

# Experimentelle Untersuchung von Halbleiter-Dehnungsmessstreifen für den Einsatz in Kraftsensoren eines humanoiden Roboters

Experimental Investigation of Semiconductor Strain Gauges for use in Force Sensors of a Humanoid Robot

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades  
Bachelor of Science (B.Sc.)

an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München

**Themenstellende/r** Prof. dr.ir. Daniel J. Rixen  
Lehrstuhl für Angewandte Mechanik

**Betreuer/Betreuerin** Felix Sygulla, M.Sc.  
Lehrstuhl für Angewandte Mechanik

**Eingereicht von** Daniel Pölzleitner  
Brahmsstraße 9  
81677 München  
+43 664 1362092

**Eingereicht am** 9. Dezember 2020 in Garching



## **Abstract**

The topic of this thesis is the design improvement for the 6D force/torque sensor of the humanoid robot LOLA by the use of semiconductor strain gauges. The behaviour of metallic and semiconductor strain gauges in combination with the respective sensor is compared regarding non-linearity, temperature behaviour and behaviour under dynamic load. Based on the results of the experimental investigation the mechanical structure of the sensor is adapted to the requirements of semiconductor strain gauges and an alignment and press device for the bonding process is developed. Furthermore, a new calibration method, which takes the non-linearities of the sensor into account, is implemented. By using semiconductor strain gauges and applying the corresponding calibration procedure, more accurate measurements with lower measurement noise are now possible with the sensor.

## **Zusammenfassung**

Diese Arbeit befasst sich mit der Weiterentwicklung des 6D Kraft-/Momentensensors des humanoiden Roboters LOLA durch den Einsatz von Halbleiter-Dehnungsmessstreifen. Es wird das Verhalten von metallischen und Halbleiter-Dehnungsmessstreifen in Kombination mit dem betreffenden Sensor bezüglich Nichtlinearität, Temperaturverhalten und Verhalten bei dynamischer Belastung verglichen. Aufgrund der Erkenntnisse aus der experimentellen Untersuchung wird die mechanische Struktur des Sensors auf die Anforderungen von Halbleiter-Dehnungsmessstreifen angepasst und eine Ausricht- und Anpressvorrichtung für den Klebevorgang entwickelt. Des Weiteren wird ein neues Kalibrierverfahren, welches die Nichtlinearitäten des Sensors berücksichtigt, implementiert. Durch die Verwendung von Halbleiter-Dehnungsmessstreifen und Anwendung des entsprechenden Kalibrierverfahrens sind nun genauere Messungen mit geringerem Messrauschen mit dem Sensor möglich.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziele der Arbeit . . . . .	2
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Kraftmessverfahren . . . . .	5
2.1.1	Metallische Dehnungsmessstreifen . . . . .	5
2.1.2	Halbleiter-Dehnungsmessstreifen . . . . .	8
2.1.3	Wheatstone'sche Messbrücke . . . . .	9
2.1.4	Faser-Bragg-Sensoren . . . . .	12
2.1.5	Piezoelektrische Kraftsensoren . . . . .	13
2.1.6	Kapazitive Kraftsensoren . . . . .	14
2.2	Bauformen von 6D Kraft-/Momentensensoren für Roboter . . . . .	15
2.2.1	Balken Bauform . . . . .	15
2.2.2	Sensoren basierend auf der Stewart Plattform . . . . .	18
2.2.3	Weitere Bauformen . . . . .	18
2.2.4	Sensoren für spezielle Bedingungen . . . . .	19
2.2.5	6D Kraft-/Momentensensoren bei humanoiden Robotern . . . . .	21
2.3	Kalibrierung von 6D Kraft-/Momentensensoren . . . . .	22
2.3.1	Least-Squares Verfahren . . . . .	22
2.3.2	Nichtlineares Least-Squares Verfahren . . . . .	23
2.3.3	Shape from Motion Verfahren . . . . .	23
2.3.4	Device Hyperplane Characterization Verfahren . . . . .	23
2.3.5	Maximum Likelihood Methode . . . . .	24
2.3.6	Kalibrierverfahren mit neuronalen Netze . . . . .	24
2.3.7	Kalibrierfehler durch Temperaturdifferenzen und ex situ Kalibrierung . . . . .	24
2.4	6D Kraft-/Momentensensor beim humanoiden Roboter LOLA . . . . .	25
2.4.1	Sensorgehäuse . . . . .	25
2.4.2	Zusammenbau . . . . .	25
2.4.3	Kalibrierung . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Entwicklung und Fertigung eines Prüfstands</b>	<b>29</b>
3.1	Auswahl der DMS . . . . .	29
3.2	Konzeption und Entwicklung eines Prüfstands . . . . .	30
3.2.1	Finale Konstruktion . . . . .	32
3.2.2	Prüfstand für dynamische Messungen . . . . .	33
3.3	Verkleben der DMS . . . . .	34
3.3.1	Markier- und Anpressvorrichtungen . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der DMS</b>	<b>37</b>
4.1	Messkette . . . . .	37

4.2	Anfängliche Probleme bei den Messungen . . . . .	38
4.3	Kraft- und Momentenmessungen . . . . .	41
4.3.1	Versuchsaufbau und Durchführung der Messungen . . . . .	41
4.3.2	Auswertung der Kraftmessungen . . . . .	42
4.3.3	Auswertung der Momentenmessungen . . . . .	47
4.4	Temperatureinfluss . . . . .	50
4.4.1	Auswertung der Temperaturmessungen ohne Belastung . . . . .	50
4.4.2	Auswertung der Temperaturmessungen mit Belastung . . . . .	50
4.5	Lichteinfluss . . . . .	54
4.6	Drift . . . . .	54
4.7	Dynamische Messungen . . . . .	56
4.7.1	Versuchsaufbau und Durchführung der Messungen . . . . .	56
4.7.2	Auswertung der dynamischen Messungen . . . . .	56
4.8	Bewertung der Messergebnisse . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Konstruktive Änderungen und Fertigung des Sensors</b>	<b>63</b>
5.1	Konstruktive Änderungen am Sensor . . . . .	63
5.2	Gewichtvergleich . . . . .	67
5.3	Fertigung des Sensors . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Kalibrierung des Sensors</b>	<b>69</b>
6.1	Kalibrieralgorithmus . . . . .	70
6.2	Kalibriermessungen . . . . .	72
6.2.1	Aufbau der Kalibriermessungen . . . . .	72
6.2.2	Durchführung der Kalibriermessungen . . . . .	72
6.3	Auswertung der Ergebnisse . . . . .	73
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>79</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	79
7.2	Ausblick . . . . .	80
<b>A</b>	<b>Klebeanleitung für die DMS</b>	<b>81</b>
A.1	Benötigte Werkzeuge, Vorrichtungen und Materialien . . . . .	81
A.2	Oberflächenvorbereitung . . . . .	81
A.3	Klebevorgang . . . . .	82
A.4	Aushärten . . . . .	83
A.5	Verdrahten und Versiegeln . . . . .	84
<b>B</b>	<b>Diagramme aus der experimentellen Untersuchung der DMS</b>	<b>87</b>
<b>C</b>	<b>Kalibrierfehler</b>	<b>99</b>
	<b>Literatur</b>	<b>105</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

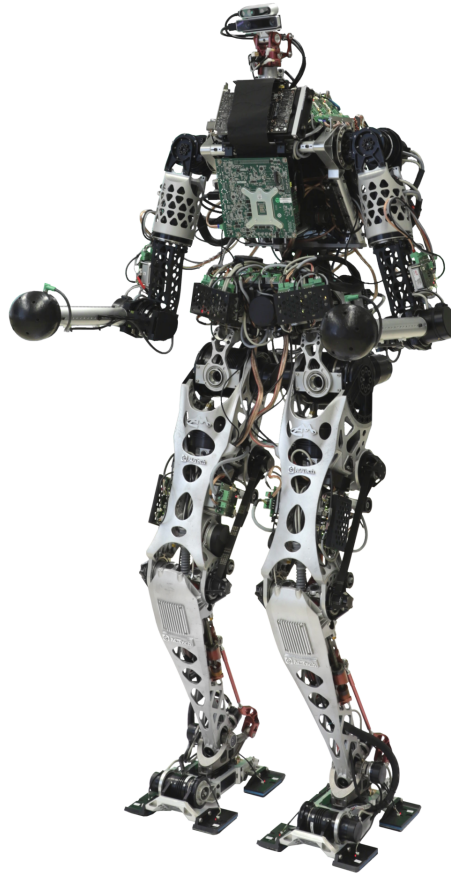
Humanoide Roboter sind durch ihr menschenähnliches Design sehr gut für Umgebungen geeignet, die für den Mensch geschaffen wurden. Bereits ohne besondere künstliche Intelligenz zeigen sich die Vorteile in solchen Umgebungen. Zum Beispiel können humanoide Roboter im Gegensatz zu radgetriebenen Robotern Treppensteigen oder über und auf Hindernisse steigen. All das macht sie ideal für den Einsatz zur Assistenz von Menschen zum Beispiel in der Pflege, in Fabriken und vielen weiteren Einsatzgebieten. Außerdem wird durch Forschung an humanoiden Robotern die Entwicklung in vielen mechatronischen Bereichen vorangetrieben. [4, 20]

Für die Regelung und Stabilität des Gangs humanoider Roboter ist es wichtig die genauen Kontaktkräfte und -momente am Fuß zu kennen. Eine stabile Oberkörperposition wird über die Kontaktmomente geregelt und eine Stoßdämpfung beim Erstkontakt mit dem Boden über die Kontaktkräfte. Für die meisten Regelungsstrategien reicht es die Normalkraft und die seitlichen Momente zu kennen. Für komplexere werden allerdings auch die Tangentialkräfte und das Moment um die vertikale Achse benötigt. Zur Bestimmung dieser Lasten werden meistens Kraft-Momentensensoren verwendet. Für diese gibt es verschiedenste Bauweisen und Methoden zur Kraftmessung. Im Fall von LOLA, dem 26 DoF humanoiden Roboter des Lehrstuhls für Angewandte Mechanik, ist dies ein 6D-Kraft-/Momentensensor basierend auf metallischen Dehnungsmessstreifen (DMS) in Malteserkreuz Bauweise. [20]

Seit der Entwicklung dieses Sensors im Jahre 2007 hat sich der Stand der Technik verändert und es werden vermehrt Halbleiter DMS für Kraft-/Momentensensoren verwendet. Diese versprechen aufgrund ihres hohen Verstärkungsfaktors, welcher bis zu 100-mal höher ist als bei herkömmlichen metallischen DMS, eine höhere Empfindlichkeit und ein besseres Rauschverhalten. Beim aktuell verwendeten Sensor stellt das hohe Messrauschen noch ein großes Problem dar. Es führt zu ungenauen Messungen und kleine Lasten können unter Umständen gar nicht gemessen werden. Es sind allerdings auch Nachteile gegenüber metallischen DMS wie ein nichtlineares Verhalten oder eine starke Temperaturabhängigkeit bekannt.

Wie schon beim bereits eingesetzten Sensor [30] muss auch die Weiterentwicklung möglichst kompakt und leicht gebaut werden. Sie soll als integrales und tragendes Bauteil des Fußes ausgeführt werden und für maximale Kräfte von bis zu 1200 N und Momente von bis zu 120 Nm ausgelegt sein. Kommerzielle Kraftsensoren mit Halbleiter DMS haben aufgrund ihrer Bauweise aus Stahl beim geforderten Messbereich ein zu hohes Gewicht und können deswegen nicht eingesetzt werden. Außerdem ist die Empfindlichkeit in den verschiedenen Achsrichtungen nicht auf die Anforderung des Roboters angepasst.

Des Weiteren ist im aktuell verwendeten Sensorgehäuse nur ein sehr begrenzter Bauraum für elektronische Bauteile vorhanden. Durch den Verbau von Halbleiter DMS wird allerdings eine



**Abbildung 1.1:** 26 DoF humanoider Roboter LOLA [20].

komplexere Elektronik benötigt, für welche im neuen Sensorgehäuse genug Platz vorhanden sein muss.

Nicht zuletzt ist eine sorgfältig durchgeführte Kalibrierung für die Performance eines Kraft-/Momentensensors essentiell. Durch diese wird das Verhalten zwischen der auftretenden Last und dem Ausgangssignal des Sensors abgebildet. Mit einem geeigneten Kalibrieralgorithmus können Koppelleffekte verschiedener Lastkomponenten, nichtlineares Verhalten und andere Ungenauigkeiten kompensiert werden. Aktuell ist die Kalibrierung des Sensors auf ein lineares Verhalten abgestimmt. Durch die genannten Nichtlinearitäten der Halbleiter DMS ist voraussichtlich ein komplexeres Kalibrierverfahren nötig, welches den neuen Anforderungen gerecht wird.

## 1.1 Ziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Verbesserung des 6D Kraft-/Momentensensors von LOLA. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf den Einsatz von Halbleiter DMS gelegt. Da am Lehrstuhl allerdings noch nie mit diesen gearbeitet wurde und ihr Verhalten nicht genau bekannt ist, sollen sie auf einem Prüfstand mit herkömmlichen metallischen Dehnungsmessstreifen verglichen werden. Dabei ist besonders von Interesse, inwiefern sich bei Kraft- und Momentenmessungen Nichtlinearitäten gegenüber metallischen Dehnungsmessstreifen bemerkbar machen. Des Weiteren soll das Temperaturverhalten der beiden DMS Typen verglichen werden. Nach der Evaluie-



Die Anpassung des Verhaltens der Halbleiter DMS soll der Sensor auf diese angepasst werden. Zudem soll das Sensorgehäuse auch für die Dimensionen einer neuen Auswertelektronik ausgelegt werden.

Es steckt außerdem Verbesserungspotenzial im Klebprozess der DMS. Durch die spezielle Form der Balken, an denen die DMS angebracht werden müssen und die schlechte Zugänglichkeit der Klebpositionen, sind Vorrichtungen zum Ausrichten und Anpressen der DMS nötig, welche einen genauen und reproduzierbaren Aufklebevorgang garantieren. Eine fehlerhafte Ausrichtung oder Klebestelle kann zu Fehlern in den Messungen führen.

Des Weiteren soll ein neues Kalibrierverfahren implementiert werden, welches den neuen Anforderungen durch Halbleiter DMS gerecht wird. Vor allem sollte das Kalibrierverfahren imstande sein, die Nichtlinearität der Halbleiter DMS zu berücksichtigen. Es ist auch denkbar einen zusätzlichen Temperatursensor am Sensor anzubringen. Dessen Messwerte sollten dann zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit in die Kalibrierung einfließen.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird auf verschiedene Technologien zur Kraftmessung eingegangen. Aufbauend auf diesen werden verschiedene gebräuchliche Konzepte für Kraft-/Momentensensoren vorgestellt und im Speziellen beleuchtet, welche Sensoren bei humanoiden Robotern im Einsatz sind. Des Weiteren werden diverse Kalibrierverfahren für Kraft-/Momentensensoren präsentiert. Mit diesen Kenntnissen wird der aktuell verbaute 6D Kraft-/Momentensensor von LOLA beschrieben. Nach der Einführung in die grundlegenden Themen erfolgt in Kapitel 3 die Präsentation eines Prüfstands zum Vergleich von metallischen und Halbleiter-Dehnungsmessstreifen. Im Zuge dessen wird auch der Klebprozess für Dehnungsmessstreifen und die dafür benötigten Vorrichtungen erklärt. Danach wird in Kapitel 4 der Aufbau und die Durchführung der Versuche mit dem Prüfstand beschrieben und eine Auswertung der damit erhaltenen Messdaten durchgeführt. Anschließend wird in Kapitel 5 auf die konstruktiven Änderungen des Sensors gegenüber dem Vorgängermodell eingegangen. In Kapitel 6 wird der Kalibrierprozess beschrieben und verschiedene Verfahren verglichen. Zuletzt wird in Kapitel 7 ein Fazit gezogen und weitere Möglichkeiten zur Verbesserung des Sensors vorgestellt.



## Kapitel 2

### Stand der Technik

#### 2.1 Kraftmessverfahren

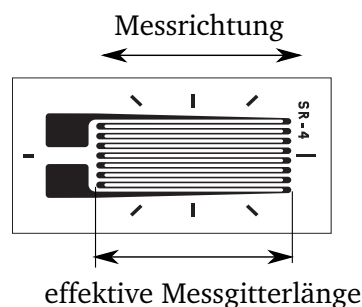
Die gebräuchlichste Art um Kräfte und Momente zu messen ist die Dehnungsmessung. Aus der ermittelten Dehnung  $\varepsilon = \Delta l/l_0 = \sigma/E$  kann dann durch das Hookesche Gesetz (2.1) auf die wirkenden Kräfte und Momente rückgeschlossen werden.

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (2.1)$$

Als Messobjekt in 6D Kraft-/Momentensensoren können verschiedenste Technologien verwendet werden. Die momentan gebräuchlichste Messmethode ist die Dehnungsmessung über die Änderung des elektrischen Widerstands. Es existieren allerdings auch Konzepte welche die Änderung der Kapazität [1, 3, 17] oder optische Verfahren [8] als Messmethode verwenden. Es gibt auch Methoden die Kraft direkt zu messen wie zum Beispiel über den piezoelektrischen Effekt [19].

##### 2.1.1 Metallische Dehnungsmessstreifen

Aktuell werden für die Kraftmessung vor allem Dehnungsmessstreifen (DMS) verwendet, wobei zwischen metallischen DMS und Halbleiter DMS unterschieden werden muss. Das Wirkprinzip metallischer DMS lässt sich auf die Widerstandsänderung eines elektrischen Leiters in Folge von Dehnung zurückführen. Der elektrische Leiter muss dazu so mit dem Messobjekt verbunden sein, dass sich die Dehnung überträgt. Bei den heute großteils verwendeten Folien-DMS wird dazu ein metallisches Messgitter mäanderförmig auf eine Trägerfolie aufgebracht, die meist durch Kleben am Messobjekt befestigt wird.



**Abbildung 2.1:** Metallischer DMS mit mäanderförmigem Messgitter [37].

Um die Querempfindlichkeit der DMS zu reduzieren, sind die Querverbindungsstellen breiter als das Gitter in Längsrichtung ausgeführt. DMS sind heute mit einer Messgitterlänge von ca. 0,2 mm bis 150 mm und einem Nennwiderstand von 100  $\Omega$  bis 1000  $\Omega$  verfügbar. Die DMS haben inklusive Trägerfolie und Abdeckfolie in etwa eine Dicke von 50  $\mu\text{m}$ . Des Weiteren sind Folien-DMS mit verschiedensten Messgitteranordnungen verfügbar wie zum Beispiel lineare DMS mit einem Messgitter zur Dehnungsmessung in einer Richtung oder DMS für die Messung von Torsions- und Scherspannung, welche zwei Messgitter mit einer Neigung von jeweils 45° zur Messachse besitzen.

Durch Temperaturänderungen kann es zu einer unerwünschten Widerstandsänderung durch einen temperaturabhängigen spezifischen Widerstand und einer relativen Dehnung zwischen DMS und Träger kommen. Diese Effekte können jedoch durch geeignete Materialwahl kompensiert werden (gleicher Ausdehnungskoeffizient und weitestgehend temperaturunabhängiger spezifischer Widerstand). Außerdem muss beim Aufkleben der DMS mit höchster Sorgfalt gearbeitet werden. Es ist auf eine passende Materialwahl, die korrekte Bearbeitung und Reinigung der Oberfläche sowie die richtigen Aushärtebedingungen für den Klebstoff zu achten. Bei einer mangelhaften Klebung kann der DMS in seine Lage vor dem Aushärten zurück kriechen. Des Weiteren müssen die DMS vor Feuchtigkeit geschützt werden, da Klebstoff und DMS Wasser aufnehmen können und sich somit der Widerstand ändert, dadurch wird eine Dehnung vorgetäuscht. Auch durch Winkelfehler beim Aufkleben können Fehler bei der Messung entstehen. Bei kleinen Winkeln ist dieser noch relativ gering, nimmt aber stetig zu (Tabelle 2.1). Ist der DMS um einen Winkelfehler  $\phi$  versetzt zur Hauptdehnungsrichtung aufgeklebt, ist die gemessene Dehnung um den Faktor  $e = 1 - \cos(\phi)$  geringer. Weitere Fehlerquellen sind Einstreueffekte durch magnetische Felder oder negative Einflüsse der Zuleitung, wie zum Beispiel abweichende Widerstände durch ungleiche Kabellängen.[29]

**Tabelle 2.1:** Auswirkung des Winkelfehlers.

Winkelfehler $\phi$	2,6°	5,7°	8,1°	11,5°	18,2°	25,8°
Messfehler $e$	0,1%	0,5%	1,0%	2,0%	5,0%	10,0%

### Beschreibung des Wirkprinzips

Der Widerstand  $R$  ist von der Länge des Leiters  $l$ , dem Leiterquerschnitt  $A$  und dem spezifischen Widerstand  $\rho$  des Leiters abhängig:

$$R = \frac{l}{A} \rho. \quad (2.2)$$

Aufgrund von Dehnung ändern sich Länge, Querschnitt und der spezifische Widerstand. Durch partielles Ableiten erhält man die relative Widerstandsänderung  $\Delta R/R$ :

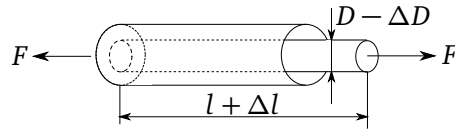
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (2.3)$$

Der Querschnitt lässt sich darüber hinaus durch den Durchmesser  $D$  des Leiters ausdrücken:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (2.4)$$

Diese Gleichung wird dann durch die Dehnung  $\varepsilon = \Delta l/l$  dividiert:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 - 2 \frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta l}{l}} + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}}. \quad (2.5)$$



**Abbildung 2.2:** Formänderung eines Leiters mit der Länge  $l$  und dem Durchmesser  $D$ . Basierend auf [29, s.S. 252].

Das links stehende Verhältnis von relativem Widerstand zu Dehnung wird als  $k$ -Faktor bezeichnet. Außerdem ist die relative Querkontraktion  $\Delta D/D$  zur relativen Längenänderung  $\Delta l/l$  als Poisson'sche Zahl  $\mu$  definiert:

$$\mu = -\frac{\Delta D/D}{\Delta l/l}. \quad (2.6)$$

Damit kann Gleichung (2.5) folgendermaßen geschrieben werden:

$$k = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon}. \quad (2.7)$$

Da bei Metallen die Änderung des spezifischen Widerstands  $\rho$  sehr gering ausfällt, kann dieser Term vernachlässigt werden. Die Poisson'sche Zahl liegt bei den verwendeten Materialien zwischen 0,2 und 0,5. Damit ergibt sich für metallische DMS höchstens ein  $k$ -Faktor von 2:

$$k = 1 + 2\mu \approx 1 + 2 \cdot 0,5 = 2. \quad (2.8)$$

Daraus folgt, dass die relative Widerstandsänderung maximal doppelt so groß wie die auftretende Dehnung ist:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon = 2\varepsilon. \quad (2.9)$$

Bezieht man nun die Widerstandsänderung  $\Delta R$  nicht auf den momentanen Widerstand  $R$ , sondern auf den festen Anfangswiderstand  $R_0$  (wie zum Beispiel den Auslegungswiderstand einer Messbrücke), kann Gleichung (2.9) folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R} = k\varepsilon \quad (2.10)$$

und daraus folgt:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{k\varepsilon}{1 - k\varepsilon}. \quad (2.11)$$

Durch Bildung der Differenz zwischen der Näherung (2.11) und der exakten Gleichung (2.9), Einsetzen einer Dehnung von  $10^{-3}$  (üblich sind Werte zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-3}$ ) und einem  $k$ -Faktor von 2 folgt der Fehler durch Anwendung der Näherung:

$$\frac{\Delta R}{R_0} - \frac{\Delta R}{R} = \frac{k\varepsilon}{1 - k\varepsilon} - k\varepsilon = \frac{(k\varepsilon)^2}{1 - k\varepsilon} = \frac{(2 \cdot 10^{-3})^2}{1 - 2 \cdot 10^{-3}} \approx (2 \cdot 10^{-3})^2 = 4 \cdot 10^{-6}. \quad (2.12)$$

Dieser Fehler kann für die meisten Anwendungsfälle vernachlässigt werden und es folgt schließlich:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R}{R_0} = k\varepsilon. \quad (2.13)$$

Diese Herleitung entstammt aus [29].

### 2.1.2 Halbleiter-Dehnungsmessstreifen

Anders als bei den metallischen DMS ist bei Halbleiter DMS aus Germanium oder Silizium die Änderung des spezifischen Widerstands aufgrund des piezoresistiven Effekts die ausschlaggebende Größe. Durch Dehnung ändern sich Bandabstände und Dichte der Ladungsträger [29]. Die Herleitung des k-Faktors ist bis zur Gleichung (2.7) gleich. Der letzte Term kann auch als Produkt von piezoresistiven Koeffizienten des Halbleitermaterials  $\pi_l$  und Elastizitätsmodul  $E$  geschrieben werden [46]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} = \pi_l E. \quad (2.14)$$

Somit ergibt sich der k-Faktor von Halbleiter DMS zu:

$$k = 1 + 2\mu + \pi_l E. \quad (2.15)$$

Da der Faktor  $\pi_l$  eine hohe Anisotropie bezüglich der Kristallrichtung zeigt, werden Halbleiter DMS so gefertigt, dass  $\pi_l$  in Messrichtung möglichst hoch ist. Das Vorzeichen des k-Faktors hängt dabei von der Dotierung des Halbleiter Werkstoffs ab [29]. Mit diesen DMS können k-Faktoren von -100 bei N-Typ Halbleiter DMS und bis zu +200 bei P-Typ Halbleiter DMS erreicht werden. Die DMS sind für gewöhnlich mit Widerständen von 60  $\Omega$  bis 1000  $\Omega$  erhältlich, für Spezialanwendungen gibt es sie aber auch mit einem Widerstand von bis zu 10 k $\Omega$ . Die Vorteile von Halbleiter DMS ergeben sich aus dem hohen k-Faktor. Diese Vorteile sind [46]:

- Entfallen eines Verstärkers.
- wenig Messrauschen.
- Messung kleiner Dehnungen.

Es gibt allerdings auch einige Nachteile gegenüber metallischen DMS, diese sind [46]:

- schlechtes Linearitätsverhalten zwischen Widerstandsänderung und Dehnung (Abb. 2.3).
- unterschiedlicher k-Faktor bei Zug- und Druckdehnung (Abb. 2.3).
- Abweichungen des k-Faktors von bis zu  $\pm 10\%$  zum Nennwert. Innerhalb eines Fertigungsloses beträgt die Abweichung allerdings nur  $\pm 2\%$  bis  $\pm 3\%$  vom Mittelwert des Loses.
- hohe Temperaturabhängigkeit des piezoresistiven Koeffizienten  $\pi_l$  und daraus folgend ein temperaturabhängiger k-Faktor (2.15) (Abb. 2.4).
- hohe Temperaturabhängigkeit des Widerstands (Abb. 2.5).
- geringe maximale Dehnbarkeit (bei Silizium in etwa 3000  $\mu\text{m}/\text{m}$  bei Zugbelastung und 4000  $\mu\text{m}/\text{m}$  bei Druckbelastung) und dadurch schlechte Eignung zum Aufkleben an gekrümmten Flächen.
- sorgfältige Installation nötig (lichtempfindlich, empfindlich gegen mechanische Beschädigung, Eigenschaften können stark durch Klebstoff und Aushärteverfahren beeinflusst werden).

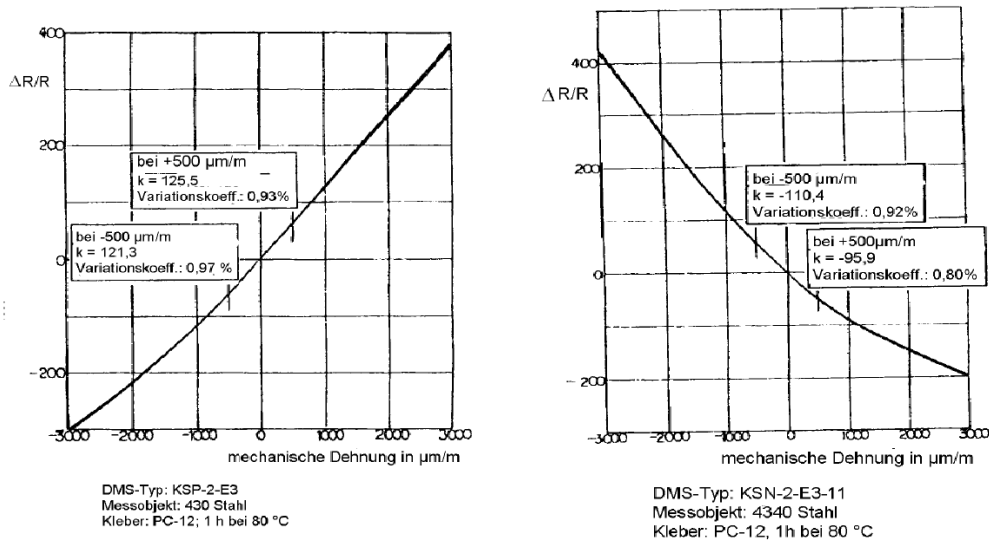


Abbildung 2.3: Widerstands-Dehnungskennlinie für P-Typ (links) und N-Typ (rechts) Halbleiter DMS. Nichtlinearität der Kennlinie und unterschiedlicher k-Faktor für Zug- und Druck sind ersichtlich [46, s.S. 5].

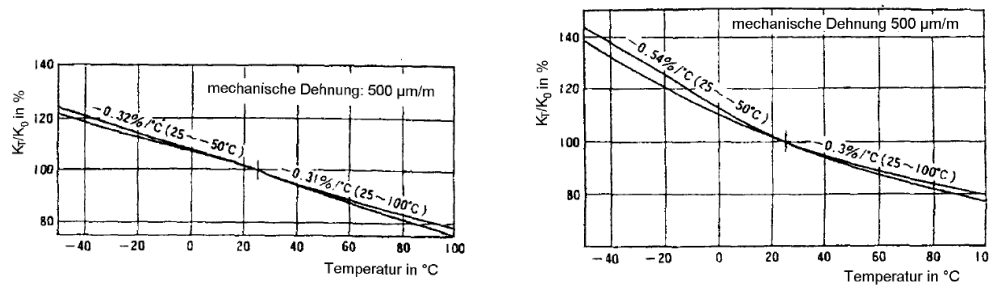


Abbildung 2.4: Temperaturabhängigkeit des k-Faktors für P-Typ (links) und N-Typ (rechts) Halbleiter DMS [46, s.S. 6].

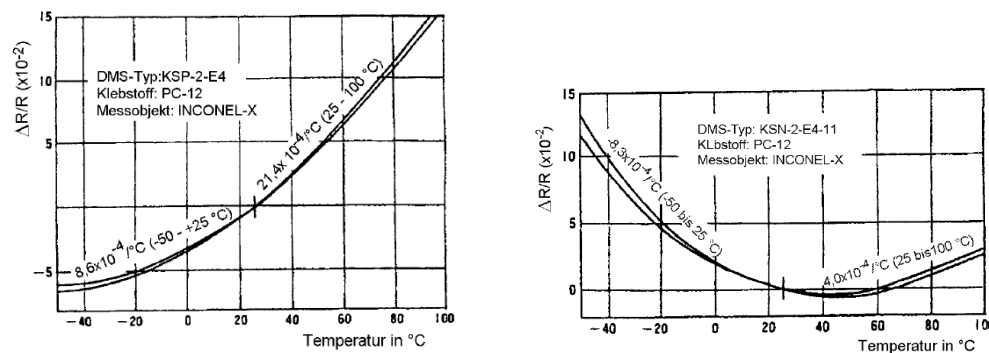


Abbildung 2.5: Temperaturabhängigkeit des Widerstands für P-Typ (links) und N-Typ (rechts) Halbleiter DMS [46, s.S. 8].

### 2.1.3 Wheatstone'sche Messbrücke

Die wichtigste Schaltung zur Messung in Verbindung mit DMS ist die Wheatstone'sche Messbrücke. Sie besteht aus vier Brückenzeigen mit den Widerständen  $R_1$  bis  $R_4$ . Sind alle Widerstände gleich, ist die Ausgangsspannung  $U_d$  gleich 0. Ändert sich allerdings ein Widerstand ist die Ausgangsspannung  $U_d$  ungleich Null und kann als Maß für die Widerstandsänderung

herangezogen werden. Diese Tatsache wird bei der Messung mit DMS genutzt, da diese bekanntlich bei Dehnung ihren Widerstand ändern. Durch Anwendung der Kirchhoffschen Maschenregel lässt sich die Ausgangsspannung  $U_d$  als Funktion der Eingangsspannung  $U_0$  und der Widerstände schreiben:

$$U_d = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (2.16)$$

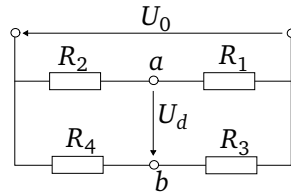


Abbildung 2.6: Wheatstone'sche Messbrücke. Basierend auf [29, s.S. 215].

