diesem Fall die Spannungssignale aus dem Messverstärker. Die y-Werte sind die zugeordneten Kraftwerte. Die x- und y-Werte können den Kalibrierscheinen entnommen werden und werden nach Zug und Druck unterschieden. Die Unsicherheiten der y-Werte stammen ebenfalls aus diesen Kalibrierscheinen. Die Unsicherheit der x-Werte ist konstant und ist in Abschnitt 8.2.3 ermittelt worden. In der linearen Ansatzfunktion wird der Offset zu null gesetzt. Der Offset wird ansonsten in der Drehmomentbilanz korrigiert, obwohl der Erwartungswert der Korrektur null sein soll. Nach Anwendung der ODR-Methode wird die Unsicherheit der Fitparameter ausgegeben und eine Fehlerfortpflanzung des Messverstärkersignals wird ermöglicht

$$a_{S,DMiFZ1,Zug/Druck} \cdot S_{MV} + a_{KA,S,DMiFZ1,Zug/Druck} \cdot \quad (8.10)$$

$S_{MV}$  hat den Erwartungswert 0 und die Unsicherheit des Messverstärkers  $w_{MV}$ . Es zeigt die Streuung als Kraftwert, die durch die Unsicherheit des Messverstärkers verursacht wird. Diese wird in der Drehmomentbilanz zum Kraftsignal addiert.

Die Fit-Parameter der ODR-Methode und ihre Standardunsicherheiten sind in Tabelle 8.2 gegeben. Die Werte werden nur für die Messverstärker angegeben, aus denen die Kraftsignale zur Drehmomentbestimmung  $M_z$  verwendet werden.

Tabelle 8.2: Fit-Parameter des ODR-Fits für die Verstärker DM1 FZ1 und DM2 FZ1 einschließlich der Standardunsicherheiten

Messverstärker Einheit	$a_{S,DMiFZi}$ kN/(mV/V)	Standardunsicherheit kN/(mV/V)
DM1 Fz1-Druck	-444,374	0,029
DM1 Fz1-Zug	444,618	0,002
DM2 Fz1-Druck	-444,474	0,022
DM2 Fz1-Zug	443,462	0,002

### 8.3 Weitere Messunsicherheitseinflüsse

Der Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha_T$  wird für das Material GJS 500-7 (Gusseisen mit Kugelgraphit) mit  $12,5 \cdot 10^{-6} 1/K$  beziffert. Die Abstände der BM-Messstränge-Referenzpunkte zum Mittelpunkt werden im liegenden Zustand mit dem Lasertracker vermessen. Die Messunsicherheit der Einzelpunktmessungen wird von SPATIAL ANALYZER per Monte-Carlo-Simulation berechnet (siehe Abs. 7.3).

# 9 Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets

Im folgenden Kapitel werden die Messunsicherheitsbudgets für die Laststufen  $1,1 \text{ MN}\cdot\text{m}$  und  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$  dargestellt. Die Messunsicherheiten für jede Laststufe und eine einhüllende Funktion zur Messunsicherheitsabschätzung ist in Abbildung 9.1 dargestellt.

Das Messunsicherheitsbudget wird speziell für  $1 \text{ MN}\cdot\text{m}$  erstellt, um eine Messunsicherheit für eine Vergleichsmessung mit der  $1,1 \text{ MN}\cdot\text{m}$ -Drehmoment-Normalmesseinrichtung zu erhalten. Im Budget in Tabelle 9.1 wird ersichtlich, dass die Messunsicherheit von  $M_z$  für  $1 \text{ MN}\cdot\text{m}$  nur von den zwei DM-Referenzkraftaufnehmern bestimmt wird. Je nach Drehrichtung des Moments bestimmt ein Kraftaufnehmer die Unsicherheit zu 93%. Die erweiterte relative Gesamtmessunsicherheit ( $k = 2$ ) bei  $M_z = 0,984 \text{ MN}\cdot\text{m}$  beträgt  $0,21 \cdot 10^{-3}$ .

Bei einem  $M_z$  von  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$  arbeiten beide Referenzkraftaufnehmer im Nennbereich, was sich positiv auf die Messunsicherheit auswirkt. Der Index beträgt bei einem Rechtsdrehmoment für DM1-Kraftaufnehmer 47,3% und für DM2-Kraftaufnehmer nur 40,1%. Dadurch, dass die Anteile durch die Referenzkraftaufnehmer reduziert wurden, fallen andere Einflüsse stärker ins Gewicht. Vor allem der Einfluss des DM1-Messverstärkers steigt auf einen Anteil von 9,2%. Für den DM2-Messverstärkers sind es 1,2%. Die Messhebellänge  $l_{\text{MH},1}$  hat einen Index 0,2% und für  $l_{\text{MH},2}$  liegt der Index bei 0,5%. Der Temperaturanteil steigt auf 0,2%. Die Nebenschlüsse für Tangentialkräfte sind in Summe 0,2%.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die dominierenden Faktoren in der Unsicherheitsbetrachtung die Referenzkraftaufnehmer sind. Eine Reduzierung der Unsicherheit wäre daher nur möglich, wenn ein verbessertes Kraftmesssystem eingesetzt wird. Die übrigen Anteile sind hinsichtlich der Messunsicherheit hinreichend gut abgeschätzt, so dass diese nicht weiter betrachtet werden müssen, da die Referenzkraftaufnehmer weitaus dominanter sind.

Tabelle 9.1: Messunsicherheitsbudget des Kalibriermoments  $M_Z$  bei 1 MN·m,  $u_i$  als Standardunsicherheit,  $c_i$  als Sensitivitätskoeffizient, und der Index als  $\frac{(c_i \cdot u_i)^2}{\sum((c_i \cdot u_i)^2)}$

Einflussgröße	Schätzwert	Standardunsicherheit ( $u_i$ )	Unsicherheitsbeitrag in kN·m ( $c_i \cdot u_i$ )	Index in %
$F_{z,DM1}$	-366,287 kN	0,400 kN	-1,0	93,23
$F_{z,DM2}$	27,152 kN	0,034 kN	0,09	0,67
$\alpha_{DM1}$	0°	0,0205°	0,0	
$\alpha_{DM2}$	0°	0,0205°	0,0	
$l_{MH,1}$	2,499 832 0 m	$0,048 \cdot 10^{-3}$ m	0,001	
$l_{MH,2}$	2,500 014 5 m	$0,048 \cdot 10^{-3}$ m	0,018	0,03
$\Delta T$	0 K	0,577 K	0,0072	
$\alpha_T$	$12,5 \cdot 10^{-6}$ 1/K	$5,77 \cdot 10^{-9}$ 1/K		
$\Delta S_{DM1}$	0 mV/V	$2,18 \cdot 10^{-4}$ mV/V	0,24	5,36
$\Delta S_{DM2}$	0 mV/V	$0,78 \cdot 10^{-4}$ mV/V	0,087	0,70
$a_{S,DM1Fz1,Druck}$	-444,374 kN/(mV/V)	0,029 kN/(mV/V)		
$a_{S,DM2Fz1,Druck}$	443,462 kN/(mV/V)	0,002 kN/(mV/V)		
$F_{T,BM1}$	39,53 N	1,48 N	0,0031	
$F_{T,BM2}$	42,99 N	1,62 N	0,0034	
$F_{T,BM3}$	37,20 N	1,35 N	0,0029	
$F_{T,BM4}$	38,47 N	1,40 N	0,0030	
$r_{BM1}$	2,121 28 m	$78 \cdot 10^{-6}$ m	$3,1 \cdot 10^{-6}$	
$r_{BM2}$	2,121 11 m	$79 \cdot 10^{-6}$ m	$3,4 \cdot 10^{-6}$	
$r_{BM3}$	2,121 37 m	$87 \cdot 10^{-6}$ m	$3,2 \cdot 10^{-6}$	
$r_{BM4}$	2,121 26 m	$87 \cdot 10^{-6}$ m	$3,3 \cdot 10^{-6}$	
$\sum F_{T,BMi}$	0,335 56 kN·m	0,006 22 kN·m		
$M_{T,BM1}$	20,40 N·m	2,34 N·m	0,0024	
$M_{T,BM2}$	20,77 N·m	2,39 N·m	0,0024	
$M_{T,BM3}$	19,27 N·m	2,22 N·m	0,0022	
$M_{T,BM4}$	20,03 N·m	2,23 N·m	0,0023	
$\sum M_{T,BMi}$	0,080 47 kN·m	0,004 66 kN·m		
$M_{B,DM1}$	35,78 N·m	1,43 N·m	0,0014	
$M_{B,DM2}$	35,78 N·m	1,43 N·m	0,0014	
$\sum M_{B,DMi}$	0,071 55 kN·m	0,003 04 kN·m		
$M_Z$	984,1 kN·m	$U(k=2) = 2,1$ kN·m	$u(k=2) = 0,21$ %	

Tabelle 9.2: Messunsicherheitsbudget des Kalibriermoments  $M_Z$  bei 5 MN·m,  $u_i$  als Standardunsicherheit,  $c_i$  als Sensitivitätskoeffizient, und der Index als  $\frac{(c_i \cdot u_i)^2}{\sum((c_i \cdot u_i)^2)}$

Einfluss -größe	Schätzwert	Standard -unsicherheit ( $u_i$ )	Unsicherheits -beitrag in kN·m ( $c_i \cdot u_i$ )	Index in %
$F_{z,DM1}$	-1168,234 kN	0,219 kN	-0,55	47,62
$F_{z,DM2}$	828,097 kN	0,202 kN	0,50	40,52
$\alpha_{DM1}$	0°	0,0205°	0,0	
$\alpha_{DM2}$	0°	0,0205°	0,0	
$l_{MH,1}$	2,499 832 0 m	$0,048 \cdot 10^{-3}$ m	0,040	0,25
$l_{MH,2}$	2,500 014 5 m	$0,048 \cdot 10^{-3}$ m	0,056	0,53
$\Delta T$	0 K	0,577 K	0,036	0,20
$\alpha_T$	$12,5 \cdot 10^{-6}$ 1/K	$5,77 \cdot 10^{-9}$ 1/K		
$\Delta S_{DM1}$	0 mV/V	$2,18 \cdot 10^{-4}$ mV/V	0,24	9,14
$\Delta S_{DM2}$	0 mV/V	$0,78 \cdot 10^{-4}$ mV/V	0,087	1,20
$a_{S,DM1Fz1,Druck}$	-444,374 kN/(mV/V)	0,017 kN/(mV/V)		
$a_{S,DM2Fz1,Zug}$	443,462 kN/(mV/V)	0,002 kN/(mV/V)		
$F_{T,BM1}$	198,9 N	12,3 N	0,0026	0,11
$F_{T,BM2}$	201,8 N	12,3 N	0,0026	0,11
$F_{T,BM3}$	184,9 N	11,4 N	0,0024	0,09
$F_{T,BM4}$	191,3 N	11,4 N	0,0025	0,10
$r_{BM1}$	2,121 28 m	$78 \cdot 10^{-6}$ m	$16 \cdot 10^{-6}$	
$r_{BM2}$	2,121 11 m	$79 \cdot 10^{-6}$ m	$16 \cdot 10^{-6}$	
$r_{BM3}$	2,121 37 m	$87 \cdot 10^{-6}$ m	$17 \cdot 10^{-6}$	
$r_{BM4}$	2,121 26 m	$87 \cdot 10^{-6}$ m	$16 \cdot 10^{-6}$	
$\sum F_{T,BMi}$	1,6481 kN·m	0,0506 kN·m		0,41
$M_{T,BM1}$	101,4 N·m	12,8 N·m	0,013	0,03
$M_{T,BM2}$	103,2 N·m	13,0 N·m	0,013	0,03
$M_{T,BM3}$	95,8 N·m	12,0 N·m	0,012	0,02
$M_{T,BM4}$	99,6 N·m	12,6 N·m	0,013	0,02
$\sum M_{T,BMi}$	0,4001 kN·m	0,0252 kN·m		0,10
$M_{B,DM1}$	174,5 N·m	11,3 N·m	0,011	0,02
$M_{B,DM2}$	174,5 N·m	11,3 N·m	0,011	0,02
$\sum M_{B,DMi}$	0,3490 kN·m	0,003 04 kN·m		0,04
$M_Z$	4988,1 kN·m	$U(k=2) = 1,6$ kN·m	$u(k=2) = 0,032$ %	

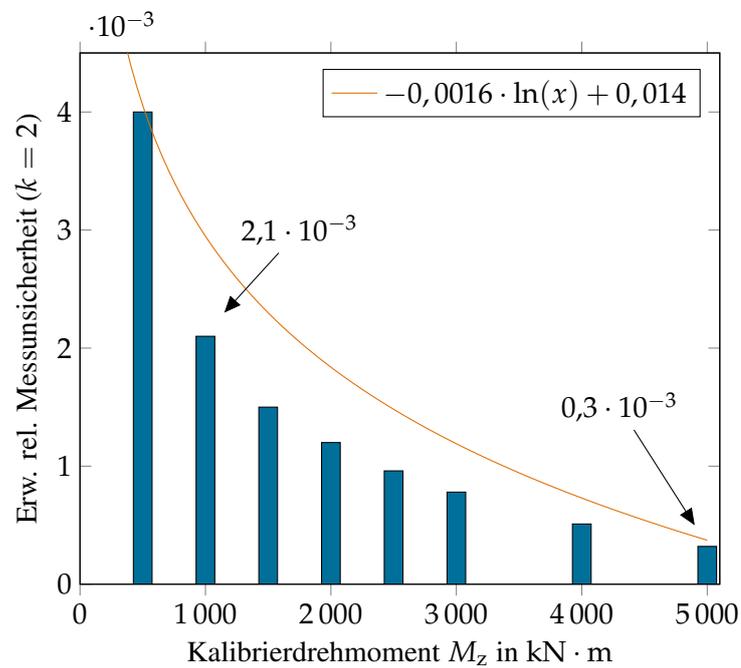
Abbildung 9.1: Messunsicherheit der verschiedenen Laststufen  $M_z$ 

Abbildung 9.1 stellt die erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) für jeden Lastschritt einer DIN51309-Kalibrierung bis  $5 \text{ MN} \cdot \text{m}$  dar. Wie bereits in Tabelle 9.2 erwähnt erreichen die Kraftaufnehmer ihre geringste Messunsicherheit im Nominalbereich von  $1200 \text{ kN}$ . Da diese Anteile den größten Beitrag im Messunsicherheitsbudget bilden beinhaltet das auch die Entwicklung der Messunsicherheit des Drehmoments  $M_z$  über die Stufen. Daraus folgt, dass die Messunsicherheit von  $M_z$  bei  $5 \text{ MN} \cdot \text{m}$  mit  $0,032 \%$  am kleinsten wird. Die größte Messunsicherheit wird bei  $500 \text{ kN} \cdot \text{m}$  erreicht, mit  $0,4 \%$ . Es bietet sich an, die Momentenstufen in Bereiche mit maximalen Messunsicherheiten einzuteilen. Von  $500 \text{ kN} \cdot \text{m}$  bis  $1500 \text{ kN} \cdot \text{m}$  beträgt die maximale Unsicherheit  $0,4 \%$ . Von  $1500 \text{ kN} \cdot \text{m}$  bis  $2500 \text{ kN} \cdot \text{m}$  beträgt die Unsicherheit  $0,2 \%$  und von  $2500 \text{ kN} \cdot \text{m}$  bis  $5000 \text{ kN} \cdot \text{m}$  ist die Unsicherheit maximal  $0,15 \%$ .

# 10 Zusammenfassung und Ausblick

## 10.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die metrologische Charakterisierung der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung durchgeführt. Darunter fällt die Identifikation aller betrachteten Messunsicherheitseinflüsse. Diese sind in Abschnitt 4.1.2 in einem Ishikawa-Diagramm zusammengefasst. Dazu gehören die Hauptkategorien Referenzkraftaufnehmer, geometrische Merkmale, Regelung, Messverstärker und Umgebungsbedingungen.

Zentraler Bestandteil der Charakterisierung ist das Aufstellen des mathematischen Modells zur Bestimmung des am Kalibriergegenstand anliegenden Drehmoments  $M_z$ . Die Modellgleichung wird wie folgt festgelegt:

$$M_z = [l_{MH,2} \cdot F_{DM2} \cos(\alpha_{DM2}) \cdot -l_{MH,1} \cdot F_{DM1} \cdot \cos(\alpha_{DM1})] \cdot (1 + \alpha_T \cdot \Delta T) + \sum_1^{i=4} F_{T,BMi} \cdot r_{BMi} + \sum_1^{i=4} M_{T,BMi} + \sum_1^{i=2} M_{BM,DMi}$$

Die Kraft eines Referenzkraftaufnehmer beträgt

$$F_{DMj} = f(S_{DM,j}) + a_{DM,j,Zug/Druck} \cdot \Delta S_{DM,j}$$

Die Funktion  $f(S_{MV})$  verwendet das mV/V-Signal des Messverstärkers und berechnet mit einer Polynomfunktion dritten Grades einen Kraftwert. Der Unsicherheitseinfluss durch den Messverstärker wird durch die Eingangsgröße  $\Delta S_{DMi,U}$  abgebildet. Durch die Multiplikation mit der vereinfachten Sensitivität  $k_{Sens}$  des DM-Kraftaufnehmers wird die absolute Streuung der Kraft ermittelt.

Die Messhebellänge  $l_{MH,j}$  wird berechnet durch

$$l_{MH,j} = \mp x_{KE,DMj} + \frac{x_{loc}}{2}$$

$x_{KE,DMj}$  bildet die Position entlang der globalen x-Achse, an der die Krafteinleitung bestimmt ist. Der Standortwechsel des Lasertrackers führt zu einer zusätzlichen Messunsicherheit  $x_{loc}$ .

Die Momentnebenschlüsse werden aus den ermittelten Steifigkeitskoeffizienten und den gemessenen Verschiebungen der Torsionswinkelmessung bestimmt:

$$\begin{aligned} \text{Tangentialkraft:} & \quad F_T = k_{FT} \cdot u_T \\ \text{Torsionsmoment:} & \quad M_T = k_{MT} \cdot \gamma_{MT} \\ \text{Biegemoment:} & \quad M_B = k_{MB} \cdot u_{MB} \end{aligned}$$

Die Aufstellung der Modellgleichung geht eine FE-Analyse der Messeite voraus, um einen Referenzdatensatz für die späteren Versuchsdaten zu generieren. Ein Großteil des Drehmoments wird durch die Referenzkraftaufnehmer in Zusammenwirken mit dem Messhebel erzeugt. Die Neben-

schlüsse bilden einen kleinen Anteil (0,051 %). Diese sind aber in der gesamten Bilanz nicht zu vernachlässigen. Zu den Nebenschlüssen bei einem Moment um die z-Achse zählen die Momente durch Tangentialkräfte an den BM-Messsträngen, die Torsionsmomente an den BM-Messsträngen und die Biegemomente an den DM-Messsträngen. Die Verformungen am Messhebelende bei einem Drehmoment von 5 MN·m beträgt etwa 1 mm und an den BM-Messsträngen 0,7 mm.

Zusätzlich sind FE-Simulationen durchgeführt worden, deren praktische Umsetzung im Versuch schwierig sind. Der Drehpunkt des Messhebels fällt mit dem Messhebelmittelpunkt in einem Bereich von unter 0,05 mm zusammen. Bei einer Aufprägung von 1 K dehnt sich der Messhebel um 0,55 mm. Die zusätzliche Winkelabweichung des DM-Messstrangs durch die Messhebelrotation bleibt wesentlich kleiner als der fertigungsbedingte Winkelabweichung  $\alpha_{DMj}$  von  $0,0205^\circ$  und wird daher vernachlässigt.

Aufbauend auf der Analyse der Modellgleichung, werden die einzelnen Kategorien im Detail untersucht. Im Kapitel 5 werden die einzelnen Kalibrierergebnisse beleuchtet. Die erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) der Aufnehmer liegt im Bereich von 100 kN bis 200 kN bei 0,2 % und im Bereich von 1000 kN bis 1200 kN unter 0,05 %.