Eine Brücke wird als abgeglichen bezeichnet, wenn die Ausgangsspannung  $U_d$  gleich Null ist. Aus Gleichung (2.16) folgt, dass die Messbrücke unter der Bedingung  $R_2 R_3 = R_1 R_4$  abgeglichen ist. Bei der für das Messen mit DMS relevanten Ausschlag-Widerstandsmessbrücke kann im Gegensatz zu anderen Konfigurationen auf einen erneuten Abgleich bei einer Widerstandsänderung verzichtet werden, da nur eine Widerstandsänderung in der Nähe des Arbeitspunkts gemessen wird. Die Brücke ist dann so ausgelegt, dass sie bei einem bestimmten Widerstandswert abgeglichen ist. Dadurch kann die Ausgangsspannung als Maß für die Widerstandsänderung herangezogen werden.

Wird nun ein Widerstand  $R_x$  als variabel angenommen und die restlichen drei Widerstandswerte  $R$  gleich gesetzt, erhält man folgende Gleichung:

$$U_d = U_0 \left( \frac{1}{2} - \frac{R}{R_x} \right) = \frac{U_0}{2} \frac{R_x - R}{R_x + R}. \quad (2.17)$$

Die Kennlinie für  $U_d$  ist also nichtlinear und es ergeben sich folgende Werte für  $U_d$ :

$$R_x = 0 \Rightarrow U_d = -\frac{U_0}{2}$$

$$R_x = R \Rightarrow U_d = 0$$

$$R_x \rightarrow \infty \Rightarrow U_d = +\frac{U_0}{2}$$

### Brücke mit konstanter Eingangsspannung

Je nach Anzahl der variablen Widerstände wird die Schaltung als Viertel-, Halb- oder Vollbrücke bezeichnet. Eine Viertelbrücke besitzt einen variablen Widerstand, eine Halbbrücke zwei und bei einer Vollbrücke sind alle Widerstände variabel. Je nach Anordnung der Widerstände gibt es auch noch Unterschiede innerhalb der Brückenkonfigurationen (siehe Tabelle 2.2). Wird nun die Brücke mit einer konstanten Spannung gespeist und eine Viertelbrücke nach Konfiguration a mit drei festen Widerständen  $R_0$  und einem variablen Widerstand mit demselben Anfangswiderstand  $R_0$  und dem veränderlichen Anteil  $\Delta R$  gewählt, ergibt sich für die Ausgangsspannung folgende Gleichung:

$$U_d = U_0 \frac{(R_0 + \Delta R)R_0}{(2R_0 + \Delta R)2R_0} = U_0 \frac{\Delta R}{4R_0 + 2\Delta R}. \quad (2.18)$$

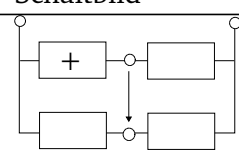
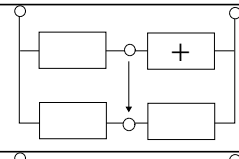
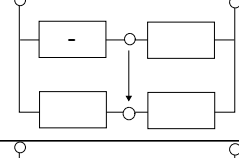
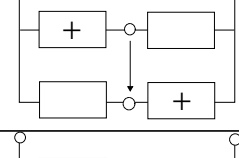
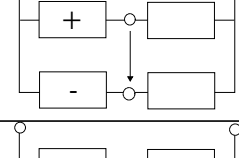
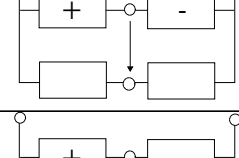
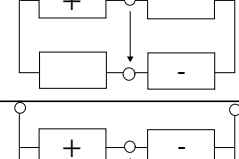



Da von sehr kleinen Widerstandsänderungen gegenüber dem Anfangswiderstand ausgegangen werden kann, vereinfacht sich die Gleichung wie folgt:

$$U_d \approx \frac{U_0 \Delta R}{4 R_0}. \quad (2.19)$$

Die Herleitung der restlichen Ergebnisse in Tabelle 2.2 erfolgt auf dieselbe Weise.

**Tabelle 2.2:** Ausgangsspannung für verschiedene Brückenkonfigurationen. Angelehnt an [29, s.S. 219].

Index	Schaltbild	konstante Speisespannung	konstanter Speisestrom
a		$U_d \approx +\frac{U_0 \Delta R}{4 R_0}$	$U_d \approx +\frac{I_0}{4} \Delta R$
b		$U_d \approx -\frac{U_0 \Delta R}{4 R_0}$	$U_d \approx -\frac{I_0}{4} \Delta R$
c		$U_d \approx -\frac{U_0 \Delta R}{4 R_0}$	$U_d \approx -\frac{I_0}{4} \Delta R$
d		$U_d \approx +\frac{U_0 \Delta R}{2 R_0}$	$U_d = +\frac{I_0}{2} \Delta R$
e		$U_d \approx +\frac{U_0 \Delta R}{2 R_0}$	$U_d = +\frac{I_0}{2} \Delta R$
f		$U_d = +\frac{U_0 \Delta R}{2 R_0}$	$U_d = +\frac{I_0}{2} \Delta R$
g		$U_d \approx -\frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2$	$U_d = -\frac{I_0 \Delta R}{4 R_0} \Delta R$
h		$U_d = +U_0 \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = +I_0 \Delta R$

Teilweise sehen die Ergebnisse für die Ausgangsspannung bei diversen Konfigurationen identisch aus, die Schaltungen sind dennoch nicht gleichwertig. Zum Beispiel ist die Halbbrücke in Konfiguration f der Konfiguration e vorzuziehen, da bei der Herleitung dieser keine Vereinfachungen getroffen wurden und die Ausgangsspannung wirklich linear von der Widerstandsänderung abhängt.

### Brücke mit konstantem Eingangsstrom

Werden die Brücken mit einem konstanten Eingangsstrom  $I_0$  gespeist, kann die Eingangsspannung  $U_0$  in Abhängigkeit von  $I_0$  aufgestellt werden:

$$U_0 = I_0 \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (2.20)$$

Wird nun für  $U_0$  der Zusammenhang aus Gleichung (2.16) eingesetzt, kann die Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom Eingangsstrom  $I_0$  beschrieben werden:

$$U_d = I_0 \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = I_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (2.21)$$

Werden nun die Gleichungen in Tabelle 2.2 für konstanten Speisestrom aufgestellt, fällt auf, dass die Gleichungen nur mehr von  $\Delta R$  und nicht mehr vom Verhältnis  $\Delta R/R_0$  abhängen. Dies ist von Vorteil, wenn hochohmige Widerstände verwendet werden können. Außerdem sind im Gegensatz zu den Gleichungen mit konstanter Eingangsspannung alle Ergebnisse ab Schaltung d exakt und linear. Die Herleitungen aus diesem Kapitel entstammen [29].

### Temperaturkompensation

Wird jeder Widerstand in der Brücke mit gleichem Anfangswiderstand  $R_0$  gewählt und wird jeder Widerstand mit einem eigenen  $\Delta R$  beaufschlagt, kann durch Einsetzen in Gleichung (2.16) folgende Form gewonnen werden:

$$U_d = U_0 \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4}{2(2R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4)}. \quad (2.22)$$

Daraus ist ersichtlich, dass sich die Widerstandsänderungen  $\Delta R_1$  und  $\Delta R_2$  sowie  $\Delta R_3$  und  $\Delta R_4$  aufheben, falls sie gleich groß sind. Dieses Ergebnis kann bei Halb- und Vollbrücken zur Temperaturkompensation genutzt werden. Im Fall von DMS werden dabei bei einer Halbbrücke ein und bei einer Vollbrücke zwei Temperaturkompensationsstreifen in einem mechanisch unbelasteten Bereich mit gleicher Temperatur und Material am Messobjekt installiert und so verschalten, dass Temperaturkompensationsstreifen und Messstreifen in benachbarten Brücken Zweigen liegen. [13]

#### 2.1.4 Faser-Bragg-Sensoren

Optische DMS oder auch Faser-Bragg-Sensoren messen die Dehnung über eine Wellenlängenänderung des reflektierten Lichts. Die Wellenlänge des reflektierten Lichts ist definiert als:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda. \quad (2.23)$$

Wobei  $n_{eff}$  der effektive Brechungsindex des Fasermaterials ist und  $\Lambda$  die Bragg Gitter Periode. Die Wellenlängenänderung kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$\Delta \lambda = \lambda(1 - p_e) \Delta \varepsilon + (\alpha_f + \xi) \Delta T. \quad (2.24)$$

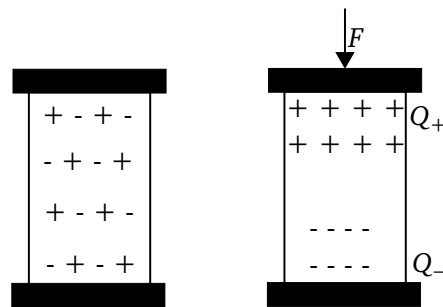
In dieser Gleichung steht  $p_e$  für den effektiven photoelastischen Koeffizienten,  $\alpha_f$  ist der thermische Ausdehnungskoeffizient und  $\xi$  der thermooptische Koeffizient des Fasermaterials [8].

Wie man aus dieser Formel sieht, reagieren Faser-Bragg-Sensoren nicht nur auf Dehnungen, sondern auch auf Temperaturdifferenzen. Deswegen ist eine Temperaturkompensation bei solchen Sensoren äußerst wichtig. Eine der gebräuchlichsten Methoden ist die Verwendung eines zusätzlichen Faser-Bragg-Sensors in einem unbelastetem Bereich des Messobjekts als Referenzsensor. Aber auch eine Temperaturkompensation wie bei Wheatstone Brücken ist möglich. Bei der Fertigung werden die Faser-Bragg-Gitter in eine Glasfaser eingeschrieben. Vorteile der Faser-Bragg-Sensoren sind die hohe Sensitivität, die Korrosionsbeständigkeit und die Resistenz auf elektromagnetische Interferenzen [33].

### 2.1.5 Piezoelektrische Kraftsensoren

Piezoelektrische Kraftsensoren nutzen den piezoelektrischen Effekt. Durch Einwirken einer Kraft tritt in piezoelektrischen Materialien eine Ladungsverschiebung auf [28]. Um eine Vorstellung vom prinzipiellen Effekt zu bekommen, kann stark vereinfacht gesagt werden, dass eine Krafteinwirkung eine Gitterverschiebung bewirkt und eine Störung der normal gleichverteilten Ladungen im Kristall bewirkt. Die Ladungsverschiebung kann durch die Verschiebungsdichte  $D$  ausgedrückt werden:

$$D = \frac{Q}{A}. \quad (2.25)$$



**Abbildung 2.7:** Piezokristall ohne Kraftwirkung (links) und mit Kraftwirkung (rechts). Angelehnt an [28, s.S. 208].

Dabei ist  $Q$  die Ladung und  $A$  die Fläche. Die Ladung kann mithilfe der piezoelektrischen Konstante  $k_p$  und der einwirkenden Kraft  $F$  berechnet werden:

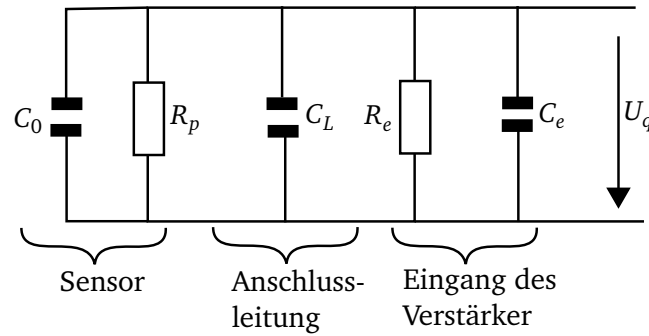
$$Q = k_p F. \quad (2.26)$$

Da Ladungen allerdings nicht direkt messbar sind, müssen sie über eine Kapazität in eine proportionale Spannung  $U_q$  überführt werden:

$$Q = C U_q \Rightarrow U_q = \frac{Q}{C} = \frac{k_p F}{C}. \quad (2.27)$$

Es werden dafür Elektrometerverstärker verwendet, da diese einen sehr hochohmigen Eingang haben. Des Weiteren ist zu beachten, dass alle Kapazitäten im Messaufbau berücksichtigt werden. Diese sind die Kapazität des Piezokristalls  $C_0$ , die Kapazität der Zuleitung  $C_L$  und die Eingangskapazität des Verstärkers  $C_e$ . Daraus folgt für die Messspannung  $U_q$ :

$$U_q = \frac{Q}{C_{ges}} = \frac{k_p F}{C_0 + C_L + C_e}. \quad (2.28)$$



**Abbildung 2.8:** Ersatzschaltbild einer Messschaltung mit piezoelektrischem Sensor. Basierend auf [28, s.S. 209].

Es ist zu beachten, dass jede Änderung an der Messanordnung die Gesamtkapazität verändern kann und somit eine Neukalibrierung erforderlich ist. Außerdem sind externe Schaltkapazitäten unvermeidlich und vermindern die Empfindlichkeit. Für die Zeitkonstante der Messanordnung gilt:

$$\tau = R_{ges} C_{ges} = \frac{R_e R_p}{R_e + R_p} (C_0 + C_L + C_e). \quad (2.29)$$

Daraus folgt, dass der Verlustwiderstand des Piezokristalls  $R_p$  und der Eingangswiderstand des Verstärkers  $R_e$  sehr hochohmig sein müssen, da sonst die Ladung sehr schnell ausgeglichen wird. Deswegen sind piezoelektrische Sensoren bevorzugt bei stark veränderlichen Kräften einzusetzen, eine Messung von stationären Kräften ist aber unter Berücksichtigung der Zeitkonstante  $\tau$  auch möglich [28]. Solche Sensoren ermöglichen eine annähernd weglose Kraftmessung und können in einem großen Temperaturbereich eingesetzt werden [19]. Die Herleitungen zu piezoelektrischen Kraftsensoren entstammen [28].

### 2.1.6 Kapazitive Kraftsensoren

Bei kapazitiven Kraftsensoren handelt es sich um Kondensatoren, bei denen Dehnungen bzw. Verschiebungen über die Variation des senkrechten Abstands  $a$  zwischen den Kondensatorplatten und der parallelen Verschiebung der Kondensatorplatten, welche die Überdeckung der Kondensatorfläche  $A$  verändert, gemessen werden können. Die Kapazität eines Kondensators ist definiert als:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{a}. \quad (2.30)$$

$\varepsilon_0$  ist dabei die elektrische Feldkonstante und  $\varepsilon_r$  die Permittivitätszahl des Dielektrikums. Aus dieser Formel ist ersichtlich, dass die Kapazität umgekehrt proportional zum Plattenabstand ist und somit eine nichtlineare Abhängigkeit besteht. Die Empfindlichkeit  $E$  eines Kondensators bezogen auf den Plattenabstand  $A$  ist:

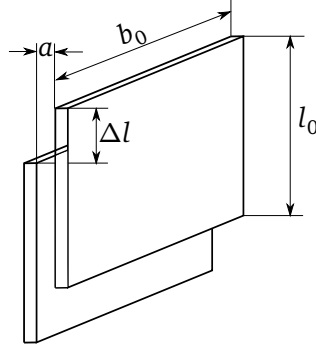
$$E = \frac{dC}{da} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{a^2} = -\frac{C}{a}. \quad (2.31)$$

Die Empfindlichkeit eines Kondensators ist also umso größer, je kleiner der Plattenabstand ist. Neben der Änderung des Plattenabstands ist es auch möglich die Überdeckung der Platten zu variieren. Liegen zwei Kondensatorplatten exakt übereinander ist die Kapazität

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l_0 b_0}{a} \quad (2.32)$$

mit der Plattenlänge  $l_0$  und der Plattenbreite  $b_0$ . Wird nun eine Platte um  $\Delta l$  in Längsrichtung verschoben ergibt sich die neue Kapazität zu:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b_0}{a} (l_0 - \Delta l) = C_0 - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b_0}{a} \Delta l. \quad (2.33)$$



**Abbildung 2.9:** Möglichkeit der Änderung der Kapazität durch parallele Verschiebung der Kondensatorplatten über  $\Delta l$  und Variation des Plattenabstands  $a$ . Angelehnt an [29, s.S. 289].

Die Kapazität ist also proportional zur Verschiebung  $\Delta l$ . Falls nur die Verschiebung gemessen werden soll, müssen die Platten exakt geführt werden, um den Plattenabstand konstant zu halten. Die Herleitungen aus diesem Kapitel entstammen größtenteils [29].

Vorteile der Nutzung dieses Messprinzips sind die Kostenersparnis gegenüber teuren DMS [17] und die Möglichkeit sehr kleine Kräfte zu messen (drei Größenordnungen kleiner als andere Messmethoden) [1]. Allerdings ist das Verhalten schwierig zu modellieren, da sich die Änderungen der Kapazität durch parallele und senkrechte Verschiebung deutlich unterscheiden. Des Weiteren reagieren kapazitive Sensoren empfindlich auf Feuchtigkeit, da die Permittivitätszahl von Wasser sehr hoch ist und somit die Kapazität bei Feuchtigkeit stark steigt [29].

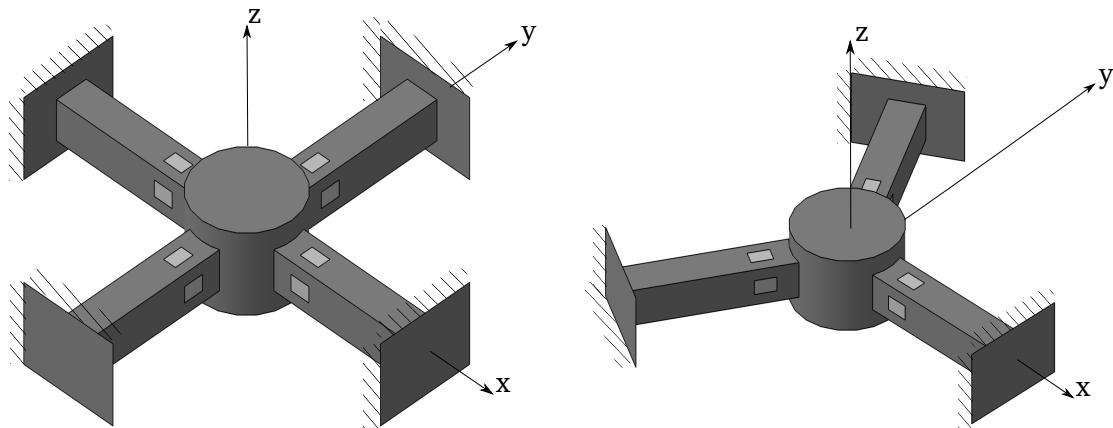
## 2.2 Bauformen von 6D Kraft-/Momentensensoren für Roboter

Die verschiedenen Kraftmessverfahren resultieren in verschiedenen Bauweisen für Kraft-/Momentensensoren, welche sich je nach Anwendung bewährt haben. In vielen Robotern sind noch immer Sensoren mit DMS die bevorzugte Variante. Die meist verwendeten Bauformen sind dort Bauweisen mit drei oder vier Messbalken und die Stewart Plattform. Bei speziellen Bedingungen haben sich aber auch andere Kraftmessverfahren als vorteilhaft herausgestellt.

### 2.2.1 Balken Bauform

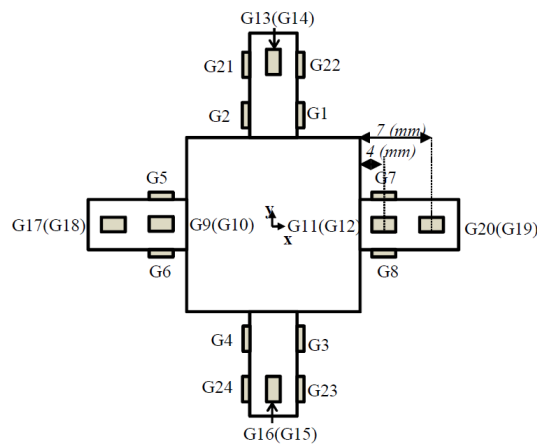
Bei der Bauform mit Messbalken sind die Bauweisen mit drei Messbalken oder mit vier Messbalken, auch Malteserkreuz-Bauweise genannt, am gebräuchlichsten (Abb. 2.10). Im Normalfall werden an den Balken mit meist rechteckigem oder quadratischen Querschnitt an jeder Seite des Balkens Sensoren zur Dehnungsmessung angebracht (also bei der Malteserkreuz-Bauweise insgesamt 16 DMS und bei der Bauweise mit 3 Balken 12 DMS). Meistens sind das DMS, aber auch Faser-Bragg Sensoren sind denkbar. Die gegenüberliegenden DMS sind in

der Regel zu einer Halbbrücke verschaltet. Durch diese Schaltung wird die Empfindlichkeit verdoppelt und Temperaturkompensation erreicht. Bei einer Belastung wird durch die auftretende Biegung immer einer der DMS auf Zug und der andere auf Druck belastet. Um die Messungen der einzelnen Balken weitestgehend zu entkoppeln, empfiehlt es sich die Balken mittels einer Blattfeder oder ähnlichem mit dem Gehäuse zu verbinden. Der größte Vorteil der Malteserkreuz-Bauweise gegenüber der Bauweise mit 3 Balken ist, dass einzelne Kraft- und Momentenkomponenten weitestgehend entkoppelt gemessen werden können. Bei einer Kraft in z-Richtung reagieren die DMS, welche oben und unten an den Balken angebracht sind. Bei einer Kraft in x-Richtung (bzw. y-Richtung) reagieren die seitlichen DMS die am Balken in y-Richtung (bzw. x-Richtung) angebracht sind. Bei einem Moment um die z-Achse reagieren alle seitlich angebrachten DMS und bei einem Moment um die x-Achse (bzw. y-Achse) reagieren die DMS, welche oben und unten am Balken in y-Richtung (bzw. x-Richtung) angebracht sind.



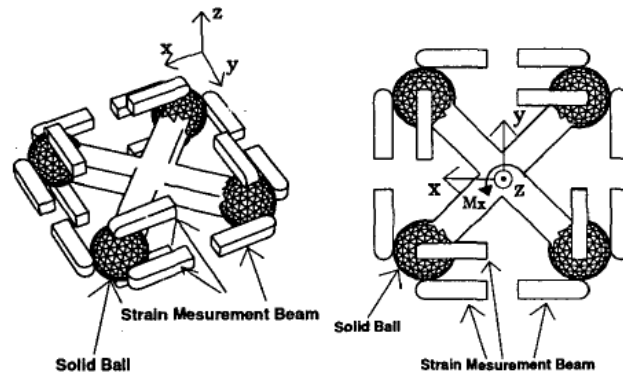
**Abbildung 2.10:** Prinzipieller Aufbau der Malteserkreuz Bauweise (links) und der Bauweise mit 3 Balken (rechts).

Kang et al. konnten durch Anbringung von 24 DMS anstatt von 16 und deren exakte Platzierung eine noch bessere Entkopplung bei einem Sensor in Malteserkreuz-Bauweise erreichen (Abb. 2.11) [12].



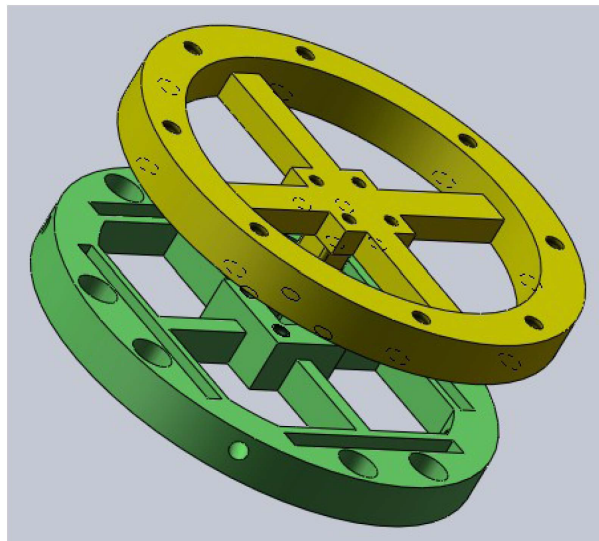
**Abbildung 2.11:** Platzierung der DMS an einem Sensor in Malteserkreuz Bauweise zur entkoppelten Messung der Kräfte und Momente [12, s.S. 4].

Basierend auf der Malteserkreuz Bauweise wurden auch speziellere Bauweisen entwickelt. Zum Beispiel ein Sensorkonzept mit Kugeln, sodass keine Momente übertragen werden (Abb. 2.12) [22].

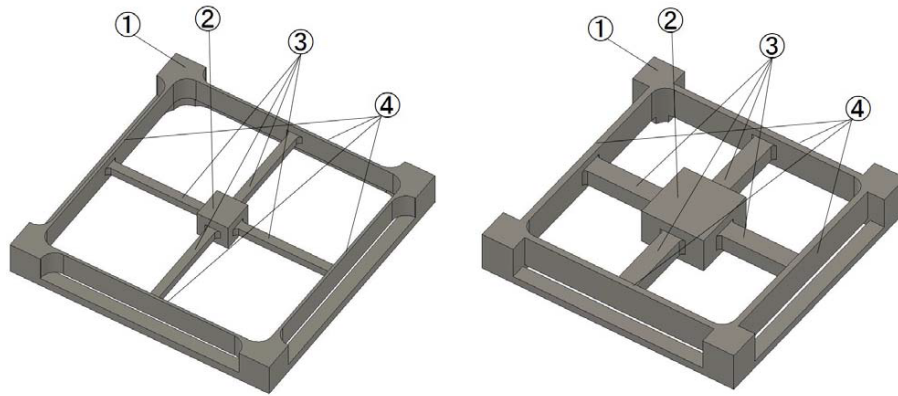


**Abbildung 2.12:** 6D Kraft-/Momentensensoren mit Kugeln an der Verbindungsstelle zur Struktur um die Übertragung von Momenten zu verhindern. Als zweite Verbindungsstelle dienen die Balken [22, s.S. 2278].

Eine weitere Abwandlung ist ein zweilagiger Sensor mit insgesamt 8 Balken um Kräfte und Momente besser entkoppelt messen zu können [14]. In einer Ebene sind dabei schmale und hohe Balken, welche eine hohe Sensitivität bezüglich Kräften in der Balkenebene und eines Moments um die Achse rechtwinklig zur Balkenebene zeigen und in der zweiten ein typisches Balkendesign mit rechteckigem Querschnitt welche für die Messung der restlichen Kraft- und Momentenkomponenten zuständig ist [45]. Mit einem ähnlichen Konzept in dem in der ersten Ebene dünne Balken mit niedriger Steifigkeit verwendet werden und in der zweiten welche mit größerem Querschnitt und höherer Steifigkeit, ist es durch den Teil mit geringer Steifigkeit möglich kleine Kräfte mit hoher Genauigkeit zu messen und durch den Teil mit hoher Steifigkeit trotzdem einen großen Messbereich zu gewährleisten (Abb. 2.14) [25]. Ein Nachteil dieser zweilagigen Sensoren ist jedoch, dass sie meist nicht monolithisch gefertigt werden können und die dadurch nötigen Verbindungsstellen aufgrund von Hystereseeffekten oder Setzen der Verbindungsstellen zu Messfehlern führen können.



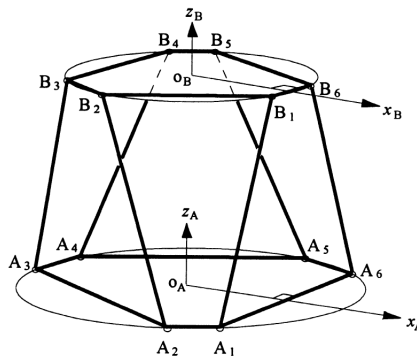
**Abbildung 2.13:** Erste und zweite Ebene eines zweilagigen Sensors mit insgesamt 8 Balken [45, s.S. 1789].



**Abbildung 2.14:** Hochsensitiver Sensorteil (links) und hochsteifer Sensorteil (rechts) eines zweilagigen Sensors in Malteserkreuz Bauweise [25, s.S. 1387].

### 2.2.2 Sensoren basierend auf der Stewart Plattform

Die Stewart Plattform ist ein Manipulator bestehend aus 2 Platten, welche mit 6 beweglichen Beinen verbunden sind, die eine Translation und Rotation um alle drei Achsen zulässt. Kraft-/Momentensensoren, welche auf diesem Konzept aufbauen, haben dieselbe geometrische Gestalt, sind jedoch nicht beweglich. Die Kraft- und Momentenmessung erfolgt über die Dehnung in den 6 Beinen (Abb. 2.15). Die Stewart Plattform ist dabei komplizierter als die klassischen Balken Bauformen, hat dafür aber eine sehr hohe Steifigkeit [33]. Außerdem ist die Bauhöhe meistens deutlich höher als bei einem Sensor in Balken Bauform.



**Abbildung 2.15:** Prinzipskizze eines Sensors basierend auf der Stewart Plattform [11, s.S. 32].

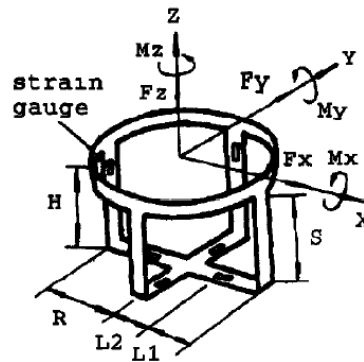
### 2.2.3 Weitere Bauformen

Eine weitere Möglichkeit ist es, einen Sensor in Säulenform zu bauen. Diese Sensoren sind in der Säulenachse meist deutlich steifer als die Balken Bauform. Allerdings haben sie dadurch auch eine geringe Sensitivität in dieser Richtung und eine schlechte Entkopplung von Kräften und Momenten in der Ebene rechtwinklig zur Säulenachse [33].

Des Weiteren gibt es auch eine Kombination aus der Säulen- und der Balken Bauweise (Abb. 2.16). Dabei verbindet die Balken-Säulen Kombination die zwei Sensoranschlussstellen. Die Kraftmesssensoren können dabei an den Säulen- und Balkenelementen angebracht

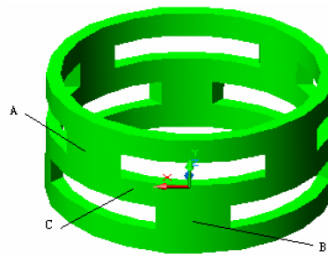


werden und so die Empfindlichkeit des Sensors auf die zu messende Lastkomponente beeinflussen.



**Abbildung 2.16:** Beispiel eines Sensors der die Balken- und Säulen-Bauweise kombiniert [42, s.S. 204].

Ein weiteres Konzept ist es, einen Sensor in Form eines hohlen Zylinders zu bauen (Abb. 2.17). Die DMS sind dabei in Schlitten, welche rechtwinklig zur Zylinderachse und rund um den Zylinder jeweils  $45^\circ$  versetzt eingebracht sind, befestigt. Zur Ermittlung der Kräfte und Momente wird hierbei die Schubspannung gemessen.[43]



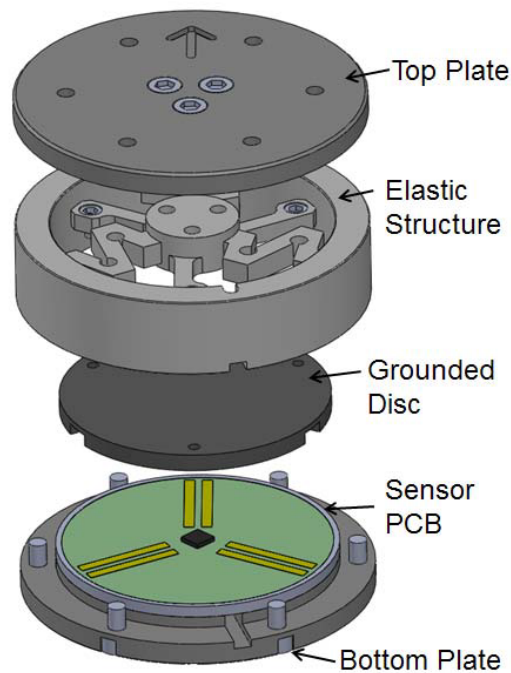
**Abbildung 2.17:** Zylinderförmiger Sensorkörper [43, s.S. 447].

Um Vor- und Nachteile von Halbleiter DMS und metallischen DMS auszugleichen, gibt es auch die Möglichkeit diese zu kombinieren. Für Lasten im unteren Messbereich können die Messwerte der Halbleiter DMS genutzt werden, da diese eine höhere Sensitivität haben und für die Lasten im oberen Messbereich können die Messwerte der metallischen DMS herangezogen werden, da sie einer höheren Dehnung standhalten und nicht das Problem der Nichtlinearitäten haben. Der beschriebene Sensor in [32] ist zwar nur ein Momentensensor, jedoch ist diese Auslegung auch für 6D Kraft-/Momentensensoren denkbar.