Für die Bestimmung der Momentnebenschlüsse ist ein Prüfstand entwickelt worden. Dieser leitet die Gewichtskraft von kalibrierten Massescheiben auf einen vom Lastfall abhängigen Hebelarm ein. Die Belastung „simuliert“ den Einsatz der Messstränge im Kalibrierbetrieb. Die auftretende Verformung der Messstränge am Referenzpunkt unter Last wird mit einem Interferometer erfasst, während die eingeleitete Last mit einem Mehrkomponentenaufnehmer gemessen wird. Das Ergebnis ist eine Kalibrierkurve für jede Biegefeder und Lastfall, die den jeweiligen Steifigkeitskoeffizienten abbildet. Diese wird aus allen Datenpunkte mittels „Orthogonal Distance Regression“ gebildet. Die Ergebnisse der einzelnen Steifigkeitskoeffizienten und deren Messunsicherheiten sind in Kapitel 6 dargestellt. Die Messunsicherheiten von Lastfall 1 und 3 liegen bei 5 %. Bei Lastfall 2 werden drei Korrekturfaktoren eingeführt, da es einen nicht zu vernachlässigen Unterschied zwischen FE-Analyse und experimentellen Ergebnisse gibt. Die Korrekturfaktoren berücksichtigen Verfahrensfehler bei der Steifigkeitsermittlung und Differenzen durch die FE-Analyse. Die Einführung der Korrekturfaktoren führt zu einer hohen Unsicherheit, die an die Unsicherheit der FE-Rechnung mit 20 % gekoppelt ist. Die Verschiebungen der Messstränge werden im Betrieb mittels Rotationsmessung ermittelt. Dazu wird ein Interferometer verwendet, um einen Punkt am Messhebel zu verfolgen. Der resultierende Torsionswinkel lässt Rückschlüsse auf die übrigen Verschiebungen zu, da von einer idealen Rotation ausgegangen wird. Die experimentell ermittelten Ergebnisse stimmen mit den FE-Ergebnissen überein. Die Messunsicherheit der Rotationsmessung beträgt circa 20 %.

Die Messhebellänge wird mit dem zur Verfügung stehenden Lasertracker gemessen. Dazu wird der Lasertracker auf zwei verschiedene Positionen aufgestellt. An dieser Stelle werden die Zylinderaussparungen der Biegefedern abgetastet. Aus den Zylinderachsen kann eine mittlere Achse definiert werden. Der Kräfteinleitungspunkt ist der Durchstoßpunkt der mittleren Achse durch die Mitte der Messhebelebene. Für die Messunsicherheitsbetrachtung werden für alle Messpunkte 1000 Proben aus einer Monte-Carlo-Simulation erhoben. Der anschließende Fit gibt eine Standardabweichung für die Lage einer einzelnen Zylinderachse in x-Richtung an und damit ein Maß für die Messunsicherheit. Zusätzlich muss für den Standortwechsel eine Messunsicherheit hinzugefügt werden, die mit einer Messung an der Referenzwand abgeschätzt wird. Jeder gemessenen

Hebelkraft  $F_{DMi}$  ist ein Hebelarm zugeordnet. Der Hebelarm ist die Distanz vom jeweiligen Kraft-einleitungspunkt bis zum Messhebelmittelpunkt, dessen Erfassung einer Unsicherheit unterliegt. Die Messhebellänge  $l_{MH,1}$  beträgt 2499,832 mm und  $l_{MH,2}$  ist 2500,015 mm. Die erweiterte absolute Messunsicherheit ( $k = 2$ ) beträgt für beide Hebelarme 0,096 mm.

Die Klimadaten für Lufttemperatur und -feuchte werden exemplarisch für einen Tag untersucht. Die Spezifikationen des Hallenklimas von maximal  $(20 \pm 1)$  K und  $(45 \pm 5)$  % werden eingehalten. Innerhalb des untersuchten Zeitraums an den ausgewählten Stützstellen liegt die Spannweite einzelner Sensoren bei 0,2 K und die Bandbreite aller Sensoren liegt unterhalb von 0,5 K. Die Konstanz der Temperaturniveaus lässt sich anhand der Jahresverläufe belegen. Die Luftfeuchtigkeit unterliegt nicht der gleichen Konstanz und zeigt im untersuchten Zeitraum einen kontinuierlichen Aufwärtstrend, da dieser stärker von externen Wetterbedingungen abhängt. Der Jahresverlauf zeigt, dass die Spezifikationen dennoch eingehalten werden.

Die Messverstärker werden mit einem Brückennormal kalibriert, um die notwendigen Korrekturen zur Rückführung des ausgegebenen mV/V-Signals zu erhalten. Zunächst werden für die in einem Kalibrierschein angegebenen Sollwertabweichungen ein Polynom-Fit erstellt. Der Anzeigewert des Brückennormals wird durch den gefundenen Fit korrigiert. Anhand der Kalibrierung der Messverstärker mit dem Brückennormal kann die Linearitätsabweichung und die Stabilität ermittelt werden. Zunächst wird die Nullpunktabweichung der Messverstärker festgestellt und der Anzeigewert um diesen Wert korrigiert. Die Linearitätsabweichung beträgt vor der Korrektur bis zu  $4 \cdot 10^{-3}$  mV/V. Mittels linearer Regression können die Abweichungen durch eine Funktion korrigiert werden. Die Messunsicherheit des korrigierten Signals entspricht der Messunsicherheit des Brückennormals aus seinem Kalibrierschein (erweiterte absolute Messunsicherheit ( $k = 2$ )  $1 \cdot 10^{-4}$  mV/V). Die Stabilität der Messverstärker wird anhand der Nullpunktabweichung über den Zeitraum von Oktober 2023 bis Februar 2024 betrachtet. Hier wird eine Abweichung von maximal  $3,79 \cdot 10^{-4}$  mV/V festgestellt. Die Standardunsicherheit der vier untersuchten Messverstärker liegt zwischen  $1 \cdot 10^{-4}$  mV/V bis  $2,5 \cdot 10^{-4}$  mV/V.

Abschließend werden die Messunsicherheitsbudgets bei 1 MN·m und 5 MN·m vorgestellt. Bei 1 MN·m ist der Index des im Druckbereich liegenden Kraftaufnehmers bei 98 %. Die erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) von  $M_z$  ist 0,4 %. Für 5 MN·m liegt die erweiterte relative Messunsicherheit ( $k = 2$ ) bei 0,032 %. Damit wird folgende Einstufung vorgenommen (unter Berücksichtigung der Einhüllfunktion  $MU = -0,0016 \cdot \ln(M_z) + 0,014$ ):

- 500 kN·m bis 1500 kN·m: 0,4 %
- 1500 kN·m bis 2500 kN·m: 0,23 %
- 2500 kN·m bis 5000 kN·m: 0,15 %

## 10.2 Ausblick

Hinsichtlich des Messunsicherheitsbudget gibt es mehrere Punkte, die näher untersucht werden könnten, um die bestehenden Abschätzungen zu validieren oder sogar zu minimieren.

Der größte Beitrag zur Messunsicherheit sind die Referenzkraftaufnehmer. Besonders neue DMS-basierte Aufnehmer unterliegen einer Drift nach den ersten Anwendungen. Eine wichtige Aufgabe

besteht darin, die Langzeitstabilität der Referenzkraftaufnehmer durch eine regelmäßige Rekalibrierung zu überwachen. Die meisten Potentiale zur Reduzierung der Messunsicherheit liegen in der Wahl des Kraftaufnehmersystems. Es ist daher sinnvoll, unterschiedliche Kraftaufnehmer oder auch Kraftaufnehmersysteme zu untersuchen.

Wie in der Arbeit gezeigt, tragen die Nebenschlüsse nicht im hohen Maße zur Messunsicherheit bei. Diese werden erst eine Rolle spielen, sollte die Unsicherheit der Referenzkraftaufnehmer reduziert werden. Hier liegt viel Potential bei einer erneuten Betrachtung der Messunsicherheit der Nebenschlüsse. Die Steifigkeitskoeffizienten wurden unter hohem Zeitdruck bestimmt. Eine Wiederholung der Steifigkeitsbestimmung mit einer höheren Anzahl an Messungen und eines optimierten Prüfstands könnte die Messunsicherheit deutlich reduzieren. Insbesondere die Korrektur von  $k_{MT}$  für die Bestimmung der Torsionsmomente durch FE-Berechnungen unterliegen einer hohen Unsicherheit. Die Analyse der Wechselwirkung von Axialkraft und Torsionsmoment kann hilfreich sein. Die Bestimmung der Verformungen geschieht über die trigonometrischen Zusammenhänge mit der Torsionswinkelmessung, die zudem über FE-Korrekturen angepasst werden müssen. Weiterhin ist die Torsionswinkelmessung nur über eine Punktmessung und eine Neigungswinkelmessung an anderer Position validiert. Hier kann eine weitere Validierung einen Mehrwert erbringen, indem die Verformungen mit einem alternativen, geeigneteren Messsystem direkt an den Biegefederkoppelpunkten gemessen werden. Die Messungen dienen auch der Validierung des FE-Modells.

Sollte die Unsicherheit der Kraftaufnehmer gesenkt werden können, könnte auch die Unsicherheit der Messhebellänge erneut analysiert werden. Hier wäre eine erneute Vermessung der Messhebellänge sinnvoll, da die Reproduzierbarkeit der Messung nachgewiesen werden sollte. Der Standortwechsel ist mit einer hohen Unsicherheit behaftet, hier wäre eine Reduzierung der Unsicherheit durch eine erneute Messung an der Referenzwand möglich.

Die Analyse des Messunsicherheitsbudgets hat gezeigt, dass die Unsicherheit der Messverstärker eine große Rolle spielen. Diese Feststellung macht deutlich, dass eine einfache Reduktion der Messunsicherheit dadurch erzielt werden kann, indem die gesamte Messkette mit den im Betrieb verwendeten Messverstärkern kalibriert wird. Hierzu sollte eine Möglichkeit gefunden werden, die Messverstärker der DM-Referenzkraftaufnehmer zu transportieren und am Ort der Kraft-Normalmesseinrichtungen zu verwenden.

In dieser Arbeit ist die Betrachtung der Drehmomentmessung bei einer Kalibrierung bisher nicht berücksichtigt worden. Hier gilt es, das Verhalten der Maschine näher zu untersuchen und Effekte, die durch das Regelverhalten oder die Einstellung des Ausgangszustands des Kalibriergenstands entstehen, näher zu untersuchen. Interessant ist an dieser Stelle auch, unterschiedliche Regelkonzepte zu entwickeln und deren Auswirkung auf das sich einstellende Drehmoment zu untersuchen. Für eine Vorabuntersuchung ist es sinnvoll, das FE-Modell um die hydraulische Seite zu erweitern, um eine direkte Validierung der Kraftwerte zu erhalten und dynamische Regelvorgänge abzubilden.

Zur Validierung der Messunsicherheit wird eine Vergleichsmessung mit der 1,1 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung durchgeführt. Dazu gehört auch der Nachweis der Langzeitstabilität des 5 MN·m-Aufnehmers. Als Nächstes werden zusätzliche Einflüsse wie Axialkräfte, Biegemomente und Dynamik untersucht und die dafür notwendigen Kalibrierverfahren entwickelt.

Zum Abschluss ist der Umbau auf die 20 MN·m-Ausbaustufe vorgesehen. Für die Vorbereitung des Umbaus sollten die Optimierungspotentiale für die erste Ausbaustufe, wie etwa Referenzkraft-

aufnehmer und Regelung, aufgezeigt werden. Eine Voruntersuchung mit einem Drehmomentaufnehmer jenseits der  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}$  könnte wertvolle Hinweise auf die Umstellung der Maschine auf die 2. Ausbaustufe geben.

# Anhang

## A.1 Referenzkraftaufnehmer



Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Nationales Metrologieinstitut



## Kalibrierschein

*Calibration Certificate*

Gegenstand: <i>Object:</i>	Kraftaufnehmer 1200 kN (Zugkraft: 80 kN bis 850 kN) <i>Force transducer 1200 kN (Tensile force: 80 kN to 850 kN)</i>	
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Interface, Inc.	
Typ: <i>Type:</i>	SMT2	
Kennnummer: <i>Serial no.:</i>	1144691A	
Auftraggeber: <i>Customer:</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt AG 1.22 Darstellung Drehmoment Bundesallee 100 38116 Braunschweig	
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	6	
Geschäftszeichen: <i>Reference no.:</i>	PTB 1.21Ries_22054-03	
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	12434 PTB 22	
Ort der Kalibrierung: <i>Location of calibration:</i>	PTB Braunschweig	
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	01.07.2022	
Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>	Braunschweig, 16.08.2022	Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>
	Siegel <i>Seal</i>	

Dipl.-Ing. (FH) M. Seidel

F. Ries

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.  
Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die kalibrierten Gegenstände.  
*Calibration certificates without signature and seal are not valid. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.*  
*The presented results relate only to the items calibrated.*

Abbildung A.1: Kalibrierschein DM1-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Zugkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 80 kN bis 850 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 01.07.2022

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12434 PTB 22  
 Page 2 of calibration certificate of 16.08.2022, calibration mark: 12434 PTB 22

In case of doubts the German text of this certificate is valid.

### 1. Kalibrierverfahren / Calibration procedure

DIN EN ISO 376:2011-09

Wartezeit 30 s  
 Waiting time

### 2. Kraft-Normalmesseinrichtung / Force standard machine

Bezeichnung: 1-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung

Designation: 1-MN Force Standard Machine

Relative Messunsicherheit der Kraft im verwendeten Messbereich ( $k = 2$ ):  $\leq 0,002\%$

Relative measurement uncertainty of the force in the measuring range used ( $k = 2$ ):

### 3. Kalibrieranordnung / Calibration arrangement

#### 3.1 Kraftaufnehmer / Force transducer

Kraftaufnehmer 1200 kN

Force transducer 1200 kN

Typ	SMT2		
Type			
Kennnummer	1144691A		
Serial number			
Hersteller	Interface, Inc.		
Manufacturer			
Kabellänge	4x500 cm	Verlängerung: 4x30 cm	
Cable length		Extension:	

#### 3.2 Anzeigegerät / Indicator

Typ	DMP41 (PTB)		
Type			
Kennnummer	823301101		
Serial number			
Hersteller	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH		
Manufacturer			
Messbereich	5 mV/V	Auflösung	0,0000015 mV/V
Measuring range		Resolution	
Messkanal	1-4	Kalibrierwert	5,000000 mV/V
Measuring channel		Calibration signal	
Speisespannung	5 V	Tiefpassfilter	0,10 Hz Be
Excitation voltage		Low-pass filter	

#### 3.3 Einspannteile / Mounting parts

2 Zwischenringe PTB  
 2 intermediate rings PTB  
 2 Kugelmuttern PTB  
 2 ball nuts PTB  
 2 Kugelschalen PTB  
 2 ball cups PTB  
 2 Verlängerungsstücke PTB  
 2 extension rods PTB

#### 3.4 Anmerkungen / Notes

-

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.1: Kalibrierschein DM1-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Zugkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 80 kN bis 850 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 01.07.2022 [Fortsetzung]

Seite 3 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12434 PTB 22  
Page 3 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12434 PTB 22

#### 4. Ergebnisse und Auswertung / Results and evaluation

Kraftrichtung: Zugkraft  
Force application: tensile

Mittlere Messtemperatur (11,9 ± 0,2) °C  
Mean measuring temperature  
Aufnehmernullsignal -0,009678 mV/V  
Zero signal of the transducer

**Tabelle 1: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Vorbelastungen in mV/V**

Table 1: Zero-reduced values indicated for preloads in mV/V

Einbaustellung Mounting position	0 °	120 °	240 °
Nullanzeige $i_0$ Indication at zero load	0,000000	0,000000	0,000000
Anzeige bei Höchstkraft $F_N$ Indication at max force	1,911634	1,911614	1,911635
Restanzeige $i_f$ Indication after preloading	0,000026	-0,000014	0,000045

**Tabelle 2: Relative Restanzeigen bezogen auf die Höchstkraft in %**

Table 2: Relative zero shift after preloading related to the maximum force in %

Nach Vorbelastungen / After preloadings				
Einbaustellung Mounting position	0 °	120 °	240 °	
Rel. Nullpunktabweichung $f_0$ Rel. zero error	0,001	-0,001	0,002	
Nach Messreihen / After measurement series				
Messreihe Measurement series	$X_1$	$X_2$	$X_4'$	$X_6'$
Rel. Nullpunktabweichung $f_0$ Rel. zero error	0,009	0,005	0,002	0,006

**Tabelle 3: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Kriechmessung**

Table 3: Zero-reduced values indicated for series of creep test

Einbaustellung Mounting position	240 °
<b>Kriechmessung bei maximaler Belastung</b> Creep test at max. calibration force	
Nullanzeige Indication at zero load	0,000000 mV/V
Anzeige bei Höchstkraft $i_{30}$ nach 30 s Indication at max force after 30 s	1,911650 mV/V
Anzeige bei Höchstkraft $i_{300}$ nach 300 s Indication at max force after 300 s	1,911739 mV/V
Rel. Kriechabweichung $c$ bei max. Belastung Rel. creep error at max. calibration force	0,005 %
<b>Kriechmessung bei Wegnahme der Kraft</b> Creep test after force removal	
Restanzeige $i_{30}$ nach 30 s Indication after preloading 30 s	0,000104 mV/V
Restanzeige $i_{300}$ nach 300 s Indication after preloading 300 s	0,000034 mV/V
Rel. Kriechabweichung $c$ bei Wegnahme der Kraft Rel. creep error after force removal	0,004 %

Seite 4 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12434 PTB 22  
Page 4 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12434 PTB 22

**Tabelle 4: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Messreihen**

Table 4: Zero-reduced values indicated for all series

Krafttrichtung: Zugkraft

Force application: tensile

<i>F</i>	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub> '	<i>X</i> <sub>5</sub>	<i>X</i> <sub>6</sub> '
Kraft <i>Force</i>	Messreihe 1 <i>Meas. series 1</i>	Messreihe 2 <i>Meas. series 2</i>	Messreihe 3 <i>Meas. series 3</i>	Messreihe 4' <i>Meas. series 4'</i>	Messreihe 5 <i>Meas. series 5</i>	Messreihe 6' <i>Meas. series 6'</i>
in kN	0 ° in mV/V	0 ° in mV/V	120 ° auf / up in mV/V	120 ° ab / down in mV/V	240 ° auf / up in mV/V	240 ° ab / down in mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000044	0,000000	0,000117
80	0,179932	0,179916	0,179923	0,180077	0,179933	0,180133
160	0,359857	0,359828	0,359846	0,360093	0,359872	0,360148
240	0,539784	0,539753	0,539777	0,540088	0,539808	0,540133
320	0,719736	0,719692	0,719709	0,720063	0,719744	0,720063
400	0,899661	0,899612	0,899622	0,899984	0,899675	0,900016
480	1,079578	1,079509	1,079526	1,079887	1,079587	1,079978
560	1,259517	1,259425	1,259442	1,259769	1,259532	1,259880
640	1,439418	1,439361	1,439375	1,439643	1,439418	1,439717
720	1,619370	1,619292	1,619307	1,619510	1,619384	1,619618
800	1,799318	1,799241	1,799265	1,799359	1,799341	1,799462
850	1,911796	1,911712	1,911730		1,911842	
0	0,000175	0,000092				

**Tabelle 5: Mittelwerte, Parameter und Messunsicherheiten für zunehmende Einzelkräfte**

Table 5: Mean values, parameters and measurement uncertainties for incremental single forces

<i>F</i>	$\bar{X}_{WR}$	<i>b</i> '	<i>b</i>	<i>v</i>	$\bar{X}_r$	$W_{\bar{X}_r}$
Kraft <i>Force</i>	arithmet. Mittelwert <i>Arithm. mean</i>	rel. Wiederholpräzision <i>Rel. repeatability error</i>	rel. Vergleichspräzision <i>Rel. reproducibility error</i>	rel. Umkehrspanne <i>Rel. reversibility error</i>	arithmet. Mittelwert (AM) <i>Arithm. Mean</i>	erw. rel. Messunsicherheit <i>Exp. rel. meas. uncertainty AM</i>
in kN	in mV/V	in %	in %	in %	in mV/V	in %
0	0,000000	-	-	-	0,000000	-
80	0,179924	0,009	0,006	0,098	0,179929	0,022
160	0,359843	0,008	0,007	0,073	0,359858	0,021
240	0,539769	0,006	0,006	0,059	0,539790	0,020
320	0,719714	0,006	0,005	0,047	0,719730	0,020
400	0,899637	0,005	0,006	0,039	0,899653	0,020
480	1,079544	0,006	0,006	0,035	1,079564	0,021
560	1,259471	0,007	0,007	0,027	1,259497	0,021
640	1,439390	0,004	0,003	0,020	1,439404	0,020
720	1,619331	0,005	0,005	0,013	1,619354	0,020
800	1,799280	0,004	0,004	0,006	1,799308	0,020
850	1,911754	0,004	0,006	-	1,911789	0,020