#### 2.2.4 Sensoren für spezielle Bedingungen

Für spezielle äußere Bedingungen oder Einschränkungen haben sich andere Messtechnologien als Dehnungsmessstreifen als vorteilhaft erwiesen. Bei besonders kleinen Sensoren sind kapazitive Sensoren gut geeignet. Zum Beispiel entwickelten Beyeler et al. einen MEMS (microelectromechanical systems) 6D Kraft-/Momentensensor, welcher nur  $10\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 0,5\text{ mm}$  misst und imstande ist, Kräfte und Momente im Mikro- und Nanonewton Bereich zu messen. Auch Brookhuis et al. entwickelten einen 6D Kraft-/Momentensensor mit kapazitiver Messtechnologie. Dieser hat für seine Größe von  $9\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  einen relativ großen Messbereich von bis zu  $50\text{ N}$  und  $25\text{ Nmm}$  [3]. Aber auch piezoresistive Sensoren kommen

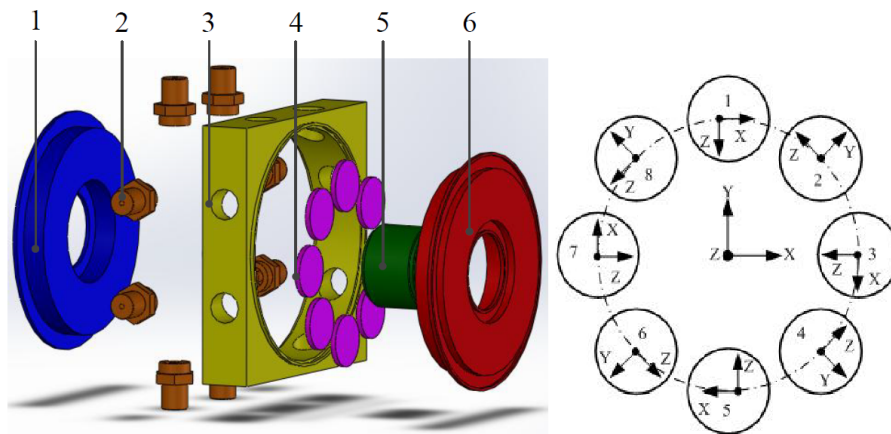
in Frage, wenn der Sensor besonders klein sein muss. Estevez et al. stellten einen 6D Kraft-/Momentensensor vor, welcher nur  $3\text{ mm} \times 1,5\text{ mm} \times 0,03\text{ mm}$  groß ist und einen Messbereich von  $30\text{ mN}$  und  $50\text{ }\mu\text{Nm}$  hat [6]. Des Weiteren ist es mit kapazitiven Sensoren möglich, relativ günstige 6D Kraft-/Momentensensoren herzustellen. Lee et al. entwickelten einen Sensor, welcher aufgrund der einfachen Struktur des Sensorgehäuses und da die Sensorelemente automatisiert auf eine Leiterplatte aufgebracht werden können, sehr kostengünstig herzustellen ist (Abb. 2.18) [17]. Allerdings hat dieser einen relativ kleinen Messbereich von  $20\text{ N}$  und  $1\text{ Nm}$  bei einem Durchmesser von  $60\text{ mm}$  und einer Höhe von  $20\text{ mm}$ .



**Abbildung 2.18:** Aufbau eines kostengünstig und vollautomatisch herstellbaren kapazitiven Sensors [17, s.S. 2293].

Falls hohe elektromagnetische Interferenzen auftreten oder hohe Beständigkeit gegen Chemikalien und Korrosion gefordert ist, können Faser-Bragg-Sensoren verwendet werden. Ein solcher Sensor wurde von Huang et al. entwickelt [8]. Die Struktur des Sensors ist in der klassischen Malteserkreuz Bauweise ausgeführt und die Messbalken sind insgesamt mit 16 Faser-Bragg Sensoren bestückt.

Alle bis jetzt beschriebenen Sensoren basieren auf der Dehnungsmessung, dementsprechend sind diese Sensoren alle elastisch verformbar. Elastische Sensoren sind aber immer ein Kompromiss aus hoher Steifigkeit und hoher Sensitivität. Des Weiteren zeigen sie oft Koppeleffekte. Eine Entkopplung ist zwar teilweise mechanisch möglich, aber erfordert eine relativ komplexe Konstruktion und ist auch meist dann nicht vollständig gegeben. Piezoelektrische Sensoren können Kräfte direkt messen und müssen deswegen nicht elastisch verformbar sein. Somit können sie, zumindest theoretisch, die aufgeführten Probleme beseitigen. Liu et al. entwickelten einen solchen Sensor (Abb. 2.19). Dieser zeigt eine bessere statische Performance als die klassischen elastischen 6D Kraft-/Momentensensoren, jedoch sind auch bei diesem die Koppeleffekte nicht vollständig beseitigt. [19]



**Abbildung 2.19:** Struktureller Aufbau des vorgestellten piezoelektrischen Sensors (links) und räumliche Anordnung der piezoelektrischen Chips zur Kraftmessung (rechts)[19, s.S. 662].

### 2.2.5 6D Kraft-/Momentensensoren bei humanoiden Robotern

Bei 6D Kraft-/Momentensensoren für humanoide Roboter wird zur Zeit im Wesentlichen die Bauweise mit drei Messbalken und die Malteserkreuz Bauweise mit vier Messbalken verwendet [15]. Gegen die Stewart Plattform spricht, dass sie nicht so flach wie ein Sensor in Malteserkreuz Bauweise ausgeführt werden kann, was meist aufgrund begrenzten Bauraums ein Problem darstellt. Die Vorteile der angesprochenen spezielleren Bauweisen spielen für die Anwendung bei humanoiden Robotern nur eine sehr geringe oder gar keine Rolle.

Für den humanoiden Roboter *iCub* vom *Istituto Italiano di Tecnologia* wurde ein 6D Kraft-/Momentensensor in Balkenbauweise mit 3 Messbalken entwickelt [27]. Zur Messung sind auf den Balken insgesamt 12 Halbleiter DMS appliziert. Als Werkstoff für den Sensorkörper wird Stahl verwendet. Aufgrund der hohen Festigkeit wird auf einen zusätzlichen Überlastschutz verzichtet. Der Sensor ist für eine maximale Kraft von 2000 N in allen Achsen sowie ein maximales Moment von 40 Nm um die x- und y-Achse und 30 Nm um die z-Achse ausgelegt. Der humanoide Roboter *H7* der *Universität Tokio* nutzt den bereits kurz vorgestellten 6D Kraft-/Momentensensor mit Kugeln um die Übertragung von Momenten zu verhindern [22]. Viele andere humanoide Roboter wie der *Wabian* der *Waseda Universität*, der *HRP-2* vom *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* in Japan oder der *THORMANG* von *ROBOTIS* aus Südkorea nutzen kommerzielle 6D Kraft-/Momentensensoren. Diese sind meistens aus Stahl und haben deswegen eine relativ hohe Masse. Außerdem gibt es nur eine begrenzte Anzahl an Herstellern und Modellen, wodurch die kommerziellen Sensoren meistens nur mäßig die individuellen Anforderungen erfüllen. Ein weiterer Nachteil ist der meist relativ hohe Preis. Über die genaue Bauweise dieser kommerziellen Sensoren ist wenig Information verfügbar, soweit bekannt wird aber meistens die Bauweise mit drei Messbalken oder die Malteserkreuz Bauweise verwendet.

Der *HUBO* von der *KAIST Universität* in Südkorea nutzt im Gegensatz zu den zuvor genannten humanoiden Robotern nur einen 3D Kraft-/Momentensensor zur Messung von einer Kraft in z-Richtung und Momenten um die x- und y-Achse [9, 10]. Dieser ist auch in der Malteserkreuz Bauweise ausgeführt. Die maximale Belastung des Sensors beträgt 1000 N und 50 Nm. Der humanoide Roboter *TORO* des *DLR* ist momentengesteuert und benutzt Momentensensoren in allen Gelenken [26]. Eine Zusammenfassung von Informationen zu den beschriebenen Sensoren ist in [15] zu finden.

## 2.3 Kalibrierung von 6D Kraft-/Momentensensoren

Um von den ausgegebenen Messwerten eines 6D Kraft-/Momentensensors auf die Lasten zu schließen, muss eine Kalibrierung durchgeführt werden. Dafür sind Kalibriermessungen notwendig. Bei diesen werden Kräfte und Momente in allen relevanten Achsen auf den Sensor aufgebracht. Aus den dabei gewonnen Messwerten (Vektor  $\mathbf{z}$ ) kann durch ein geeignetes Kalibrierverfahren eine Kalibriermatrix  $\mathbf{C}$  erstellt werden. Im Betrieb können mithilfe dieser die Kräfte und Momente (Vektor  $\mathbf{m}$ ) durch  $\mathbf{Cz} = \mathbf{m}$  berechnet werden. Es ist auch möglich, die Kalibrierung anstatt am echten Sensor mithilfe einer Simulation durchzuführen, zum Beispiel mithilfe eines FEM Programms. Dabei kann es allerdings zu Fehlern kommen, da es am realen System immer Ungenauigkeiten wie nicht exakt applizierte DMS, Abweichungen der Widerstände oder des k-Faktors der DMS, Ungenauigkeiten in der Fertigung des Sensors oder Abweichungen der Festigkeit durch Materialfehler oder ähnlichem gibt. Im Optimalfall berücksichtigt das Kalibrierverfahren Koppeffekte und Nichtlinearitäten des Sensors und gleicht diese aus. Im Fall eines 6D Kraft-/Momentensensors in Malteserkreuz Bauweise mit acht Halbbrücken ergibt sich ein Messvektor mit acht Messwerten ( $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{8 \times 1}$ ) und ein Lastvektor mit sechs Kraft- und Momentenkomponenten ( $\mathbf{m} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ).

### 2.3.1 Least-Squares Verfahren

Das am häufigsten verwendete Kalibrierverfahren ist das Least-Squares Verfahren (LSV) [31, 41]. Zum Kalibrieren muss die Anzahl der aufgebrachten Lasten mindestens gleich groß sein wie die Anzahl der Freiheitsgrade des Sensors. Es empfiehlt sich allerdings, die Anzahl der aufgebrachten Lasten deutlich höher als die Anzahl der Freiheitsgrade zu wählen. Des Weiteren müssen diese Lasten linear unabhängig voneinander sein. Um Nichtlinearitäten auszugleichen, sollen außerdem mehrere betragsmäßig unterschiedliche Lasten aufgebracht werden, um möglichst den ganzen Messbereich abzudecken. Beim klassischen LSV bleibt die Kalibriergleichung jedoch immer eine lineare Gleichung und kann keine nichtlineare Kennlinie nachbilden, sondern nur eine Gerade deren Abweichungen zur nichtlinearen Kurve möglichst gering sind. Es empfiehlt sich des Weiteren Messwerte bei einem Lastfall öfter als einmal aufzunehmen und einen gemittelten Wert zur Kalibrierung zu verwenden, um negative Einflüsse des Messrauschens auszugleichen.

Die aus den Kalibriermessungen erhaltene Messreihe kann in Matrixform geschrieben werden:

$$\mathbf{CZ} = \mathbf{M} \quad \text{mit} \quad \mathbf{C} \in \mathbb{R}^{6 \times 8}, \mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{8 \times l}, \mathbf{M} \in \mathbb{R}^{6 \times l} \quad (l \hat{=} \text{Anzahl der Lasten}) \quad (2.34)$$

$\mathbf{M}$  ist dabei die Lastmatrix bestehend aus den Vektoren der  $l$  aufgebrachten Lasten und  $\mathbf{Z}$  ist die Messmatrix aus den  $l$  gemessenen Messvektoren. Schließlich kann durch Lösen der Gleichung (2.34) mithilfe der Moore-Penrose Pseudoinversen [16]  $\mathbf{Z}^+ = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T$  die Kalibriermatrix berechnet werden:

$$\mathbf{C} = \mathbf{MZ}^+ \quad (2.35)$$

Trotz seiner Einfachheit liefert es in den meisten Fällen eine ausreichend genaue Kalibriermatrix. Nachteile dieses Verfahrens sind, dass Nichtlinearitäten zwischen ausgegebener Spannung und vorhandener Dehnung in der Kalibriermatrix nicht nachgebildet werden können und dass es sehr zeitaufwändig ist, da alle aufgebrachten Lasten genau bekannt sein müssen und bereits kleine Abweichungen der Lasten beim Kalibrierprozess zu Fehlern in der Kalibriermatrix führen.

### 2.3.2 Nichtlineares Least-Squares Verfahren

Um die vorhin angesprochenen Nichtlinearitäten nachzubilden, gibt es als Erweiterung des LSV ein nicht-lineares LSV. Dabei geht die gemessene Ausgangsspannung nicht mehr nur linear, sondern auch mit Potenzen in die Berechnung der Kräfte und Momente ein:

$$\mathbf{m} = \mathbf{C}_1 \mathbf{z} + \mathbf{C}_2 \mathbf{z}^2 + \dots + \mathbf{C}_n \mathbf{z}^n \quad (2.36)$$

Durch Umformen entsteht eine Gleichung analog zum klassischen LSV

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 & \dots & \mathbf{C}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z} \\ \mathbf{z}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{z}^n \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

und kann auch analog gelöst werden. Mit diesem Verfahren ist es nicht nur möglich einzelne Messwerte mit höheren Potenzen in die Berechnung der Kalibriermatrix einfließen zu lassen, sondern auch das Einbeziehen von Koppeltermen ist möglich. Der Messvektor und die Kalibriermatrix werden dadurch deutlich größer, aber die Nichtlinearitäten können ausgeglichen werden. Es bleibt allerdings das Problem, dass das Verfahren relativ zeitaufwändig ist. Lin et al. stellen ein nicht-lineares LSV mit Termen bis  $\mathbf{z}^5$  für einen 6D-Kraft-/Momentensensor vor und können damit die Kopplungseffekte des Sensors stark vermindern [18].

### 2.3.3 Shape from Motion Verfahren

Beim Shape from Motion Verfahren (SFM) [41] müssen im Gegensatz zum LSV nicht alle aufgebrachten Lasten genau bekannt sein, sondern nur zwei. Es empfiehlt sich jedoch drei Lasten, die jeweils reine Kräfte in x-, y- und z-Richtung darstellen, aufzubringen. Da die Lasten durch eine konstante Masse aufgebracht werden, beschreiben die verschiedenen Kraftvektoren eine Kugeloberfläche rund um das Sensorkoordinatensystem. Vorteil dieses Verfahrens ist die hohe Genauigkeit, die in kurzer Zeit erreicht werden kann. Dies rührt daher, dass nur drei Lasten genau bekannt sein müssen und die restlichen Messwerte dadurch schnell aufgenommen werden können. Außerdem gibt es weniger Fehler durch ungenaue Kräfte. Vor allem durch nicht genau bekannte Massenschwerpunkte und dadurch ungenaue Hebelarme kann es beim LSV zu Ungenauigkeiten bei der Messwertaufnahme von Momenten kommen. Der größte Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Linearisierung um einen Punkt stattfindet, da die Aufbringung der Lasten mit einer konstanten Masse erfolgt.

### 2.3.4 Device Hyperplane Characterization Verfahren

Das Device Hyperplane Characterization Verfahren [23] ist ein von dem SFM inspiriertes Verfahren. Es ist eine Anwendung des Rank Theorem [34]. Im Gegensatz zum SFM werden hier die Kräfte entlang einer Hyperebene, anstatt auf einer Kugeloberfläche aufgebracht. Es müssen auch hier streng genommen nur drei Lasten genau bekannt sein. Es werden zuerst Messwerte, ohne Kenntnis über die Kräfte, zum festlegen der Hyperebene generiert. Danach werden mindestens drei genau bekannte Kräfte aufgebracht und die Kräfte auf die Hyperebene projiziert. Zuletzt wird die Kalibriermatrix durch Datenfitting erstellt. Das Verfahren

liefert eine ähnliche Genauigkeit wie das LSV, dauert allerdings deutlich kürzer. Es ist außerdem einfacher als das SFM, da die geometrische Randbedingung bei der Konstruktion des Prüfstands nicht berücksichtigt werden muss.

### 2.3.5 Maximum Likelihood Methode

Eine weitere Möglichkeit zur Kalibrierung ist die Maximum Likelihood Methode [35]. Es ist ein statistisches Verfahren. Vereinfacht gesagt, wird dabei die Funktion approximiert, deren Parameter am wahrscheinlichsten zu den beobachteten Daten passt. Bei dem von Tran et al. vorgestellten Sensor werden sehr kleine Fehler von 1% beim Moment und 0,5% bei der Kraft durch eine Kalibrierung mit der Maximum Likelihood Methode erreicht. Außerdem ist sie auch für nichtlineare Zusammenhänge geeignet. Es wird allerdings eine große Anzahl von Messwerten benötigt.

### 2.3.6 Kalibrierverfahren mit neuronalen Netze

In letzter Zeit sind auch vermehrt Kalibrierverfahren basierend auf neuronalen Netzwerken entwickelt worden. Der große Vorteil dieser ist, dass sie Nichtlinearitäten berücksichtigen können und eine Entkopplung der Kraft- und Momentenkomponenten erreicht werden kann. Diese ist mechanisch oft schwer zu realisieren und sehr teuer. Bei 150 Trainingsdurchläufen wird beim vorgestellten Sensor von Yao et al. der Koppeleffekt auf 0,1% reduziert. Des Weiteren können die neuronalen Netzwerke ohne physikalisches und mathematisches Modell aufgebaut werden. [44]

Es gibt mehrere Weiterentwicklungen der Kalibrierverfahren mit neuronalen Netzen. Unter anderem eine Methode bei der sie mit einer Support Vector Machine (SVM) kombiniert wird [21]. Die SVM ist ein Machinelearningtool, welches durch das Structural Risk Minimization Prinzip nichtlineare, hochdimensionale Probleme mit wenigen Samples löst. Dabei wird die „normale“ Kalibriermatrix vom neuronalen Netzwerk erstellt und Nichtlinearitäten und Kopplungseffekte durch die SVM kompensiert. Durch dieses Verfahren werden die Fehler beim vorgestellten Sensor auf unter 1% reduziert. Ohne die SVM liegen die Fehler bei maximal 3,6%, bei der Messung in Achsrichtung und der Koppelfehler bei 8,5%.

Eine andere Weiterentwicklung basiert auf Deep Neural Networks [24]. Beim vorgestellten kapazitiven Sensor von Oh et al. ist dieses Verfahren um 31% besser als das LSV und um 21% besser als ein normales neuronales Netzwerk. Vor allem da es Koppeleffekte und Nichtlinearitäten besser kompensieren kann.

### 2.3.7 Kalibrierfehler durch Temperaturdifferenzen und ex situ Kalibrierung

Zusätzlich können bei der Kalibrierung Fehler durch Temperaturdifferenzen entstehen. Diese können durch eine geeignete Anordnung der DMS zwar teilweise kompensiert werden, oft aber nicht ausreichend. Es gibt die Möglichkeit, zusätzlich einen Temperatursensor zu installieren. Ein weiteres Problem ist, dass Hersteller meist einmal pro Jahr eine Neukalibrierung fordern, was einen enormen Arbeitsaufwand durch Demontage darstellt. Dieser Aufwand kann durch eine Kalibrierung direkt am Roboter enorm reduziert werden. Diese sogenannte in situ Kalibrierung kann des Weiteren Fehler, welche durch die Montage verursacht werden,

verhindern. Eine Kalibrierung des Sensors außerhalb des eingesetzten Systems wird ex situ Kalibrierung genannt und kann durch Toleranzen und durch die Montage aufgebrachte Kräfte zu Fehlern führen. [5, 36]

## 2.4 6D Kraft-/Momentensensor beim humanoiden Roboter LOLA

### 2.4.1 Sensorgehäuse

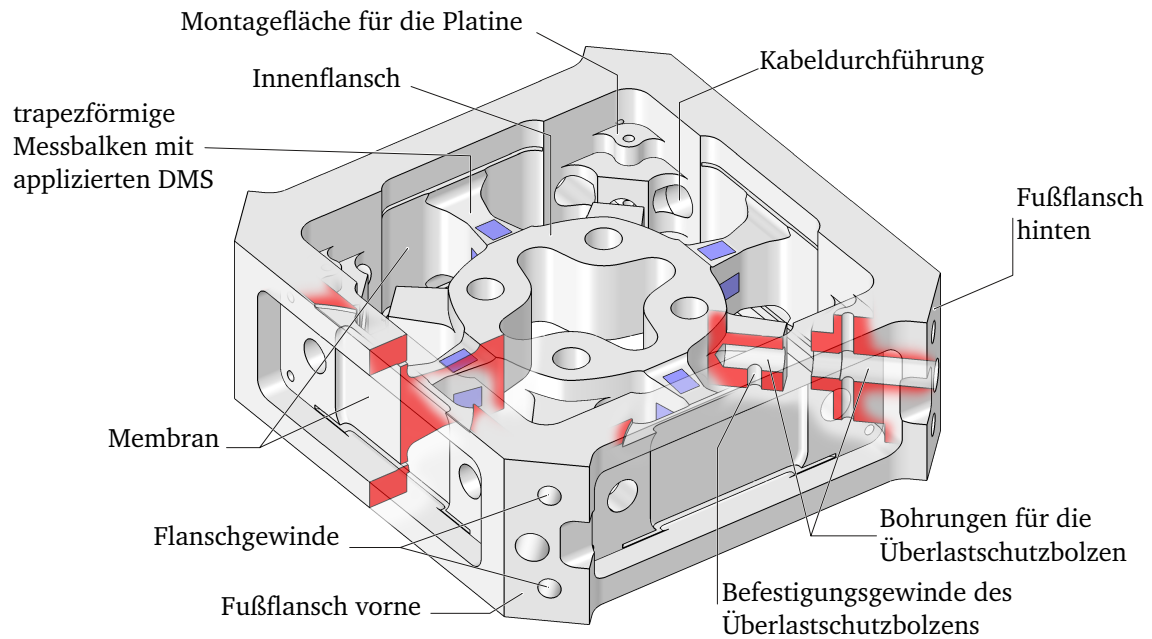
Beim humanoiden Roboter LOLA des Lehrstuhls für Angewandte Mechanik an der Technischen Universität München wird zurzeit ein 6D Kraft-/Momentensensoren in der Malteserkreuz Bauweise verwendet (Abb. 2.20). Es werden metallische DMS vom Typ *TK-MC-T009Q-350/DPM2* des Herstellers *Vishay Intertechnology, Inc.* verwendet. Diese haben einen Nennwiderstand von  $350\ \Omega$  und einen k-Faktor von 2,1. Das Sensorgehäuse ist aus der hochfesten Aluminiumlegierung *EN AW-7075 T651* gefertigt. Der Sensor ist mit 16 metallischen DMS bestückt, die jeweils zu Halbbrücken verschaltet sind.

Die Messbalken sind trapezförmig verjüngt, damit im Bereich der DMS die Dehnung nahezu linear verläuft. Durch diese Form wird allerdings auch die Struktur geschwächt. Um diese negative Auswirkung möglichst gering zu halten, werden die Balken nach der Klebefläche für die DMS wieder verdickt. Um eine möglichst gute Entkopplung der einzelnen Lastkomponenten zu gewährleisten, sind die Balken über eine 1,3 mm dicke Membran mit dem Außenteil des Sensors verbunden. Diese Membran ist nur seitlich direkt mit dem Gehäuse verbunden, da oben und unten ein dünner Schlitz eingefräst ist. Um eine möglichst hohe Sensitivität zu garantieren, sind die DMS so nah wie möglich am Balkenanfang angebracht, da dort die größte Dehnung auftritt. Zur Befestigung am Fuß sind an der Sensoraußenseite vier Flächen mit jeweils zwei Gewindebohrungen vorgesehen. Die Anbindung zum Sprunggelenk erfolgt über einen Flansch an der Innenseite. Die kreuzförmige Ausnehmung in der Mitte dient zur Gewichtsersparnis und als Verdrehsicherung für eine Isolierbuchse. An Innen- und Außenseite des Sensorgehäuses sind Bohrungen zur Realisierung eines Überlastschutzes eingebracht. Zur Energieversorgung ist eine Kabeldurchführung, in welche eine Kabelklemme zur Zugentlastung eingeschraubt wird, vorgesehen. Zur Platinenmontage sind an der Oberseite des Sensors vier Auflageflächen mit Gewindebohrungen vorhanden. Des Weiteren ist der gesamte Sensorkörper weitestgehend symmetrisch ausgeführt.

Der Sensor ist für eine Kraft von 500 N in x-Richtung, 100 N in y-Richtung und 1200 N in z-Richtung und ein Moment von 100 Nm um die x-Achse, 120 Nm um die y-Achse und 50 Nm um die z-Achse ausgelegt. Eine FEM Berechnung ergibt, dass bei der maximalen Belastung von 120 Nm um die y-Achse an der Ober- und Unterseite der Balken eine von Mises-Spannung von  $140\ \text{N/mm}^2$  vorliegt und eine maximale Dehnung von  $\varepsilon = 1,424 \cdot 10^{-3}$  im Bereich der DMS. Der Sensorkörper ist außerdem als integrales und tragendes Bauteil ausgeführt. [30]

### 2.4.2 Zusammenbau

Zur elektrischen Isolierung zwischen Sensor und Sprunggelenk ist eine Isolierbuchse vorgesehen. Als Material wird ein elektrisch isolierendes und druckfestes Hartgewebe gewählt. Die Buchse hat dieselbe kreuzförmige Kontur wie die Ausnehmung im Sensor, um eine Verdrehsicherung zu gewährleisten. Diese liegt außerdem noch an der Oberseite der Verbindungs-



**Abbildung 2.20:** Aktuell verbauter Sensor beim humanoiden Roboter LOLA [30, s.S. 47],

fläche zwischen Sprunggelenk und Sensor auf. Diese Fläche am Sensor ist so gestaltet, dass eine möglichst geringe und für das Isoliermaterial verkräftbare Flächenpressung vorliegt. An der Sensorunterseite ist auch eine Isolierbuchse aus demselben Material vorhanden, da sonst durch die Schrauben eine elektrische Verbindung herrschen würde. Zum Verteilen des Drucks von den Schraubenköpfen auf die Isolierbuchse ist ein Zentralverschluss vorgesehen.

Es ist außerdem ein Überlastschutz mit vier Stahlbolzen realisiert. Diese sind an der Innenseite des Sensors in eine Passbohrung eingepresst und werden über eine Madenschraube zusätzlich gegen Verdrehung gesichert. An der Sensoraußenseite ragen die Bolzen in eine etwas größere Bohrung, sodass kein Kontakt besteht. Mittels FEM sind die Maße so berechnet, dass die Bolzen in Kontakt mit der äußeren Bohrung stehen, sobald eine gewisse Grenzlast überschritten wird. Diese ist durch die Belastungsgrenze der Balken festgelegt.

Die Sensorplatine ist zusammen mit dem oberen Deckel über die vorhin beschriebenen Bohrungen befestigt. Durch die Verbindungsstelle zwischen Sensor und Sprunggelenk ist an der Platine eine relativ große Ausnehmung erforderlich. Zum Schutz der innenliegenden elektronischen Bauteile vor Beschädigung und Staub sind an allen Seiten des Sensors Deckel vorgesehen. Da der obere und die seitlichen Deckel keine besonderen Festigkeitsanforderungen haben, sind diese aus POM gefertigt. Der untere Deckel ist für die Versteifung des Sensors und zum Schutz vor spitzen Gegenständen durch Auftreten aus derselben hochfesten Aluminiumlegierung wie der Sensorkörper gefertigt. Der zusammengebaute Sensor wiegt 403,3 g.[30]



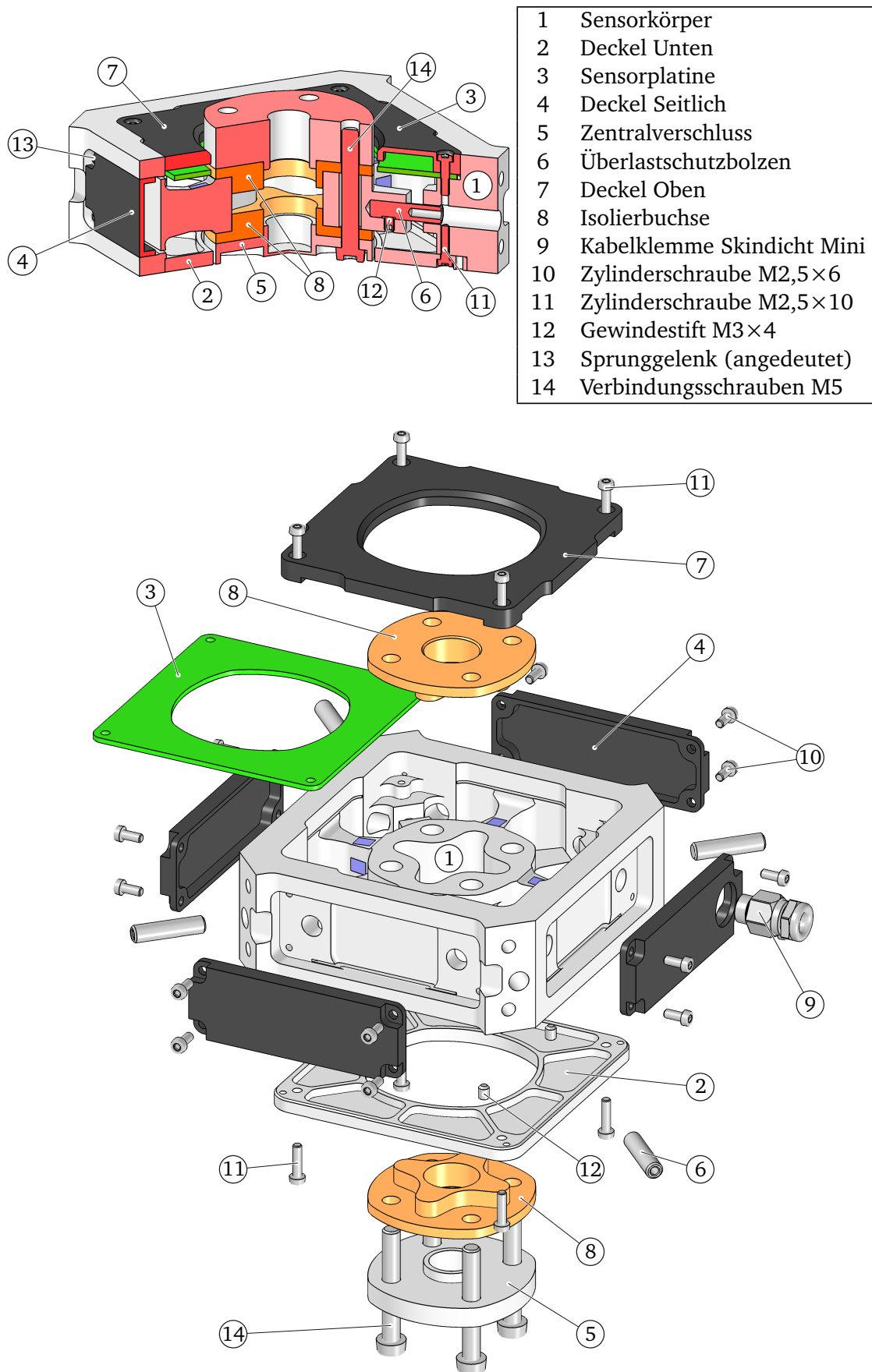
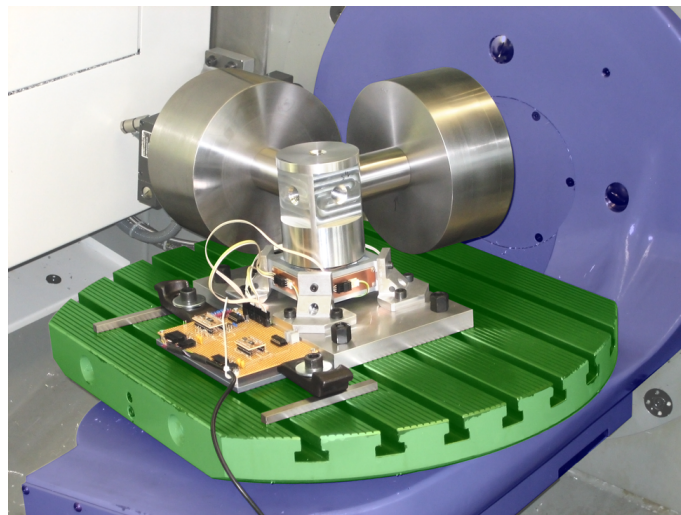


Abbildung 2.21: Zusammenbau und Explosionszeichnung des Kraftsensors [30, s.S. 50].

### 2.4.3 Kalibrierung

Die Kalibriermessungen wird mithilfe einer Vorrichtung an der lehrstuhleigenen CNC-Fräsmaschine *DMU-50* mit Schwenktisch durchgeführt (Abb. 2.22). Die Kalibriervorrichtung besteht aus einer Grundplatte, die auf den Schwenktisch aufgespannt ist. Grundplatte und Sensor sind über vier Winkel verbunden. An der Verbindungsstelle zum Sprunggelenk ist ein Adapter fixiert. An diesen können verschiedene Lastkörper angebracht werden. Es werden insgesamt drei Lastkonfigurationen verwendet und durch Schwenken des Tisches 486 Messwerte aufgenommen. Die Messwerte werden mithilfe von 32-fachen Oversampling aufgenommen, d.h. ein Messwert wurde 32 mal aufgenommen und danach der Mittelwert dieser Messungen verwendet. Mit den gewonnenen Messwerten wird eine Kalibriermatrix mithilfe des LSV und des SFM erstellt. Die Kalibriermatrix, welche mit dem LSV erstellt wird, ist dabei die genauere und wird schlussendlich auch verwendet. Der durchschnittliche Fehler im Kraftbereich ist dabei 0,628% und im Momentenbereich 0,479%. Die mit dem SFM gewonnene Kalibriermatrix zeigt einen durchschnittlichen Fehler von 0,753% im Kraftbereich und 0,706% im Momentenbereich.[30]



**Abbildung 2.22:** Kalibriervorrichtung inkl. Sensor in der CNC-Fräsmaschine [30, s.S. 72].

## Kapitel 3

### Entwicklung und Fertigung eines Prüfstands

Eine der Hauptaufgaben dieser Arbeit ist es, metallische und Halbleiter DMS hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu vergleichen. Zuerst müssen dafür passende Halbleiter DMS ausgewählt und beschafft werden. Für die darauf folgende experimentelle Untersuchung der DMS bietet es sich an, ein bereits gefertigtes, aber noch nicht verwendetes Sensorgehäuse zu verwenden. Dies muss auch bei der Konzeption und Konstruktion berücksichtigt werden. Der Prüfstand soll aus dem teilweise mit DMS bestückten Sensor und einem Aufbau zur Aufbringung von Kräften und Momenten bestehen. Des Weiteren ist es nötig, ein Verfahren oder eine Vorrichtung zur Applikation der DMS zu entwickeln.

#### 3.1 Auswahl der DMS

Zur experimentellen Untersuchung sollen die zuvor verwendeten metallischen DMS, eine modernere Type eines metallischen DMS und eine Halbleiter DMS Type verglichen werden. Da sich allerdings herausgestellt hat, dass die ursprünglich verwendeten metallischen DMS noch dem Stand der Technik entsprechen, werden diese für den Vergleich verwendet. Die verwendeten DMS mit der Bezeichnung *TK-MC-T009Q-350/DPM2* vom Hersteller *Vishay Intertechnology, Inc.* haben einen Nennwiderstand von  $350 \pm 0,15\% \Omega$  und einen k-Faktor von 2,1. Das Messgitter besteht aus modifiziertem Karma und hat eine Abmessung von  $1,52 \text{ mm} \times 2,54 \text{ mm}$ . Die Trägerfolie besteht aus glasfaserverstärktem Epoxyphenol und hat eine Abmessung von  $4,1 \text{ mm} \times 5,6 \text{ mm}$ . Insgesamt ist der DMS nur ca.  $50 \mu\text{m}$  dick. Die DMS Type ist für Aluminiumlegierungen temperaturkompensiert.

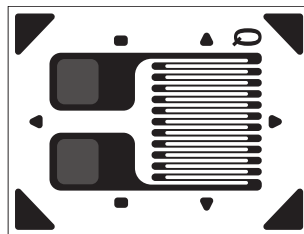


Abbildung 3.1: DMS des Typ *TK-MC-T009Q-350-DPM2* [38].

Bei der Beschaffung von Halbleiter DMS ist die Auswahl an Modellen und Herstellern deutlich begrenzter. Anders als bei metallischen DMS sind Halbleiter DMS auch ohne Trägermembran verfügbar. Durch die direkte Applizierung der DMS am Sensor können noch bessere

Messergebnisse erzielt werden, da die Membran eine weitere Fehlerquelle darstellt. Jedoch ist das Anbringen am Sensor nochmal deutlich diffiziler. Für den experimentellen Vergleich werden Halbleiter DMS der Type *SS-080-050-500 PB* vom Hersteller *Micron Instruments* verwendet (Abb. 3.2). Die DMS besitzen einen Nennwiderstand von  $540 \pm 50 \Omega$  bei  $25^\circ\text{C}$  und einen k-Faktor von  $140 \pm 10$ . Als Messobjekt dient ein Monokristall aus P-dotiertem Silizium mit Abmessungen von  $1,27 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$  und einer Dicke von  $0,01 \text{ mm}$ . Die Membran misst  $7,62 \text{ mm} \times 3,43 \text{ mm}$ , ist  $0,127 \text{ mm}$  dick und besteht aus dem Verbundwerkstoff FR-4. Die maximale Dehnung des DMS beträgt  $\pm 3000 \mu\text{m}/\text{m}$  und kann bei Temperaturen von bis zu  $260^\circ\text{C}$  eingesetzt werden. Der Hersteller verspricht eine maximale Linearitätsabweichung von  $1,5\%$  bei  $1500 \mu\text{m}/\text{m}$ . Der Ausdehnungskoeffizient des Halbleiterkristalls ist nicht auf den der Aluminiumlegierung abgeglichen. Die Temperaturabhängigkeit des k-Faktors  $TCGF$  (3.1) beträgt  $-13\%$  und der Temperaturkoeffizient des Widerstands  $TCR$  (3.2) beträgt  $16\%$ . Die beiden Werte sind auf eine Temperaturänderung von  $56^\circ\text{C}$  bezogen.

$$TCGF = 100 \frac{k_2 - k_1}{k_1(T_2 - T_1)}. \quad (3.1)$$

$$TCR = 100 \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)}. \quad (3.2)$$

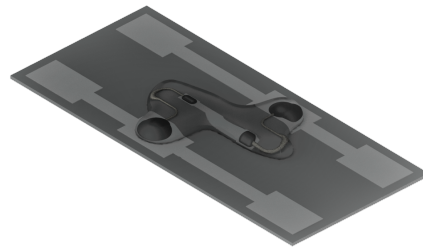
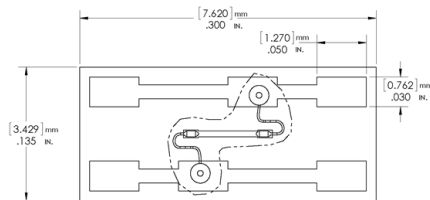
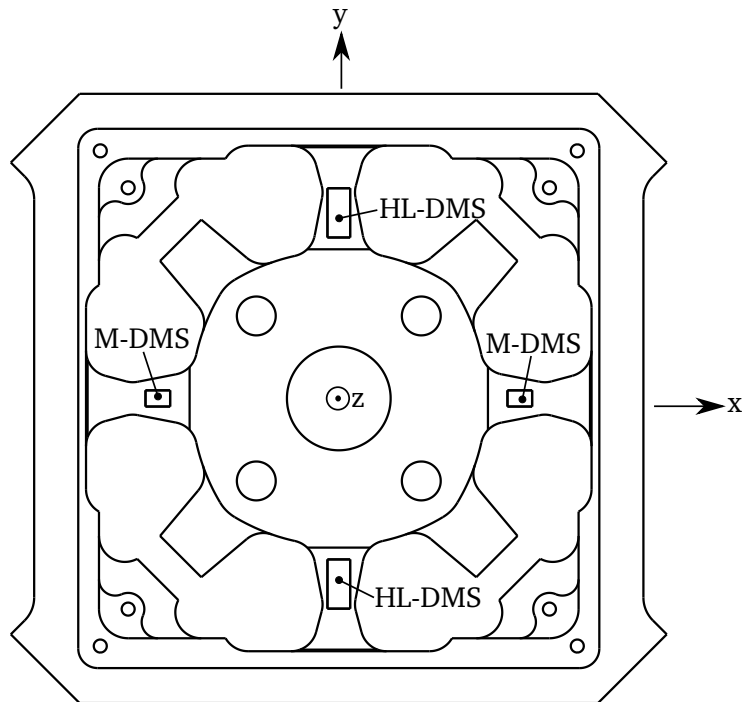


Abbildung 3.2: Halbleiter DMS des Herstellers *Micron Instruments* [7].

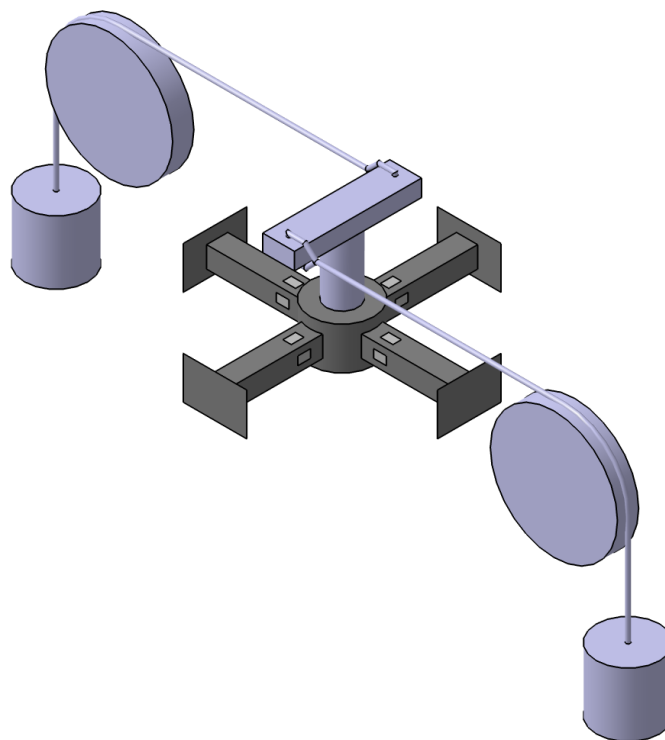
## 3.2 Konzeption und Entwicklung eines Prüfstands

Es wird ein gefertigtes Gehäuse des originalen Sensors für die experimentelle Untersuchung verwendet. Die Konzeption eines Prüfstands ist im folgenden beschrieben. Der Sensor sollte mit jeweils zwei Halbbrücken mit metallischen- und Halbleiter DMS bestückt sein (Abb. 3.3). Für die Halbbrücken werden jeweils an der Ober- und Unterseite der Messbalken ein DMS aufgeklebt. Durch diese Konfiguration kann der Sensor eine Kraft in z-Richtung und ein Moment um die x-Achse und um die y-Achse messen. Dementsprechend sollte der Prüfstand auch in der Lage sein, diese Lasten auf den Sensor aufzubringen. Der Fertigungsaufwand für den Prüfstand sollte möglichst gering sein. Durch diese Anforderung wurde festgelegt, dass das Aufbringen der Lasten mittels Gewichten erfolgen soll, da für andere Möglichkeiten der Lastaufbringung zusätzliche Maschinen oder Gerätschaften benötigt werden. Zusätzlich zu den statischen Belastungen sollte der Prüfstand auch imstande sein dynamische Kräfte und Momente aufzubringen.

Ein erstes Konzept sieht die Belastung mit einer Kraft in z-Richtung durch Gewichte, deren Schwerpunkt auf der z-Achse des Sensors liegt, um keine Momente zu erzeugen, vor. Die Momente sollten über eine Konstruktion mit Seilrollen aufgebracht werden (Abb. 3.4). Der Vorteil dieses Konzepts ist die Möglichkeit reine Kräfte und Momente aufzubringen. Die Fertigung eines solchen Prüfstands wäre allerdings relativ aufwendig, weswegen ein weiteres Konzept erstellt wird.



**Abbildung 3.3:** Positionierung der Halbleiter DMS (HL-DMS) und metallischen DMS (M-DMS) am Sensorgehäuse.

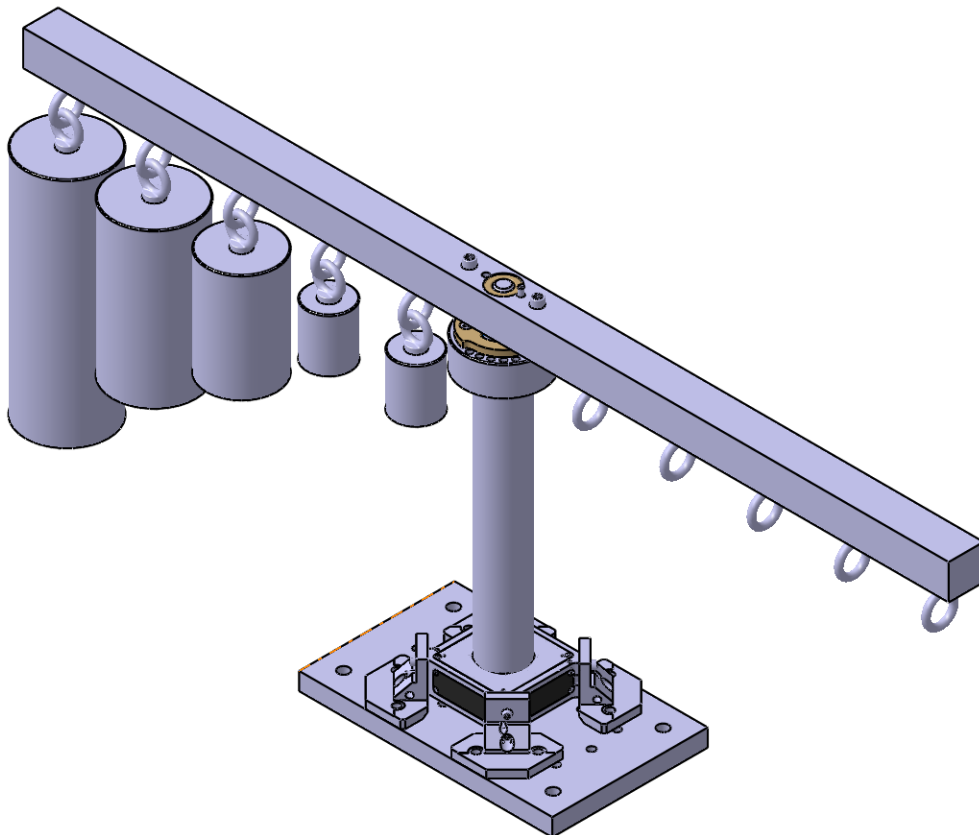


**Abbildung 3.4:** Konzept eines Prüfstands mit Seilrollen, in diesem Fall für ein Moment um die  $z$ -Achse. Die Belastung in andere Richtungen würde ähnlich erfolgen.

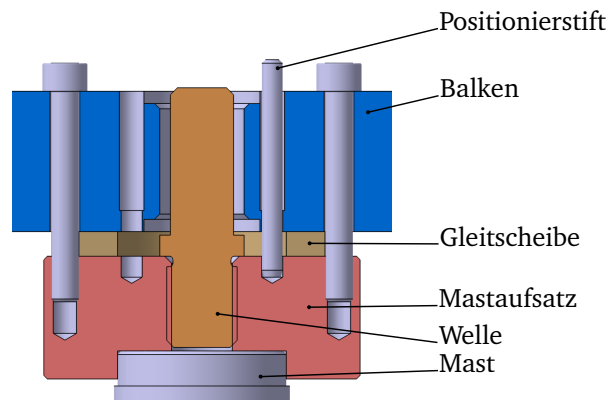
### 3.2.1 Finale Konstruktion

Die finale Konstruktion (Abb. 3.5) ist relativ einfach gehalten. Zum Aufspannen des Sensors auf einen Messtisch wird eine bereits bestehende Konstruktion, welche für die Kalibrierung des bestehenden Sensors verwendet wurde, wiederverwendet. Auf der Grundplatte, welche über Spannpratzen am Messtisch aufgespannt werden kann, sind vier Winkel befestigt. Der Sensor ist über diese Winkel mit der Grundplatte verbunden. Am inneren Flansch des Sensors ist ein Mast angebracht. An diesem ist eine Welle und eine Gleitscheibe befestigt. Über diese Bauteile ist ein Balken drehbar um die z-Achse gelagert. An diesem sind Hakenschrauben angebracht um verschiedene Gewichte aufhängen zu können. Die Position des Balkens kann über einen Positionierstift und eine Schraubverbindung fixiert werden. Mit dieser Positionier-einrichtung (Abb. 3.6) kann der Winkel des Balkens zum Sensor in  $15^\circ$  Schritten eingestellt werden. Alle Bauteile oberhalb des Sensors sind zusätzlich zu den Schraubverbindungen noch mit Passstiften oder anderen Passungen verbunden, um eine genaue Positionierung zu gewährleisten.

Bis auf die Gleitelemente und die Welle ist der gesamte Aufbau aus Aluminium gefertigt. Die Welle ist aus dem hochfesten Vergütungsstahl 42CrMo4 gefertigt, da diese ein großes Moment aufnehmen muss. Durch die einfache Austauschbarkeit der Gewichte kann der komplette Messbereich des Sensors von 1200 N und 120 Nm problemlos abgedeckt werden. Ein Nachteil dieser Konstruktion ist, dass es nicht möglich ist, den Sensor mit reinen Momenten zu belasten. Für eine Kraft in z-Richtung ist dies schon möglich. Außerdem kann es durch Ungenauigkeiten bei der Fertigung zu nicht erwünschten Momenten kommen, da durch den großen Hebelarm bereits kleine Abweichungen in der Toleranz zu merklichen Momenten führen.



**Abbildung 3.5:** Finale Konstruktion der Prüfvorrichtung.

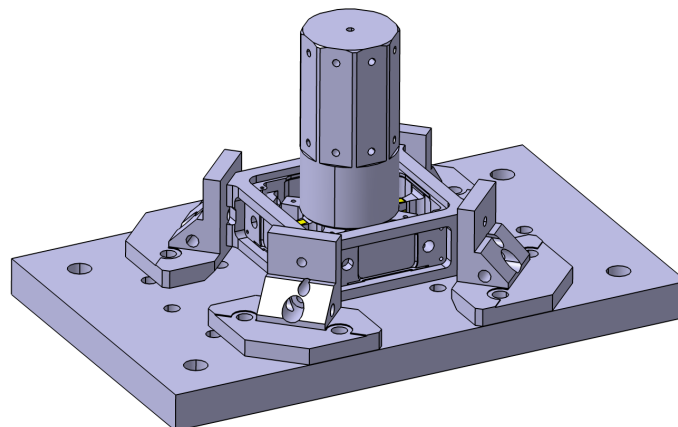


**Abbildung 3.6:** Schnittansicht des Verstellmechanismus. Es sind jeweils mehrere Anschraub- und Positionierbohrungen über den Umfang verteilt.

Da diese Konstruktion deutlich einfacher und somit auch schneller gefertigt werden kann, wird sie den anderen Konzepten vorgezogen und realisiert. Nach Fertigstellung der Konstruktion und der Fertigungszeichnungen wurde der Prüfstand in der mechanischen Werkstatt des Lehrstuhls gefertigt.

### 3.2.2 Prüfstand für dynamische Messungen

Um die Übertragungsfunktion der Sensorstruktur und damit seine Eigenfrequenzen zu bestimmen, wird ein Prüfstand zur dynamischen Messung benötigt. Die Kraftübertragung sollte mittels eines Schwingungserregers erfolgen. Es ist nur ein zusätzliches Bauteil nötig, um die dynamischen Messungen durchzuführen. Der Aufbau aus Grundplatte, Winkel und Sensor ist derselbe wie beim Prüfstand zur statischen Messung. Anstatt des Masts ist ein Adapter zum Verbinden des Schwingungserregers am inneren Flansch des Sensors befestigt (Abb. 3.7). Dieser hat eine oktagonale Form. An der Oberseite und an den Seitenflächen sind jeweils Gewindebohrungen vorhanden. Über diese kann der Schwingungserreger durch einen Stößel mit dem Sensor verbunden werden. Durch die Gewindebohrung an der Oberseite kann eine Kraft in z-Richtung übertragen werden und durch die seitlichen Gewindebohrungen ein Moment um die x- oder y-Achse in Kombination mit einer Kraft in y-Richtung oder x-Richtung übertragen werden.



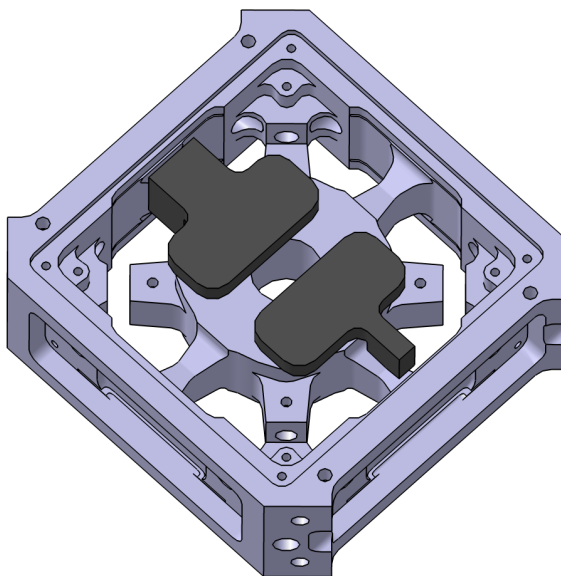
**Abbildung 3.7:** Prüfvorrichtung für dynamische Messungen.

### 3.3 Verkleben der DMS

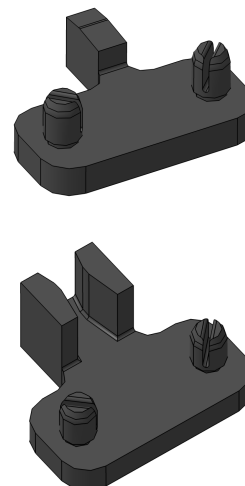
Das Verkleben der DMS am Sensor ist ein äußerst kritischer Vorgang. Fehler beim Ausrichten oder Anpressen der DMS können zu Messfehlern führen oder die DMS sogar beschädigen. Als Klebstoff wird der warmtaushärtende *M-Bond 610* vom Hersteller *Micro Measurements* verwendet. Es sind zwar auch kaltaushärtende Klebstoffe verfügbar, welche den Anforderungen genügen, allerdings kann bei diesem Klebeprozess die Ausrichtung nicht mehr nachjustiert werden. Eine genaue Ausrichtung beim ersten Versuch ist allerdings durch die schlechte Erreichbarkeit der Klebeflächen an den Balken nicht ausreichend gewährleistet. Da das Aushärten unter Anpressdruck geschehen muss, werden für die Ausrichtung und das Ankleben der DMS Vorrichtungen verwendet. Eine genaue Anleitung zum Klebevorgang ist in Anhang A zu finden.

#### 3.3.1 Markier- und Anpressvorrichtungen

Zur Ausrichtung der DMS empfiehlt es sich die Klebposition zu markieren. Bei Aluminium eignet sich dazu ein herkömmlicher 4H Bleistift, da es damit einfach möglich ist, Markierungen in die Oberfläche zu polieren. Somit ist auch nach der Reinigung der Klebestelle die Markierung noch gut sichtbar. Da die Messbalken eine komplexe Form haben, ist es mit herkömmlichen Mitteln wie zum Beispiel einem Lineal nicht möglich, eine saubere und genaue Markierung zu erstellen. Die entwickelten Markiervorrichtungen (Abb. 3.9) können durch zwei Bolzen über die Anschraubbohrungen im Sensor genau positioniert werden. Im zu markierenden Bereich haben die Vorrichtungen eine Negativform der Balkenform und ermöglichen eine einfache und präzise Markierung der DMS Position mittels Bleistift. Die Anlagefläche für den Bleistift ist leicht außer mittig vom Balken, um die Strichstärke auszugleichen. Dadurch ist die Markierung genau mittig. Da diese Bauteile keinerlei Festigkeitsanforderungen haben und es Einzelstücke sind, werden diese mit einem 3D-Drucker gefertigt (Abb. 3.10), da dies kostengünstig und schnell ist und auch die Genauigkeitsanforderungen erfüllt.

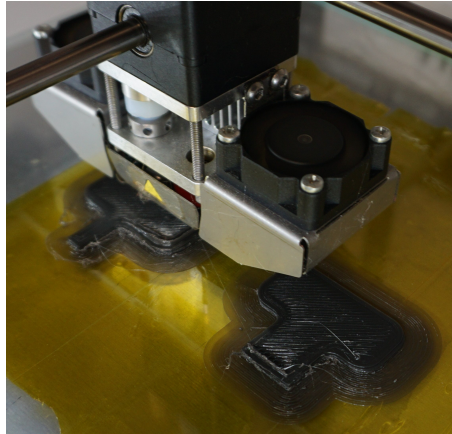


**Abbildung 3.8:** Zusammenbau von Markiervorrichtungen und Sensor.



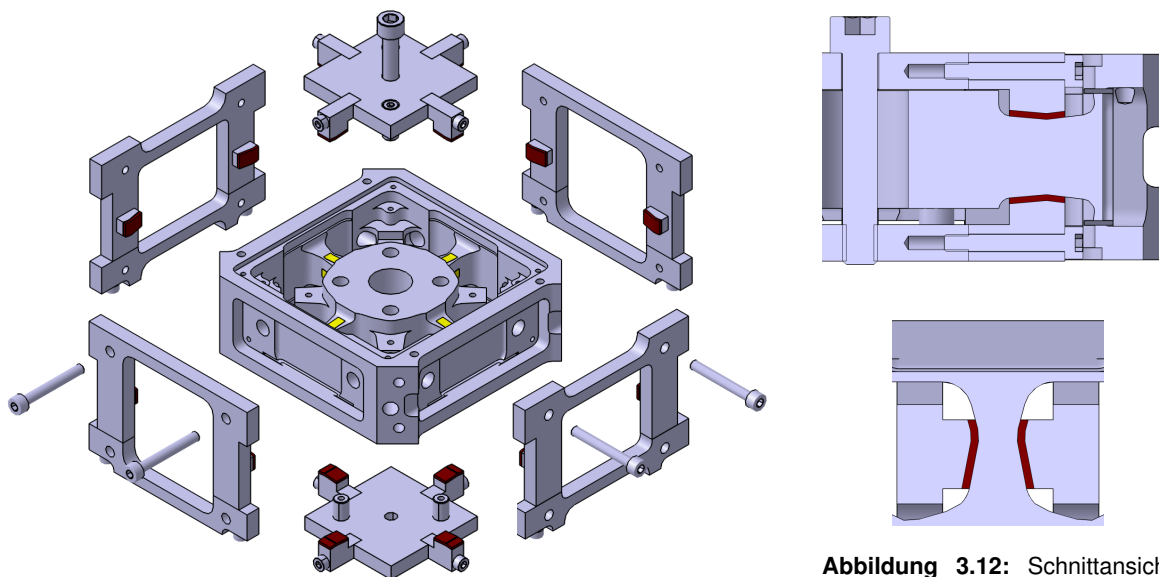
**Abbildung 3.9:** Markiervorrichtung für die Ober- und Unterseite der Balken (oben) und Markiervorrichtung für die Seitenflächen (unten).





**Abbildung 3.10:** 3D-Druck der Markiervorrichtungen.

Vom Klebstoffhersteller wird empfohlen, den Anpressdruck mittels einer Federklemme auf die Klebestelle aufzubringen. Dies ist allerdings aufgrund der Balkengeometrie bei diesem Sensor nicht möglich. Die Anpressvorrichtung für die DMS an der Ober- und Unterseite der Balken (Abb. 3.11) bleibt weitestgehend unverändert zu der von Schwienbacher konstruierten [30]. Die Pressvorrichtung ist über die Anschraubbohrungen geführt und der Anpressdruck wird durch Anziehen einer zentral gelegenen Schraube aufgebaut. Die Finger mussten neu gefertigt werden, da die Halbleiter DMS länger sind und die Membran bis in den wieder breiter werdenden Bereich der Balken ragt. Diese haben die Negativform der Balkenform und sind etwas versetzt, sodass zwischen Klebestelle und Pressfinger noch ein Silikonpad gelegt werden kann, das den Druck gleichmäßig auf die Klebestelle verteilt. Die Anpressvorrichtung für die seitlichen DMS (Abb. 3.11) wird neu konstruiert. Diese wird über die Ausfräsung für die Deckel an Ober- und Unterseite des Sensors geführt. Der Anpressdruck wird auch hier über Schrauben erzeugt, jedoch sind es in diesem Fall vier Schrauben pro Vorrichtungspaar, da es nicht möglich ist, eine Schraube zentral zu platzieren. Die Anpressfläche hat auch hier wieder die Negativform der Balkenform inklusive eines Offsets für ein Silikonpad.



**Abbildung 3.11:** Explosionsansicht des Sensors und der Anpressvorrichtungen.

**Abbildung 3.12:** Schnittansicht der Klebestellen an der Ober- und Unterseite (oben) und der seitlichen Klebestellen (unten).



## Kapitel 4

# Experimentelle Untersuchung der DMS

In diesem Kapitel ist nur eine Auswahl der Diagramme, welche aus den Messdaten erstellt werden, enthalten. Der Rest findet sich im Anhang B. Im gesamten Kapitel werden für die verschiedenen Messbrücken Abkürzungen verwendet. Für die Messbrücken mit Halbleiter DMS wird HL DMS 1 und HL DMS 2 verwendet, für die Messbrücken mit metallischen DMS M DMS 1 und M DMS 2.

### 4.1 Messkette

Für die experimentelle Untersuchung der DMS wird der im vorigen Kapitel beschriebene Prüfstand in Kombination mit einem kommerziellen Messverstärker des Typs *MGC* vom Hersteller *HBM* eingesetzt (Abb. 4.1). Die Verstärkung der vier Brückenschaltungen ist dabei so eingestellt, dass die Ausgangsspannung von Halbleiter DMS und metallischen DMS in einem ähnlichen Bereich liegt und der gesamte Ausgangsspannungsbereich des Verstärkers genutzt wird. Dadurch ergibt sich eine Verstärkung von 1000 bei den metallischen DMS und eine Verstärkung von 12,5 bei den Halbleiter DMS. Der Verstärker bietet außerdem die Möglichkeit die Messkette abzugleichen. Ein Abgleich ist die Unterdrückung eines unerwünschten Anfangssignals. Der Abgleich ist nötig, da die verschiedenen Glieder der Messkette bereits ein Signal liefern. Dieses entsteht durch mehrere Quellen wie dem Eigengewicht des Sensors bzw. des Prüfstands, Asymmetrien in der Brückenschaltung oder Abweichungen vom Nullpunkt des Verstärkers.

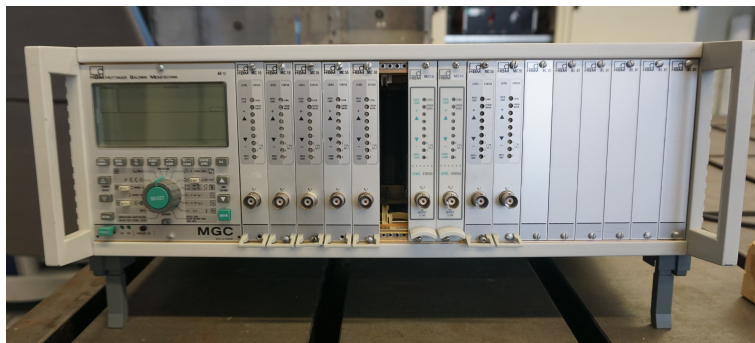


Abbildung 4.1: Messverstärker *MGC*.

Neben der Ausgangsspannung der Halbbrücken wird noch die Temperatur des Sensors mithilfe eines Thermoelements gemessen. Dieses Thermoelement ist vom Typ-K und hat die

Materialpaarung NiCr-Ni. Durch den Seebeck Effekt erzeugt es eine Thermospannung aufgrund einer Temperaturänderung. Das Thermoelement ist mit einem Klebeband in der Nähe der Messbalken am Sensor befestigt.

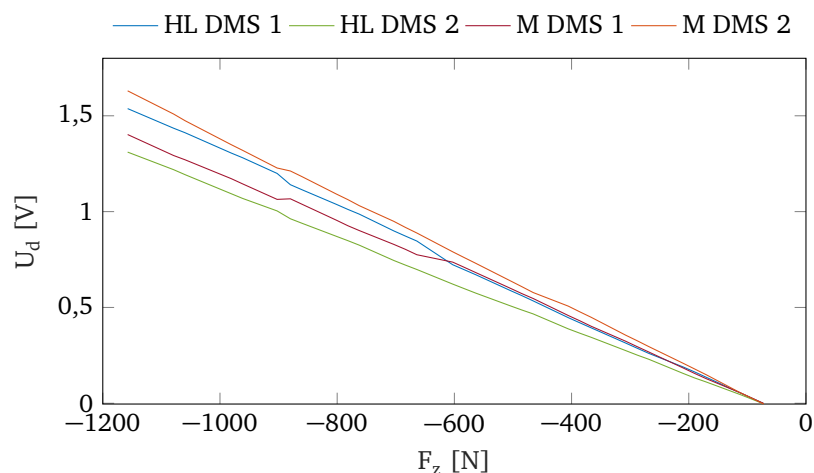
Für die Aufzeichnung der Messwerte wird das Multi-Kanal Messgerät *DT9857E* vom Hersteller *Data Translation* in Kombination mit der Messwerterfassungssoftware *DASYLab* von *National Instruments* verwendet. Die Auswertung der Messungen erfolgt mit *MATLAB*.