**Tabelle 6: Klassifizierungen**

Table 6: Classifications

Kraftbereich / <i>Force range</i>		Geräteklasse / <i>Instrument class</i>			
Von / <i>From</i>	Bis / <i>To</i>	Fall A / <i>Case A</i>	Fall B / <i>Case B</i>	Fall C / <i>Case C</i>	Fall D / <i>Case D</i>
80 kN	850 kN	00	0,5	00	0,5
160 kN	850 kN	00	0,5	00	0,5
240 kN	850 kN	00	00	00	00
320 kN	850 kN	00	00	00	00
400 kN	850 kN	00	00	00	00

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.1: Kalibrierschein DM1-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Zugkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 80 kN bis 850 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 01.07.2022 [Fortsetzung]

Seite 5 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12434 PTB 22  
Page 5 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12434 PTB 22

**Tabelle 7: Ausgeglichene Ergebnisse und Messunsicherheiten**

Kraftrichtung: Zugkraft

Table 7: Fitted results and measurement uncertainties

Force application: tensile

$F$ Kraft  Force  in kN	$X_a$ ausgegl. Mittelwert (BM), zunehmend  Balanced mean (BM)  in mV/V	$W_{X_a}$ erw. rel. Mess- unsicherheit BM, ( $k = 2$ )  Rel. meas. uncertainty BM  in %	$f_c$ rel. Interp.- Abw.  Rel. inter- polation error  in %	$W_{X_v}$ erw. rel. Mess- unsicherheit zu/abn., ( $k = 2$ )  Rel. meas. uncer- tainty incr/decr  in %
0	0,000000	-	-	-
80	0,179939	0,024	-0,005	0,118
160	0,359870	0,022	-0,003	0,089
240	0,539796	0,021	-0,001	0,074
320	0,719719	0,021	0,002	0,062
400	0,899640	0,021	0,001	0,053
480	1,079563	0,021	0,000	0,045
560	1,259489	0,021	0,001	0,038
640	1,439420	0,021	-0,001	0,032
720	1,619359	0,021	0,000	0,027
800	1,799308	0,021	0,000	0,023
850	1,911782	0,020	0,000	0,020

#### Ausgleichsfunktionen / Fitting functions $X = X(F)$

Die in der Tabelle oben aufgeführten ausgeglichenen Mittelwerte  $X_a$  sind mit folgender Funktion berechnet:

The balanced mean  $X_a$  values stated in the table above have been calculated with the following function:

$$X_a = [ + 0,002249292 \cdot F / \text{kN} - 7,62 \cdot 10^{-10} \cdot ( F / \text{kN} )^2 + 7,08 \cdot 10^{-13} \cdot ( F / \text{kN} )^3 ] \text{ mV/V}$$

Unter Berücksichtigung der Umkehrspanne  $v$  ergibt sich folgende Funktion für abnehmende Kraftbeträge:

Considering the reversibility  $v$  the following function results for decremental forces:

$$X_t = [ + 0,002250547 \cdot F / \text{kN} - 1,864 \cdot 10^{-9} \cdot ( F / \text{kN} )^2 + 1,61 \cdot 10^{-13} \cdot ( F / \text{kN} )^3 + 7,9 \cdot 10^{-5} ] \text{ mV/V}$$

#### Ausgleichsfunktionen / Fitting functions $F = F(X)$

Die Berechnung der Kraft  $F_a$  zu einem gegebenen Messwert  $X$  erfolgt mit Hilfe der Funktion:

The calculation of the force  $F_a$  related to a measurement signal  $X$  is carried out using the function:

$$F_a = \{ + 444,5844 \cdot X / ( \text{mV/V} ) + 0,067 \cdot [ X / ( \text{mV/V} ) ]^2 - 0,0277 \cdot [ X / ( \text{mV/V} ) ]^3 \} \text{ kN}$$

Unter Berücksichtigung der Umkehrspanne  $v$  ergibt sich folgende Funktion für abnehmende Signale  $X$ :

Considering the reversibility  $v$  the following function results for decremental forces:

$$F_t = \{ + 444,3363 \cdot X / ( \text{mV/V} ) + 0,1636 \cdot [ X / ( \text{mV/V} ) ]^2 - 0,0062 \cdot [ X / ( \text{mV/V} ) ]^3 - 0,0349 \} \text{ kN}$$

#### Einhüllende für die Messunsicherheiten / Envelope functions for measurement uncertainties

Die in der Tabelle oben aufgeführten erweiterten relativen Messunsicherheiten  $W_{X_a}$  können approximiert werden mit:

The expanded relative uncertainties  $W_{X_a}$  stated in the table above can be approximated with:

$$W_{X_a} = + 2,69 \cdot 10^{-4} - 3,97 \cdot 10^{-7} \cdot F / \text{kN} + 8,31 \cdot 10^{-10} \cdot ( F / \text{kN} )^2 - 5,43 \cdot 10^{-13} \cdot ( F / \text{kN} )^3$$

Die der Tabelle oben aufgeführten erweiterten relativen Messunsicherheiten  $W_{X_v}$  können approximiert werden mit:

The expanded relative uncertainties  $W_{X_v}$  stated in the table above can be approximated with:

$$W_{X_v} = + 0,0315 / ( F / \text{kN} ) + 8,86 \cdot 10^{-4} - 1,29 \cdot 10^{-6} \cdot F / \text{kN} + 5,19 \cdot 10^{-10} \cdot ( F / \text{kN} )^2$$

Seite 6 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12434 PTB 22  
 Page 6 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12434 PTB 22

**Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter <http://www.bipm.org>).

Diese Aussage und das CIPM-MRA-Logo beziehen sich nur auf die Messergebnisse in diesem Kalibrierschein.



**The Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

The CIPM MRA Logo and this statement attest only to the measurement component of the certificate.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Bundesallee 100  
 38116 Braunschweig  
 DEUTSCHLAND

Abbestraße 2-12  
 10587 Berlin  
 DEUTSCHLAND

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.1: Kalibrierschein DM1-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Zugkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 80 kN bis 850 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 01.07.2022 [Fortsetzung]



Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Nationales Metrologieinstitut



## Kalibrierschein

*Calibration Certificate*

Gegenstand: <i>Object:</i>	Kraftaufnehmer 1200 kN (Druckkraft: 120 kN bis 1200 kN) <i>Force transducer 1200 kN</i> (Compressive force: 120 kN to 1200 kN)	
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Interface, Inc.	
Typ: <i>Type:</i>	SMT2	
Kennnummer: <i>Serial no.:</i>	1144691A	
Auftraggeber: <i>Customer:</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt AG 1.22 Darstellung Drehmoment Bundesallee 100 38116 Braunschweig	
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	6	
Geschäftszeichen: <i>Reference no.:</i>	PTB 1.21Thi_22054-01	
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	12432 PTB 22	
Ort der Kalibrierung: <i>Location of calibration:</i>	PTB Braunschweig	
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	08.07.2022	
Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>	Braunschweig, 16.08.2022	Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>
	Siegel <i>Seal</i>	

Dipl.-Ing. (FH) M. Seidel

I. Thieme

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.  
Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die kalibrierten Gegenstände.  
*Calibration certificates without signature and seal are not valid. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.*  
*The presented results relate only to the items calibrated.*

Abbildung A.2: Kalibrierschein DM1-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Druckkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 120 kN bis 1200 kN, 2 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 08.07.2022

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12432 PTB 22  
 Page 2 of calibration certificate of 16.08.2022, calibration mark: 12432 PTB 22

In case of doubts the German text of this certificate is valid.

### 1. Kalibrierverfahren / Calibration procedure

DIN EN ISO 376:2011-09

Wartezeit 30 s  
 Waiting time

### 2. Kraft-Normalmesseinrichtung / Force standard machine

Bezeichnung: 2-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung

Designation: 2-MN Force Standard Machine

Relative Messunsicherheit der Kraft im verwendeten Messbereich ( $k = 2$ ):  $\leq 0,002\%$

Relative measurement uncertainty of the force in the measuring range used ( $k = 2$ ):

### 3. Kalibrieranordnung / Calibration arrangement

#### 3.1 Kraftaufnehmer / Force transducer

Kraftaufnehmer 1200 kN

Force transducer 1200 kN

Typ SMT2

Type

Kennnummer 1144691A

Serial number

Hersteller Interface, Inc.

Manufacturer

Kabellänge 4x500 cm Verlängerung: 4x30 cm

Cable length

Extension:

#### 3.2 Anzeigegerät / Indicator

Typ DMP41 (PTB)

Type

Kennnummer 823301101

Serial number

Hersteller Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Manufacturer

Messbereich 5 mV/V

Measuring range

Auflösung 0,0000015 mV/V

Resolution

Messkanal 1-4

Measuring channel

Kalibrierwert 5,000000 mV/V

Calibration signal

Speisespannung 5 V

Excitation voltage

Tiefpassfilter 0,10 Hz Be

Low-pass filter

#### 3.3 Einspannteile / Mounting parts

1 Einschraub- / Einsatzdruckstück

1 loading pad

1 ebenes Druckstück PTB

1 plain loading pad PTB

#### 3.4 Anmerkungen / Notes

-

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.2: Kalibrierschein DM1-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Druckkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 120 kN bis 1200 kN, 2 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 08.07.2022 [Fortsetzung]

Seite 3 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12432 PTB 22  
Page 3 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12432 PTB 22

#### 4. Ergebnisse und Auswertung / Results and evaluation

Kraftrichtung: Druckkraft  
Force application: compressive

Mittlere Messtemperatur (20,6 ± 0,2) °C  
Mean measuring temperature  
Aufnehmernullsignal -0,017969 mV/V  
Zero signal of the transducer

**Tabelle 1: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Vorbelastungen in mV/V**

Table 1: Zero-reduced values indicated for preloads in mV/V

Einbaustellung Mounting position	0 °	120 °	240 °
Nullanzeige $i_0$ Indication at zero load	0,000000	0,000000	0,000000
Anzeige bei Höchstkraft $F_N$ Indication at max force	-2,700223	-2,700214	-2,700076
Restanzeige $i_f$ Indication after preloading	-0,000088	-0,000052	-0,000056

**Tabelle 2: Relative Restanzeigen bezogen auf die Höchstkraft in %**

Table 2: Relative zero shift after preloading related to the maximum force in %

Nach Vorbelastungen / After preloadings				
Einbaustellung Mounting position	0 °	120 °	240 °	
Rel. Nullpunktabweichung $f_0$ Rel. zero error	0,003	0,002	0,002	
Nach Messreihen / After measurement series				
Messreihe Measurement series	$X_1$	$X_2$	$X_4'$	$X_6'$
Rel. Nullpunktabweichung $f_0$ Rel. zero error	0,007	0,005	0,004	0,005

**Tabelle 3: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Kriechmessung**

Table 3: Zero-reduced values indicated for series of creep test

Einbaustellung Mounting position	240 °
<b>Kriechmessung bei maximaler Belastung</b> Creep test at max. calibration force	
Nullanzeige Indication at zero load	0,000000 mV/V
Anzeige bei Höchstkraft $i_{30}$ nach 30 s Indication at max force after 30 s	-2,700089 mV/V
Anzeige bei Höchstkraft $i_{300}$ nach 300 s Indication at max force after 300 s	-2,700281 mV/V
Rel. Kriechabweichung $c$ bei max. Belastung Rel. creep error at max. calibration force	0,007 %
<b>Kriechmessung bei Wegnahme der Kraft</b> Creep test after force removal	
Restanzeige $i_{30}$ nach 30 s Indication after preloading 30 s	-0,000227 mV/V
Restanzeige $i_{300}$ nach 300 s Indication after preloading 300 s	-0,000155 mV/V
Rel. Kriechabweichung $c$ bei Wegnahme der Kraft Rel. creep error after force removal	0,003 %

Seite 4 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12432 PTB 22  
Page 4 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12432 PTB 22

**Tabelle 4: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Messreihen**

Table 4: Zero-reduced values indicated for all series

Kraftrichtung: Druckkraft

Force application: compressive

<i>F</i>	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub> '	<i>X</i> <sub>5</sub>	<i>X</i> <sub>6</sub> '
Kraft Force	Messreihe 1 Meas. series 1	Messreihe 2 Meas. series 2	Messreihe 3 Meas. series 3	Messreihe 4' Meas. series 4'	Messreihe 5 Meas. series 5	Messreihe 6' Meas. series 6'
in kN	0° in mV/V	0° in mV/V	120° auf / up in mV/V	120° ab / down in mV/V	240° auf / up in mV/V	240° ab / down in mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-0,000112	0,000000	-0,000122
120	-0,269871	-0,269862	-0,269865	-0,270230	-0,269851	-0,270207
240	-0,539738	-0,539729	-0,539743	-0,540256	-0,539725	-0,540219
360	-0,809663	-0,809653	-0,809667	-0,810290	-0,809655	-0,810246
480	-1,079632	-1,079623	-1,079645	-1,080308	-1,079615	-1,080256
600	-1,349640	-1,349633	-1,349660	-1,350302	-1,349597	-1,350224
720	-1,619683	-1,619674	-1,619711	-1,620271	-1,619638	-1,620192
840	-1,889774	-1,889751	-1,889789	-1,890244	-1,889723	-1,890171
960	-2,159904	-2,159862	-2,159889	-2,160225	-2,159832	-2,160157
1080	-2,430079	-2,430027	-2,430049	-2,430229	-2,429985	-2,430155
1200	-2,700294	-2,700233	-2,700256		-2,700184	
0	-0,000181	-0,000135				

**Tabelle 5: Mittelwerte, Parameter und Messunsicherheiten für zunehmende Einzelkräfte**

Table 5: Mean values, parameters and measurement uncertainties for incremental single forces

<i>F</i>	$\bar{X}_{WR}$	<i>b</i> '	<i>b</i>	<i>v</i>	$\bar{X}_r$	$W_{\bar{X}_r}$
Kraft Force	arithmet. Mittelwert Arithm. mean	rel. Wiederholpräzision Rel. repeatability error	rel. Vergleichspräzision Rel. reproducibility error	rel. Umkehrspanne Rel. reversibility error	arithmet. Mittelwert (AM) Arithm. Mean	erw. rel. Messunsicherheit Exp. rel. meas. uncertainty AM
in kN	in mV/V	in %	in %	in %	in mV/V	in %
0	0,000000	-	-	-	0,000000	-
120	-0,269867	0,003	0,007	0,134	-0,269862	0,015
240	-0,539734	0,002	0,003	0,093	-0,539735	0,014
360	-0,809658	0,001	0,001	0,075	-0,809662	0,014
480	-1,079628	0,001	0,003	0,060	-1,079631	0,014
600	-1,349637	0,001	0,005	0,047	-1,349632	0,014
720	-1,619679	0,001	0,005	0,034	-1,619677	0,014
840	-1,889763	0,001	0,003	0,024	-1,889762	0,014
960	-2,159883	0,002	0,003	0,015	-2,159875	0,014
1080	-2,430053	0,002	0,004	0,007	-2,430038	0,014
1200	-2,700264	0,002	0,004	-	-2,700245	0,014

**Tabelle 6: Klassifizierungen**

Table 6: Classifications

Kraftbereich / Force range		Geräteklasse / Instrument class			
Von / From	Bis / To	Fall A / Case A	Fall B / Case B	Fall C / Case C	Fall D / Case D
120 kN	1200 kN	00	0,5	00	0,5
<b>240 kN</b>	<b>1200 kN</b>	<b>00</b>	<b>0,5</b>	<b>00</b>	<b>0,5</b>
360 kN	1200 kN	00	0,5	00	0,5
480 kN	1200 kN	00	00	00	00
600 kN	1200 kN	00	00	00	00

Seite 5 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12432 PTB 22  
Page 5 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12432 PTB 22

**Tabelle 7: Ausgeglichene Ergebnisse und Messunsicherheiten**

Table 7: Fitted results and measurement uncertainties

Kraftrichtung: Druckkraft

Force application: compressive

<i>F</i> Kraft <i>Force</i> in kN	<i>X<sub>a</sub></i> ausgegl. Mittelwert (BM), zunehmend <i>Balanced</i> mean (BM) in mV/V	<i>W<sub>Xa</sub></i> erw. rel. Mess- unsicherheit BM, ( <i>k</i> = 2) <i>Rel. meas.</i> uncertainty BM in %	<i>f<sub>c</sub></i> rel. Interp.- Abw. <i>Rel. inter-</i> <i>polation error</i> in %	<i>W<sub>Xv</sub></i> erw. rel. Mess- unsicherheit zu/abn., ( <i>k</i> = 2) <i>Rel. meas. uncer-</i> <i>tainty incr/decr</i> in %
0	0,000000	-	-	-
120	-0,269851	0,017	0,004	0,155
240	-0,539740	0,015	-0,001	0,117
360	-0,809666	0,014	-0,001	0,092
480	-1,079630	0,014	0,000	0,072
600	-1,349633	0,014	0,000	0,056
720	-1,619675	0,014	0,000	0,043
840	-1,889757	0,014	0,000	0,032
960	-2,159878	0,014	0,000	0,024
1080	-2,430040	0,014	0,000	0,018
1200	-2,700243	0,014	0,000	0,014

#### Ausgleichsfunktionen / Fitting functions $X = X(F)$

Die in der Tabelle oben aufgeführten ausgeglichenen Mittelwerte  $X_a$  sind mit folgender Funktion berechnet:

The balanced mean  $X_a$  values stated in the table above have been calculated with the following function:

$$X_a = [-0,002248607 \cdot F / \text{kN} - 1,277 \cdot 10^{-9} \cdot (F / \text{kN})^2 - 4,4 \cdot 10^{-14} \cdot (F / \text{kN})^3] \text{ mV/V}$$

Unter Berücksichtigung der Umkehrspanne  $v$  ergibt sich folgende Funktion für abnehmende Kraftbeträge:

Considering the reversibility  $v$  the following function results for decremental forces:

$$X_t = [-0,002250889 \cdot F / \text{kN} + 1,541 \cdot 10^{-9} \cdot (F / \text{kN})^2 - 7,39 \cdot 10^{-13} \cdot (F / \text{kN})^3 - 1,21 \cdot 10^{-4}] \text{ mV/V}$$

#### Ausgleichsfunktionen / Fitting functions $F = F(X)$

Die Berechnung der Kraft  $F_a$  zu einem gegebenen Messwert  $X$  erfolgt mit Hilfe der Funktion:

The calculation of the force  $F_a$  related to a measurement signal  $X$  is carried out using the function:

$$F_a = \{-444,7199 \cdot X / (\text{mV/V}) - 0,1124 \cdot [X / (\text{mV/V})]^2 + 0,00164 \cdot [X / (\text{mV/V})]^3\} \text{ kN}$$

Unter Berücksichtigung der Umkehrspanne  $v$  ergibt sich folgende Funktion für abnehmende Signale  $X$ :

Considering the reversibility  $v$  the following function results for decremental forces:

$$F_t = \{-444,2689 \cdot X / (\text{mV/V}) + 0,1353 \cdot [X / (\text{mV/V})]^2 + 0,02881 \cdot [X / (\text{mV/V})]^3 - 0,054\} \text{ kN}$$

#### Einhüllende für die Messunsicherheiten / Envelope functions for measurement uncertainties

Die in der Tabelle oben aufgeführten erweiterten relativen Messunsicherheiten  $W_{Xa}$  können approximiert werden mit:

The expanded relative uncertainties  $W_{Xa}$  stated in the table above can be approximated with:

$$W_{Xa} = +0,00568 / (F / \text{kN}) + 1,22 \cdot 10^{-4} + 2,09 \cdot 10^{-8} \cdot F / \text{kN} - 5,76 \cdot 10^{-12} \cdot (F / \text{kN})^2$$

Die der Tabelle oben aufgeführten erweiterten relativen Messunsicherheiten  $W_{Xv}$  können approximiert werden mit:

The expanded relative uncertainties  $W_{Xv}$  stated in the table above can be approximated with:

$$W_{Xv} = +0,0415 / (F / \text{kN}) + 0,00144 - 2,06 \cdot 10^{-6} \cdot F / \text{kN} + 7,89 \cdot 10^{-10} \cdot (F / \text{kN})^2$$

Seite 6 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12432 PTB 22  
 Page 6 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12432 PTB 22

**Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter <http://www.bipm.org>).

Diese Aussage und das CIPM-MRA-Logo beziehen sich nur auf die Messergebnisse in diesem Kalibrierschein.



**The Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

The CIPM MRA Logo and this statement attest only to the measurement component of the certificate.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Bundesallee 100  
 38116 Braunschweig  
 DEUTSCHLAND

Abbestraße 2-12  
 10587 Berlin  
 DEUTSCHLAND

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.2: Kalibrierschein DM1-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Druckkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 120 kN bis 1200 kN, 2 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 08.07.2022 [Fortsetzung]



Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Nationales Metrologieinstitut



## Kalibrierschein

Calibration Certificate

Gegenstand: <i>Object:</i>	Kraftaufnehmer 1200 kN (Zugkraft: 80 kN bis 850 kN) <i>Force transducer 1200 kN (Tensile force: 80 kN to 850 kN)</i>	
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Interface, Inc.	
Typ: <i>Type:</i>	SMT2	
Kennnummer: <i>Serial no.:</i>	1144692A	
Auftraggeber: <i>Customer:</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt AG 1.22 Darstellung Drehmoment Bundesallee 100 38116 Braunschweig	
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	6	
Geschäftszeichen: <i>Reference no.:</i>	PTB 1.21Ries_22054-07	
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	12438 PTB 22	
Ort der Kalibrierung: <i>Location of calibration:</i>	PTB Braunschweig	
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	26.07.2022	
Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>	Braunschweig, 16.08.2022	Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>
	Siegel <i>Seal</i>	

Dipl.-Ing. (FH) M. Seidel

F. Ries

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.  
Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die kalibrierten Gegenstände.  
*Calibration certificates without signature and seal are not valid. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.*  
*The presented results relate only to the items calibrated.*

Abbildung A.3: Kalibrierschein DM2-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Zugkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 80 kN bis 850 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 26.07.2022

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12438 PTB 22  
 Page 2 of calibration certificate of 16.08.2022, calibration mark: 12438 PTB 22

In case of doubts the German text of this certificate is valid.

### 1. Kalibrierverfahren / Calibration procedure

DIN EN ISO 376:2011-09

Wartezeit 30 s  
 Waiting time

### 2. Kraft-Normalmesseinrichtung / Force standard machine

Bezeichnung: 1-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung

Designation: 1-MN Force Standard Machine

Relative Messunsicherheit der Kraft im verwendeten Messbereich ( $k = 2$ ):  $\leq 0,002\%$

Relative measurement uncertainty of the force in the measuring range used ( $k = 2$ ):

### 3. Kalibrieranordnung / Calibration arrangement

#### 3.1 Kraftaufnehmer / Force transducer

Kraftaufnehmer 1200 kN

Force transducer 1200 kN

Typ SMT2

Type

Kennnummer 1144692A

Serial number

Hersteller Interface, Inc.

Manufacturer

Kabellänge 4x500 cm Verlängerung: 4x30 cm

Cable length

Extension:

#### 3.2 Anzeigegerät / Indicator

Typ DMP41 (PTB)

Type

Kennnummer 823301101

Serial number

Hersteller Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Manufacturer

Messbereich 5 mV/V

Measuring range

Auflösung 0,0000015 mV/V

Resolution

Messkanal 1-4

Measuring channel

Kalibrierwert 5,000000 mV/V

Calibration signal

Speisespannung 5 V

Excitation voltage

Tiefpassfilter 0,10 Hz Be

Low-pass filter

#### 3.3 Einspannteile / Mounting parts

2 Zwischenringe PTB

2 intermediate rings PTB

2 Kugelmuttern PTB

2 ball nuts PTB

2 Kugelschalen PTB

2 ball cups PTB

2 Verlängerungsstücke PTB

2 extension rods PTB

#### 3.4 Anmerkungen / Notes

-

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.3: Kalibrierschein DM2-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Zugkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 80 kN bis 850 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 26.07.2022 [Fortsetzung]

Seite 3 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12438 PTB 22  
Page 3 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12438 PTB 22

#### 4. Ergebnisse und Auswertung / Results and evaluation

Kraftrichtung: Zugkraft  
Force application: tensile

Mittlere Messtemperatur (20,9 ± 0,2) °C  
Mean measuring temperature  
Aufnehmernullsignal 0,031844 mV/V  
Zero signal of the transducer

**Tabelle 1: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Vorbelastungen in mV/V**

Table 1: Zero-reduced values indicated for preloads in mV/V

Einbaustellung Mounting position	0 °	120 °	240 °
Nullanzeige $i_0$ Indication at zero load	0,000000	0,000000	0,000000
Anzeige bei Höchstkraft $F_N$ Indication at max force	1,916660	1,916592	1,916590
Restanzeige $i_f$ Indication after preloading	0,000003	-0,000015	0,000002

**Tabelle 2: Relative Restanzeigen bezogen auf die Höchstkraft in %**

Table 2: Relative zero shift after preloading related to the maximum force in %

Nach Vorbelastungen / After preloadings				
Einbaustellung Mounting position	0 °	120 °	240 °	
Rel. Nullpunktabweichung $f_0$ Rel. zero error	0,000	-0,001	0,000	
Nach Messreihen / After measurement series				
Messreihe Measurement series	$X_1$	$X_2$	$X_4'$	$X_6'$
Rel. Nullpunktabweichung $f_0$ Rel. zero error	0,008	0,003	0,002	0,003

**Tabelle 3: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Kriechmessung**

Table 3: Zero-reduced values indicated for series of creep test

Einbaustellung Mounting position	240 °
<b>Kriechmessung bei maximaler Belastung</b> Creep test at max. calibration force	
Nullanzeige Indication at zero load	0,000000 mV/V
Anzeige bei Höchstkraft $i_{30}$ nach 30 s Indication at max force after 30 s	1,916583 mV/V
Anzeige bei Höchstkraft $i_{300}$ nach 300 s Indication at max force after 300 s	1,916663 mV/V
Rel. Kriechabweichung $c$ bei max. Belastung Rel. creep error at max. calibration force	0,004 %
<b>Kriechmessung bei Wegnahme der Kraft</b> Creep test after force removal	
Restanzeige $i_{30}$ nach 30 s Indication after preloading 30 s	0,000056 mV/V
Restanzeige $i_{300}$ nach 300 s Indication after preloading 300 s	-0,000005 mV/V
Rel. Kriechabweichung $c$ bei Wegnahme der Kraft Rel. creep error after force removal	0,003 %

Seite 4 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12438 PTB 22  
Page 4 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12438 PTB 22

**Tabelle 4: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Messreihen**

Table 4: Zero-reduced values indicated for all series

Kraftrichtung: Zugkraft

Force application: tensile

<i>F</i>	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub> '	<i>X</i> <sub>5</sub>	<i>X</i> <sub>6</sub> '
Kraft Force	Messreihe 1 Meas. series 1	Messreihe 2 Meas. series 2	Messreihe 3 Meas. series 3	Messreihe 4' Meas. series 4'	Messreihe 5 Meas. series 5	Messreihe 6' Meas. series 6'
in kN	0 ° in mV/V	0 ° in mV/V	120 ° auf / up in mV/V	120 ° ab / down in mV/V	240 ° auf / up in mV/V	240 ° ab / down in mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000030	0,000000	0,000055
80	0,180401	0,180390	0,180392	0,180534	0,180396	0,180553
160	0,360801	0,360782	0,360781	0,361026	0,360792	0,361051
240	0,541222	0,541183	0,541190	0,541506	0,541199	0,541534
320	0,721637	0,721589	0,721608	0,721938	0,721611	0,721958
400	0,902046	0,901979	0,902011	0,902350	0,902014	0,902361
480	1,082421	1,082355	1,082381	1,082716	1,082378	1,082715
560	1,262803	1,262731	1,262751	1,263067	1,262750	1,263065
640	1,443212	1,443157	1,443169	1,443417	1,443146	1,443417
720	1,623637	1,623575	1,623576	1,623747	1,623566	1,623762
800	1,804029	1,803963	1,803979	1,804054	1,803968	1,804047
850	1,916772	1,916687	1,916710		1,916701	
0	0,000148	0,000065				

**Tabelle 5: Mittelwerte, Parameter und Messunsicherheiten für zunehmende Einzelkräfte**

Table 5: Mean values, parameters and measurement uncertainties for incremental single forces

<i>F</i>	$\bar{X}_{WR}$	<i>b</i> '	<i>b</i>	<i>v</i>	$\bar{X}_r$	$W_{\bar{X}_r}$
Kraft Force	arithmet. Mittelwert Arithm. mean	rel. Wiederholpräzision Rel. repeatability error	rel. Vergleichspräzision Rel. reproducibility error	rel. Umkehrspanne Rel. reversibility error	arithmet. Mittelwert (AM) Arithm. Mean	erw. rel. Messunsicherheit Exp. rel. meas. uncertainty AM
in kN	1-2 in mV/V	in %	in %	in %	1-3-5 (AM) in mV/V	in %
0	0,000000	-	-	-	0,000000	-
80	0,180396	0,006	0,005	0,083	0,180396	0,018
160	0,360792	0,005	0,006	0,070	0,360791	0,017
240	0,541203	0,007	0,006	0,060	0,541204	0,018
320	0,721613	0,007	0,004	0,047	0,721619	0,018
400	0,902013	0,007	0,004	0,038	0,902024	0,018
480	1,082388	0,006	0,004	0,031	1,082393	0,018
560	1,262767	0,006	0,004	0,025	1,262768	0,018
640	1,443185	0,004	0,005	0,018	1,443176	0,017
720	1,623606	0,004	0,004	0,011	1,623593	0,017
800	1,803996	0,004	0,003	0,004	1,803992	0,017
850	1,916730	0,004	0,004	-	1,916728	0,017

**Tabelle 6: Klassifizierungen**

Table 6: Classifications

Kraftbereich / Force range		Geräteklasse / Instrument class			
Von / From	Bis / To	Fall A / Case A	Fall B / Case B	Fall C / Case C	Fall D / Case D
80 kN	850 kN	00	0,5	00	0,5
160 kN	850 kN	00	00	00	00
240 kN	850 kN	00	00	00	00
320 kN	850 kN	00	00	00	00
400 kN	850 kN	00	00	00	00

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.3: Kalibrierschein DM2-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Zugkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 80 kN bis 850 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 26.07.2022 [Fortsetzung]

Seite 5 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12438 PTB 22  
Page 5 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12438 PTB 22

**Tabelle 7: Ausgeglichene Ergebnisse und Messunsicherheiten**

Kraftrichtung: Zugkraft

Table 7: Fitted results and measurement uncertainties

Force application: tensile

$F$ Kraft  Force  in kN	$X_a$ ausgegl. Mittelwert (BM), zunehmend  Balanced mean (BM)  in mV/V	$W_{X_a}$ erw. rel. Mess- unsicherheit BM, ( $k = 2$ )  Rel. meas. uncertainty BM  in %	$f_c$ rel. Interp.- Abw.  Rel. inter- polation error  in %	$W_{X_v}$ erw. rel. Mess- unsicherheit zu/abn., ( $k = 2$ )  Rel. meas. uncer- tainty incr/decr  in %
0	0,000000	-	-	-
80	0,180406	0,020	-0,005	0,098
160	0,360808	0,020	-0,004	0,084
240	0,541207	0,020	-0,001	0,072
320	0,721604	0,020	0,002	0,061
400	0,902000	0,019	0,003	0,050
480	1,082395	0,018	0,000	0,042
560	1,262790	0,018	-0,002	0,034
640	1,443186	0,017	-0,001	0,028
720	1,623583	0,017	0,001	0,023
800	1,803983	0,017	0,001	0,019
850	1,916734	0,017	0,000	0,017

#### Ausgleichsfunktionen / Fitting functions $X = X(F)$

Die in der Tabelle oben aufgeführten ausgeglichenen Mittelwerte  $X_a$  sind mit folgender Funktion berechnet:

The balanced mean  $X_a$  values stated in the table above have been calculated with the following function:

$$X_a = [ + 0,002255093 \cdot F / \text{kN} - 3,25 \cdot 10^{-10} \cdot ( F / \text{kN} )^2 + 2,27 \cdot 10^{-13} \cdot ( F / \text{kN} )^3 ] \text{ mV/V}$$

Unter Berücksichtigung der Umkehrspanne  $v$  ergibt sich folgende Funktion für abnehmende Kraftbeträge:

Considering the reversibility  $v$  the following function results for decremental forces:

$$X_t = [ + 0,002256761 \cdot F / \text{kN} - 2,609 \cdot 10^{-9} \cdot ( F / \text{kN} )^2 + 5,58 \cdot 10^{-13} \cdot ( F / \text{kN} )^3 + 3,5 \cdot 10^{-5} ] \text{ mV/V}$$

#### Ausgleichsfunktionen / Fitting functions $F = F(X)$

Die Berechnung der Kraft  $F_a$  zu einem gegebenen Messwert  $X$  erfolgt mit Hilfe der Funktion:

The calculation of the force  $F_a$  related to a measurement signal  $X$  is carried out using the function:

$$F_a = \{ + 443,4406 \cdot X / ( \text{mV/V} ) + 0,0284 \cdot [ X / ( \text{mV/V} ) ]^2 - 0,0088 \cdot [ X / ( \text{mV/V} ) ]^3 \} \text{ kN}$$

Unter Berücksichtigung der Umkehrspanne  $v$  ergibt sich folgende Funktion für abnehmende Signale  $X$ :

Considering the reversibility  $v$  the following function results for decremental forces:

$$F_t = \{ + 443,1129 \cdot X / ( \text{mV/V} ) + 0,2272 \cdot [ X / ( \text{mV/V} ) ]^2 - 0,0215 \cdot [ X / ( \text{mV/V} ) ]^3 - 0,0154 \} \text{ kN}$$

#### Einhüllende für die Messunsicherheiten / Envelope functions for measurement uncertainties

Die in der Tabelle oben aufgeführten erweiterten relativen Messunsicherheiten  $W_{X_a}$  können approximiert werden mit:

The expanded relative uncertainties  $W_{X_a}$  stated in the table above can be approximated with:

$$W_{X_a} = + 2,02 \cdot 10^{-4} + 5,49 \cdot 10^{-8} \cdot F / \text{kN} - 2,92 \cdot 10^{-10} \cdot ( F / \text{kN} )^2 + 2,16 \cdot 10^{-13} \cdot ( F / \text{kN} )^3$$

Die der Tabelle oben aufgeführten erweiterten relativen Messunsicherheiten  $W_{X_v}$  können approximiert werden mit:

The expanded relative uncertainties  $W_{X_v}$  stated in the table above can be approximated with:

$$W_{X_v} = - 7,8 \cdot 10^{-4} / ( F / \text{kN} ) + 0,00114 - 1,98 \cdot 10^{-6} \cdot F / \text{kN} + 9,9 \cdot 10^{-10} \cdot ( F / \text{kN} )^2$$

Seite 6 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12438 PTB 22  
 Page 6 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12438 PTB 22

**Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter <http://www.bipm.org>).

Diese Aussage und das CIPM-MRA-Logo beziehen sich nur auf die Messergebnisse in diesem Kalibrierschein.



**The Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

The CIPM MRA Logo and this statement attest only to the measurement component of the certificate.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Bundesallee 100  
 38116 Braunschweig  
 DEUTSCHLAND

Abbestraße 2-12  
 10587 Berlin  
 DEUTSCHLAND

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.3: Kalibrierschein DM2-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Zugkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 80 kN bis 850 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 26.07.2022 [Fortsetzung]



Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Nationales Metrologieinstitut



## Kalibrierschein

*Calibration Certificate*

Gegenstand: <i>Object:</i>	Kraftaufnehmer 1200 kN (Druckkraft: 100 kN bis 1000 kN) <i>Force transducer 1200 kN (Compressive force: 100 kN to 1000 kN)</i>	
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Interface, Inc.	
Typ: <i>Type:</i>	SMT2	
Kennnummer: <i>Serial no.:</i>	1144692A	
Auftraggeber: <i>Customer:</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt AG 1.22 Darstellung Drehmoment Bundesallee 100 38116 Braunschweig	
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	6	
Geschäftszeichen: <i>Reference no.:</i>	PTB 1.21Ries_22054-08	
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	12439 PTB 22	
Ort der Kalibrierung: <i>Location of calibration:</i>	PTB Braunschweig	
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	27.07.2022	
Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>	Braunschweig, 16.08.2022	Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>
	Siegel <i>Seal</i>	

Dipl.-Ing. (FH) M. Seidel

F. Ries

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.  
Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die kalibrierten Gegenstände.  
*Calibration certificates without signature and seal are not valid. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.*  
*The presented results relate only to the items calibrated.*

Abbildung A.4: Kalibrierschein DM2-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Druckkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 100 kN bis 1000 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 26.07.2022

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12439 PTB 22  
 Page 2 of calibration certificate of 16.08.2022, calibration mark: 12439 PTB 22

In case of doubts the German text of this certificate is valid.

### 1. Kalibrierverfahren / Calibration procedure

DIN EN ISO 376:2011-09

Wartezeit 30 s  
 Waiting time

### 2. Kraft-Normalmesseinrichtung / Force standard machine

Bezeichnung: 1-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung

Designation: 1-MN Force Standard Machine

Relative Messunsicherheit der Kraft im verwendeten Messbereich ( $k = 2$ ):  $\leq 0,002\%$

Relative measurement uncertainty of the force in the measuring range used ( $k = 2$ ):

### 3. Kalibrieranordnung / Calibration arrangement

#### 3.1 Kraftaufnehmer / Force transducer

Kraftaufnehmer 1200 kN

Force transducer 1200 kN

Typ SMT2

Type

Kennnummer 1144692A

Serial number

Hersteller Interface, Inc.