## 4.2 Anfängliche Probleme bei den Messungen

Bei Beginn der Messungen gab es noch einige Störungen im Messsignal. Die Störquellen, Auswirkungen und Lösungsansätze sind im folgenden beschrieben.

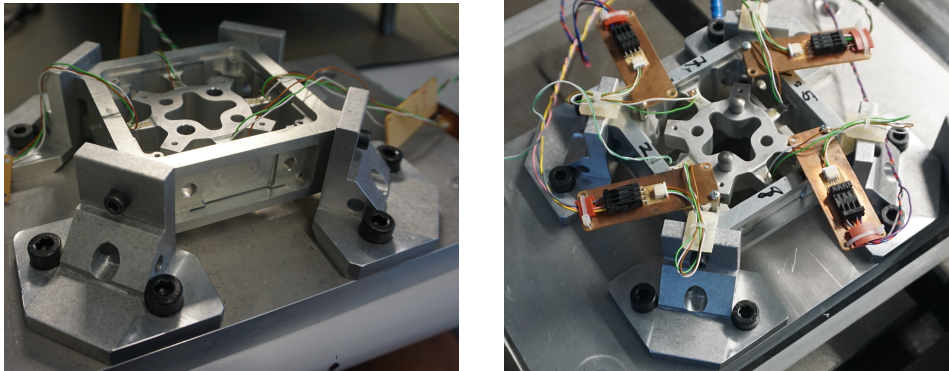
Das Messsignal kann durch Spannungs- und Stromquellen beeinflusst werden. In diesem Fall war die Stromversorgung des Messverstärkers eine solche Störquelle. Bei statischen Messungen ohne Belastung zeigt sich dadurch ein stark schwankendes Signal in Form einer Sinusschwingung mit einer Frequenz von ca. 50 Hz. Bei den metallischen DMS ist dieser Effekt stärker zu sehen als bei den Halbleiter DMS. Zur Behebung des Problems, wird der Messverstärker räumlich möglichst weit entfernt vom Kraftsensor aufgestellt und geschirmte Kabel verwendet.

Zur Verbindung von Sensor und Messverstärker wurden anfangs Adapterstecker verwendet. Bereits durch minimale Berührungen oder Schwingungen des Aufbaus, welche bei der Belastung mit Gewichten zwangsweise auftreten, änderte sich wohl die Kontaktfläche der Steckverbindung und somit der Widerstand. Aufgrund dessen ändert sich auch die gemessene Ausgangsspannung. Die Kennlinie durch die Messpunkte zeigt dadurch immer wieder in unregelmäßigen Abständen Sprünge. Diese werden für einige folgende Messpunkte als Offset beibehalten, bis der nächste Sprung in der Kennlinie auftritt (Abb. 4.2). Die Störungen sind bei metallischen DMS stärker ausgeprägt. Dies lässt sich durch die höhere Verstärkung, welche die metallischen DMS gegenüber den Halbleiter DMS benötigen, um in etwa die gleiche Ausgangsspannung zu erhalten, erklären. Die höhere Verstärkung wird benötigt, da der k-Faktor der verwendeten Halbleiter DMS in etwa 70 mal höher ist als der der metallischen DMS.



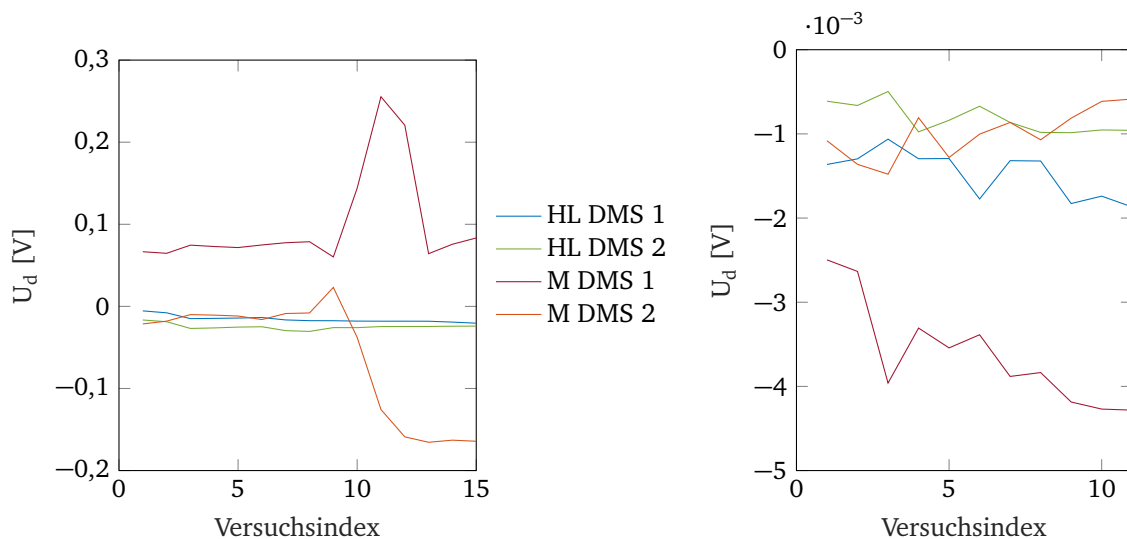
**Abbildung 4.2:** Kraft-Spannungs Kennlinie der vier Messbrücken. Es treten immer wieder Sprünge in der Kennlinie auf.

Die Störungen werden durch Ersetzen der Adapterstecker durch ein durchgehendes Kabel von den Lötstützpunkten bis zum Verstärker beseitigt. In diesem Fall reicht es nicht, die Kabel in der Nähe der Stecker durch Kabelbinder zu befestigen um eine Zugentlastung herzustellen, sodass sich die Kabelbewegungen außerhalb dieses Bereichs nicht auf den Stecker übertragen (Abb. 4.3). Auch das möglichst sanfte Aufhängen der Gewichte um Schwingungen zu minimieren und Vermeiden von Berührungen der Kabel und Stecker bringt nicht den gewünschten Effekt.



**Abbildung 4.3:** Sensor mit losen Kabeln (links) und Sensor mit befestigten Kabeln (rechts).

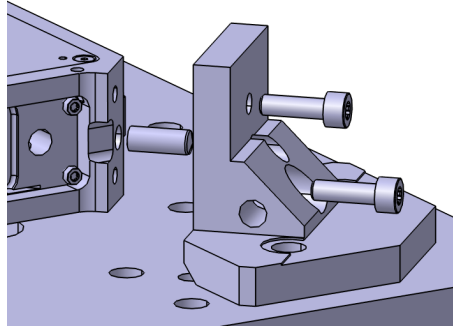
Um den vorher-nachher Zustand zu vergleichen, wird ein Versuch durchgeführt. Die Messbrücken werden dafür bei Beginn des Versuchs abgeglichen. Der Sensor wird danach mit 20 kg belastet, die Last wieder entfernt und ein neuer Messwert aufgenommen. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt. Wie in Abb. 4.4 zu sehen ist, weichen die Messwerte teils deutlich vom Anfangswert ab. Die Sprünge vermindern sich aber durch Entfernen der Stecker erheblich. Beim Versuch mit Steckern ist deutlich zu sehen, dass die Sprünge bei den metallischen DMS größer ausfallen. Dies lässt sich durch die höhere Verstärkung erklären.



**Abbildung 4.4:** Abweichungen vom Anfangswert der Ausgangsspannung vor Entfernen der Stecker (links) und danach (rechts).

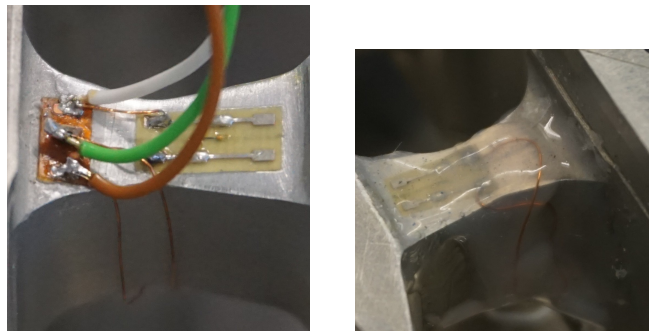
Durch mechanische Belastung von kraftschlüssigen Verbindungsstellen kann es dazu kommen, dass sich der Aufbau durch Überwindung der Haftreibung leicht verschiebt und somit die Belastung auf den Sensor bezüglich der Momente eine andere ist. Des Weiteren können

durch solche Verschiebungen innere Spannungen entstehen. Da die resultierende Dehnung beim maximalen Moment deutlich höher ausfällt als bei der maximalen Kraft, können bereits vergleichsweise kleine Momente große Abweichungen in der gemessenen Ausgangsspannung verursachen. Diese Fehler können sich auch durch Sprünge in der Kennlinie bemerkbar machen. Um diese Einflüsse zu beseitigen, wurden bei den Verbindungswinkeln zwischen Kraftsensor und Grundplatte zu der Schraubverbindung zusätzliche Passstifte hinzugefügt (Abb. 4.5), um eine formschlüssige Verbindung herzustellen. Die restlichen Verbindungsstellen sind entweder schon formschlüssig verbunden oder werden als nicht kritisch identifiziert, da sie bereits mit relativ großen Schrauben gesichert sind. Außerdem sollte eine horizontale Bewegung des gesamten Versuchsaufbaus keine Auswirkung auf die Belastung haben.



**Abbildung 4.5:** Explosionsansicht der Verbindungsstelle von Sensor und Befestigungswinkel mit zusätzlichem Passstift.

Eine weitere Störquelle sind freiliegende Kupferdrähte zur Bildung der Messbrücken zwischen DMS und Lötstützpunkten. Bereits bei kleinen Bewegungen der Drähte ist eine Änderung der Ausgangsspannung zu erkennen. Bei dem in LOLA verbauten Sensor ist eine solche Bewegung bereits ausgeschlossen, da die Messbrücken mit Silikon versiegelt sind. Auf diese Maßnahme wurde beim Prüfstand anfangs verzichtet, da die negativen Auswirkungen nicht klar waren. Durch Versiegelung der Messbrücken können zufriedenstellende Messdaten aufgenommen werden.



**Abbildung 4.6:** Messbrücken und Verbindungsdrähte in unversiegeltem (links) und versiegeltem Zustand (rechts).

## 4.3 Kraft- und Momentenmessungen

### 4.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung der Messungen

Zur Bestimmung der Kennlinien und k-Faktoren der verschiedenen DMS werden die Brücken jeweils in der Anfangskonfiguration abgeglichen. Der Sensor ist allerdings in der Anfangskonfiguration nicht unbelastet, da der Aufbau bereits 7,4 kg wiegt und eine Kraft in negativer z-Richtung auf den Sensor ausübt. Für die Kraftmessung werden jeweils symmetrisch Gewichte in 10 kg Schritten am Prüfstand aufgehängt. Durch das symmetrische Aufhängen sollte auf den Sensor eine reine Kraft wirken und keine Momente. Wie sich allerdings bei der Auswertung herausstellt, wirken durch Toleranzen in der Fertigung und durch leichte Massenunterschiede zwischen den Gewichten auch kleine Momente auf den Sensor, welche allerdings die Kennlinien merklich beeinflussen.

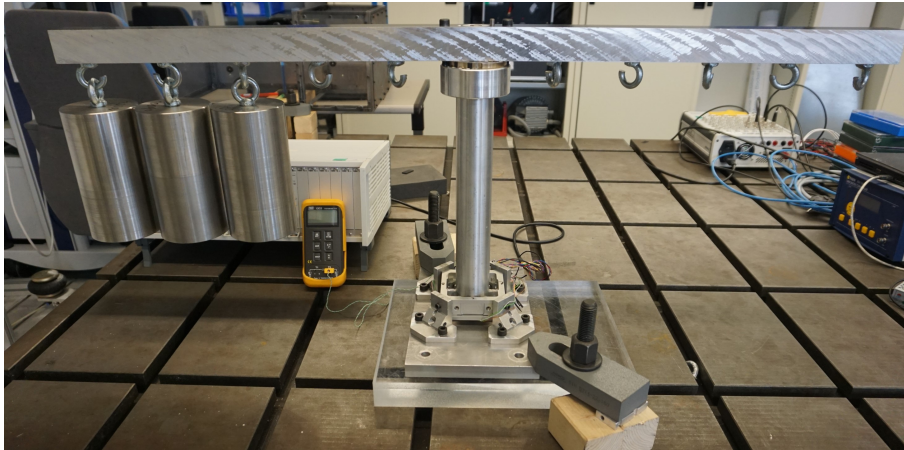
Um diesen Einfluss zu umgehen werden die Messungen mehrmals und in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Bei einer Konfiguration ist die Position des Prüfbalkens so eingestellt, dass er parallel zu den Messbalken steht, an denen die Halbleiter DMS verklebt sind, sodass kein Moment auf diese wirkt und in einer zweiten Konfiguration um  $90^\circ$  versetzt, sodass auf die Messbalken mit den metallischen DMS kein Moment wirkt. Um Einflüsse von Schwingungen des Aufbaus oder der Sensorstruktur zu vermeiden, wird mit der Aufzeichnung der Messdaten immer solange gewartet, bis diese Einflüsse in den Daten nicht mehr sichtbar sind. Direkt nach dem Aufhängen der Gewichte ist es deutlich ersichtlich, dass der Aufbau durch das Aufhängen der Gewichte angeregt wird und zu schwingen beginnt. Um die Einflüsse des Rauschens der Ausgangsspannung auszugleichen werden pro Messung 2048 Messwerte mit einer Frequenz von 2000 Hz aufgenommen. Somit dauert eine Messung knapp über eine Sekunde.



**Abbildung 4.7:** Versuchsaufbau zur Kraftmessung mit Maximallast (1158 N).

Das Vorgehen zum Messen von Momenten um die x-Achse und um die y-Achse läuft ähnlich ab. Der Abgleich der DMS geschieht in der gleichen Konfiguration wie bei der Kraftmessung. Die Gewichte werden aber in diesem Fall nur auf einer Seite des Prüfbalkens aufgehängt und zwar so, dass sich das Moment pro Messung um ca. 10 Nm erhöht. Es ist zu beachten, dass pro zusätzlichem Gewicht sich nicht nur das Moment erhöht, sondern auch die Kraft in z-Richtung. Der Balken wird außerdem so positioniert, dass die Momente jeweils reine Momente um die x-Achse oder um die y-Achse sind. Bei der Aufzeichnung der Messwerte wird wieder gewartet bis die Schwingungen des Aufbaus nicht mehr in den Messdaten sichtbar

sind. Die Anzahl der Messwerte pro Messung und die Messfrequenz sind identisch zu der Konfiguration zur Kraftmessung.



**Abbildung 4.8:** Versuchsaufbau zur Momentenmessung mit Maximallast (366,5 N und 117,7 Nm).

### 4.3.2 Auswertung der Kraftmessungen

Zuerst wird zur Weiterverarbeitung der Daten mithilfe der *MATLAB* Funktion *mean()* der Mittelwert aus den aufgezeichneten Rohdaten der einzelnen Messungen gebildet. Zusammen mit den dazugehörigen Kräften wird eine Kraft-Spannungs Kennlinie erstellt. Die Kennlinien beginnen aufgrund der Belastung vom Aufbau von ca -70 N und dem Abgleich in dieser Konfiguration bei 0 V.

Die Kraftmessungen werden mehrmals durchgeführt um zu Überprüfen ob das Verhalten gleich bleibt. Datensatz 1 (D 1) und Datensatz 2 (D 2) werden direkt hintereinander aufgenommen. Datensatz 3 (D 3) wird erst nach einigen Tagen Abstand aufgezeichnet. Der letzte Buchstabe bei der Bezeichnung der Datensätze sagt aus, auf welche DMS Brücken das unerwünschte Moment wirkt. HL steht dabei für die Halbleiter DMS und M für die metallischen DMS.

Zur besseren Vergleichbarkeit von metallischen DMS und Halbleiter DMS wird die Ausgangsspannung  $U_d$  durch den k-Faktor und die eingestellte Verstärkung dividiert. Man erhält so einen normierten Wert  $U_{d,norm} = U_d / (k \cdot V)$ .

Beim Vergleich von Halbleiter DMS und metallischen DMS ist vor allem die Veränderung des k-Faktors durch Dehnung interessant, da dieser bei den Halbleiter DMS nicht konstant ist. Bei metallischen DMS sollte der k-Faktor konstant sein. Der k-Faktor kann als Maß für die Steigung der Kennlinie gesehen werden. Da nur die Ausgangsspannung  $U_d$  und die Kraft  $F$  und nicht die Dehnung  $\varepsilon$  bekannt sind, kann der k-Faktor nicht direkt berechnet werden. Über die Kraft  $F$  und dem Hebelarm  $l$  oder dem Biegemoment  $M_b$  und Widerstandsmoment  $W_b$  kann jedoch die Biegespannung  $\sigma_b$  berechnet werden:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{Fl}{W_b}. \quad (4.1)$$

Mit der Formel für die Dehnung  $\varepsilon = \sigma_b / E$ , mit der Biegespannung  $\sigma_b$  und dem Elastizitätsmodul  $E$ , und durch Umformen der Gleichung für  $U_d$  aus Tabelle 2.2 Zeile f zu  $\Delta R / R_0 = 2U_d / U_0$



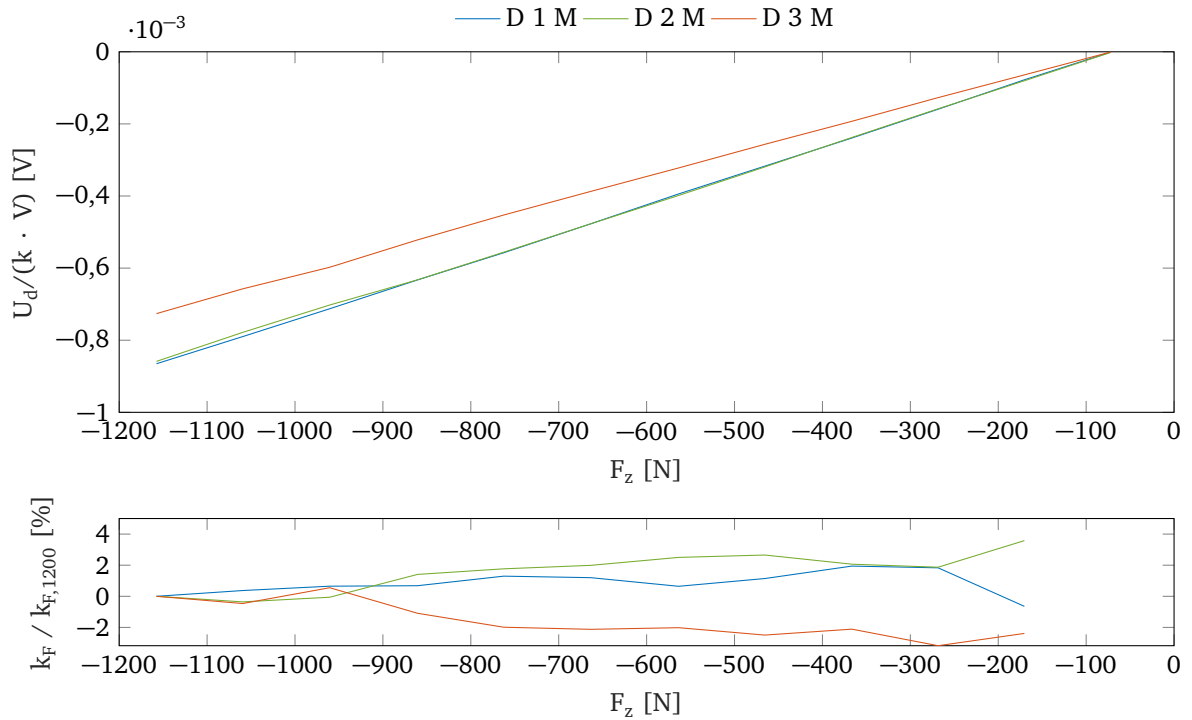
kann die Gleichung  $k\varepsilon = \Delta R/R_0$  (2.13) in Abhängigkeit von bekannten und konstanten Größen geschrieben werden:

$$k \frac{Fl}{W_b E} = 2 \frac{U_d}{U_0} \Rightarrow k \underbrace{\frac{lU_0}{2W_b E}}_{const.} = \frac{U_d}{F}. \quad (4.2)$$

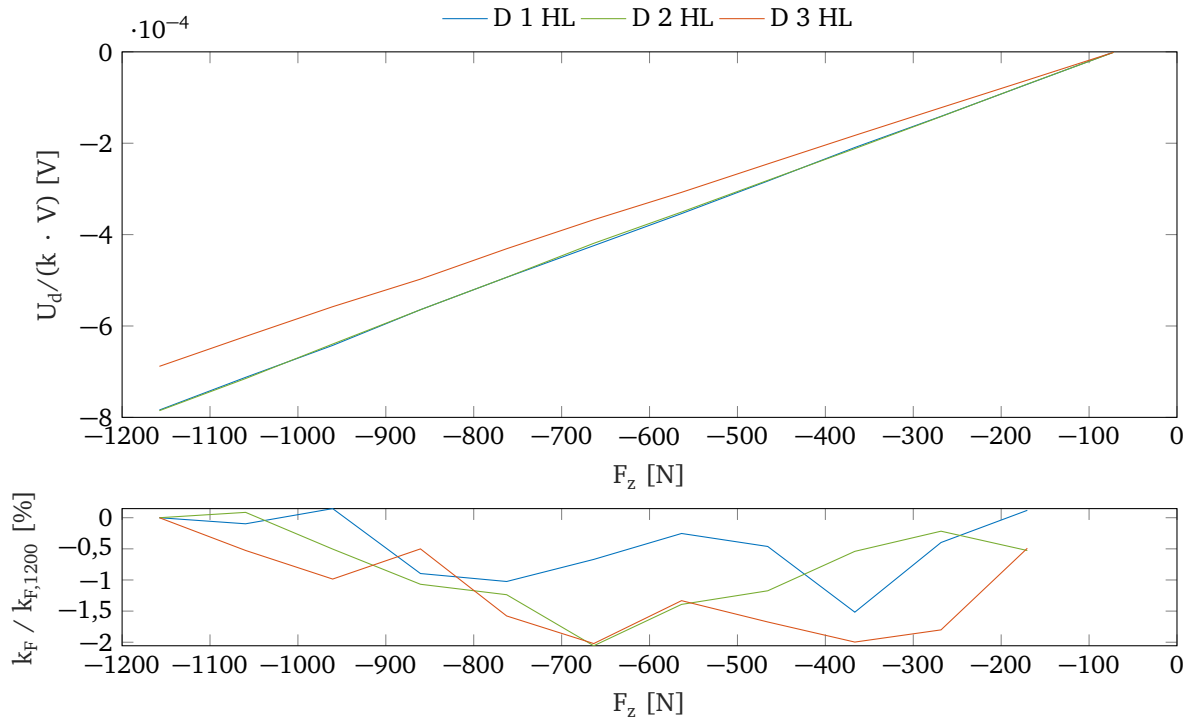
Damit ist zwar nicht direkt der k-Faktor bekannt, aber ein dazu proportionaler Wert  $k \cdot const.$ . Zur besseren Veranschaulichung wird der aktuelle k-Faktor  $k_F$  auf den Wert des k-Faktors bei Maximalbelastung von 1200 N  $k_{F,1200}$  der betreffenden Kennlinie bezogen.

Es ist zu erkennen, dass Datensatz 1 und Datensatz 2 bis auf minimale Abweichungen die gleiche Kennlinie zeigen, die Kennlinie, welche mit Datensatz 3 erstellt wird, allerdings deutliche Abweichungen zeigt (Abb. 4.9 und 4.10). Dies ist bei den Halbleiter DMS sowie metallischen DMS deutlich zu erkennen. Die genauen Gründe für die Abweichungen bei Datensatz 3 sind nicht bekannt, allerdings wird der Prüfstand dazwischen mehrmals demontiert und der Sensor für andere Versuche aufgeheizt oder abgekühlt, dies könnte die Feuchtigkeit an den DMS verändern. Des Weiteren ist zu sehen, dass der k-Faktor innerhalb eines Datensatzes mit der Belastung schwankt. Bei den Halbleiter DMS ist dies zu erwarten. Wieso die metallischen DMS allerdings ein ähnliches Verhalten zeigen, ist unbekannt.

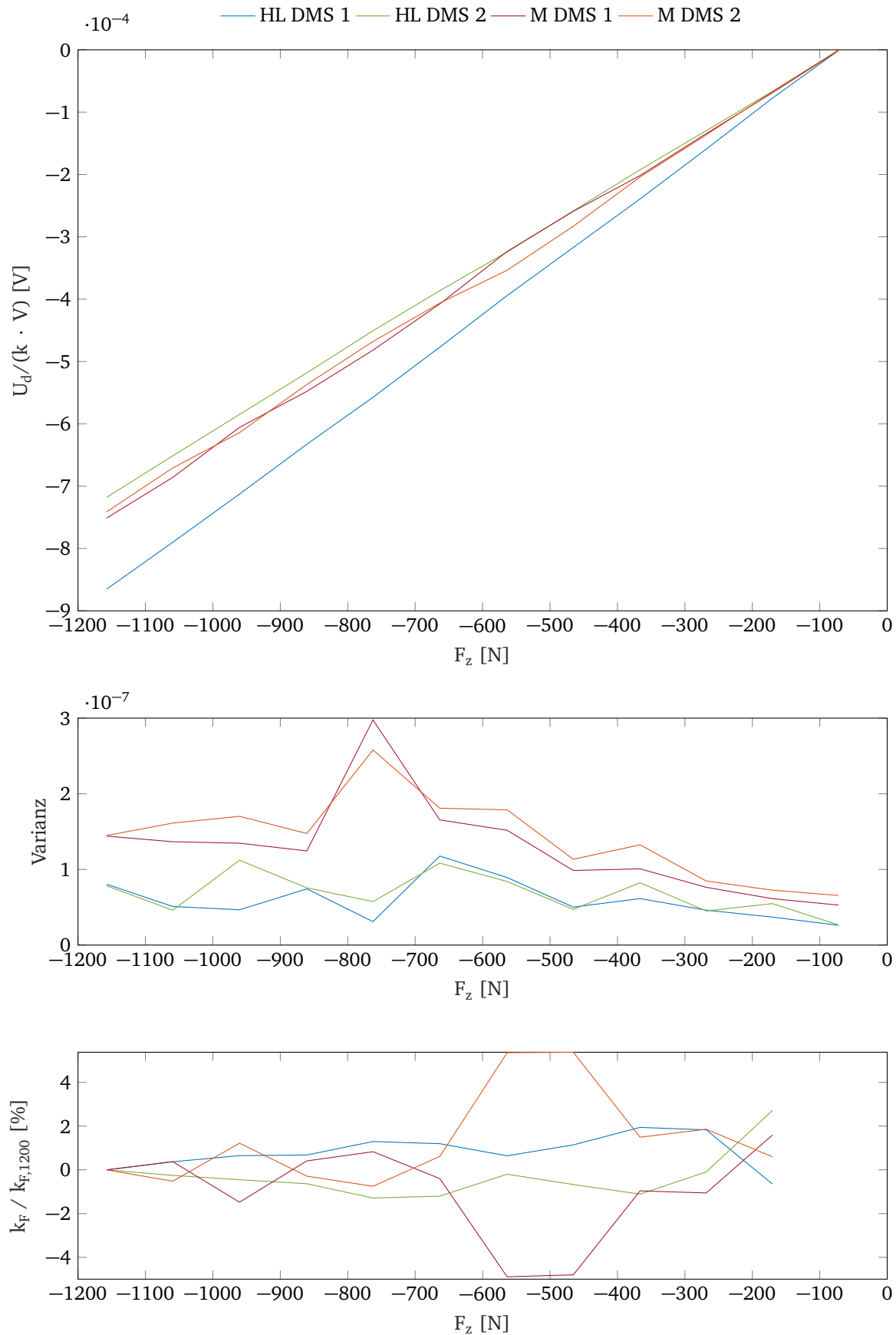
Bei der Betrachtung der verschiedenen Kennlinien innerhalb eines Datensatzes ist deutlich zu erkennen, dass das unerwünschte Moment Auswirkungen auf die entsprechenden DMS hat und die Kennlinie sowie die k-Faktoren deutliche Schwankungen zeigen (Abb. 4.11 und 4.12). Zur Beurteilung des Messrauschens wird die Varianz herangezogen. Diese wird aus den Rohdaten der Messungen mit der *MATLAB*-funktion *var()* bestimmt. Die Varianz der Halbleiter DMS ist dabei fast durchgehend niedriger als die der metallischen DMS (Abb. 4.11 und 4.12). Bei der Varianz ist auch ein Unterschied zwischen den Momentenkonfigurationen ersichtlich. Wenn ein Moment auf die DMS wirkt, ist die Varianz höher.



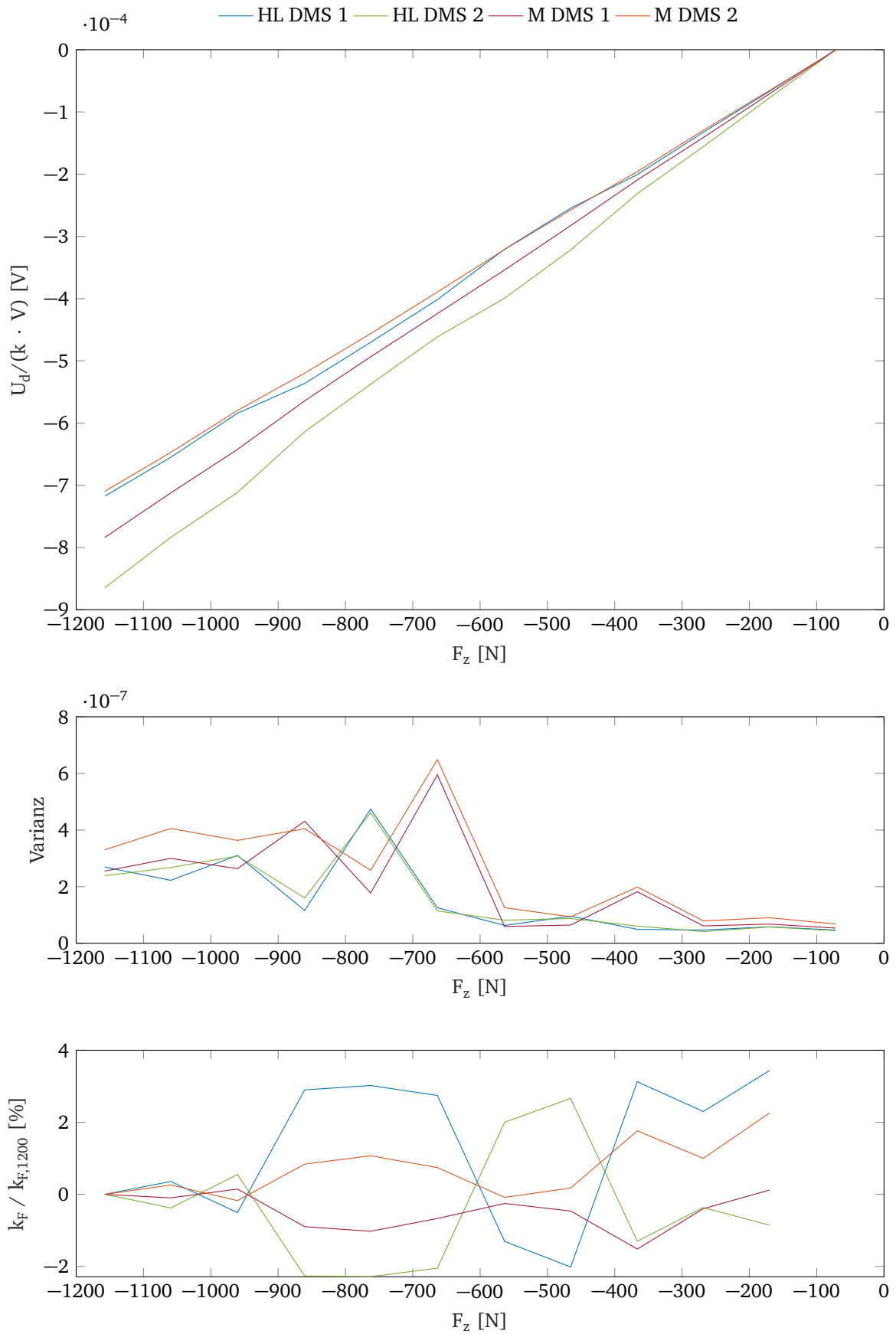
**Abbildung 4.9:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben) und Änderung der k-Faktoren (unten) der Brücke HL DMS 1 für die Datensätze 1 bis 3.