Manufacturer

Kabellänge 4x500 cm Verlängerung: 4x30 cm

Cable length

Extension:

#### 3.2 Anzeigegerät / Indicator

Typ DMP41 (PTB)

Type

Kennnummer 823301101

Serial number

Hersteller Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Manufacturer

Messbereich 5 mV/V

Measuring range

Auflösung 0,0000015 mV/V

Resolution

Messkanal 1-4

Measuring channel

Kalibrierwert 5,000000 mV/V

Calibration signal

Speisespannung 5 V

Excitation voltage

Tiefpassfilter 0,10 Hz Be

Low-pass filter

#### 3.3 Einspannteile / Mounting parts

1 Einschraub- / Einsatzdruckstück PTB

1 loading pad PTB

1 ebenes Druckstück PTB

1 plain loading pad PTB

#### 3.4 Anmerkungen / Notes

-

Seite 3 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12439 PTB 22  
Page 3 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12439 PTB 22

#### 4. Ergebnisse und Auswertung / Results and evaluation

Kraftrichtung: Druckkraft  
Force application: compressive

Mittlere Messtemperatur (21,0 ± 0,2) °C  
Mean measuring temperature  
Aufnehmernullsignal 0,025632 mV/V  
Zero signal of the transducer

**Tabelle 1: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Vorbelastungen in mV/V**

Table 1: Zero-reduced values indicated for preloads in mV/V

Einbaustellung Mounting position	0 °	120 °	240 °
Nullanzeige $i_0$ Indication at zero load	0,000000	0,000000	0,000000
Anzeige bei Höchstkraft $F_N$ Indication at max force	-2,255847	-2,255854	-2,255745
Restanzeige $i_f$ Indication after preloading	-0,000102	-0,000022	-0,000035

**Tabelle 2: Relative Restanzeigen bezogen auf die Höchstkraft in %**

Table 2: Relative zero shift after preloading related to the maximum force in %

Einbaustellung Mounting position	Nach Vorbelastungen / After preloadings			
	0 °	120 °	240 °	
Rel. Nullpunktabweichung $f_0$ Rel. zero error	0,005	0,001	0,002	
Messreihe Measurement series	Nach Messreihen / After measurement series			
	$X_1$	$X_2$	$X_4'$	$X_6'$
Rel. Nullpunktabweichung $f_0$ Rel. zero error	0,008	0,005	0,003	0,004

**Tabelle 3: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Kriechmessung**

Table 3: Zero-reduced values indicated for series of creep test

Einbaustellung Mounting position	240 °
<b>Kriechmessung bei maximaler Belastung</b> Creep test at max. calibration force	
Nullanzeige Indication at zero load	0,000000 mV/V
Anzeige bei Höchstkraft $i_{30}$ nach 30 s Indication at max force after 30 s	-2,255773 mV/V
Anzeige bei Höchstkraft $i_{300}$ nach 300 s Indication at max force after 300 s	-2,255865 mV/V
Rel. Kriechabweichung $c$ bei max. Belastung Rel. creep error at max. calibration force	0,004 %
<b>Kriechmessung bei Wegnahme der Kraft</b> Creep test after force removal	
Restanzeige $i_{30}$ nach 30 s Indication after preloading 30 s	-0,000144 mV/V
Restanzeige $i_{300}$ nach 300 s Indication after preloading 300 s	-0,000076 mV/V
Rel. Kriechabweichung $c$ bei Wegnahme der Kraft Rel. creep error after force removal	0,003 %

Seite 4 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12439 PTB 22  
Page 4 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12439 PTB 22

**Tabelle 4: Nullkorrigierte Anzeigewerte der Messreihen**

Table 4: Zero-reduced values indicated for all series

Kraftrichtung: Druckkraft

Force application: compressive

<i>F</i>	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub> '	<i>X</i> <sub>5</sub>	<i>X</i> <sub>6</sub> '
Kraft <i>Force</i>	Messreihe 1 <i>Meas. series 1</i>	Messreihe 2 <i>Meas. series 2</i>	Messreihe 3 <i>Meas. series 3</i>	Messreihe 4' <i>Meas. series 4'</i>	Messreihe 5 <i>Meas. series 5</i>	Messreihe 6' <i>Meas. series 6'</i>
in kN	0° in mV/V	0° in mV/V	120° auf / up in mV/V	120° ab / down in mV/V	240° auf / up in mV/V	240° ab / down in mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-0,000068	0,000000	-0,000094
100	-0,225465	-0,225460	-0,225473	-0,225701	-0,225474	-0,225716
200	-0,450935	-0,450931	-0,450961	-0,451320	-0,450974	-0,451351
300	-0,676434	-0,676417	-0,676466	-0,676927	-0,676472	-0,676940
400	-0,901982	-0,901958	-0,902018	-0,902529	-0,902030	-0,902522
500	-1,127545	-1,127512	-1,127586	-1,128115	-1,127584	-1,128115
600	-1,353147	-1,353116	-1,353193	-1,353691	-1,353186	-1,353660
700	-1,578763	-1,578706	-1,578801	-1,579279	-1,578796	-1,579239
800	-1,804431	-1,804342	-1,804473	-1,804831	-1,804472	-1,804788
900	-2,030157	-2,030058	-2,030190	-2,030391	-2,030173	-2,030350
1000	-2,255924	-2,255816	-2,255936		-2,255888	
0	-0,000183	-0,000107				

**Tabelle 5: Mittelwerte, Parameter und Messunsicherheiten für zunehmende Einzelkräfte**

Table 5: Mean values, parameters and measurement uncertainties for incremental single forces

<i>F</i>	$\bar{X}_{WR}$	<i>b</i> '	<i>b</i>	<i>v</i>	$\bar{X}_r$	$W_{\bar{X}_r}$
Kraft <i>Force</i>	arithmet. Mittelwert <i>Arithm. mean</i>	rel. Wiederholpräzision <i>Rel. repeatability error</i>	rel. Vergleichspräzision <i>Rel. reproducibility error</i>	rel. Umkehrspanne <i>Rel. reversibility error</i>	arithmet. Mittelwert (AM) <i>Arithm. Mean</i>	erw. rel. Messunsicherheit <i>Exp. rel. meas. uncertainty AM</i>
in kN	in mV/V	in %	in %	in %	in mV/V	in %
0	0,000000	-	-	-	0,000000	-
100	-0,225463	0,002	0,004	0,104	-0,225471	0,017
200	-0,450933	0,001	0,009	0,082	-0,450957	0,018
300	-0,676426	0,003	0,006	0,069	-0,676457	0,017
400	-0,901970	0,003	0,005	0,056	-0,902010	0,017
500	-1,127529	0,003	0,004	0,047	-1,127572	0,017
600	-1,353132	0,002	0,003	0,036	-1,353175	0,017
700	-1,578735	0,004	0,002	0,029	-1,578787	0,017
800	-1,804387	0,005	0,002	0,019	-1,804459	0,018
900	-2,030108	0,005	0,002	0,009	-2,030173	0,018
1000	-2,255870	0,005	0,002	-	-2,255916	0,018

**Tabelle 6: Klassifizierungen**

Table 6: Classifications

Kraftbereich / <i>Force range</i>		Geräteklasse / <i>Instrument class</i>			
Von / <i>From</i>	Bis / <i>To</i>	Fall A / <i>Case A</i>	Fall B / <i>Case B</i>	Fall C / <i>Case C</i>	Fall D / <i>Case D</i>
100 kN	1000 kN	00	0,5	00	0,5
<b>200 kN</b>	<b>1000 kN</b>	<b>00</b>	<b>0,5</b>	<b>00</b>	<b>0,5</b>
300 kN	1000 kN	00	00	00	00
400 kN	1000 kN	00	00	00	00
500 kN	1000 kN	00	00	00	00

Seite 5 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12439 PTB 22  
Page 5 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12439 PTB 22

**Tabelle 7: Ausgeglichene Ergebnisse und Messunsicherheiten**

Table 7: Fitted results and measurement uncertainties

Kraftrichtung: Druckkraft

Force application: compressive

<i>F</i>	<i>X<sub>a</sub></i>	<i>W<sub>Xa</sub></i>	<i>f<sub>c</sub></i>	<i>W<sub>Xv</sub></i>
Kraft	ausgegl. Mittelwert (BM), zunehmend	erw. rel. Mess- unsicherheit BM, ( <i>k</i> = 2)	rel. Interp.- Abw.	erw. rel. Mess- unsicherheit zu/abn., ( <i>k</i> = 2)
<i>Force</i>	<i>Balanced</i> mean (BM)	<i>Rel. meas.</i> uncertainty BM	<i>Rel. inter-</i> <i>polation error</i>	<i>Rel. meas. uncer-</i> <i>tainty incr/decr</i>
in kN	in mV/V	in %	in %	in %
0	0,000000	-	-	-
100	-0,225468	0,017	0,001	0,122
200	-0,450956	0,018	0,000	0,098
300	-0,676468	0,018	-0,002	0,082
400	-0,902004	0,018	0,001	0,068
500	-1,127570	0,018	0,000	0,057
600	-1,353166	0,018	0,001	0,047
700	-1,578796	0,018	-0,001	0,038
800	-1,804463	0,018	0,000	0,030
900	-2,030169	0,018	0,000	0,023
1000	-2,255917	0,018	0,000	0,018

#### Ausgleichsfunktionen / Fitting functions $X = X(F)$

Die in der Tabelle oben aufgeführten ausgeglichenen Mittelwerte  $X_a$  sind mit folgender Funktion berechnet:

The balanced mean  $X_a$  values stated in the table above have been calculated with the following function:

$$X_a = [-0,002254589 \cdot F / \text{kN} - 8,73 \cdot 10^{-10} \cdot (F / \text{kN})^2 - 4,54 \cdot 10^{-13} \cdot (F / \text{kN})^3] \text{ mV/V}$$

Unter Berücksichtigung der Umkehrspanne  $v$  ergibt sich folgende Funktion für abnehmende Kraftbeträge:

Considering the reversibility  $v$  the following function results for decremental forces:

$$X_i = [-0,002256339 \cdot F / \text{kN} + 7,3 \cdot 10^{-10} \cdot (F / \text{kN})^2 - 2,27 \cdot 10^{-13} \cdot (F / \text{kN})^3 - 8,1 \cdot 10^{-5}] \text{ mV/V}$$

#### Ausgleichsfunktionen / Fitting functions $F = F(X)$

Die Berechnung der Kraft  $F_a$  zu einem gegebenen Messwert  $X$  erfolgt mit Hilfe der Funktion:

The calculation of the force  $F_a$  related to a measurement signal  $X$  is carried out using the function:

$$F_a = \{-443,5398 \cdot X / (\text{mV/V}) - 0,0763 \cdot [X / (\text{mV/V})]^2 + 0,01746 \cdot [X / (\text{mV/V})]^3\} \text{ kN}$$

Unter Berücksichtigung der Umkehrspanne  $v$  ergibt sich folgende Funktion für abnehmende Signale  $X$ :

Considering the reversibility  $v$  the following function results for decremental forces:

$$F_i = \{-443,1958 \cdot X / (\text{mV/V}) + 0,0636 \cdot [X / (\text{mV/V})]^2 + 0,00875 \cdot [X / (\text{mV/V})]^3 - 0,036\} \text{ kN}$$

#### Einhüllende für die Messunsicherheiten / Envelope functions for measurement uncertainties

Die in der Tabelle oben aufgeführten erweiterten relativen Messunsicherheiten  $W_{Xa}$  können approximiert werden mit:

The expanded relative uncertainties  $W_{Xa}$  stated in the table above can be approximated with:

$$W_{Xa} = \exp(-8,69) \cdot (F / \text{kN})^{(+0,00844)}$$

Die der Tabelle oben aufgeführten erweiterten relativen Messunsicherheiten  $W_{Xv}$  können approximiert werden mit:

The expanded relative uncertainties  $W_{Xv}$  stated in the table above can be approximated with:

$$W_{Xv} = +0,0213 / (F / \text{kN}) + 0,00115 - 1,49 \cdot 10^{-6} \cdot F / \text{kN} + 4,97 \cdot 10^{-10} \cdot (F / \text{kN})^2$$

Seite 6 zum Kalibrierschein vom 16.08.2022, Kalibrierzeichen: 12439 PTB 22  
 Page 6 of the Calibration Certificate dated 16.08.2022, calibration mark: 12439 PTB 22

**Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter <http://www.bipm.org>).

Diese Aussage und das CIPM-MRA-Logo beziehen sich nur auf die Messergebnisse in diesem Kalibrierschein.



**The Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

The CIPM MRA Logo and this statement attest only to the measurement component of the certificate.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Bundesallee 100  
 38116 Braunschweig  
 DEUTSCHLAND

Abbestraße 2-12  
 10587 Berlin  
 DEUTSCHLAND

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

Abbildung A.4: Kalibrierschein DM2-Referenzkraftaufnehmer, Kanal  $F_{z,1}$ , Druckkalibrierung nach DIN EN ISO 376 von 100 kN bis 1000 kN, 1 MN-Kraftnormalmesseinrichtung, 26.07.2022 [Fortsetzung]

## A.2 Nebenschluss

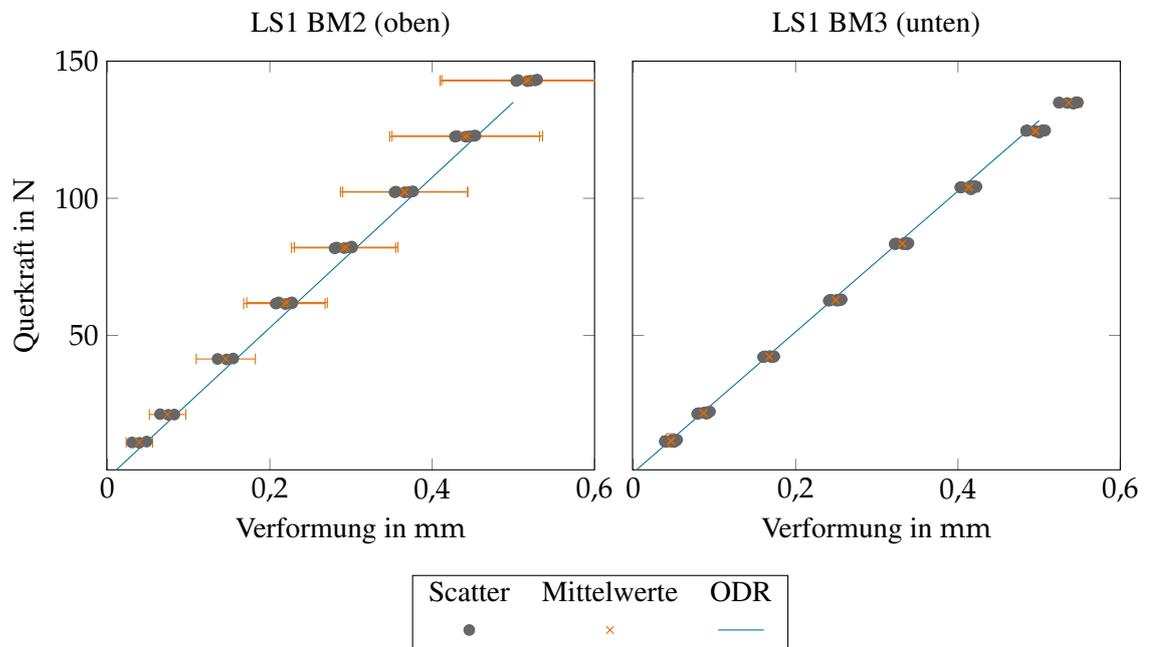


Abbildung A.5: Bildung der Kalibrierkurve des Steifigkeitskoeffizienten  $k_{FT}$  durch ODR in Lastfall 1 für BM2 und BM3.

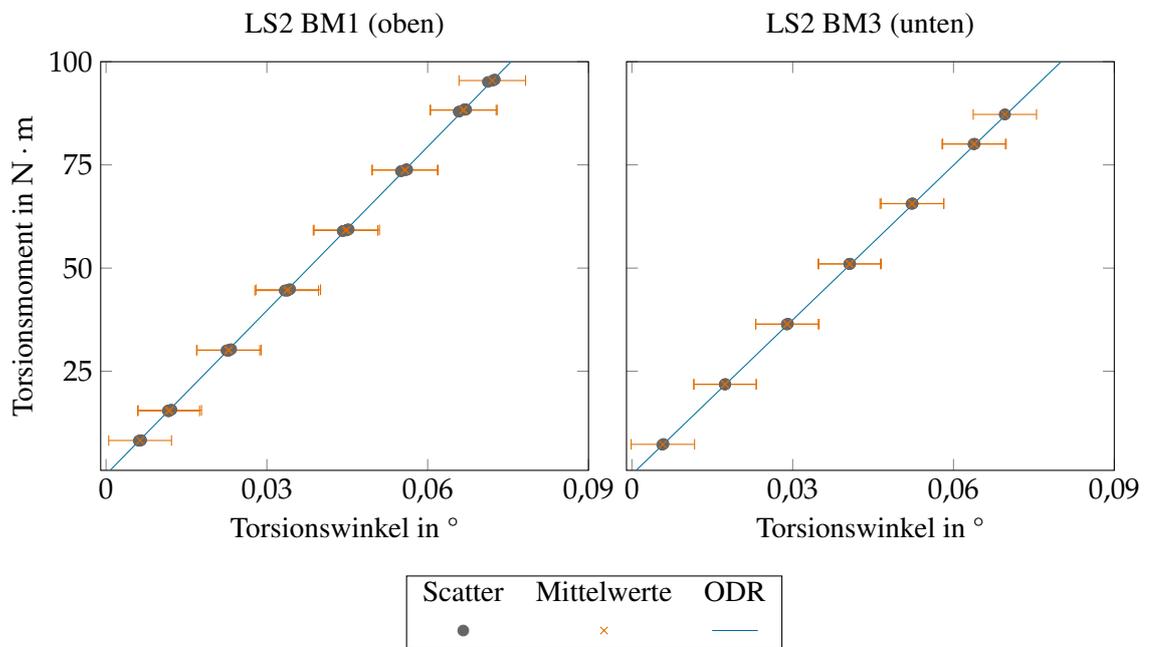


Abbildung A.6: Bildung der Kalibrierkurve des Steifigkeitskoeffizienten  $k_{MT}$  durch ODR in Lastfall 2 für BM1 und BM3.

Mitglied im / Member of  
Deutschen Kalibrierdienst



## Kalibrierschein / Calibration Certificate

erstellt durch das Kalibrierlaboratorium

issued by the calibration laboratory



Deutsche  
Akkreditierungsstelle  
D-K-15106-01-00

**GTM Testing and Metrology GmbH**  
Philipp-Reis-Straße 4-6  
D - 64404 Bickenbach

Kalibrierzeichen Calibration mark	12415
	D-K- 15106-01-00
	2021-10

Gegenstand <i>Object</i>	Mehrkomponentenaufnehmer (6 MK)	<p>Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Die DAkKS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.</p> <p><i>This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DAkKS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.</i></p>
Hersteller <i>Manufacturer</i>	GTM GmbH	
Typ <i>Type</i>	Serie MKA	
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	71059	
Auftraggeber <i>Customer</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt AG 1.22, Darstellung Drehmoment Bundesallee 100 38116 Braunschweig	
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	236205	
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	6	
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	26.10.2021	

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine sind bei Nennung des für die Freigabe Verantwortlichen in Klarschrift auch ohne Unterschrift gültig.  
*This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates with the full name of the approval responsible person are valid without signature.*

Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
26.10.2021	 Schwind	 Raabe

GTM Testing and Metrology GmbH  
Philipp-Reis-Straße 4-6, D-64404 Bickenbach, Tel.: +49 / 6257 / 9720-0, Fax.: +49 / 6257 / 9720-77

Abbildung A.7: Kalibrierschein der 6-Komponentenaufnehmer MKA, Einsatz im Biegefederprüfstand

Seite 2 von 6  
Page of



12415
D-K- 15106-01-00
2021-10

## 1 Kalibriergegenstand

### Calibrated object

Beschreibung: <i>Description</i>	Mehrkomponentenaufnehmer (6 MK)		
Hersteller: <i>Manufacturer</i>	GTM GmbH		
Typ: <i>Type</i>	Serie MKA		
Seriennummer: <i>Serial number</i>	71059		
Baujahr: <i>Year of manufacture</i>	2021		
Nennlasten: <i>Nominal loads</i>	$F_x = 3 \text{ kN}$ $M_x = 200 \text{ N}\cdot\text{m}$	$F_y = 3 \text{ kN}$ $M_y = 200 \text{ N}\cdot\text{m}$	$F_z = 10 \text{ kN}$ $M_z = 200 \text{ N}\cdot\text{m}$
Messbereich: <i>Measurement range</i>	$F_x = 3 \text{ kN}$ $M_x = 200 \text{ N}\cdot\text{m}$	$F_y = 3 \text{ kN}$ $M_y = 200 \text{ N}\cdot\text{m}$	$F_z = 10 \text{ kN}$ $M_z = 200 \text{ N}\cdot\text{m}$
Kabellänge: <i>Cable length</i>	5 m		
Nullsignal: <i>Zero signal</i>	$F_x = 0,00055 \text{ mV/V}$ $M_x = 0,00224 \text{ mV/V}$	$F_y = 0,00327 \text{ mV/V}$ $M_y = -0,00445 \text{ mV/V}$	$F_z = 0,00575 \text{ mV/V}$ $M_z = -0,00222 \text{ mV/V}$
Anschlusstechnik: <i>Connection technology</i>	6-Leitertechnik		
Bemerkung: <i>Comment</i>	--		

## 2 Anzeigegerät

### Indicator

Beschreibung: <i>Description</i>	Digital Amplifier
Hersteller: <i>Manufacturer</i>	GTM GmbH
Typ: <i>Type</i>	MCA 3.0 14-Kanal
Seriennummer: <i>Serial number</i>	51516
Baujahr: <i>Year of manufacture</i>	2006
Speisespannung: <i>Excitation voltage</i>	10 V
Auflösung: <i>Resolution</i>	0,00001 mV/V
Filter / Integrationszeit: <i>Filter / Integration time</i>	100 ms
Tarierautomatik: <i>Automatic taring</i>	off
Autokalibrierung: <i>Autocalibration</i>	off
Bemerkung: <i>Comment</i>	--

GTM Testing and Metrology GmbH

Philipp-Reis-Straße 4-6, D-64404 Bickenbach, Tel.: +49 / 6257 / 9720-0, Fax.: +49 / 6257 / 9720-77

Abbildung A.7: Kalibrierschein der 6-Komponentenaufnehmer MKA, Einsatz im Biegefederprüfstand [Fortsetzung]

Seite 3 von 6  
Page of



12415
D-K- 15106-01-00
2021-10

### 3 Kalibrierverfahren *Calibration procedure*

Der Kalibriergegenstand wurde dreimal mit Messbereichsendlast in der jeweiligen Belastungsrichtung vorbelastet. Vor jeder Benutzung des Kalibriergegenstandes ist diese Vorbelastung zu wiederholen. Die Belastungszeit betrug 30 bis 45 Sekunden.