**Abbildung 4.10:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben) und Änderung der k-Faktoren (unten) der Brücke M DMS 1 für die Datensätze 1 bis 3.



**Abbildung 4.11:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben), Varianz (mittig) und Änderung der k-Faktoren (unten) des Datensatzes D 1 M.



**Abbildung 4.12:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben), Varianz (mittig) und Änderung der k-Faktoren (unten) des Datensatzes D 1 HL.

### 4.3.3 Auswertung der Momentenmessungen

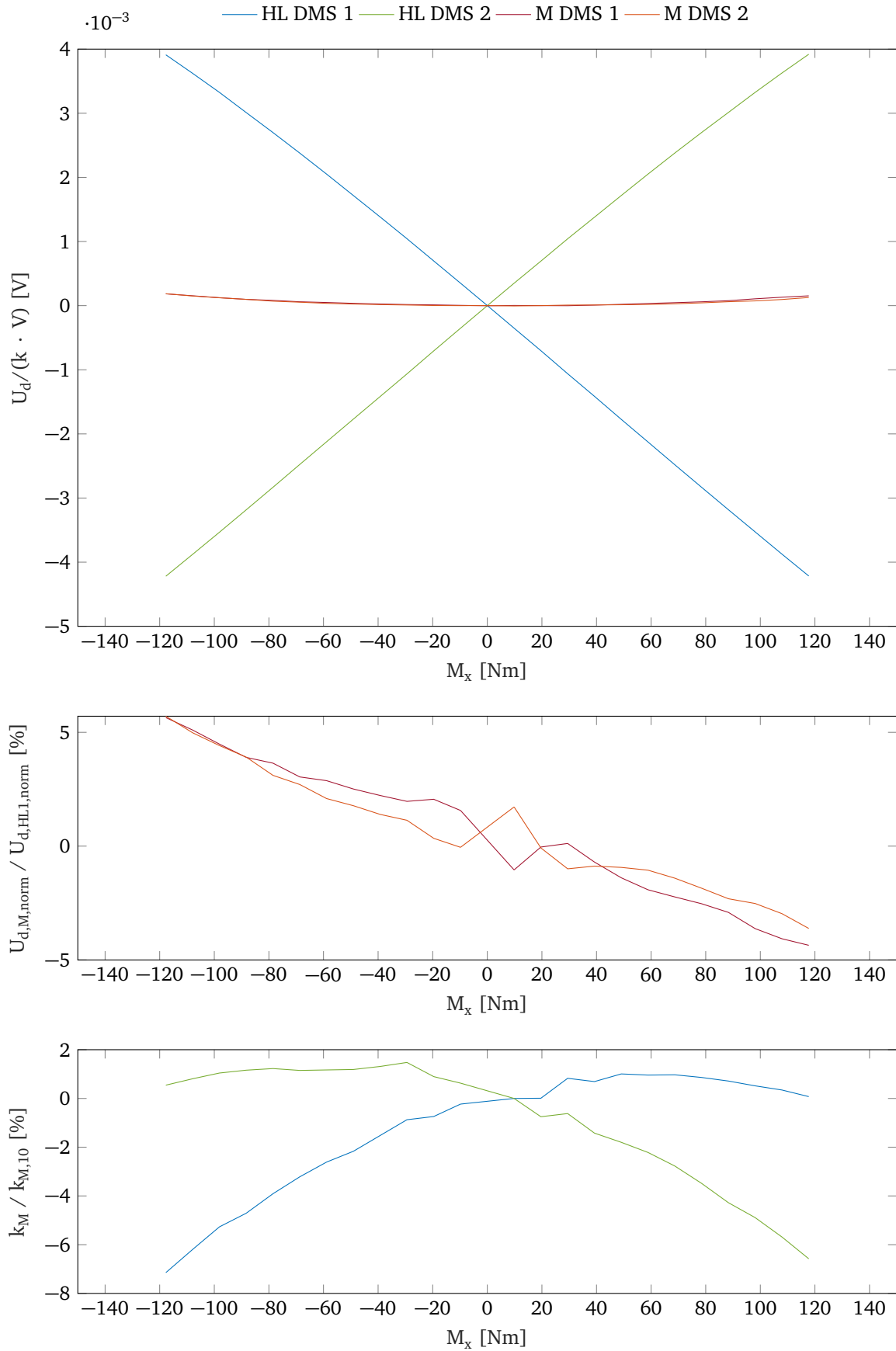
Auch bei den Momentenmessungen wird zuerst unter Zuhilfenahme von *MATLAB* der Mittelwert der gemessenen Daten gebildet. Da keine reinen Momente aufgebracht werden können, wird der durch die Kraft verursachte Anteil der Spannung aus den Daten herausgerechnet. Dafür wird mithilfe der *MATLAB*-Funktion *fit()* eine Funktion für die Ausgangsspannung  $V(F)$  in Abhängigkeit der Kraft  $F$  erstellt und der damit erhaltene Spannungswert von den Daten subtrahiert. Da die Fehler durch Nichtlinearitäten klein sind, wird für  $V(F)$  eine lineare Funktion gewählt.

Es ist erkenntlich, dass bei der Momentenmessung größere Ausgangsspannungen auftreten. Daraus lässt sich schließen, dass die Dehnung bei dem maximalen Moment größer ist als bei der maximalen Kraft. Bei Betrachtung der erhaltenen Kennlinien ist deutlich zu erkennen, dass es Koppeleffekte im Sensor gibt (Abb. 4.13 und 4.14). Die eigentlich unbelasteten Halbleiter DMS zeigen bei einem Moment um die y-Achse einen Ausschlag. Bei den metallischen DMS und einem Moment um die x-Achse verhält es sich gleich. Zur Veranschaulichung wird der prozentuale Anteil der normierten Spannung der eigentlich nicht belasteten DMS vom normierten Spannungswert der belasteten DMS aufgetragen (Abb. 4.13 und 4.14). Eigentlich sollte die Ausgangsspannung der nicht belasteten DMS  $U_d = 0$  sein, also je höher der prozentuale Anteil, desto größer die Kopplung. Es ist ersichtlich, dass die Kopplung mit der Belastung zunimmt.

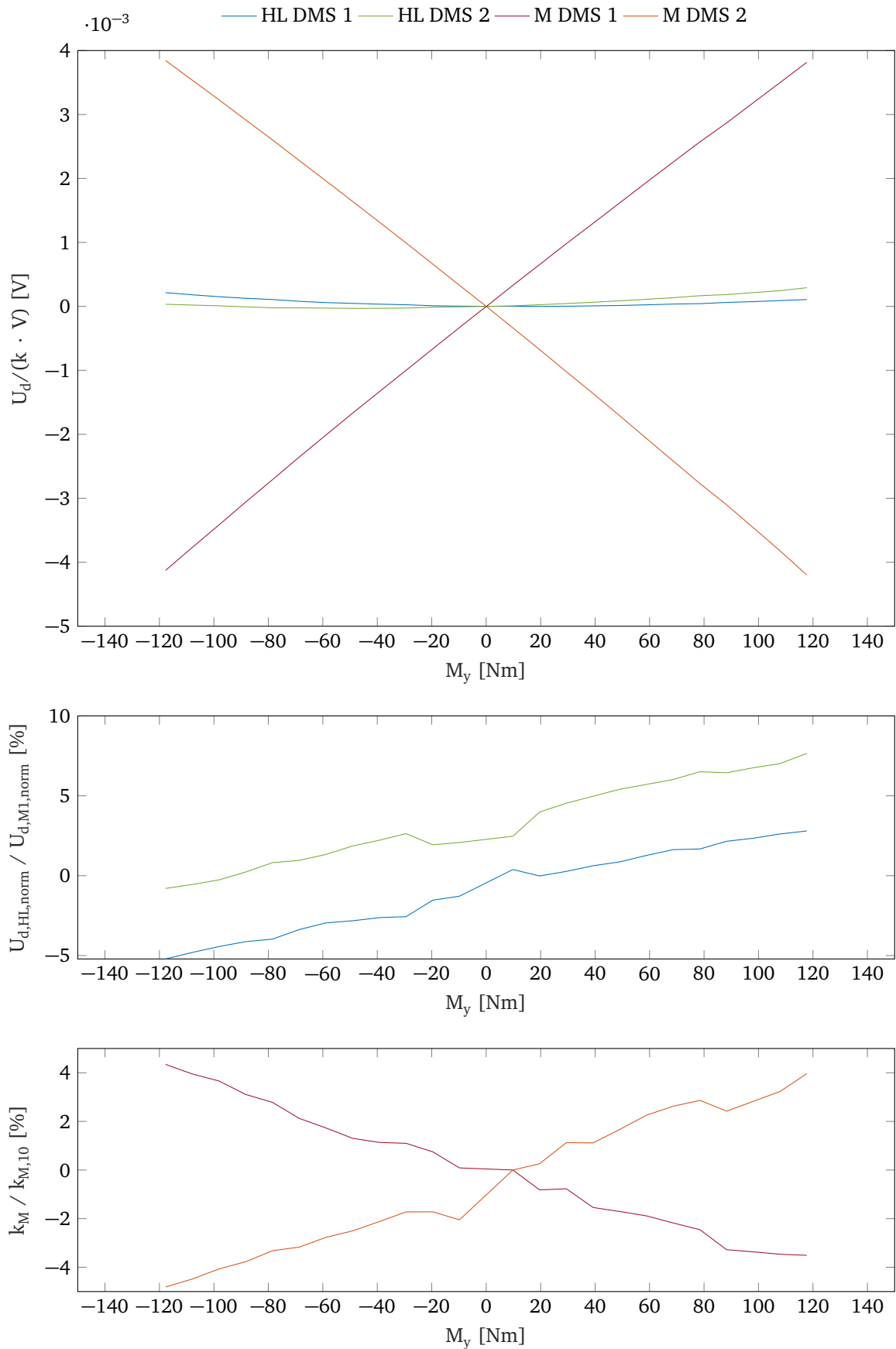
Wie bei den Kraftmessungen wird auch bei den Momentenmessungen durch Umformung der genannten Formeln ein zum k-Faktor proportionaler Wert berechnet:

$$k \frac{M_b}{W_b E} = 2 \frac{U_d}{U_0} \Rightarrow k \underbrace{\frac{U_0}{2W_b E}}_{const.} = \frac{U_d}{M_b}. \quad (4.3)$$

Durch die gegensätzliche Dehnung der gegenüberliegenden Halbbrücken ergibt sich, wie zu erwarten, bei den k-Faktoren derselben DMS ein unterschiedliches Vorzeichen. Besonders interessant ist der Verlauf des k-Faktors über den gesamten Messbereich. Um anschauliche Werte zu liefern, wird für die Kennlinie die prozentuale Abweichung vom k-Faktor bei einer Belastung von 10 Nm  $k_{M,10}$  und das Moment um die entsprechende Achse als Daten gewählt. Wie schon bei den Kraftmessungen zeigt sich auch hier ein nicht konstanter k-Faktor (Abb. 4.13 und 4.14). Die Abweichung über den ganzen Messbereich beträgt bei allen DMS fast 10 %. Bei den Halbleiter DMS ist der Verlauf des k-Faktors eindeutig nichtlinear und bei den metallischen annähernd linear. Das Ergebnis bei den Halbleiter DMS überrascht nicht weiter, jedoch sollte wie schon bei den Kraftmessungen beschrieben, bei den metallischen DMS der k-Faktor konstant sein. Die Veränderung des k-Faktors bei den Momentenmessungen ist aussagekräftiger, da hier der ganze Messbereich des Sensors abgedeckt wird.



**Abbildung 4.13:** Momenten-Spannungs Kennlinien (oben), Kopplung zwischen belastetem und unbelastetem DMS (mittig) und Änderung der k-Faktoren (unten) bei einem Moment um die x-Achse.



**Abbildung 4.14:** Momenten-Spannungs Kennlinien (oben), Kopplung zwischen belastetem und unbelastetem DMS (mittig) und Änderung der k-Faktoren (unten) bei einem Moment um die y-Achse.

## 4.4 Temperatureinfluss

Da in der Literatur oft die Temperaturabhängigkeit von Widerstand und k-Faktor der Halbleiter DMS als großer Nachteil ausgewiesen wird, werden einerseits Versuche durchgeführt, welche den Spannungsdrift durch Temperaturänderung untersuchen und des Weiteren Versuche mit verschiedenen Belastungen und Temperaturen um die Temperaturabhängigkeit der Spannungs-Kraft Kennlinie zu evaluieren. Für die Messungen wird der Sensor in einem Ofen erhitzt bzw. in einem Kühlschrank gekühlt. Um den Spannungsdrift zu evaluieren, wird ein Abgleich der Halbbrücken nach dem Erhitzen bzw. Kühlen durchgeführt und danach die Messwerte des unbelasteten Sensors aufgenommen. Dabei kühlt bzw. erhitzt sich der Sensor langsam auf die Umgebungstemperatur. Bei den Messungen mit Belastung wird beim Erhitzen und Kühlen gleich vorgegangen. Danach werden wie bei der Kraftmessung Gewichte in 10 kg Schritten am Prüfstand aufgehängt.

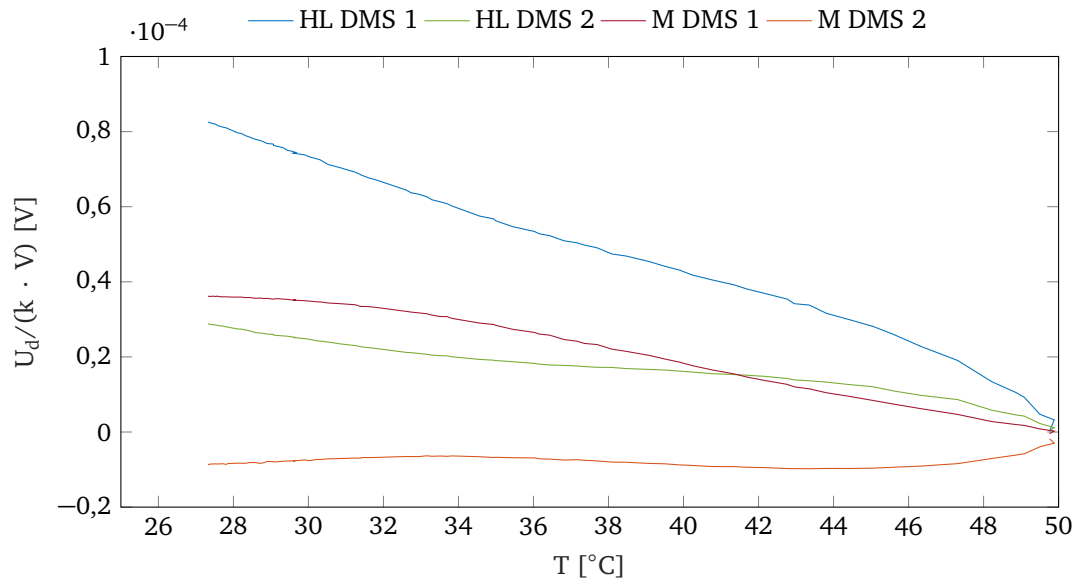
### 4.4.1 Auswertung der Temperaturmessungen ohne Belastung

Nach Auswertung der Messungen ist deutlich erkennbar, dass der Halbleiter DMS 1 die stärkste Änderung zeigt. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Widerstände der in dieser Brücke verbauten Halbleiter DMS nicht abgeglichen sind und deswegen ein zusätzlicher Widerstand zu einem der DMS hinzugefügt werden musste, um die Halbbrücke funktionsfähig zu machen. Dieser zusätzliche Widerstand hat allerdings eine stark abweichende Temperaturabhängigkeit. Der metallische DMS 2 zeigt bis auf den hinteren Bereich der Kennlinie bei hohen Temperaturen ein annähernd konstantes Verhalten. Halbleiter DMS 2 und der metallische DMS 1 zeigen am eindeutigsten ein nichtlineares Verhalten. Die gesamte Änderung ist bei M DMS 1 etwas höher als bei HL DMS 2. Wieso sich der Temperaturdrift bei allen Brücken so stark unterscheidet, ist nicht genau bekannt. Es besteht die Möglichkeit das der Ofen den Sensor nicht homogen aufgeheizt hat und es dadurch lokale Temperaturunterschiede gibt. Da die Temperatur allerdings nur an einer Stelle des Sensors gemessen wird, kann das nicht evaluiert werden. Die Änderung des Messwerts  $U_d$  bedeutet minimal in etwa  $0,6 \text{ N}/^\circ\text{C}$  bei M DMS 2 und maximal in etwa  $4,5 \text{ N}/^\circ\text{C}$  bei HL DMS 1. Diese Werte werden mit einer Funktion  $F_z(V)$  berechnet, die aufgrund der Kraftmessdaten mit der *MATLAB*-Funktion *fit()* erstellt wird.  $F_z(V)$  ist eine lineare Approximation durch alle aufgenommenen Messwerte und hat dadurch überall die gleiche Steigung. Des Weiteren hat der Steigungswert der linearen Approximation nur eine begrenzte Aussagekraft, da wie ersichtlich der Verlauf nichtlinear ist.

### 4.4.2 Auswertung der Temperaturmessungen mit Belastung

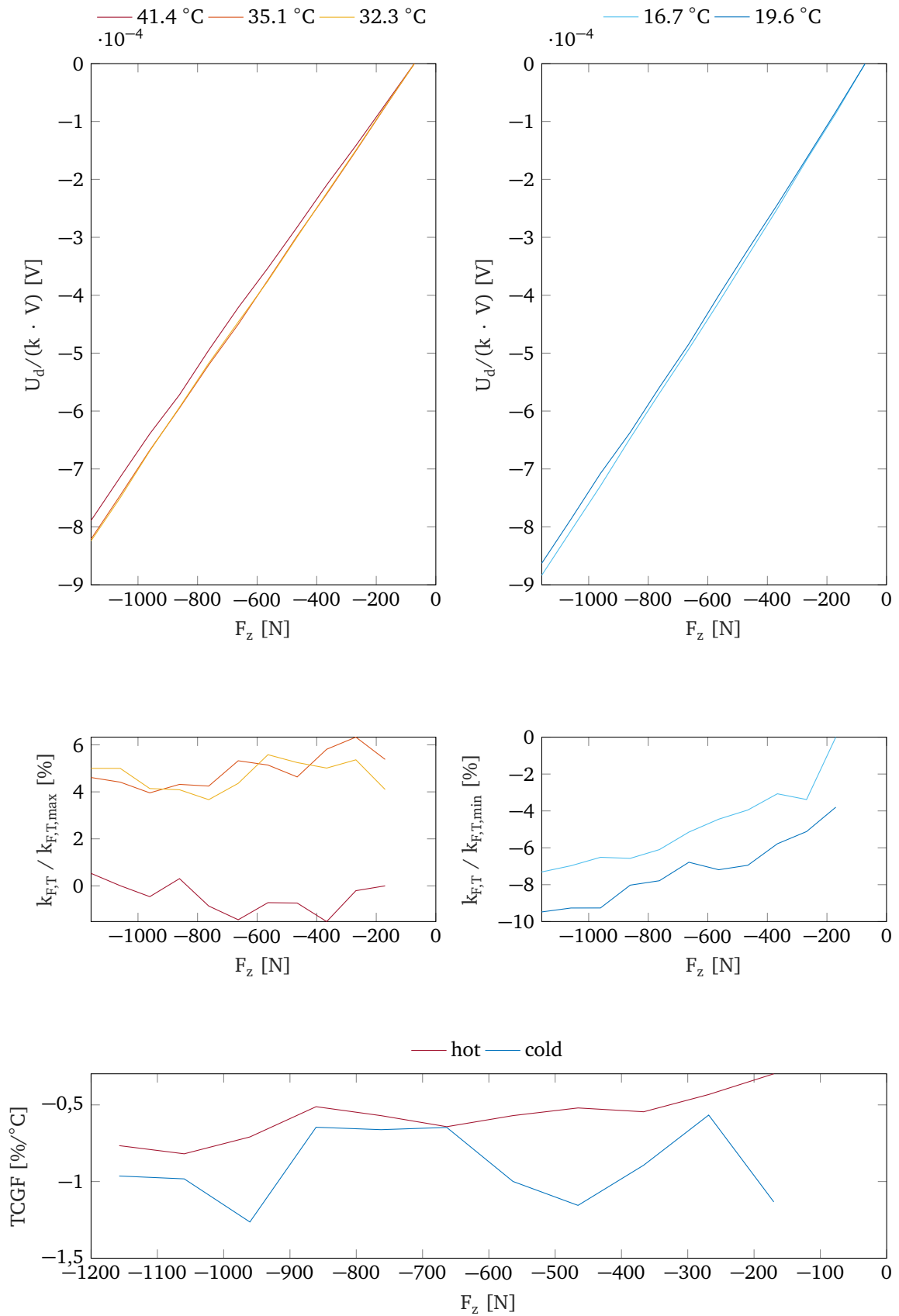
Da die Temperatur während der Aufzeichnung nicht konstant ist, sondern stetig sinkt bzw. sich erhöht, kann für die einzelnen Kennlinien keine exakte Temperatur angegeben werden, sondern nur eine mittlere Temperatur, welche den Mittelwert der Temperaturen darstellt, bei denen die Messwerte aufgenommen werden. Bereits bei den Kennlinien ist ersichtlich, dass sich die Steigung mit der Temperatur ändert (Abb. 4.16 und 4.17). Bei Betrachtung der k-Faktoren ist dieses Phänomen noch besser ersichtlich (Abb. 4.16 und 4.17). Zur besseren Veranschaulichung der Änderung werden die k-Faktoren jeweils auf den k-Faktor bei der maximalen Temperatur  $k_{F,T,max}$  bzw. bei der minimalen Temperatur  $k_{F,T,min}$  bezogen. Bei den Halbleiter DMS ist dieses Verhalten zu erwarten, bei den metallischen DMS allerdings nicht.



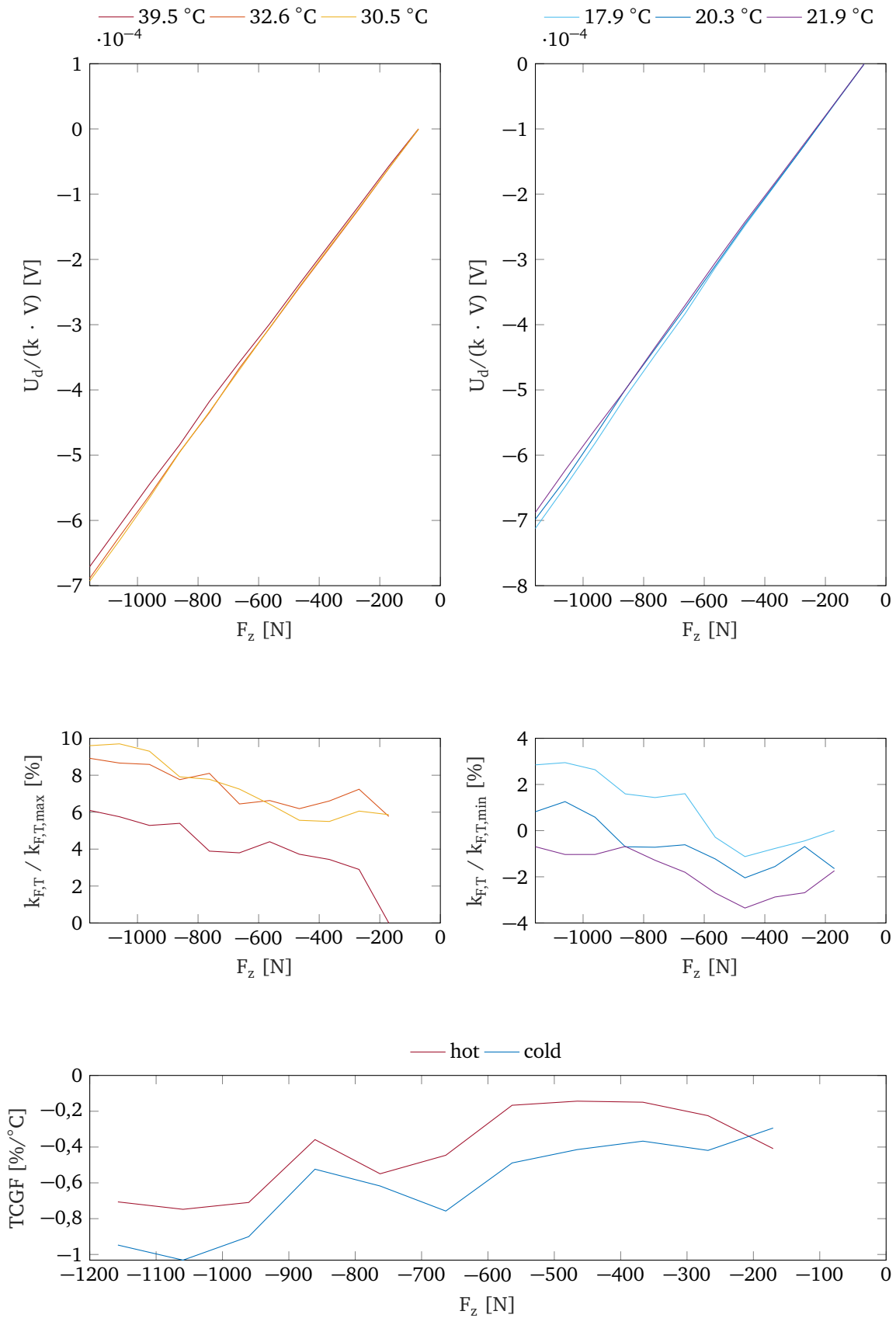


**Abbildung 4.15:** Änderung der Ausgangsspannung durch Temperaturänderung ohne Belastung.

Mit der Formel  $TCGF = 100 \cdot (k_2 - k_1) / (k_1 \cdot (T_2 - T_1))$  (3.1) für die Temperaturabhängigkeit des k-Faktors lässt sich die Änderung des k-Faktors pro °C in Prozent angeben. Dieser wird bei den heißen und kalten Testfällen jeweils aus den zwei Kennlinien mit dem größten Temperaturunterschied berechnet. Dafür wird nicht mehr die mittlere Temperatur verwendet, sondern die Temperatur, welche tatsächlich bei der Aufnahme des Messwerts vorliegt. Die berechneten Werte schwanken stark (Abb. 4.16 und 4.17). Einerseits liegt dieses Verhalten daran, dass sich der k-Faktor auch mit der Belastung ändert, andererseits kann es auch von Ungenauigkeiten in den Messungen kommen. Allerdings ist es trotz der vielen Ungenauigkeiten ersichtlich, dass sich der k-Faktor durch Temperaturdifferenzen verändert. Bei den beiden Brücken mit Halbleiter DMS und bei einer mit metallischen DMS wird der k-Faktor bei einer Temperaturerhöhung kleiner. Bei einer Brücke mit metallischen DMS wird der k-Faktor mit zunehmender Temperatur größer. Das Ergebnis der Halbleiter DMS deckt sich zwar nicht direkt mit dem Wert den der Hersteller angibt, zeigt aber, trotzdem wie vom Hersteller angegeben, eine Verminderung des k-Faktors bei Temperaturerhöhung. Was die Veränderung des k-Faktors durch Temperaturdifferenzen bei den metallischen DMS und zusätzlich noch die gegengleiche Veränderung verursacht, ist nicht bekannt.



**Abbildung 4.16:** Kraft-Spannungs Kennlinien im heißen Fall (oben links), im kalten Fall (oben rechts), Änderung der k-Faktoren im heißen Fall (mittig links), im kalten Fall (mittig rechts) und Änderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperatur (unten) bei HL DMS 2. Das Moment wirkt auf die metallischen DMS.



**Abbildung 4.17:** Kraft-Spannungs Kennlinien im heißen Fall (oben links), im kalten Fall (oben rechts), Änderung der k-Faktoren im heißen Fall (mittig links), im kalten Fall (mittig rechts) und Änderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperatur (unten) bei M DMS 2. Das Moment wirkt auf die Halbleiter DMS.

## 4.5 Lichteinfluss

Da in [46] beschrieben wird, dass Halbleiter DMS empfindlich auf Veränderung der Lichtverhältnisse reagieren, wird auch diese Eigenschaft überprüft. Dazu wird der Sensor zu Beginn der Messungen unter eine lichtundurchlässige Box gestellt und für 60 Minuten Messwerte aufgenommen. Danach wird die Box entfernt und der Sensor ist wieder in der normal beleuchteten Laborumgebung. Es werden dann für weitere 45 Minuten Messwerte aufgenommen. Der gesamte Versuch wird ohne aufgebrauchte Last durchgeführt. Das Ergebnis zeigt keinen klar erkenntlichen Drift bei den Halbleiter DMS, nur ein kleiner Sprung beim Wechsel von den abgedunkelten auf helle Verhältnisse ist sichtbar. Dieser ist allerdings vernachlässigbar klein und außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Sprünge durch kleine Erschütterungen an den Steckern ausgelöst werden. Des Weiteren sollten die Lichteinflüsse beim fertigen Sensor gleichbleibend sein, da das Sensorgehäuse von allen Seiten mit Deckeln verschlossen ist. Anders als bei den Halbleiter DMS ist bei den metallischen DMS ein deutlicher Drift erkennbar. Dieser scheint allerdings nicht direkt mit den Lichtverhältnissen zusammen zu hängen, sondern verändert sich mit der Zeit. Deswegen werden weitere Tests ohne Belastung und Veränderung der äußeren Einflüsse durchgeführt, um diesen Effekt zu untersuchen.

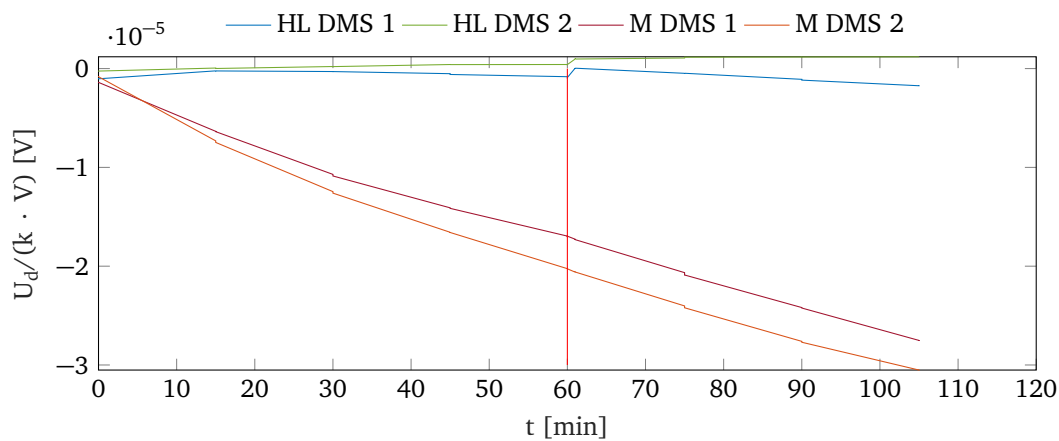


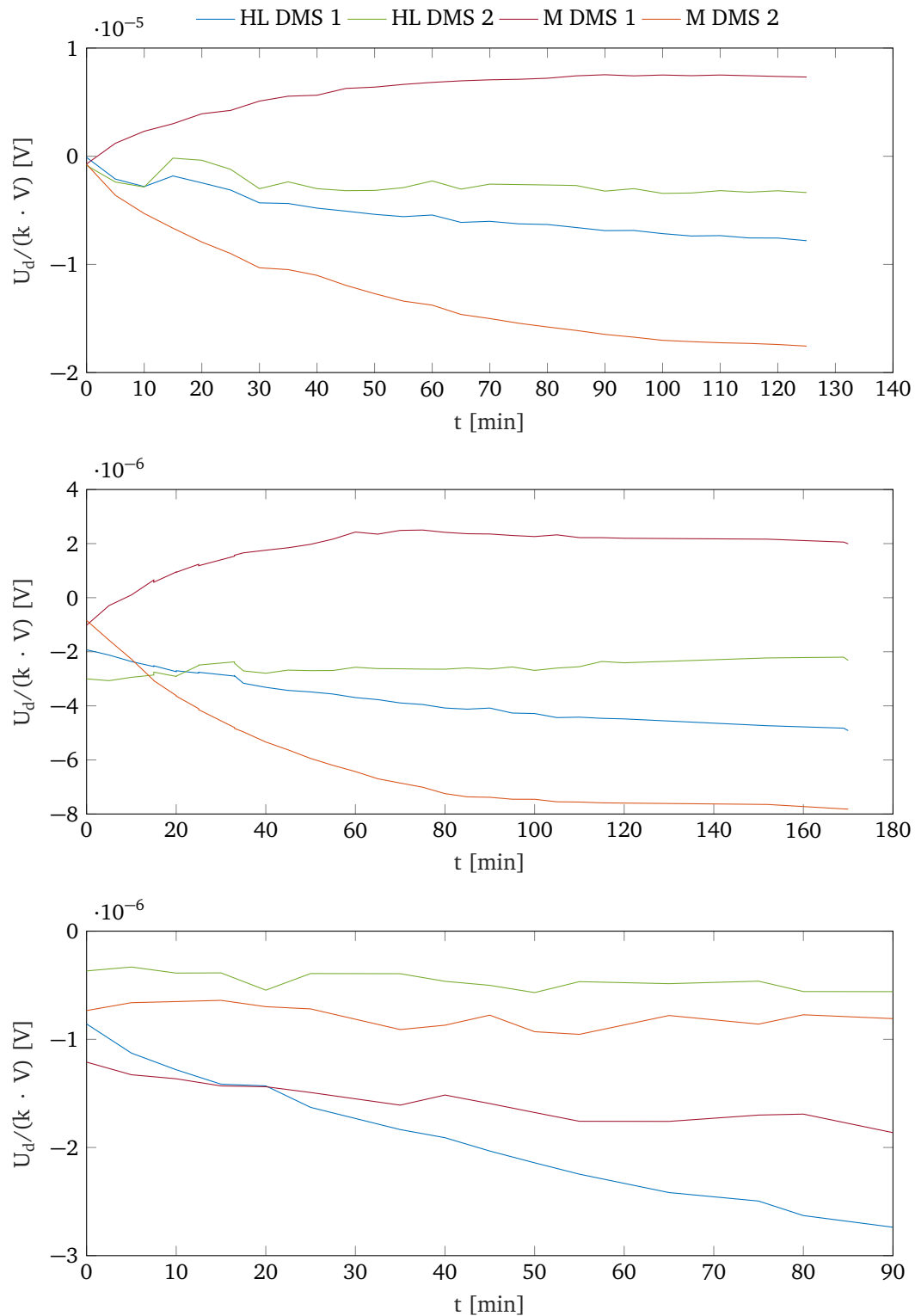
Abbildung 4.18: Änderung der Ausgangsspannung durch Änderung der Lichtverhältnisse bei  $t=60$  min.