*The calibrated object was pre-loaded three times in the actual direction with the maximum load of the measurement range. Before each use this pre-loading has to be repeated. The loading time of the various measurement steps was between 30 and 45 seconds.*

### 4 Messbedingungen *Measurement conditions*

#### 4.1 Messeinrichtung *Calibration device*

Beschreibung: <i>Description</i>	6-Komponenten-Messplattform		
Hersteller: <i>Manufacturer</i>	GTM GmbH		
Seriennummer: <i>Serial Number</i>	59755		
Baujahr: <i>Year of manufacture</i>	2013		
Messbereich: <i>Measurement range</i>	$F_x = 3750 \text{ N}$	$F_y = 4330 \text{ N}$	$F_z = 10000 \text{ N}$
	$M_x = 1250 \text{ N}\cdot\text{m}$	$M_y = 1250 \text{ N}\cdot\text{m}$	$M_z = 750 \text{ N}\cdot\text{m}$
Erweiterte rel. Messunsicherheit ( $k=2$ ): <i>Expanded rel. uncertainty (<math>k=2</math>)</i>	0,5 %		
Bemerkung: <i>Comment</i>	--		

#### 4.2 Technische Einzelheiten *Technical details*

Einbaubedingungen: <i>Mounting conditions</i>	--
Koordinatensystem: <i>Coordinate system</i>	Es gilt das Koordinatensystem des Kalibriergegenstandes
Bemerkung: <i>Comment</i>	--

### 5 Umgebungsbedingungen *Ambient conditions*

Raumtemperatur an der Messeinrichtung: <i>Ambient temperature at the calibration device</i>	21,8 °C
Luftdruck: <i>Atmospheric pressure</i>	1012 hPa
Rel. Luftfeuchte: <i>Relative humidity</i>	44 %

GTM Testing and Metrology GmbH

Philipp-Reis-Straße 4-6, D-64404 Bickenbach, Tel.: +49 / 6257 / 9720-0, Fax.: +49 / 6257 / 9720-77

Abbildung A.7: Kalibrierschein der 6-Komponentenaufnehmer MKA, Einsatz im Biegefederprüfstand [Fortsetzung]



12415
D-K- 15106-01-00
2021-10

## 6 Messunsicherheit

### Measurement uncertainty

Im Kalibrierschein sind die erweiterten relativen Messunsicherheiten der Kalibrierung  $W_{\text{Kal}}$  angegeben, die sich aus den Standardmessunsicherheiten durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k=2$  ergeben. Sie wurden gemäß EA-4/02 M: 2013 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Die erweiterte relative Gesamtmessunsicherheit  $W$  ergibt sich aus der erweiterten relativen Messunsicherheit des Bezugsnormals  $W_{\text{BN}}$ , der erweiterten relativen Messunsicherheit des Kalibrierverfahrens  $W_{\text{KV}}$  und der erweiterten relativen Messunsicherheit des Kalibriergegenstandes  $W_{\text{KG}}$ .

Der Messunsicherheitsbeitrag des Kalibriergegenstandes kann mit dem durchgeführten Kalibrierverfahren nicht abgeschätzt werden, die Verantwortung zur Berücksichtigung eines zusätzlichen Anteils obliegt dem Anwender. Ein Anteil für die Langzeitinstabilität des Kalibriergegenstandes ist nicht enthalten.

Die relative Messunsicherheit des Kalibrierverfahrens  $w_{\text{KV}}$  wird aus folgenden Einzelbeiträgen berechnet:

Rel. Messunsicherheitsbeitrag durch Ausrichtung des Koordinatensystems	$W_{\text{Koord}}$
Rel. Messunsicherheitsbeitrag durch Koordinatentransformation	$W_{\text{Trans}}$
Rel. Messunsicherheitsbeitrag durch die Messwertanzeige	$W_{\text{Anz}}$

*Indicated are the expanded relative uncertainties of calibration  $W_{\text{Kal}}$ , resulting from the standard deviation multiplied by the expansion factor  $k=2$ , as given by EA-4/02 M: 2013. The measured values are within the given interval with a probability of 95 %.*

*The expanded relative uncertainty  $W$  results from the expanded relative uncertainty of the measurement facility  $W_{\text{BN}}$ , the expanded relative uncertainty of the calibration procedure  $W_{\text{KV}}$  and the expanded relative uncertainty of the calibration object  $W_{\text{KG}}$ .*

*Caused by the calibration procedure a uncertainty contribution of the calibrated object may not be calculated. The user shall be responsible for the consideration of an additional contribution. The calibration result does not contain any contribution concerning the long-term instability of the calibration object.*

*The relative uncertainty of the calibration procedure  $w_{\text{KV}}$  is calculated from the components of the uncertainty.*

<i>Rel. uncertainty contribution of placement</i>	$W_{\text{Koord}}$
<i>Rel. uncertainty contribution of coordinate transformation</i>	$W_{\text{Trans}}$
<i>Rel. uncertainty contribution of indication</i>	$W_{\text{Anz}}$

$$W = \sqrt{W_{\text{Kal}}^2 + W_{\text{KG}}^2} = \sqrt{W_{\text{BN}}^2 + W_{\text{KV}}^2 + W_{\text{KG}}^2}$$

$$W_{\text{KV}} = k \cdot w_{\text{KV}}$$

$$w_{\text{KV}}^2 = w_{\text{Koord}}^2 + w_{\text{Trans}}^2 + w_{\text{Anz}}^2$$

GTM Testing and Metrology GmbH

Philipp-Reis-Straße 4-6, D-64404 Bickenbach, Tel.: +49 / 6257 / 9720-0, Fax.: +49 / 6257 / 9720-77

Abbildung A.7: Kalibrierschein der 6-Komponentenaufnehmer MKA, Einsatz im Biegefederprüfstand [Fortsetzung]



12415
D-K- 15106-01-00
2021-10

## 7 Messergebnisse Measurement results

### 7.1 Hauptkomponentenempfindlichkeiten Sensitivity to main components

#### Positive Belastung Positive Load

Komponente Component	Last Load		Anzeigewert Indicated value		$W_{\text{Koord}}$	$W_{\text{Trans}}$	$W_{\text{Anz}}$	$W_{\text{Kal}}$
$F_x$	3	kN	1,25929	mV/V	0,03%	0,01%	0,04%	<b>0,51%</b>
$F_y$	3	kN	1,25572	mV/V	0,03%	0,01%	0,04%	<b>0,51%</b>
$F_z$	10	kN	0,91014	mV/V	0,03%	0,01%	0,04%	<b>0,51%</b>
$M_x$	200	N·m	1,59338	mV/V	0,03%	0,07%	0,04%	<b>0,53%</b>
$M_y$	200	N·m	1,59971	mV/V	0,03%	0,07%	0,04%	<b>0,53%</b>
$M_z$	200	N·m	1,45792	mV/V	0,01%	0,01%	0,04%	<b>0,51%</b>

#### Negative Belastung Negative Load

Komponente Component	Last Load		Anzeigewert Indicated value		$W_{\text{Koord}}$	$W_{\text{Trans}}$	$W_{\text{Anz}}$	$W_{\text{Kal}}$
$F_x$	-3	kN	-1,25622	mV/V	0,03%	0,01%	0,04%	<b>0,51%</b>
$F_y$	-3	kN	-1,25625	mV/V	0,03%	0,01%	0,04%	<b>0,51%</b>
$F_z$	-10	kN	-0,91289	mV/V	0,03%	0,01%	0,04%	<b>0,51%</b>
$M_x$	-200	N·m	-1,59224	mV/V	0,03%	0,07%	0,04%	<b>0,53%</b>
$M_y$	-200	N·m	-1,59751	mV/V	0,03%	0,07%	0,04%	<b>0,53%</b>
$M_z$	-200	N·m	-1,45734	mV/V	0,01%	0,01%	0,04%	<b>0,51%</b>

GTM Testing and Metrology GmbH

Philipp-Reis-Straße 4-6, D-64404 Bickenbach, Tel.: +49 / 6257 / 9720-0, Fax.: +49 / 6257 / 9720-77

Abbildung A.7: Kalibrierschein der 6-Komponentenaufnehmer MKA, Einsatz im Biegefederprüfstand [Fortsetzung]



12415
D-K- 15106-01-00
2021-10

## 7.2 NebenkompONENTENEMPfindlichkeiten Sensitivity to tributary components

Messunsicherheit siehe „7.1 Hauptkomponentenempfindlichkeit“  
Measurement uncertainty see „7.1 Sensitivity to main components“

Positive Belastung  
Positive Load

Anzeigewerte Indicated values	Anzeigende Komponente Indicating component					
Belastende Komponente Loading component	$F_x$ mV/V	$F_y$ mV/V	$F_z$ mV/V	$M_x$ mV/V	$M_y$ mV/V	$M_z$ mV/V
$F_x$ 3 kN	---	0,00986	0,00105	-0,01696	0,00110	-0,01321
$F_y$ 3 kN	-0,01735	---	0,00147	-0,01136	0,00011	-0,02657
$F_z$ 10 kN	-0,00742	0,00288	---	0,03441	0,03654	-0,02178
$M_x$ 200 N·m	-0,00484	-0,02932	-0,00275	---	0,00722	0,00579
$M_y$ 200 N·m	0,02840	-0,00587	0,00437	-0,01433	---	-0,00341
$M_z$ 200 N·m	0,01035	-0,01826	-0,00211	-0,00410	0,00307	---

Negative Belastung  
Negative Load

Anzeigewerte Indicated values	Anzeigende Komponente Indicating component					
Belastende Komponente Loading component	$F_x$ mV/V	$F_y$ mV/V	$F_z$ mV/V	$M_x$ mV/V	$M_y$ mV/V	$M_z$ mV/V
$F_x$ -3 kN	---	-0,00994	-0,00012	0,01640	-0,00869	0,01270
$F_y$ -3 kN	0,01441	---	-0,00047	0,01055	0,00791	0,02504
$F_z$ -10 kN	0,00725	-0,00305	---	-0,02702	-0,03369	0,01482
$M_x$ -200 N·m	0,00492	0,02950	0,00151	---	-0,00680	-0,00579
$M_y$ -200 N·m	-0,02838	0,00599	-0,00543	0,01443	---	0,00274
$M_z$ -200 N·m	-0,01032	0,01770	0,00669	0,00271	-0,00175	---

## 7.3 Entkoppelungsmatrix K Decoupling matrix

K	$F_x$ / N	$F_y$ / N	$F_z$ / N	$M_x$ / N·m	$M_y$ / N·m	$M_z$ / N·m
$S_{F_x}$ / mV/V	2385,08	-17,9473	-4,52899	1,65863	-0,49939	1,3819
$S_{F_y}$ / mV/V	29,7346	2389,37	-8,04767	1,13011	0,37757	2,83082
$S_{F_z}$ / mV/V	20,1775	-9,14672	10971,9	-4,26092	-4,81728	2,77138
$S_{M_x}$ / mV/V	8,12117	43,8955	14,0952	125,595	-0,5426	-0,45691
$S_{M_y}$ / mV/V	-42,2575	9,66255	-34,0991	1,13633	125,132	0,2194
$S_{M_z}$ / mV/V	-16,7317	29,652	33,6807	0,27967	-0,19191	137,252

$$F_j = \sum_{F_i} S_{F_i} \cdot K_{ij} \text{ mit } F_j, F_i = (F_x, \dots, M_z)$$

End of Calibration Certificate / Ende des Kalibrierscheins

GTM Testing and Metrology GmbH

Philipp-Reis-Straße 4-6, D-64404 Bickenbach, Tel.: +49 / 6257 / 9720-0, Fax.: +49 / 6257 / 9720-77

Abbildung A.7: Kalibrierschein der 6-Komponentenaufnehmer MKA, Einsatz im Biegefederprüfstand [Fortsetzung]

# A.3 Messhebellänge

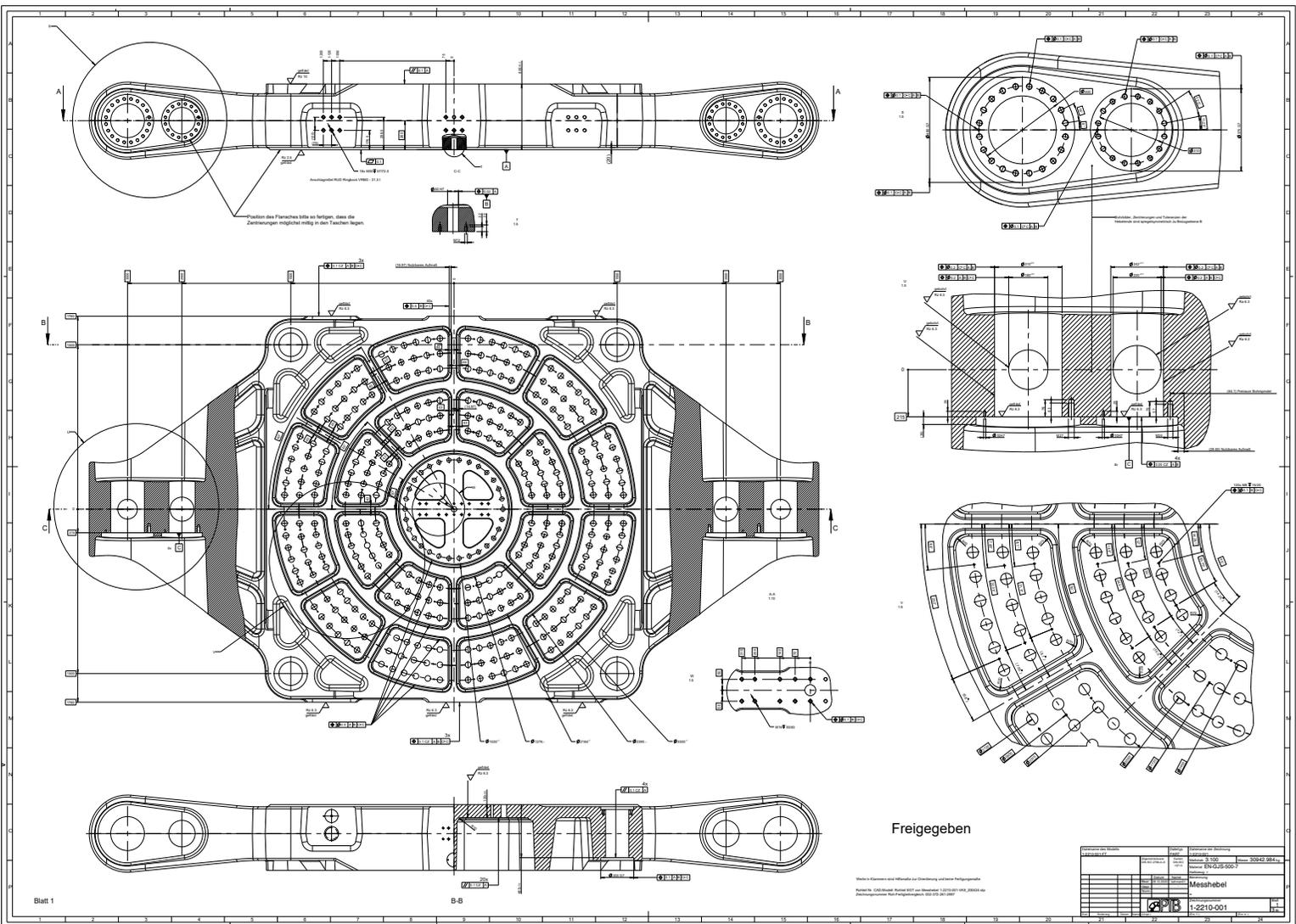


Abbildung A.8: Technische Zeichnungen des Messhebels

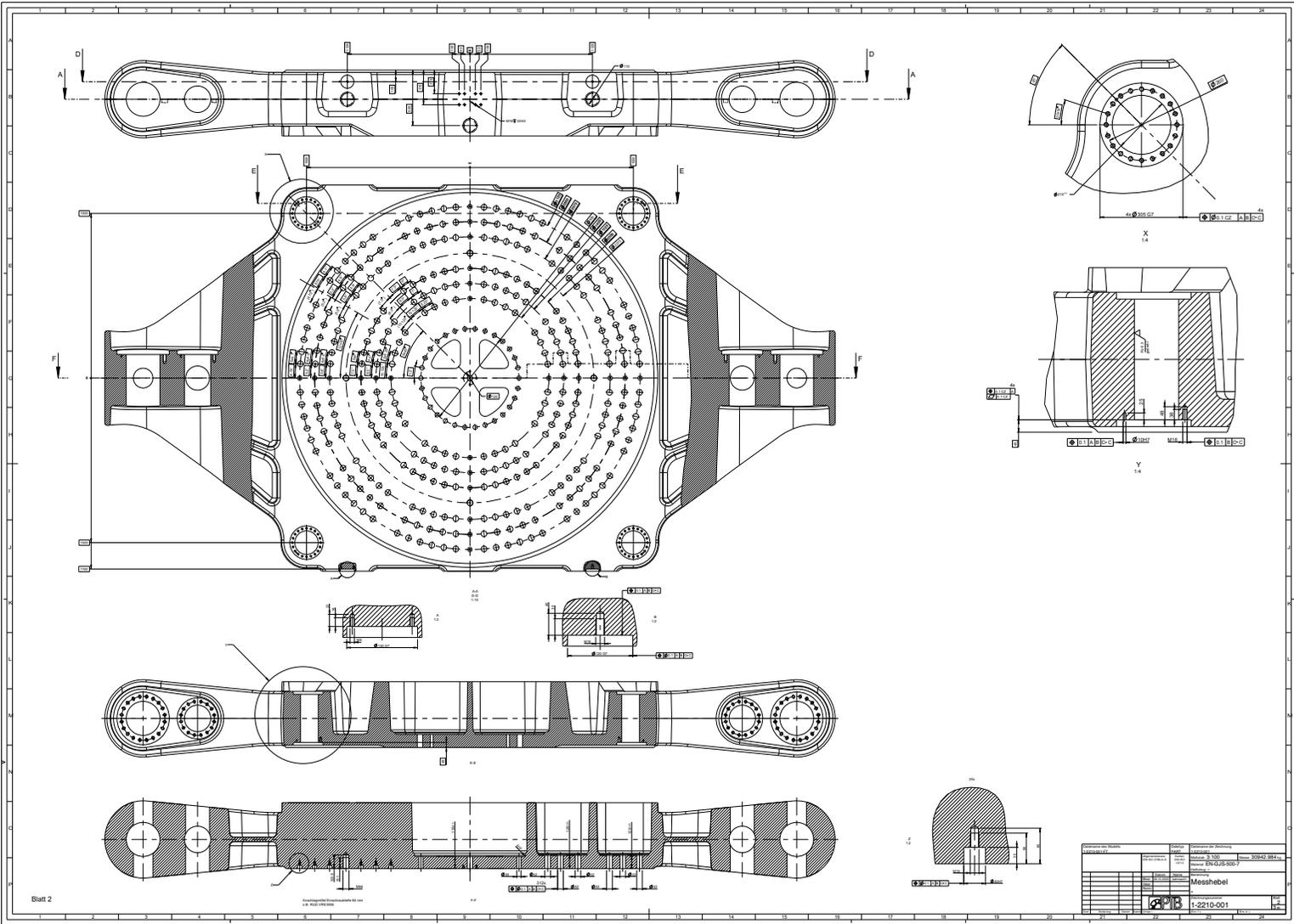
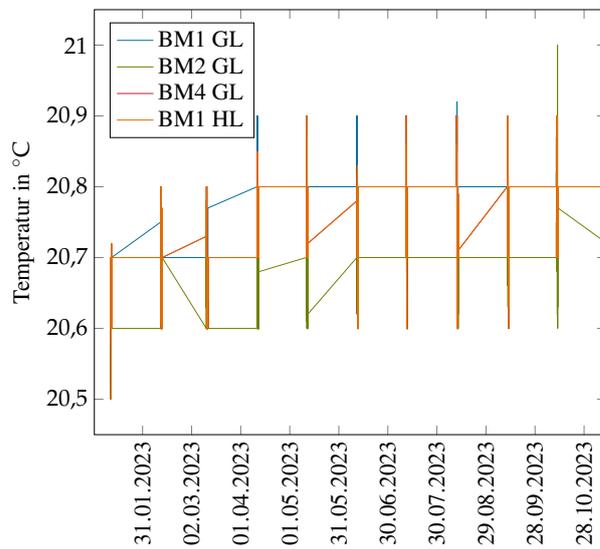
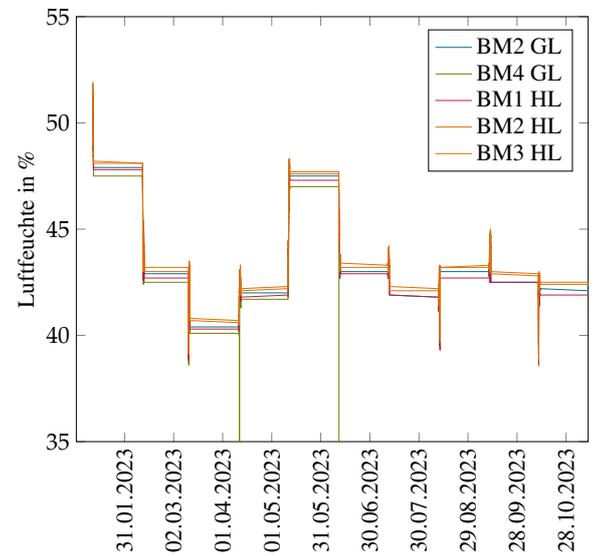