## 4.6 Drift

Um zu evaluieren, ob sich die Ausgangsspannung der Halbbrücken auch bei gleichbleibenden Verhältnissen verändert, wird die Ausgangsspannung des unbelasteten Sensors über einen längeren Zeitraum gemessen. Um auch den Einfluss des Messverstärkers zu berücksichtigen, werden 3 Messreihen aufgenommen: bei der ersten wird der Messverstärker zu Beginn der Messung eingeschaltet, bei der zweiten ist er seit 30 Minuten in Betrieb und bei der dritten Messreihe ist der Messverstärker seit 4 Stunden in Betrieb.

Es zeigt sich, dass sich die Ausgangsspannung nach dem Einschalten des Messverstärkers asymptotisch an einen Stationärwert annähert. Der Unterschied zwischen Anfangswert und Stationärwert ist dabei bei den metallischen DMS deutlich größer. Die maximale Abweichung durch Drift bei den metallischen DMS beträgt in etwa 30 N. Die Messungen decken sich

außerdem mit früheren Beobachtungen bei LOLA, wo der Messwert nach einiger Zeit vom Anfangswert abweicht, obwohl die Belastung gleich bleibt.



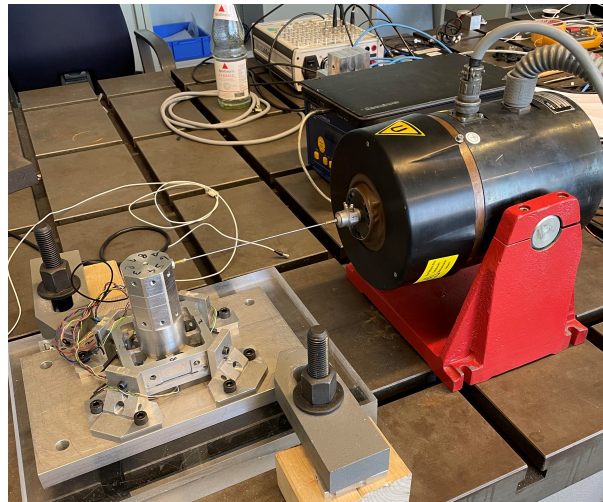
**Abbildung 4.19:** Änderung der Ausgangsspannung ohne Belastung. Verstärker zu Beginn des Versuchs eingeschaltet (oben), seit 30 min eingeschaltet (mittig) und seit 4 Stunden eingeschaltet (unten).

## 4.7 Dynamische Messungen

Die Messungen mit einer dynamischen Belastung werden durchgeführt, um die Übertragungsfunktion des Sensors zu bestimmen. Aus dieser können mehrere interessante Werte für die Regelung des Roboters abgelesen werden. Außerdem kann dabei die Eignung der DMS für Messungen schnell veränderlicher Lasten überprüft werden.

### 4.7.1 Versuchsaufbau und Durchführung der Messungen

Zur Kraftübertragung wird ein Schwingungserreger des Typs *SW 122* vom Hersteller *RMS* verwendet. Dieser wird über einen Gleichstromverstärker und einen Funktionsgenerator gesteuert. Der Schwingungserreger ist über einen Stößel mit dem Adapter am Sensor verbunden. Zwischen Schwingungserreger und Stößel ist außerdem noch ein Impedanzsensor zur Kraftmessung montiert. Durch die Steuerung über den Funktionsgenerator wird eine Kraft mit einem Sinus-Sweep Verlauf am Sensor aufgebracht. Ein Sinus-Sweep ist ein Sinus mit konstanter Amplitude aber veränderlicher Frequenz. Es werden zwei verschiedene Frequenzbereiche getestet. Ein niedriger Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 Hz und ein hoher mit 100 Hz bis 1000 Hz. Für den niedrigen Frequenzbereich wird eine Abtastrate von 2 kHz und für den hohen Frequenzbereich eine Abtastrate von 20 kHz verwendet. Über einen stufenlosen Drehgeber kann am Verstärker die Verstärkung und damit die Amplitude der Kraft eingestellt werden. Bei den Versuchen wird jeweils eine Kraft in x-Richtung in Kombination mit einem Moment um die y-Achse oder eine Kraft in y-Richtung in Kombination mit einem Moment um die x-Achse auf den Sensor aufgebracht.



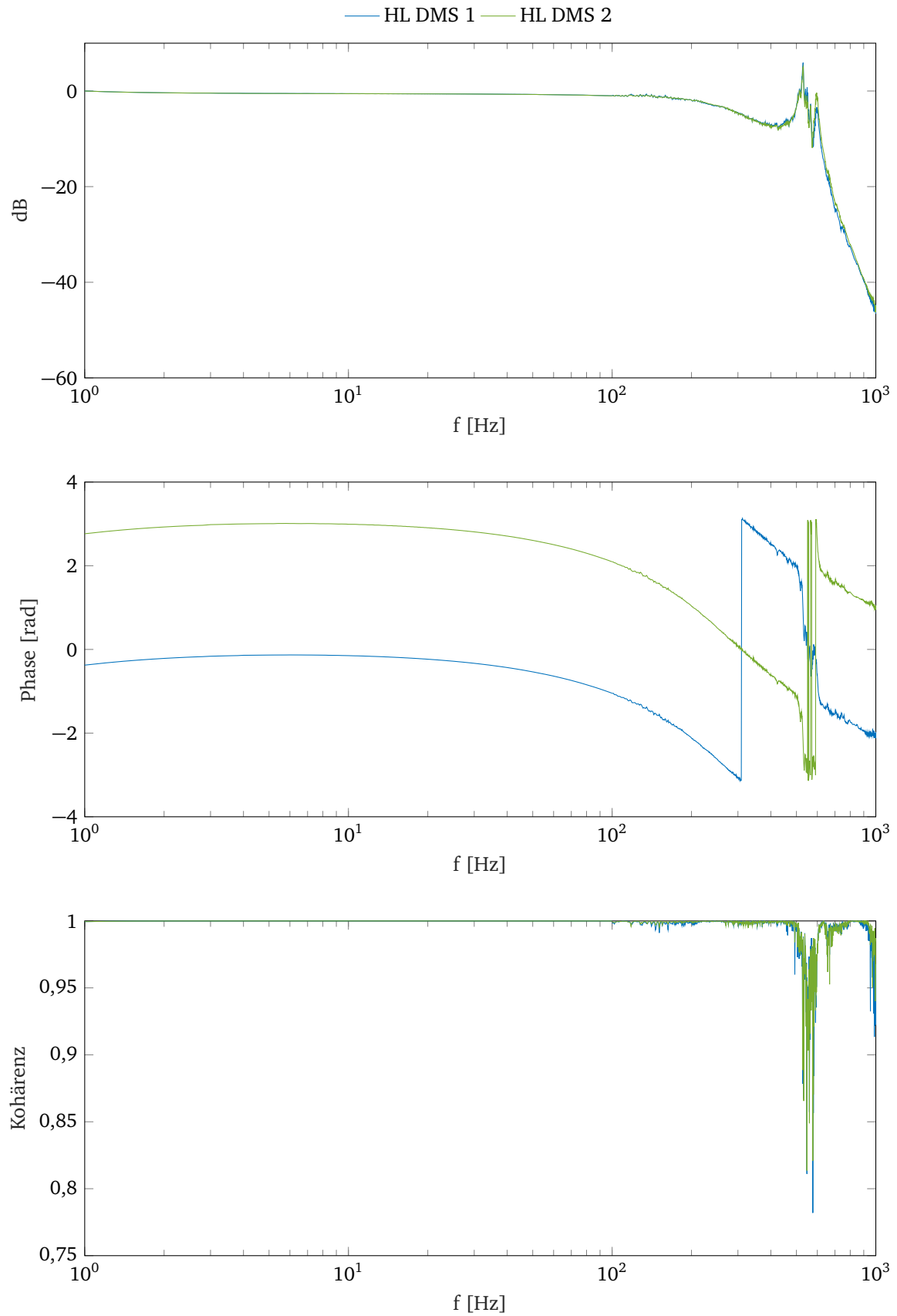
**Abbildung 4.20:** Versuchsaufbau für dynamische Messungen. Der Verstärker und Funktionsgenerator sind hier nicht zu sehen.

### 4.7.2 Auswertung der dynamischen Messungen

Zur Auswertung der Daten wird die *MATLAB*-Funktion *tfestimate()* verwendet. Diese erstellt aus den Eingangsdaten (Messungen des Impedanzsensors) und den Ausgangsdaten (Messungen der DMS) die Übertragungsfunktion. Zur Verifikation der Ergebnisse auf Richtigkeit

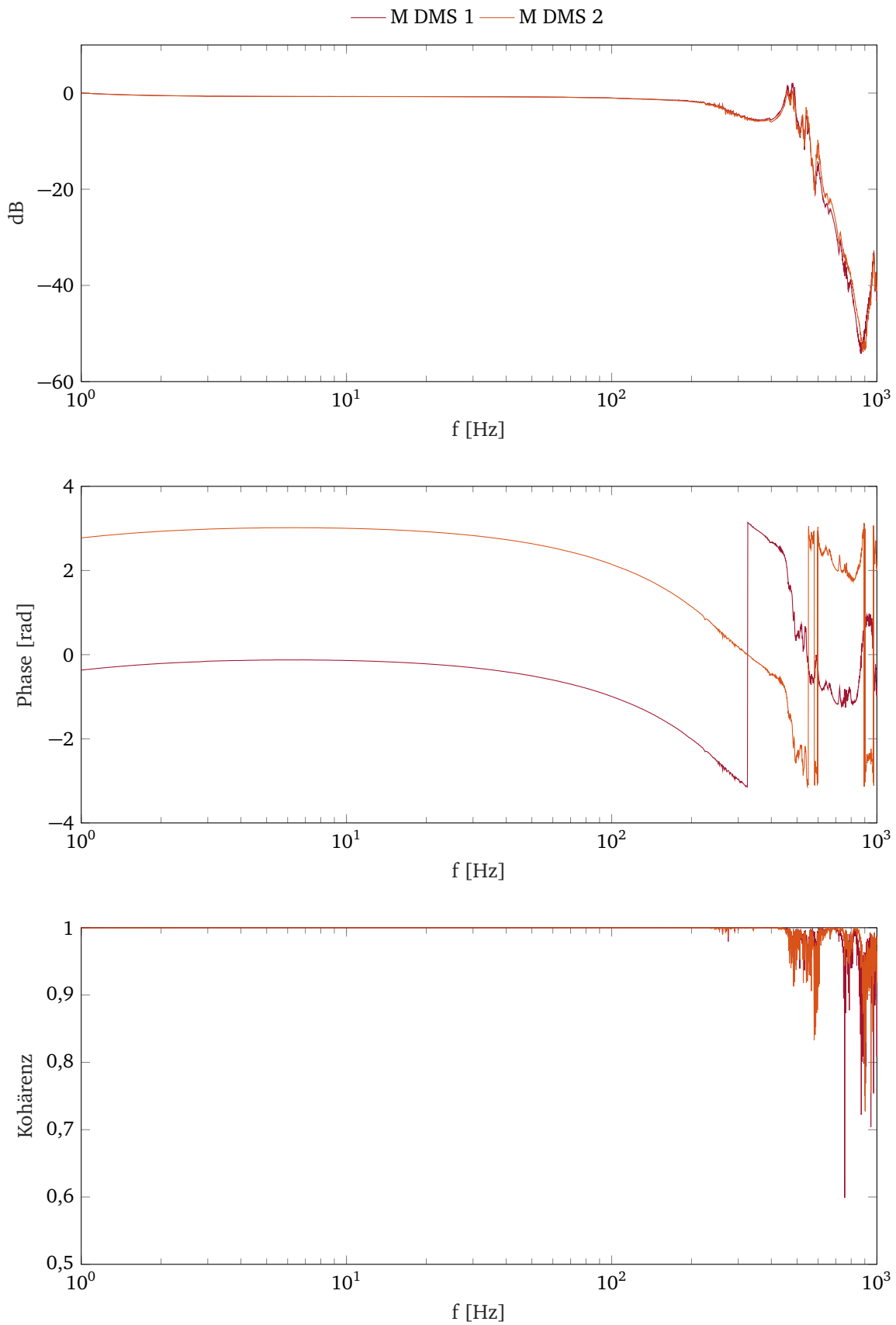
wird die Kohärenz herangezogen. Die Kohärenz ist ein Maß für die Abhängigkeit von Ein- und Ausgangssignal und kann maximal den Wert 1 annehmen. Eine niedrige Kohärenz ist gleichbedeutend mit einer hohen Unsicherheit des Ergebnis. Die Kohärenz wird mit der *MATLAB*-Funktion *mscohere()* berechnet. Um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, ist die Amplitude normiert. Dabei werden alle Werte auf den Wert bei 1 Hz bezogen. Somit startet die Betragskennlinie für jede Brücke bei 0 dB.

Bei Betrachtung der Betragskennlinien zeigt sich eine erste merkliche Dämpfung ab ca. 100 Hz (Abb. 4.21 und 4.22). Bei ca. 500 Hz scheint eine Eigenfrequenz vorhanden zu sein. Die Kohärenz ist allerdings in diesem Bereich verhältnismäßig schlecht und auch die Betragskennlinie sieht relativ verrauscht aus. Danach ist das System stark gedämpft und die Betragskennlinie fällt stark ab. Im hintersten Bereich des Diagramms fällt die Kohärenz ab. Diese Ergebnisse decken sich bei Halbleiter und metallischen DMS. Bei einer genauen Betrachtung des niedrigen Frequenzbereichs von 1 Hz bis 100 Hz sieht man, dass vor allem am Anfang und am Ende des Bereichs schon eine leichte Dämpfung vorhanden ist (Abb. 4.23). Der für die Regelung interessante Wert des Phasenversatzes von  $180^\circ$  tritt bei allen Messbrücken bei ca. 150 Hz auf. Die Betragskennlinie fällt für Halbleiter und metallische DMS bei einer Frequenz von ca. 250 Hz unter -3 dB. Bei hohen Frequenzen ist die Kohärenz der Halbleiter DMS besser als bei den metallischen DMS. Dieses Verhalten zeigt sich am stärksten im Bereich nach der Eigenfrequenz (Abb. 4.21 und 4.22).

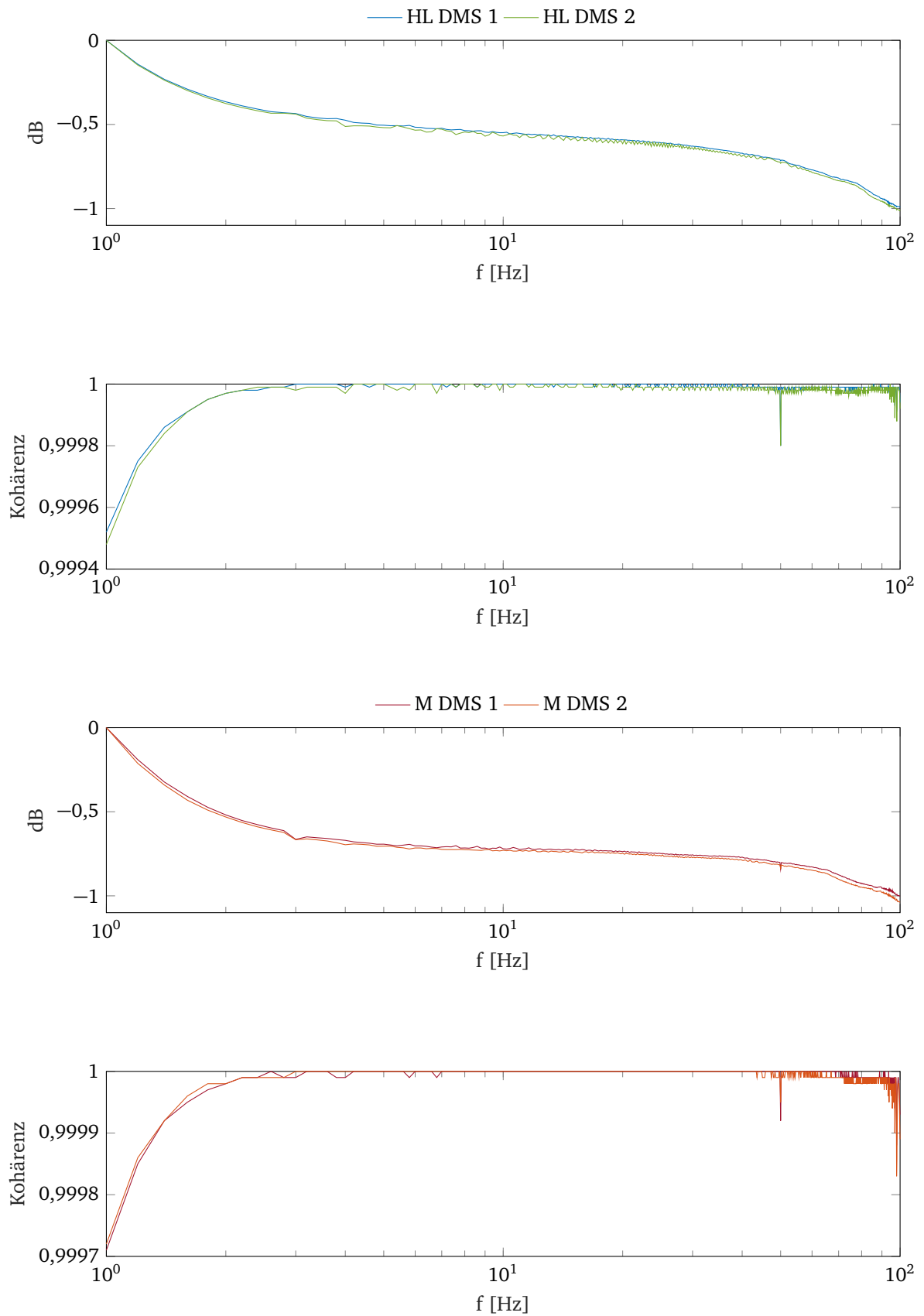


**Abbildung 4.21:** Betragskennlinie (oben), Phasenverschiebung (mittig) und Kohärenz (unten) der Brücken mit Halbleiter DMS bei Frequenzen von 1 Hz bis 1000 Hz. Es wird eine Kraft in y-Richtung und ein Moment um die x-Achse auf den Sensor aufgebracht.





**Abbildung 4.22:** Betragskennlinie (oben), Phasenverschiebung (mittig) und Kohärenz (unten) der Brücken mit metallischen DMS bei Frequenzen von 1 Hz bis 1000 Hz. Es wird eine Kraft in x-Richtung und ein Moment um die y-Achse auf den Sensor aufgebracht.



**Abbildung 4.23:** Betragskennlinie (jeweils oben) und Kohärenz (jeweils unten) der Brücken bei Frequenzen von 1 Hz bis 100 Hz.

## 4.8 Bewertung der Messergebnisse

Wie bereits in der Literatur beschrieben, besitzen Halbleiter DMS ein nichtlineares Verhalten. Dieses zeigt sich sowohl bei verschiedenen Dehnungswerten als auch bei Temperaturdifferenzen. Eigenartigerweise zeigen in diesem Fall aber auch die metallischen DMS ein solches Verhalten. Durch ein Kalibrierverfahren, welches Nichtlinearitäten nachbilden kann, und durch die Verwendung eines zusätzlichen Temperatursensors, sollte dieses Verhalten allerdings kein Problem mehr darstellen. Die Halbleiter DMS zeigen beim statischen Drift ein deutlich besseres Verhalten als die metallischen DMS. Beim thermischen Drift zeigen die Typen ein ähnliches Verhalten. Des Weiteren ist bei den Halbleiter DMS das Messrauschen geringer, obwohl hier noch ein Verstärker verwendet wird. Beim finalen Sensor kann dieser durch den hohen k-Faktor wahrscheinlich entfallen und das Rauschverhalten sollte noch besser werden. Bei dynamischen Messungen zeigen die Halbleiter DMS ein besseres Messergebnis im hochfrequenten Bereich. Es muss allerdings bei der Installation der Halbleiter DMS besonders vorsichtig gearbeitet werden um eine Verstimmung der DMS zu verhindern. Insgesamt überwiegen die Vorteile der Halbleiter DMS, da die Nachteile durch geeignete Maßnahmen ausgeglichen werden können oder zumindest in diesem Fall die metallischen DMS ein ähnliches nichtlineares Verhalten zeigen. Die Ergebnisse sind zusammengefasst in Tabelle 4.1 gezeigt.

**Tabelle 4.1:** Vergleich von Halbleiter DMS und metallischen DMS aufgrund der experimentellen Untersuchung.

	Linearität	Temperaturabhängigkeit	Rauschen	Drift	dynamische Messungen
Halbleiter DMS	-	-	+	+	+
metallische DMS	-	-	-	-	-



## Kapitel 5

# Konstruktive Änderungen und Fertigung des Sensors

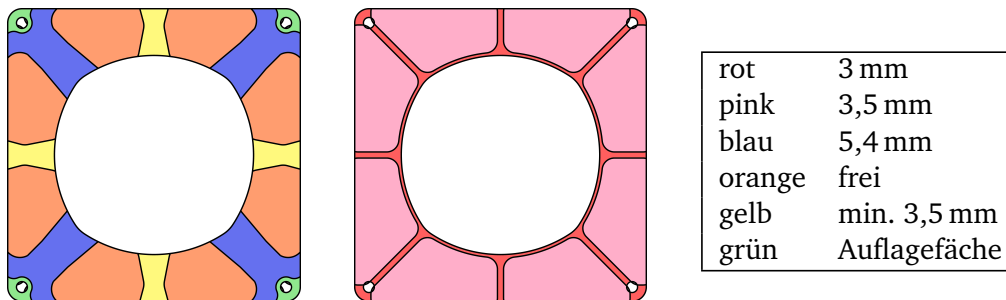
### 5.1 Konstruktive Änderungen am Sensor

Da sich die grundsätzliche Struktur wie das Balkendesign und die Entkopplung über eine Membran im Einsatz bei *LOLA* seit über 10 Jahren bewährt hat, wird dieses nicht verändert. Der Überlastschutz, die Kabeldurchführung und die seitlichen Deckel werden ebenfalls übernommen. Das Sensorgehäuse wird wie bisher aus der hochfesten Aluminiumlegierung *EN AW-7075 T651* gefertigt. Da der vorhandene Sensor und auch der Rest von *LOLA* bereits im CAD-Programm *CATIA V5* erstellt wurde, werden auch die Änderungen mit diesem Programm durchgeführt. Um Veränderungen an den Anbauteilen zu vermeiden, werden die Anschlussstellen zu Sprunggelenk und Fuß nicht verändert.

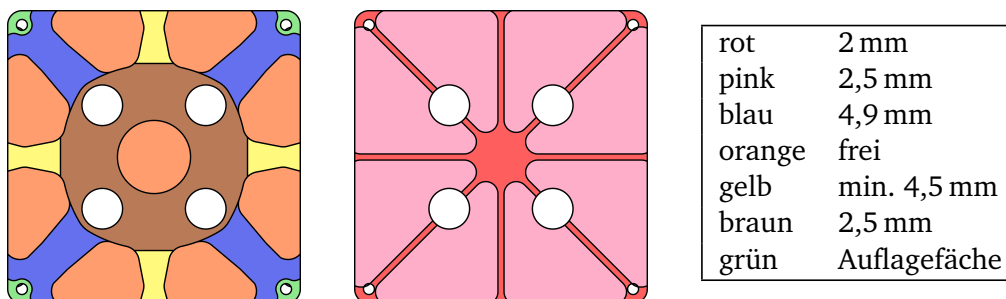
Es wurde festgestellt, dass die elektrische Isolierung zwischen Sensor und Sprunggelenk mittels Isolierbuchsen so wie derzeit ausgeführt nicht funktioniert. Der Sensor ist zwar sprunggelenksseitig isoliert, jedoch ist er leitend mit dem Fuß verbunden und auf diesem ist der Zehenmotor montiert, dieser ist wiederum durch die Erdung leitend mit dem Rest von *LOLA* verbunden. Deswegen ist der neue Sensor ohne Isolierbuchsen ausgeführt und kann über zusätzliche Gewindebohrungen geerdet werden.

Ein großer Nachteil am vorhandenen Sensorkonzept ist der geringe Platz für elektronische Bauteile, da in der Platine eine relativ große Ausnehmung für die Sprunggelenksanschlussfläche vorhanden ist. Für die geplante moderne Elektronik wäre auf der aktuellen Platine zu wenig Platz. Diese verwendet einen Microcontroller und eine EtherCAT Feldbus-Schnittstelle. Die Vorteile dieses neuen Elektronikkonzepts sind unter anderem eine höhere Auflösung des Signals durch einen 24 Bit AD-Wandler (bisher nur eine Auflösung von 12 Bit), eine Übertragungsrate von 8 kHz anstatt von nur 1 kHz und die Übertragung mit geringer Latenz. Um den Einbau dieser Elektronik zu ermöglichen, sind jetzt zwei Platinen anstatt nur einer vorhanden. Die Platine an der Oberseite hat die gleiche Form wie zuvor, da die Ausnehmung für die Anschlussstelle weiterhin notwendig ist. Die Platine an der Unterseite bietet jedoch deutlich mehr Platz, da bei dieser nur Ausnehmungen für die vier Schraubköpfe zur Verbindung mit dem Sprunggelenk vorgesehen sind. Eine Ausführung ganz ohne Ausnehmungen ist nicht möglich, da der Sensorkörper ansonsten höher gestaltet werden müsste oder die Balken asymmetrisch in z-Richtung angeordnet sein müssten. Beides ist nicht erwünscht, da dadurch mehr Bauraum für den Sensor nötig wäre oder die Symmetrie des Sensors verloren geht. Der vertikale Bauraum zwischen Sensorkörper und Platine bzw. Deckel und Platine ist sehr gering, aber die Platinen werden so platziert, dass zumindest beidseitig 2 mm Platz für

elektronische Bauteile vorhanden ist (Abb. 5.1 und 5.2). Durch die zwei Platinen hat sich der Bauraum für elektronische Bauteile mehr als verdoppelt. Des Weiteren sind beim neuen Sensorgehäuse auch eigene Anschraubbohrungen für die Platinen vorgesehen, da sie sonst beim Entfernen eines Deckels nicht mehr befestigt sind.



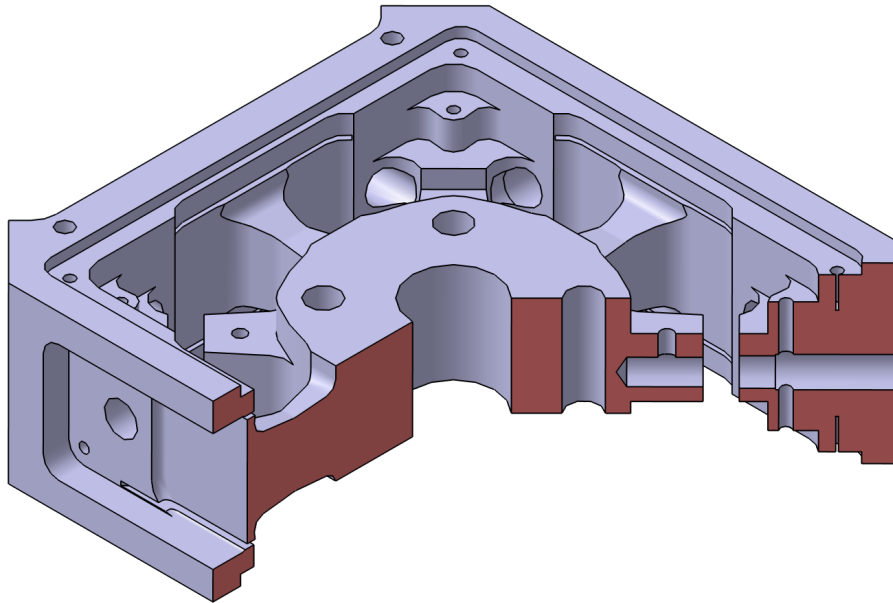
**Abbildung 5.1:** Höhenprofil der oberen Sensorplatine. Das linke Bild zeigt die zum Sensor gerichtete Seite, das rechte Bild die zum Deckel gerichtete Seite und die Tabelle den Platz für elektronische Bauteile.



**Abbildung 5.2:** Höhenprofil der unteren Sensorplatine. Das linke Bild zeigt die zum Sensor gerichtete Seite, das rechte Bild die zum Deckel gerichtete Seite und die Tabelle den Platz für elektronische Bauteile.

Beim alten Sensorkonzept ist ein Zentralverschluss zum Verteilen des Drucks der Schraubenköpfe auf die Isolierbuchsen zuständig. Da die Isolierbuchsen aber nicht mehr nötig sind, ist auch der Zentralverschluss nicht mehr nötig. Stattdessen ist nun eine einfache Stahlscheibe in Form der Auflagefläche vorgesehen, um den Sensorkörper durch zu festes Anziehen der Schrauben nicht zu beschädigen.

Um Kerbwirkungen zwischen den Balken und der Platinenanschlussfläche weiter zu reduzieren, wird der durch den Wegfall der Isolierbuchsen zusätzlich erhaltene Platz genutzt, um den Radius zwischen Balken und Anschlussstelle besser auslaufen zu lassen. Zusätzlich ist eine Erhöhung der Anschlussfläche nötig, um die Höhenverhältnisse zwischen Sensor und Sprunggelenk gleich zu halten, da es sonst zu Kollisionen der beiden Bauteile kommt.



**Abbildung 5.3:** Schnittansicht des neuen Kraftsensorgehäuses.

Die Deckel an der Ober- und Unterseite werden ebenfalls adaptiert. Um mehr Platz für elektronische Bauteile zu schaffen, sind beide dünner als zuvor ausgeführt. Durch den Wegfall des Zentralverschlusses ist im Sensorgehäuse nun genug Platz für die Schrauben zur Befestigung am Sprunggelenk vorhanden und der Deckel kann nun ohne Ausnehmungen ausgeführt werden. Beide Deckel sind wie das Sensorgehäuse aus der hochfesten Aluminiumlegierung *EN AW-7075 T651* gefertigt. Dies verleiht dem Sensorgehäuse eine höhere Steifigkeit. An der Unterseite ist ein stabiler Deckel zusätzlich zum Schutz der elektronischen Bauteile im inneren des Sensors nötig, falls *LOLA* auf spitze Bauteile tritt. Um eine leichte Demontage der Deckel zu gewährleisten, sind zusätzliche Gewindebohrungen vorgesehen, da durch die Passung, in der die Deckel sitzen, eine Demontage schwierig ist. Durch Anbringen von Schrauben in den Gewinden können die Deckel einfach abgezogen werden.