Abbildung A.8: Technische Zeichnungen des Messhebels [Fortsetzung]

## A.4 Umweltbedingungen



(a) Temperaturverlauf in der Messhalle im Jahr 2023



(b) Luftfeuchteverlauf in der Messhalle im Jahr 2023

Abbildung A.9: Klimadaten der Messhalle Euler 2 im Jahr 2023

## A.5 Messverstärker

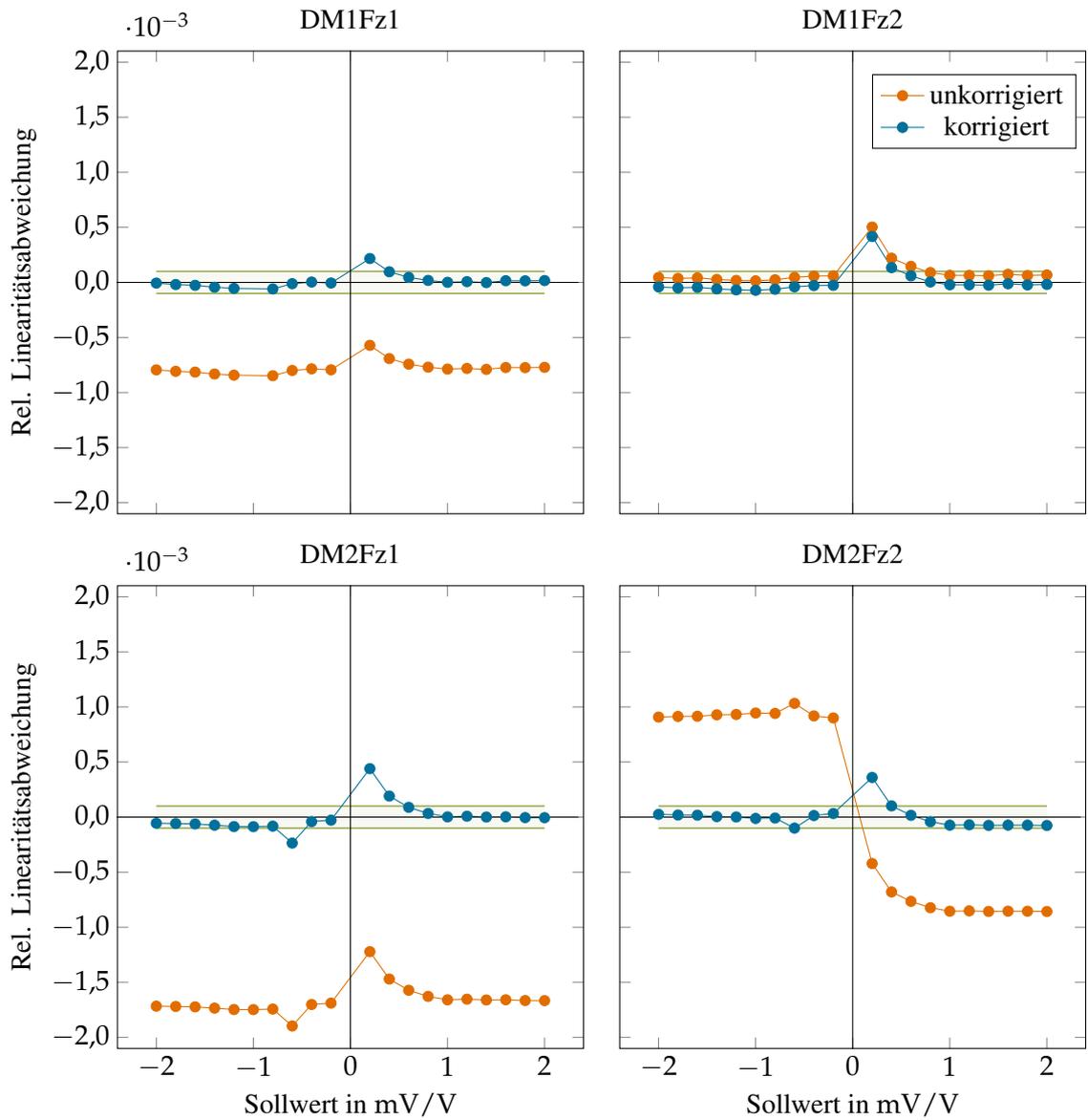


Abbildung A.10: Relative Linearitätsabweichungen des Messverstärker im PCS8000 vor und nach der Korrektur durch eine mittlere Linearitätsabweichung



Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Nationales Metrologieinstitut



## Kalibrierschein

Calibration Certificate

Gegenstand: <i>Object:</i>	Präzisions-Kalibriergerät
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Hottinger Baldwin Messtechnik
Typ: <i>Type:</i>	K 3607
Kennnummer: <i>Serial No.:</i>	1133
Auftraggeber: <i>Customer:</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt AG 1.21 - "Darstellung Kraft" Bundesallee 100 38116 Braunschweig
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	4
Geschäftszeichen: <i>Reference No.:</i>	AG 2.12/20-1306
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	28172 PTB 20
Ort der Kalibrierung: <i>Location of calibration:</i>	PTB Braunschweig
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	2020-08-11
Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>	Braunschweig, 2020-10-05

391 00B 0

  
Dipl.-Ing. (FH) A. Kölling



Im Auftrag  
*On behalf of PTB*

  
M. Hinz

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die kalibrierten Gegenstände.  
*Calibration Certificates without signature and seal are not valid. This Calibration Certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt. The presented results relate only to the items calibrated.*

Abbildung A.11: Kalibrierschein des Brückennormals K3607

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 2020-10-05, Kalibrierzeichen: 28172 PTB 20  
 Page 2 of the Calibration Certificate dated 2020-10-05, calibration mark: 28172 PTB 20

### 1. Kalibriergegenstand

Das Präzisions-Kalibriergerät K 3607 dient zur Simulation der Ausgangsspannung von 350- $\Omega$ -Dehnungsmessstreifen-Vollbrückenaufnehmern. Der Nennwert der Ausgangsspannung, bezogen auf die Eingangsspannung, ergibt sich aus den Einstellungen des Schalters „KALIBRIERWERT“, des Kalibrierstufenschalters „PROZENT VOM KALIBRIERWERT“ und des Polaritätsschalters „-/“.

Das Anschlusskabel in 6-Leiter-Schaltung mit einer Länge von 1 m dient zum Anschluss an die Messeinrichtung und ist somit Bestandteil des Kalibriergerätes.

### 2. Kalibrierverfahren

Zur Kalibrierung mit Wechselspannung wurde das Gerät über das zugehörige Anschlusskabel mit der Messeinrichtung verbunden. Die erdsymmetrische Brückenspeisespannung wurde zwischen den Anschlüssen C und B des Anschlusskabels angelegt. Als Eingangsspannung  $U_e$  wurde die Spannung zwischen den Anschlüssen F und G definiert. Die Ausgangsspannung  $U_a$  wurde zwischen den Anschlüssen A und D abgegriffen; der Anschluss E war geerdet (diese Bezeichnungen der Anschlüsse stimmen mit denen an der Buchse St 1 auf der Gerätefrontseite des Kalibriergerätes überein). Der Messwert ist der Quotient aus dem Wirkanteil der Ausgangsspannung (das ist der in Phase mit der Eingangsspannung liegende Teil) und der Eingangsspannung.

### 3. Messbedingungen

Gemessen wurde mit sinusförmiger Wechselspannung bei folgenden Nennwerten:

Wechselspannungen $U_e$	Frequenz $f$
5,00 V $\pm$ 1%	(225,0 $\pm$ 1,0) Hz
	(600,0 $\pm$ 1,0) Hz
	(4800,0 $\pm$ 1,0) Hz

Die erdsymmetrische Brückenspeisespannung enthielt keinen Gleichspannungsanteil, sie wurde über einen Trenntransformator vom Generator entkoppelt. Der Ausgang wurde bei den Messungen praktisch nicht belastet. Ebenso wurde die Eingangsspannung  $U_e$  von der angeschlossenen Messeinrichtung nur vernachlässigbar gering belastet.

### 4. Umgebungsbedingungen

Umgebungstemperatur:	(23,0 $\pm$ 1,0) °C
Relative Luftfeuchte:	(45 $\pm$ 15) %

### 5. Messergebnisse

Die Messergebnisse sind in der Tabelle auf Seite 3 zusammengestellt. Aufgeführt sind die jeweiligen Korrekturen gemäß der Definition:

$$\text{Messwert} = \text{Nennwert} + \text{Korrektur.}$$

### 6. Messunsicherheit

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k=2$  ergibt. Sie wurde gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt dann im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Überdeckungsintervall.

Seite 3 zum Kalibrierschein vom 2020-10-05, Kalibrierzeichen: 28172 PTB 20  
 Page 3 of the Calibration Certificate dated 2020-10-05, calibration mark: 28172 PTB 20

Tabelle:

Bereich 2 mV/V				
Kalibrierstufe Nennwert in mV/V		Korrekturen in 10 <sup>-3</sup> mV/V		
		225 Hz	600 Hz	4800 Hz
-100 %	- 2,0	-0,03	-0,07	-0,4
-90 %	-1,8	0,02	-0,02	-0,3
-80 %	-1,6	0,06	0,01	-0,3
-70 %	-1,4	0,09	0,05	-0,3
-60 %	-1,2	0,05	0,01	-0,3
-50 %	-1,0	0,02	-0,03	-0,3
-40 %	-0,8	-0,01	-0,06	-0,3
-30 %	-0,6	-0,02	-0,06	-0,3
-20 %	-0,4	-0,03	-0,08	-0,4
-10 %	-0,2	-0,04	-0,08	-0,4
-0 %	- 0,0	-0,03	-0,07	-0,4
0 %	0,0	-0,01	-0,05	-0,3
10 %	0,2	0,00	-0,04	-0,3
20 %	0,4	-0,01	-0,04	-0,3
30 %	0,6	-0,02	-0,06	-0,4
40 %	0,8	-0,02	-0,06	-0,4
50 %	1,0	-0,05	-0,09	-0,4
60 %	1,2	-0,09	-0,13	-0,4
70 %	1,4	-0,13	-0,16	-0,5
80 %	1,6	-0,09	-0,13	-0,4
90 %	1,8	-0,06	-0,10	-0,4
100 %	2,0	-0,01	-0,05	-0,4
Messunsicherheiten in 10 <sup>-3</sup> mV/V		0,10	0,10	0,3

Seite 4 zum Kalibrierschein vom 2020-10-05, Kalibrierzeichen: 28172 PTB 20  
Page 4 of the Calibration Certificate dated 2020-10-05, calibration mark: 28172 PTB 20

**Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter <http://www.bipm.org>).

Diese Aussage und das CIPM-MRA-Logo beziehen sich nur auf die Messergebnisse in diesem Kalibrierschein.



**The Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

The CIPM MRA Logo and this statement attest only to the measurement component of the certificate.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
DEUTSCHLAND

Abbestraße 2-12  
10587 Berlin  
DEUTSCHLAND

PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Nationales Metrologieinstitut

# Nomenklatur

## Lateinische Formelzeichen

$\Delta S_{DMi}$	Eingangsgröße in der Modellgleichung des Kalibrierdrehmoments $M_z$ zur Abschätzung der Unsicherheit des Messverstärkers DMi	mV/V
$\Delta S_{Null,max,MV}$	Spannweite der Nullpunktmessungen des Messverstärkers zur Abschätzung der Langzeitstabilität	mV/V
$\Delta S_{Regress,max,BN}$	Maximale absolute Regressionsabweichung des Brückennormal	mV/V
$\Delta S_{Regress,max,MV}$	Maximale absolute linearen Regressionsabweichung des Messverstärkers	mV/V
$A$	Fläche	m <sup>2</sup>
$a_{S,DMi,Zug/Druck}$	Linearkoeffizient aus dem ODR-Fit der Kalibrierscheindaten zur Bestimmung der Unsicherheitsfortpflanzung der Messverstärkerunsicherheit $\Delta S_{DMi}$	kN/(mV/V)
$b$	Offset als Ergebnis einer Regression für die Biegefedersteifigkeitskalibrierkurve	–
$d$	Wirkabstand	m
$E$	Elastizitätsmodul	N/mm <sup>2</sup>
$F$	Kraft	N
$F_{Ax}$	Axialkraft auf BM-Messtrang im Biegefedersteifigkeits-Prüfstand	N
$F_{BM,SZ}$	Kraft der Biegemoment-Servozyylinder	N
$F_{BM}$	Gemessene Axialkraft in globaler z-Achse des BM-Referenzkraftaufnehmers auf der Messseite	N
$F_{DM,SZ}$	Kraft der Drehmoment-Servozyylinder	N
$F_{DM}$	Gemessene Axialkraft in globaler y-Achse des DM-Referenzkraftaufnehmers auf der Messseite	N
$F_{Kal}$	Kalibrierkraft am Biegefedersteifigkeits-Prüfstand	N
$F_{QK,SZ}$	Kraft der Querkraft-Servozyylinder	N
$F_r$	Relative Kennlinienabweichung	–
$F_T$	Tangentialkraft des Biegemomentstrangs im Kalibrierbetrieb (Nebenschluss Lastfall 1)	N
$F_x$	Kraft in x-Richtung im lokalen oder globalen Koordinatensystem	N
$F_y$	Kraft in y-Richtung im lokalen oder globalen Koordinatensystem	N
$F_z$	Kraft in z-Richtung im lokalen oder globalen Koordinatensystem	N
$G$	Schubmodul	N/mm <sup>2</sup>

$i$	Index des BM-Messstrangs	–
$i$	Laststufe $i$	–
$j$	Index des DM-Messstrangs	–
$k$	Erweiterungsfaktor und statistische Sicherheit zur Darstellung des Überdeckungsintervalls der Messunsicherheit als Vielfaches der Standardabweichung	
$k$	Linearinterpolationskoeffizient als Ergebnis einer Regression für die Biegefedersteifigkeitskalibrierkurve, hier auch synonym als Steifigkeitskoeffizient des entsprechenden Lastfalls verwendet	–
$k$	$k$ -Faktor eines Dehnungsmessstreifen-Messbrücke als Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannungsverhältnis	m
$k_{FT}$	Steifigkeitskoeffizient resultierend aus der Tangentialverschiebung $u_{T,BM}$ und der wirkenden Tangentialkraft $F_{T,BM}$ (Lastfall 1)	N/mm
$k_{FZ}$	Korrekturfaktor des Steifigkeitskoeffizients $k_{MT}$ des Lastfalls 2 zur Kompensation des Axialkrafteinfluss, ermittelt aus FE-Berechnungen	–
$k_{HH}$	Korrekturfaktor des Steifigkeitskoeffizients $k_{MT}$ des Lastfalls 2 zur Kompensation des Höhenunterschieds der zwei verwendeten Reflektoren	–
$k_{MB}$	Steifigkeitskoeffizient resultierend aus der Querverschiebung $u_{B,DM}$ und des wirkenden Biegemoments $M_{B,DM}$ (Lastfall 3)	N·m/mm
$k_{MT}$	Steifigkeitskoeffizient resultierend aus der Torsionswinkel $\gamma_{T,BM}$ und des wirkenden Torsionsmoment $M_{T,BM}$ (Lastfall 2)	N·m/°
$k_{TS}$	Korrekturfaktor des Steifigkeitskoeffizients $k_{MT}$ des Lastfalls 2 zur Kompensation der Torsionssteifigkeiten im Reihenschluss	–
$k_{\alpha,BMi}$	Korrekturfaktor zur Kompensation der verfälschten Rotationsbewegung $u_{T,BMi}$ am Messstrang BMi	–
$k_{\gamma,BMi}$	Korrekturfaktor zur Kompensation des verfälschten Torsionswinkels $\gamma_{T,BMi}$ am Messstrang BMi	–
$l$	Länge	m
$l_0$	Ausgangslänge im unverformten Zustand	m
$l_{MH,1}$	Messhebellänge 1, Abstand zwischen Krafteinleitung bei Messstrang DM1 und dem Messhebelmittelpunkt	mm
$l_{MH,2}$	Messhebellänge 2, Abstand zwischen Krafteinleitung bei Messstrang DM2 und dem Messhebelmittelpunkt	mm
$M$	Drehmoment	N·m
$M_B$	Biegemoment um die globale $z$ -Achse (lokale $y$ -Achse des DM-Messstrangs) auf DM-Messstrang $i$ (Nebenschluss Lastfall 3)	N·m
$M_T$	Torsionsmoment um die $z$ -Achse auf BM-Messstrang im lokalen Koordinatensystem (Nebenschluss Lastfall 2)	N·m
$M_x$	Moment um die $x$ -Achse im lokalen oder globalen Koordinatensystem	N·m

$M_y$	Moment um die y-Achse im lokalen oder globalen Koordinatensystem	N·m
$M_z$	Moment um die z-Achse im lokalen oder globalen Koordinatensystem. Im globalen Koordinatensystem: Kalibrierdrehmoment	N·m
$p$	Druck	Pa
$R$	Elektrischer Widerstand	$\Omega$
$r$	Auflösung des Interferometers angezeigt in Längeneinheiten	mm
$r_{BM}$	Abstand des Referenzpunkts des BM-Messstrangs zum Messhebelmittelpunkt	mm
$r_{DM,FI}$	Abstand des Referenzpunkts des DM-Messstrangs zum Messhebelmittelpunkt	mm
$r_{SP}$	Abstand vom Flächenschwerpunkt bis zu Höhe des Messhebelmittelpunkts	mm
$s_{BM}$	Stellsignal für Servoventil der BM-Servozyylinder	V
$s_{DM}$	Stellsignal für Servoventil der DM-Servozyylinder	V
$s_{Korr}$	Korrektur der Sensitivität des Messverstärker, hier die durch Kalibrierung mit dem Brückennormal ermittelte mittlere Linearitätsabweichung des Messverstärkers	–
$s_{Lin}$	Linearitätsabweichung des Messverstärkers	mV/V
$s_{QK}$	Stellsignal für Servoventil der QK-Servozyylinder	V
$s_{Stab}$	Stabilitätsabweichung des Messverstärkers	mV/V
$U$	Elektrische Spannung	V
$u$	Verschiebung eines Punktes in einem Verformungszustand	mm
$u_0$	Verformungswert vor einer Messreihe der Steifigkeitskoeffizientenermittlung	–
$u_a$	Messbereichsanfang	–
$U_B$	Elektrische Eingangsspannung als Speisespannung der Wheatstoneschen Brückenschaltung	V
$u_f$	Verformungswert nach einer Messreihe der Steifigkeitskoeffizientenermittlung	mm
$u_i$	Anzeigewert einer beliebigen Messung	–
$u_{max}$	Maximaler Verformungswert einer Messreihe der Steifigkeitskoeffizientenermittlung	–
$u_{MB}$	Verschiebung des Referenzpunktes RP eines DM-Messstrangs aufgrund des wirkenden Biegemoment $M_B$ (Lastfall 3)	mm
$u_{MP}$	Verschiebung des Messhebelmittelpunkts während einer Kalibrierung	mm
$U_M$	Elektrische Ausgangsspannung durch Verstimmung des Wheatstoneschen Brückenschaltung als Messsignal	V
$u_m$	Messgröße einer beliebigen Messung	–

$u_{RR}$	Verschiebung des Retroreflektors relativ zum Sensorkopf während der Torsionswinkelmessung $\alpha_z$ am Messhebel bei Durchführung einer Kalibrierung in der 5 MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung	mm
$u_T$	Verschiebung des Referenzpunktes RP eines BM-Messstrangs aufgrund der wirkenden Tangentialkraft $F_T$ (Lastfall 1)	mm
$w$	Messunsicherheitsbeitrag	–
$W_{BN}$	Absolute Messunsicherheit des Brückennormals	mV/V
$w_{Last}$	Relativer Messunsicherheitsbeitrag der Lastmessung bei der Biegefedersteifigkeitsvermessung	–
$W_{MV}$	Absolute Messunsicherheit des Messverstärkers	mV/V
$W_{Regress,max,BN}$	Absolute Unsicherheit der Regressionsanalyse nach Kalibrierung des Brückennormals, abgeschätzt durch maximale Abweichung	mV/V
$W_{Regress,max,MV}$	Absolute Unsicherheit der Regressionsanalyse nach Abgleich mit dem Brückenormal, abgeschätzt durch maximale Abweichung	mV/V
$W_{Resol}$	Absolute Messunsicherheit des Messverstärker durch die Auflösung	mV/V
$W_{Stab,MV}$	Absolute Messunsicherheit durch Langzeitstabilität des Messverstärkers	mV/V
$w_{Verformung}$	Relativer Messunsicherheitsbeitrag der Verformungsmessung bei der Biegefedersteifigkeitsvermessung	–
$x$	Position der x-Achse im Koordinatensystem	m
$x$	Zufallsvariable	–
$y$	Position der y-Achse im Koordinatensystem	m
$y$	Zufallsvariable	–
$z$	Position der z-Achse im Koordinatensystem	m

**Griechische Formelzeichen**

$\alpha_{B,0}$	Winkel zwischen Abstand des DM-Messstrangs $r_{DM,Fl}$ und der globalen x-Achse	°
$\alpha_B$	Summe aus $\alpha_{B,0}$ und des Messhebeltorsionswinkel $\alpha_z$	°
$\alpha_{DMj}$	Fertigungsbedingte Winkelabweichung DM-Kraftaufnehmer-Vektors gegenüber der globalen y-Achse	°
$\alpha_k$	Temperaturabhängigkeit des DMS-k-Faktors	1/K
$\alpha_T$	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient	1/K
$\alpha_z$	Torsionswinkel des Hebels um die z-Achse	°
$\Delta\alpha_{FL}$	Unsicherheit der Neigung eingemessenen Messhebelflanschfläche	°
$\gamma$	Schubwinkel	–
$\gamma_{BMi}$	Torsionswinkel der Biegefeder des Biegemoment-Messstrangs i unter dem Torsionsmoment $M_T$ (Lastfall 2)	°
$\nu$	Poisson-Zahl	–

$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \cdot \text{m}$
$\sigma$	Normalspannung	$\text{N}/\text{mm}^2$
$\varepsilon$	Dehnung	$\text{mm}/\text{mm}$
$\varepsilon_Q$	Querdehnung	$\text{mm}/\text{mm}$

### Abkürzungen und Indizes

AP	Arbeitspunkt während des Einbaus des Kalibriergegenstands
B	Betriebswinkel (Winkel nach Rotation für Referenzpunkt DM-Messstrang)
BF	Biegefeder
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BM	Biegemoment
BN	Brückennormal
CAD	Computer-aided design
CWD	Center for Wind Power Drives
D-NME	Drehmoment-Normalmesseinrichtung
DM	Drehmoment
DMS	Dehnungsmessstreifen
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FE	Finite Elemente
FL	Flansch
FT	Tangentialkraft auf BM-Messstrang (Nebenschluss Lastfall 1)
FZ	Axialkraft
GL	Gegenlager
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
HH	Höhenversatz
HL	Hebel
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme
K-NME	Kraft-Normalmesseinrichtung
KA	Kraftaufnehmer
KE	Krafteinleitung
LF	Lastfall für die Nebenschlüsse
MB	Biegemoment auf DM-Messstrang (Nebenschluss Lastfall 3)
MH	Messhebel
MP	Mittelpunkt
MPE	Maximum permissible error
MT	Torsionsmoment auf BM-Messstrang (Nebenschluss Lastfall 2)
ODR	Orthogonal Distance Regression
PDF	Probability density function
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QK	Querkraft
RMS	Residual mean square

RR	Retroreflektor
RSS	Root sum squared
Stab	Stabilität
SZ	Servozyylinder
T	Temperatur/ Thermisch
TS	Torsionssteifigkeit
VIM	Internationales Wörterbuch der Metrologie (International vocabulary of metrology)
VVB	Vorverstärkerbox
WEA	Windenergieanlage

# Literatur

- [1] *EU Wind Power Action Plan: COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS*. Brüssel, 2023-10-24. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0669&qid=1702455143415> (Abruf am 26.03.2024).
- [2] Bundesministerium der Justiz. *Bundes-Klimaschutzgesetz: KSG*. 2021-08-18. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html> (Abruf am 26.03.2024).
- [3] Nejad, A. R. u. a. *Wind turbine drivetrains: state-of-the-art technologies and future development trends*. 2021. DOI: 10.5194/wes-2021-63.
- [4] CWD, Hrsg. *Brochüre Center for Wind Power Drive RWTH Aachen*. 2023. URL: [https://www.cwd.rwth-aachen.de/global/show\\_document.asp?id=aaaaaaaaabxyjvmm](https://www.cwd.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabxyjvmm) (Abruf am 26.03.2024).
- [5] Fraunhofer IWES, Hrsg. *Datenblatt Dynamic Nacelle Laboratory (DyNaLab)*. 2022. URL: [https://www.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes/dokumente/englisch/information-material/factsheets/IWES\\_Datenblatt\\_DyNaLab\\_en.pdf](https://www.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes/dokumente/englisch/information-material/factsheets/IWES_Datenblatt_DyNaLab_en.pdf) (Abruf am 26.03.2024).
- [6] Deutsche WINDGUARD, Hrsg. *Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland - Jahr 2022*. 2023. URL: [https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto\\_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2023/Status%20des%20offshore-Windenergieausbaus\\_Jahr%202022.pdf](https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2023/Status%20des%20offshore-Windenergieausbaus_Jahr%202022.pdf) (Abruf am 26.03.2024).
- [7] Deutsche WINDGUARD, Hrsg. *Status des Windenergieausbaus in Deutschland an Land - Jahr 2022*. 2023. URL: [https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto\\_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2023/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land\\_Jahr%202022.pdf](https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2023/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Jahr%202022.pdf) (Abruf am 26.03.2024).
- [8] Gnauert, J. u. a. „Measurement uncertainty estimation of a novel torque transducer for wind turbine test benches“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1065 (2018), S. 042050. DOI: 10.1088/1742-6596/1065/4/042050.
- [9] *EMPIR 14IND14 project: Torque measurement in the MN · m range*. 2024. URL: <https://www.ptb.de/empir/ind14-home.html>.
- [10] Weidinger, P. u. a. „Investigations towards extrapolation approaches for torque transducer characteristics“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1065 (2018), S. 042057. DOI: 10.1088/1742-6596/1065/4/042057.
- [11] Deutsches Institut für Normung. *Werkstoffprüfmaschinen - Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente*. Berlin. DOI: 10.31030/3352793.
- [12] JCGM, Hrsg. *Guide to the expression of uncertainty in measurement: Evaluation of measurement data*. 2008. URL: [http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf) (Abruf am 10.01.2017).

- [13] Bundesministerium der Justiz. *Gesetz über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung (Einheiten- und Zeitgesetz): EinhZeitG*. 1969-07-02. URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/me\\_einhg/BJNR007090969.html](https://www.gesetze-im-internet.de/me_einhg/BJNR007090969.html) (Abruf am 26.03.2024).
- [14] PTB. *Gesetzliche Aufgaben der PTB*. Hrsg. von Physikalisch-Technische Bundesanstalt. 2009. URL: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/allgemeine\\_dokumente/Liste\\_der\\_gesetzlichen\\_Aufgaben\\_der\\_PTB.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/allgemeine_dokumente/Liste_der_gesetzlichen_Aufgaben_der_PTB.pdf).
- [15] *Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM); deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007*. 3. Aufl. Beuth Wissen. Berlin: Beuth, 2010. ISBN: 978-3-410-20070-3.
- [16] Puente León, F. *Messtechnik: Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker*. 10. Auflage. Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-662-44820-5.
- [17] Deutsches Institut für Normung. *Grundlagen der Meßtechnik: Teil 1: Grundbegriffe*. 1995-01-01. DOI: 10.31030/2713411.
- [18] Wübbeler, G. *Grundlagen der Messunsicherheitsbestimmung mittels Bayesscher Statistik (Internes PTB-Dokument)*. 2016.
- [19] Mieke, S. *Bestimmung der Messunsicherheit nach den Regeln des GUM: Guide to the expression of uncertainty in measurement (Internes PTB-Dokument)*. 2016.
- [20] Assmann, B. und Selke, P. *Statik*. 19., überarb. Aufl. Bd. Bd. 1. Oldenbourg Lehrbücher für Ingenieure. München: Oldenbourg, 2010. ISBN: 978-3-486-59133-0.
- [21] Müller, W. H. und Ferber, F. *Technische Mechanik für Ingenieure: Mit zahlreichen Abbildungen sowie Aufgaben und Lösungen im Internet*. 5., überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2019. ISBN: 978-3-446-46117-8.
- [22] Precht, M. *Mathematik 1 für Nichtmathematiker: Grundbegriffe - Vektorrechnung - Lineare Algebra und Matrizenrechnung - Kombinatorik - Wahrscheinlichkeitsrechnung*. s.l.: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012. ISBN: 1306779987.
- [23] Böge, A. und Böge, W. *Technische Mechanik: Statik - Reibung - Dynamik - Festigkeitslehre - Fluidmechanik*. 31., überarbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-658-09154-5.
- [24] Gross, D. u. a. *Elastostatik*. 14., überarbeitete Auflage. Bd. 2. Technische Mechanik / Dieter Gross, Werner Hauger, Jörg Schröder, Wolfgang A. Wall. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021. ISBN: 978-3-662-61862-2.
- [25] M. Hennecke und B. Skrotzki, Hrsg. *Hütte*. 35. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2022. ISBN: 978-3-662-64371-6.
- [26] E. Hering und G. Schönfelder, Hrsg. *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018. ISBN: 978-3-658-12561-5.
- [27] Kleckers, T. *Die Qual der Wahl: Piezoelektrische oder DMS-basierte Kraftaufnehmer?* Hrsg. von Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. 24.03.23. URL: [https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/files/technical-articles-technotes-white-papers/Piezoelektrische\\_oder\\_DMS-basierte\\_Kraftaufnehmer.pdf](https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/files/technical-articles-technotes-white-papers/Piezoelektrische_oder_DMS-basierte_Kraftaufnehmer.pdf) (Abruf am 23.03.2023).

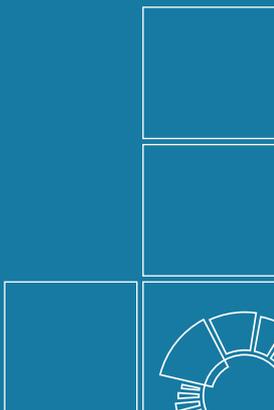
- [28] Kleckers, T. *Wie funktioniert eigentlich ein ... Piezo-Kraftaufnehmer*. Hrsg. von Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. 24.03.23. URL: <https://www.hbm.com/de/7318/wie-funktioniert-eigentlich-ein-piezo-kraftaufnehmer/> (Abruf am 24.03.2023).
- [29] Keil, S. *Dehnungsmessstreifen*. 2., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-658-13612-3.
- [30] Keil, S. „Messtechnische Briefe: MTB“. In: *Hottinger-Hotline / Deutsche Ausgabe* (1965).
- [31] Hoffmann, K. *Eine Einführung in die Technik des Messens mit DMS*. Hrsg. von Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Darmstadt, 1987. URL: [https://www.hbm.com/de/0112/fachbuch-eine-einfuehrung-in-die-technik-des-messens-mit-dehnungsmessstreifen/?hsa\\_acc=3043843200&hsa\\_ad=&hsa\\_cam=18824231000&hsa\\_grp=&hsa\\_kw=&hsa\\_mt=&hsa\\_net=adwords&hsa\\_src=x&hsa\\_tgt=&hsa\\_ver=3&cHash=2835cdeff2c656dfe24a3a39b0da5578&gclid=EAiaIQobChMIvuzR5Yz0\\_QIVRo9oCR3p\\_w2ZEAAAYASAAEgKqH\\_D\\_BwE&utm\\_campaign=Leads\\_Performance\\_Max\\_Torque\\_T210\\_DE&utm\\_medium=ppc&utm\\_source=adwords&utm\\_term=](https://www.hbm.com/de/0112/fachbuch-eine-einfuehrung-in-die-technik-des-messens-mit-dehnungsmessstreifen/?hsa_acc=3043843200&hsa_ad=&hsa_cam=18824231000&hsa_grp=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_ver=3&cHash=2835cdeff2c656dfe24a3a39b0da5578&gclid=EAiaIQobChMIvuzR5Yz0_QIVRo9oCR3p_w2ZEAAAYASAAEgKqH_D_BwE&utm_campaign=Leads_Performance_Max_Torque_T210_DE&utm_medium=ppc&utm_source=adwords&utm_term=) (Abruf am 24.03.2023).
- [32] Röske, D. „Die Messung des Drehmoments: Von der Schraube bis zur Turbinenwelle“. In: *PTB-Mitteilungen* 118.3 (2008), S. 158–165. URL: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb\\_mitteilungen/mitt2008/Heft3/PTB-Mitteilungen\\_2008\\_Heft\\_3.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_mitteilungen/mitt2008/Heft3/PTB-Mitteilungen_2008_Heft_3.pdf) (Abruf am 04.04.2023).
- [33] Adolf, K., Mauersberger, D. und Peschel, D. „Specifications and Uncertainty of Measurement of the PTB’s 1 kNm Torque Standard Machine“. In: *Proceedings of IMEKO TC3*. Warschau, 1995, S. 174–176.
- [34] Peschel, D. u. a. „The new 1.1 MN · m torque standard machine of the PTB Braunschweig/Germany“. In: *Proceedings of the IMEKO TC3*. Cairo, 2005.
- [35] Schlegel, C., Kahmann, H. und Kumme, R. „MN · m torque calibration for nacelle test benches using transfer standards“. In: *ACTA IMEKO* 2016.4 (). ISSN: 2221-870X.
- [36] Kahmann, H. u. a. „Principle and Design of a 5 MN · m Torque Standard Machine“. In: *Proceedings of the IMEKO TC3*. Helsinki, 2017.
- [37] Kahmann, H. u. a. „Design der 5 MN · m Drehmoment-Normalmeseinrichtung“. In: *tm - Technisches Messen* 90.9 (2023), S. 576–585. DOI: 10.1515/teme-2023-0057.
- [38] Kahmann, H. u. a. „FINAL DESIGN OF PTB’S 5 MN · m TORQUE STANDARD MACHINE WITH POSSIBLE FUTURE EXTENSION TO 20 MN · m“. In: *Proceedings of the 24th IMEKO TC3 Conference on Measurement of Force, Mass and Torque*. Budapest: IMEKO, 2023, S. 1–5. DOI: 10.21014/tc3-2022.076.
- [39] Interface e. K., Hrsg. *Datenblatt 12x8 Dauerschwingfester Kraftaufnehmer mit Flanschmontage*. Sep. 2015. URL: <https://www.interfaceforce.com/products/load-cells/low-profile-load-cells/1208-flange-standard-precision-universal-lowprofile-load-cell/> (Abruf am 21.06.2024).
- [40] HBM, Hrsg. *Datenblatt Sonder-Drehmomentaufnehmer 5000 kNm*. 9. Okt. 2015.

- [41] Leica Geosystems, Hrsg. *Datenblatt AT960 Lasertracker*. Juli 2015. URL: <https://hexagon.com/de/products/leica-absolute-tracker-at960?accordId=E4BF01077B2743729F2C0E768C0BC7AB> (Abruf am 21.06.2024).
- [42] Leica Geosystems, Hrsg. *The Leica Absolute Interferometer*. Dez. 2008. URL: <https://hexagon.com/de/products/leica-absolute-tracker-at960?accordId=E4BF01077B2743729F2C0E768C0BC7AB> (Abruf am 21.06.2024).
- [43] Marxer, M., Bach, C. und Keferstein, C. P. *Fertigungsmesstechnik: Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik*. 10., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021. ISBN: 978-3-658-34168-8.
- [44] Europäisches Komitee für Normung. *Metallische Werkstoffe - Kalibrierung für Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung*. 2011-09-01. DOI: 10.31030/1751519.
- [45] Geva, K. u. a. „Analysis of the measurement uncertainty of a new measurement flexure calibration set-up“. In: *ACTA IMEKO* 9.5 (2020), S. 173. DOI: 10.21014/acta\textunder score.
- [46] GTM Testing and Metrology GmbH, Hrsg. *Datenblatt des Mehrkomponentenaufnehmers der Serie MKA*. URL: [https://www.gtm-gmbh.com/fileadmin/08\\_Downloads/Datenblaetter/Mehrkomponentenaufnehmer/MKA/Datenblatt\\_Serie\\_MKA.pdf](https://www.gtm-gmbh.com/fileadmin/08_Downloads/Datenblaetter/Mehrkomponentenaufnehmer/MKA/Datenblatt_Serie_MKA.pdf) (Abruf am 04.06.2024).
- [47] SIOS Messtechnik GmbH, Hrsg. *Datenblatt Dreistrahl-Interferometer mit Planspiegelreflektor: Serie SP-TR*. 2014.
- [48] Geva, K. u. a. „Measurement uncertainty analysis of a measurement flexure hinge in a torque standard machine“. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 11.2 (2022), S. 201–209. DOI: 10.5194/jsss-11-201-2022.
- [49] Hedderich, J. und Sachs, L. *Angewandte Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-662-62294-0.
- [50] Pallavi u. a. „Comprehensive Review of Orthogonal Regression and Its Applications in Different Domains“. In: *Archives of Computational Methods in Engineering* 29.6 (2022), S. 4027–4047. DOI: 10.1007/s11831-022-09728-5.
- [51] Boggs, P. T. u. a. *ODRPACK: Software for Weighted Orthogonal Distance Regression*. 1992. URL: [https://docs.scipy.org/doc/external/odrpac\\_guide.pdf](https://docs.scipy.org/doc/external/odrpac_guide.pdf) (Abruf am 21.06.2024).
- [52] Messwelk GmbH, Hrsg. *Neigungssensor ZEROMATIC 2/2*. URL: [https://www.messwelk.de/Gesamtkatalog/#page\\_78](https://www.messwelk.de/Gesamtkatalog/#page_78) (Abruf am 21.06.2024).
- [53] Wendt, K. *Messeinrichtung zur Charakterisierung mobiler 3D-Messsysteme wie Lasertracker*. 2009. URL: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_5/5.3\\_koordinatenmesstechnik/Messgeraete\\_Bilder/5.3\\_Flyer/PTB\\_OptRefWall\\_2009\\_de.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_5/5.3_koordinatenmesstechnik/Messgeraete_Bilder/5.3_Flyer/PTB_OptRefWall_2009_de.pdf) (Abruf am 23.04.2024).

- [54] Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Hrsg. *Zeiss TEMPAR Brochüre*. 2024. URL: <https://www.zeiss.de/messtechnik/services/zubehoer/messraumausstattung/tempar.html> (Abruf am 21.06.2024).
- [55] HBK. *Datenblatt des Brückennormals K3607: K3607; Kalibriergerät; Datenblatt; B00339*. Hrsg. von HBK. 2024. URL: <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B00339.pdf> (Abruf am 23.04.2024).
- [56] Walter + Bai ag, Hrsg. *Digitalregler Digital Controller: Series PCS8000 Version 3.6: Operation Manual*. 17. Feb. 2022. URL: [https://www.walterbai.com/page/documents/Brochures/PCS-8000\\_E.pdf](https://www.walterbai.com/page/documents/Brochures/PCS-8000_E.pdf) (Abruf am 21.06.2024).







**Herausgeber:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

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