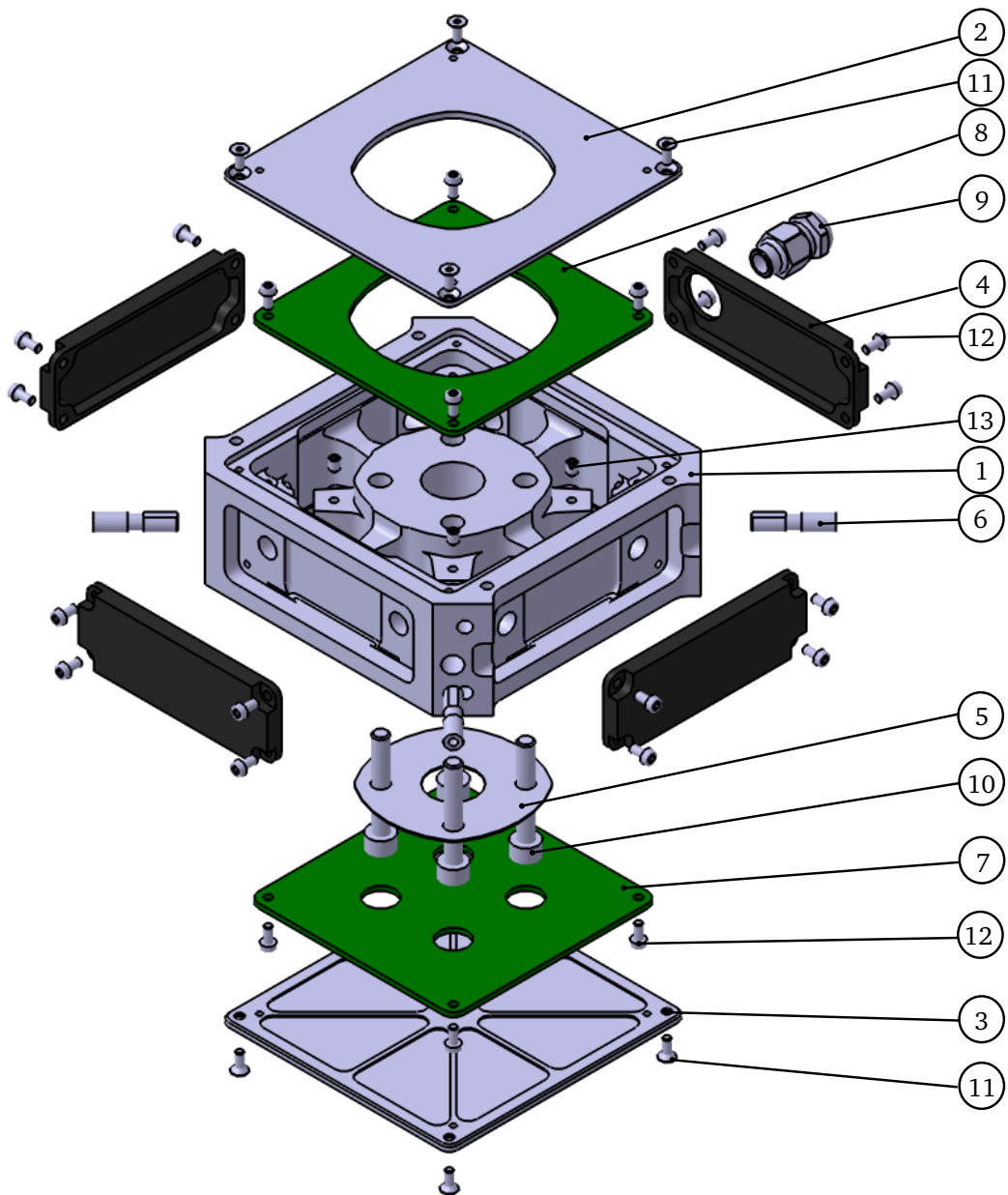
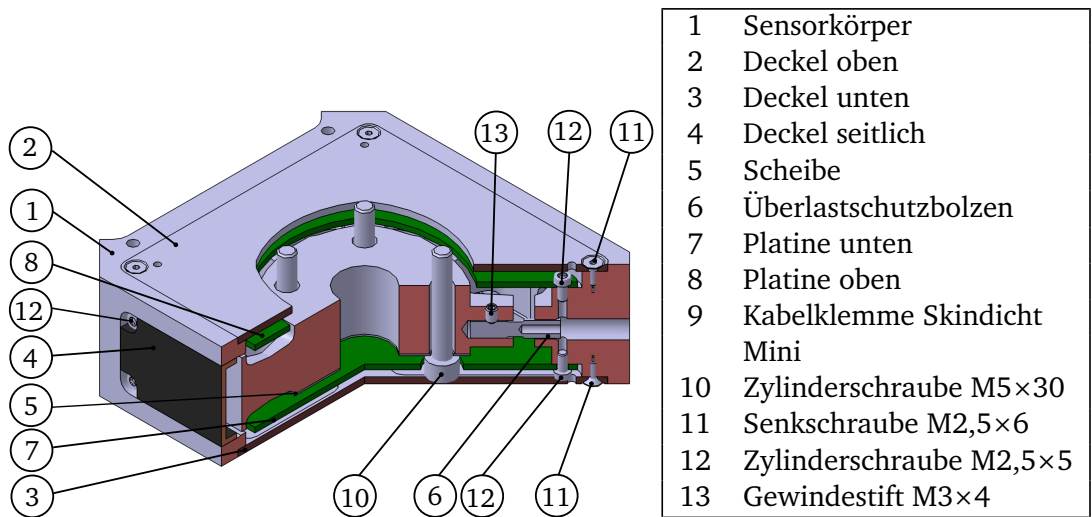


Abbildung 5.4: Zusammenbau und Explosionszeichnung des Kraftsensors.



## 5.2 Gewichtsvergleich

**Tabelle 5.1:** Gewichtstabelle des neuen Sensors.

Bauteil	Einzelgewicht	Menge	Gesamtgewicht	Prozent des Gesamtgewichts
	[g]	[Stk.]	[g]	[%]
Sensorkörper	289	1	289	66,2
Elektronik (Abschätzung)	40	1	40	9,2
Deckel unten	30	1	30	6,9
Deckel oben	22	1	22	5
Deckel seitlich	4,5	4	18	4,1
Überlastschutzbolzen	2,8	4	11,3	2,6
Zylinderschraube M2,5×5	0,4	24	9,1	2,1
Kabelklemme Skindicht	8	1	8	1,8
Mini				
Scheibe	6	1	6	1,4
Senkschraube M2,5×6	0,3	8	2,4	0,5
Gewindestift M3×4	0,2	4	0,8	0,2
	Summe	51	436,5	100

**Tabelle 5.2:** Gewichtstabelle des alten Sensors adaptiert von [30, s.S. 51]. Der Fehler in [30], dass nur eine Isolierbuchse in der Tabelle eingetragen ist, wurde ausgebessert.

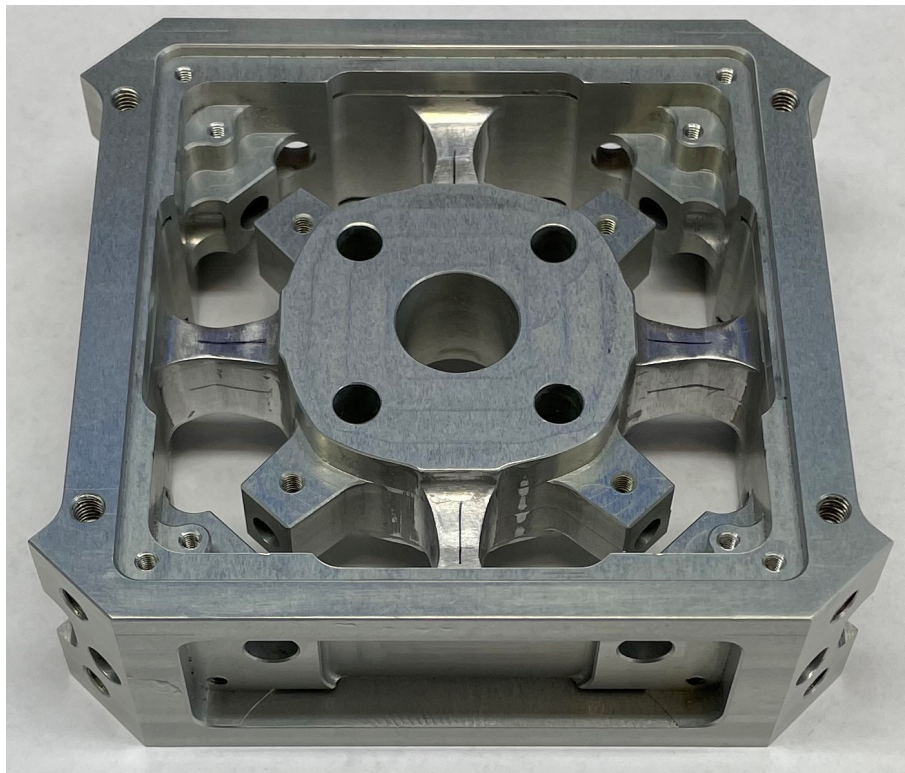
Bauteil	Einzelgewicht	Menge	Gesamtgewicht	Prozent des Gesamtgewichts
	[g]	[Stk.]	[g]	[%]
Sensorkörper	266,6	1	266,6	66,1
Deckel unten	24,8	1	24,8	6,1
Elektronik (Abschätzung)	20	1	20	5
Deckel seitlich	4,5	4	18,1	4,5
Zentralverschluss	17,8	1	17,8	4,4
Isolierbuchse	8,1	2	16,2	4
Überlastschutzbolzen	2,8	4	11,3	2,8
Deckel oben	8,4	1	8,4	2,1
Kabelklemme Skindicht	8	1	8	2
Mini				
Zylinderschraube M2,5×6	0,4	16	6,8	1,7
Zylinderschraube M2,5×10	0,6	8	4,6	1,1
Gewindestift M3×4	0,2	4	0,7	0,2
	Summe	44	403,3	100

Insgesamt ist der neue Sensor um 8,2% schwerer als der aktuell verwendete. Die Gewichtszunahme erklärt sich hauptsächlich durch den etwas schwereren Sensorkörper und der neuen Elektronik. Der Sensorkörper ist nun schwerer, da durch den Wegfall der Isolierbuchsen die kreuzförmige Ausnehmung am Anschlussflansch entfernt werden musste und durch eine Passbohrung, welche als Zentrierung zum Sprunggelenk dient, ersetzt wird. Durch die

Forderung am Sprunggelenk keine Änderungen vorzunehmen, ist auch der Durchmesser vorgegeben. Außerdem muss durch den Wegfall der Isolierbuchse etwas Material am Flansch in Richtung Sprunggelenk aufgetragen werden um Kollisionen zwischen den Teilen zu vermeiden. Die Elektronik ist beim neuen Sensor durch die Bauweise mit zwei Platinen ebenfalls schwerer. Dabei handelt es sich allerdings nur um eine Schätzung, da die Elektronik noch nicht vorhanden ist. Weil nun zwei Platinen vorliegen, wird das Gewicht der neuen Elektronik auf das Doppelte der alten geschätzt. Da die zwei Sensorplatinen nicht mehr zusammen mit den Deckeln im Sensorgehäuse verschraubt sind, hat sich auch die Gesamtanzahl der Einzelteile erhöht.

### 5.3 Fertigung des Sensors

Die Fertigung aller Sensorkomponenten übernimmt die lehrstuhleigene mechanische Werkstatt. Der Sensorkörper wird auf einer 5-Achs CNC-Fräsmaschine gefertigt. Nach dem Fräsen wird der Sensorkörper eloxiert. Da die Messbalken für den Klebevorgang nicht eloxiert sein dürfen, werden diese dabei mit einem speziellen Blei Klebeband abgedeckt. Um eine elektrische Isolierung zu verhindern werden die Erdungsbohrungen erst nach dem Eloxieren gefertigt.

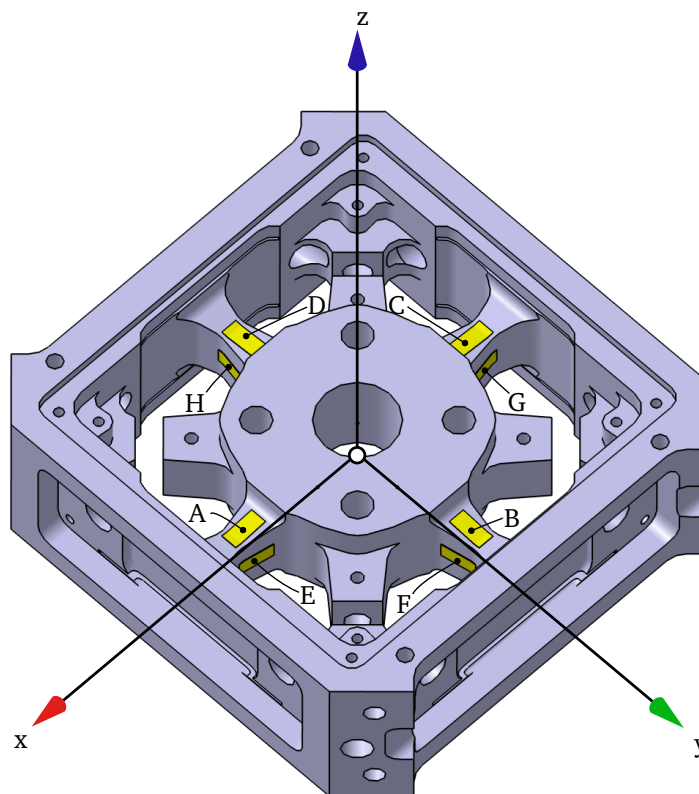


**Abbildung 5.5:** Foto des gefrästen und eloxierten Sensorgehäuses.

## Kapitel 6

### Kalibrierung des Sensors

Wie schon in Abschnitt 2.3 beschrieben, ist die Kalibrierung essentiell für die Performance eines Sensors. Fehler und Ungenauigkeiten in der Kalibrierung übertragen sich auf die späteren Messungen. Durch die Verwendung von Halbleiter DMS ist es wichtig, dass durch die Kalibrierung die nichtlineare Kennlinie nachgebildet werden kann. Da in der Arbeit von Schwienbacher [30] das Least-Squares Verfahren genauer als das Shape-from-Motion Verfahren ist und eine Implementierung der Verfahren basierend auf neuronalen Netzen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird der Fokus auf das Least-Squares Verfahren und Erweiterungen davon gelegt. Das Sensorkoordinatensystem ist so definiert, dass die z-Achse in der Mitte des Sensors liegt. Die x-y-Ebene liegt in der Mitte der Balken. Die x- und y-Achse liegen parallel zu den Balken. Die x-Achse zeigt im eingebauten Zustand bei LOLA nach vorne und die z-Achse nach oben. Das Koordinatensystem und die Anordnung der Messbrücken sind in Abb. 6.1 gezeigt.



**Abbildung 6.1:** Sensorkoordinatensystem und Anordnung der Messbrücken.

## Kalibriermatrix

Die Eingangsgröße des Sensors sind die sechs Kraft und Momentenkomponenten  $\mathbf{m}$  welche auf den Sensor wirken. Als Messgröße des Sensors wird die Diagonalspannung der acht Halbbrücken verwendet. Dadurch ergibt sich ein Messvektor  $\mathbf{z}$  mit acht Einträgen. Für die Regelung sind allerdings die Kräfte und Momente von Interesse. Durch die Kalibriermatrix  $\mathbf{C}$  kann der Lastvektor  $\mathbf{m}^*$  berechnet werden (6.1).  $\mathbf{m}^*$  ist allerdings nur eine Approximation von  $\mathbf{m}$ . Je besser das Kalibrierverfahren, desto geringer ist die Abweichung zwischen  $\mathbf{m}$  und  $\mathbf{m}^*$  (Abb. 6.2).

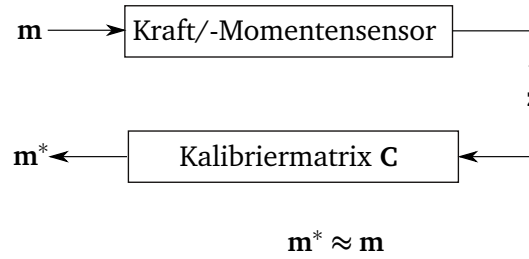


Abbildung 6.2: Zusammenhang zwischen Sensor und Kalibriermatrix. Abbildung basierend auf [40, s.S.47].

$$\underbrace{\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}}_{\mathbf{m}^*} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_{F_x,A} & c_{F_x,B} & c_{F_x,C} & c_{F_x,D} & c_{F_x,E} & c_{F_x,F} & c_{F_x,G} & c_{F_x,H} \\ c_{F_y,A} & c_{F_y,B} & c_{F_y,C} & c_{F_y,D} & c_{F_y,E} & c_{F_y,F} & c_{F_y,G} & c_{F_y,H} \\ c_{F_z,A} & c_{F_z,B} & c_{F_z,C} & c_{F_z,D} & c_{F_z,E} & c_{F_z,F} & c_{F_z,G} & c_{F_z,H} \\ c_{M_x,A} & c_{M_x,B} & c_{M_x,C} & c_{M_x,D} & c_{M_x,E} & c_{M_x,F} & c_{M_x,G} & c_{M_x,H} \\ c_{M_y,A} & c_{M_y,B} & c_{M_y,C} & c_{M_y,D} & c_{M_y,E} & c_{M_y,F} & c_{M_y,G} & c_{M_y,H} \\ c_{M_z,A} & c_{M_z,B} & c_{M_z,C} & c_{M_z,D} & c_{M_z,E} & c_{M_z,F} & c_{M_z,G} & c_{M_z,H} \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} z_A \\ z_B \\ z_C \\ z_D \\ z_E \\ z_F \\ z_G \\ z_H \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}} \quad (6.1)$$

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, reagieren theoretisch nur bestimmte Brücken auf bestimmte Lastkomponenten. Daraus ergibt sich eine Kalibriermatrix mit einigen Einträgen gleich 0. Des Weiteren sind durch die Symmetrie des Sensors die Einträge in einer Zeile betragsmäßig gleich und auch die Einträge für Kräfte in x- und y-Richtung und Momente um die x- und y-Achse betragsmäßig gleich. Durch die Anordnung und Verschaltung der Brücken ergibt sich folgende Kalibriermatrix:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} & A & B & C & D & E & F & G & H \\ F_x & & & & & & -a & & a \\ F_y & & & & & a & & -a & \\ F_z & b & b & b & b & & & & \\ M_x & & c & & -c & & & & \\ M_y & -c & & c & & & & & \\ M_z & & & & d & -d & d & -d & \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Die leeren Einträge in der Matrix sind 0. Die Ergebnisse sind angelehnt an [30].

## 6.1 Kalibrieralgorithmus

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 beschrieben ist es möglich Nichtlinearitäten und Koppelleffekte durch ein nichtlineares LSV abzubilden. Für den neuen Sensor wird dieser Ansatz gewählt

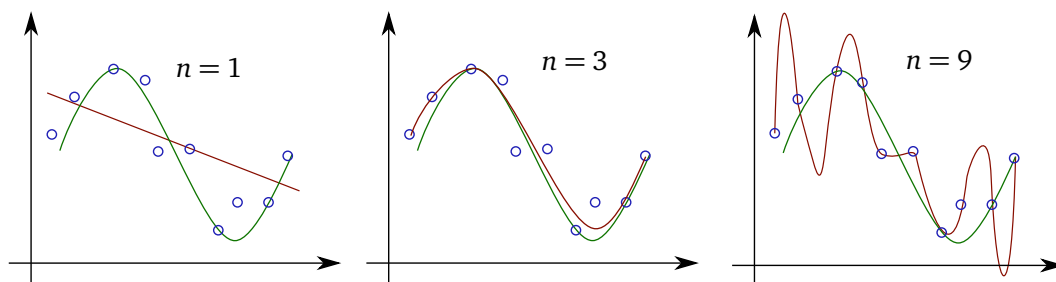
und ein Kalibrieralgorithmus implementiert. Es werden Kalibriermatrizen für ein lineares Verhalten bis zu einem Polynom 7. Grades erstellt. Für jeden Polynomgrad erhöht sich die Anzahl der Spalten der Kalibriermatrix um acht, da es acht Messbrücken gibt. Die Anzahl der Zeilen bleibt gleich, da sich an den sechs Ausgangsgrößen nichts ändert. Um einen konstanten Anfangswert zu berücksichtigen, ist eine weitere Spalte in der Kalibriermatrix und ein Eintrag im Messvektor nötig. Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}}_{\mathbf{m}^*} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{c}_0 & \mathbf{c}_1 & \mathbf{c}_2 & \dots & \mathbf{c}_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{z} \\ \mathbf{z}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{z}^n \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}} \quad (6.3)$$

Die Kalibriermatrix hat eine minimale Größe von  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{6 \times 9}$  und eine maximale Größe von  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{6 \times 57}$ . Der zugehörige Messvektor verhält sich proportional zur Kalibriermatrix und kann eine Größe zwischen  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{9 \times 1}$  und  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{57 \times 1}$  haben.

Wie schon in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, kann die Kalibriermatrix  $\mathbf{C}$  mit der Moore-Penrose Pseudoinversen  $\mathbf{Z}^+ = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T$  durch  $\mathbf{C} = \mathbf{M} \mathbf{Z}^+$  berechnet werden.  $\mathbf{Z}$  ist dabei die Matrix aus den  $l$  aufgenommenen Messvektoren  $\mathbf{z}$  und  $\mathbf{M}$  die Lastmatrix aus den  $l$  aufgebrachten Lasten  $\mathbf{m}$ . Diese Daten werden aus den Kalibriermessungen gewonnen. Dies funktioniert unabhängig vom Grad des Polynoms. Die Pseudoinverse kann mit der *MATLAB*-Funktion *pinv()* berechnet werden.

Wenn nur die Daten der Kalibriermessungen zur Validierung der Kalibriermatrix verwendet werden, ist das Ergebnis meistens umso besser, je höher der Grad des Polynoms ist. Bei einem zu hohen Polynomgrad besteht allerdings die Gefahr des Overfittings (Abb. 6.3). Das bedeutet, dass die erstellte Kalibriermatrix sehr gut zu den Datenpunkten der Kalibriermessung passt, aber zwischen den Punkten oft ein völlig falscher Zusammenhang vorhanden ist. Deswegen ist es ratsam zur Validierung einen unabhängigen Kalibrierungsdatensatz zu verwenden.



**Abbildung 6.3:** Veranschaulichung von Over- und Underfitting anhand eines Beispiels. In grün ist die richtige Funktion zu sehen, in blau die Messpunkte mit Abweichungen und in rot die Kurven aus der Regression. Die linke Kurve mit dem Grad  $n = 1$  ist underfitted, die mittlere Kurve mit dem Grad  $n = 3$  passt gut zur ursprünglichen Funktion und die rechte Kurve mit dem Grad  $n = 9$  passt zwar zu den Messpunkten, führt jedoch zu Schwingungen zwischen den verwendeten Punkten. Abbildung angelehnt an [2].

## 6.2 Kalibriermessungen

### 6.2.1 Aufbau der Kalibriermessungen

Aus Gründen der Einfachheit wird für die Kalibriermessungen eine leicht modifizierte Version des Prüfstands für die experimentelle Untersuchung der DMS verwendet. Es werden lediglich in der Grundplatte mehrere Gewindebohrungen zum Anschrauben eines Winkels hinzugefügt. Mithilfe dieses Winkels kann der Prüfstand um  $90^\circ$  gekippt um die x- oder die y-Achse am Messtisch aufgespannt werden. Dadurch ist es möglich auch Kräfte in x- und y-Richtung und Momente um die z-Achse aufzubringen. Somit sind alle messbaren Lasten abgedeckt und es ist möglich den Messbereich des Sensors komplett abzudecken.

Für die Kalibriermessungen wird der selbe Messverstärkeraufbau, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, verwendet. Die durchgeführte Kalibrierung dient als Test, um die Eignung der Kalibrierverfahren für die finale Kalibrierung festzustellen.

### 6.2.2 Durchführung der Kalibriermessungen

Wie schon bei den Kraftmessungen wird der Abgleich in der Konfiguration mit montiertem Mast und Prüfbalken durchgeführt. Die Messungen werden insgesamt in 235 verschiedenen Konfigurationen durchgeführt (Abb. 6.4). In jeder Konfiguration werden 6000 Messwerte bei einer Frequenz von 2000 Hz aufgenommen. Um das Rauschen auszugleichen, wird der Mittelwert aus diesen Messwerten gebildet. Durch die verschiedenen Konfigurationen wird der Messbereich in allen Achsen abgedeckt und außerdem Lasten in mehreren Achsen kombiniert.

Wie schon bei der experimentellen Untersuchung der DMS verändert sich der Messwert in der Abgleichkonfiguration nach einigen Messungen. Was diesen Effekt verursacht ist nicht klar. Verantwortlich dafür könnten der mechanische Aufbau, unbekannte Effekte des Verstärkers oder Temperaturdifferenzen sein. Um den Einfluss davon auf die Kalibriermessungen zu mindern, wird nach einigen Messungen wieder ein neuer Abgleich durchgeführt. Jedoch immer in derselben Konfiguration des Prüfstands.

Es wird außerdem festgestellt, dass durch das Aufspannen der Grundplatte am Messtisch messbare Spannungen im Sensor entstehen. Besonders bei den seitlichen Brücken ist eine Veränderung der Ausgangsspannung durch das Aufspannen merkbar. Auch beim Kippen des Prüfstands in die horizontale Lage sind diese Abweichungen bemerkbar. Durch den Abgleich im aufgespannten Zustand sollte der Fehler dadurch aber relativ gering sein. Da dieser Neuausgleich in horizontaler Lage zu großen Fehlern führen würde, wird dieser hier nicht durchgeführt und stattdessen ein Messwert vor und nach dem Spannen aufgenommen, um die Abweichung dadurch zu bestimmen. Für eine zukünftige Kalibrierung wäre es vorteilhaft den grundsätzlichen Aufbau der Konfiguration umzudrehen. Das heißt den Sensor am Innenflansch fixieren und die Lastaufbringung über die äußeren Montageflächen zu realisieren. Dadurch sollten im Sensor deutlich weniger Spannungen durch das Aufspannen entstehen.



**Abbildung 6.4:** Konfiguration mit vertikalem Mast (oben) und mit horizontalem Mast (mittig und unten) zur Kalibriermessung.

### 6.3 Auswertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel sind nicht alle Tabellen zu den angewendeten Kalibrierverfahren aufgelistet. Alle weiteren Tabellen sind in Anhang C zu finden.

Zur Validierung des Kalibrierverfahrens wird eine Cross-Validation verwendet (Abb. 6.5). Dabei werden die Messdaten in  $k$  Teilmengen mit jeweils gleich vielen Messungen aufgeteilt. Die Kalibrierung wird dann  $k$ -mal durchgeführt. Dabei werden  $k - 1$  Teilmengen zur Kalibrierung verwendet und der verbleibende Datensatz zur Validierung. Die Daten werden so aufgeteilt, dass jeder Datensatz einmal zur Validierung verwendet wird. In diesem Fall werden die Kalibriermessungen in vier Teilmengen aufgeteilt.

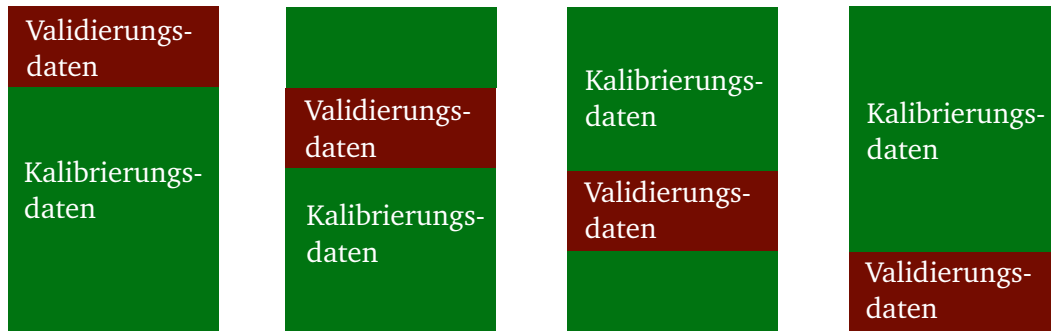


Abbildung 6.5: Cross-Validation für  $k = 4$ .

Als Parameter zur Validierung werden der Maximalwert  $\mathbf{m}_{err,max}$ , der Mittelwert  $\bar{\mathbf{m}}_{err}$  und die Standardabweichung  $\sigma$  des Kalibrierfehlers  $\mathbf{m}_{err} = \mathbf{m}^* - \mathbf{m}$  verwendet. Der Mittelwert zeigt an, ob es ein Offset zwischen den tatsächlichen und berechneten Lasten gibt. Mithilfe der Standardabweichung lässt sich gewissermaßen die Toleranz des Kalibrierfehlers bestimmen. Es ist zu erwarten, dass  $\mathbf{m}_{err}$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,73% im Bereich von  $\bar{\mathbf{m}}_{err} \pm 3\sigma$  liegt. Zusätzlich werden die Parameter noch auf den Messbereich des Sensors bezogen, um einen prozentualen Vergleichswert zu erhalten. Als Bezugsgrößen werden 500 N für  $F_x$  und  $F_y$ , 1200 N für  $F_z$ , 120 Nm für  $M_y$  und  $M_x$  und 50 Nm für  $M_z$  verwendet. Zur Minimierung des Fehlers und zur Datenbereinigung wird die Differenz der Messwerte vor und nach dem Aufspannen in horizontaler Lage bei den entsprechenden Daten abgezogen. Es wird für jede Lastkomponente der größte Fehler aus den vier Validierungsdurchläufen zum Vergleich herangezogen.

Die Ergebnisse für alle Achsen bei den genannten Kalibrierverfahren sind in Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 zu finden. Das beste Ergebnis wird mit einer Kalibriermatrix erzielt, welche ein Polynom 4. oder 5. Grades abbildet. Bei höheren Polynomgraden tritt der Effekt des Overfittings auf. Eine Kalibriermatrix die nur ein lineares Verhalten abbildet weist den größten Fehler auf. Der Mittelwert  $\bar{\mathbf{m}}_{err}$  ist bei allen Verfahren und Achsen wie gewünscht nahe 0. Der maximale Fehler bei Kräften  $F_{err,max,rel}$  beträgt bei einem Polynom 4. Grades 4,5% und die Standardabweichung  $\sigma_{F,rel}$  0,97% und tritt in der z-Achse auf. Im Momentenbereich beträgt der maximale Fehler  $M_{err,max,rel}$  19,86% und die Standardabweichung  $\sigma_{M,rel}$  4,01% und tritt um die z-Achse auf. Generell ist zu erkennen, dass das Moment um die z-Achse mit Abstand den größten Fehler aufweist. Bei einem linearen Kalibrierverfahren liegen der maximale Fehler im Kraftbereich bei 11,92% und die Standardabweichung bei 2,64%, im Momentenbereich beträgt der maximale Fehler 103,78% und die Standardabweichung 35,12%. Bei dem overfitteten Polynom 7. Grades ist die maximale Abweichung bei Kräften 4,61% und hat eine Standardabweichung von 1,14%, bei Momenten ist die maximale Abweichung 83,44% und hat eine Standardabweichung von 11,74%. Durch die Datenbereinigung wird das Ergebnis nicht in allen Achsen besser. Generell ist dadurch nur eine geringe Verbesserung zu erkennen. Die genauen Gründe, warum die Messungen in z-Richtung deutlich schlechter sind als in den anderen Achsrichtungen ist nicht bekannt. Da aber, wie schon beschrieben, der mechanische Aufbau des Prüfstands und der Messverstärker für diverse Probleme verantwortlich sind, liegt die Vermutung nahe, dass dies auch hier der Fall ist. Es kann allerdings auch an Koppeleffekten liegen, da jede Messbrücke für die Messung mehrerer Lastkomponenten zuständig ist.



**Tabelle 6.1:** Kalibrierfehler des Sensors für Kräfte bei einem zugrundeliegenden Polynom 1., 4., 5. und 7. Grades.

Polynomgrad	1		4		5		7	
	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
$F_{x,err,max}$	3,69	0,74	1,72	0,34	2,86	0,57	1,94	0,39
$\bar{F}_{x,err}$	0,01	0,00	-0,07	-0,01	-0,08	-0,02	-0,11	-0,02
$\sigma_{F_x}$	1,14	0,23	0,58	0,12	0,64	0,13	0,64	0,13
$F_{y,err,max}$	7,66	1,53	2,92	0,58	4,16	0,83	4,97	0,99
$\bar{F}_{y,err}$	0,04	0,01	-0,04	-0,01	-0,03	-0,01	0,00	0,00
$\sigma_{F_y}$	1,95	0,39	0,68	0,14	0,97	0,19	1,10	0,22
$F_{z,err,max}$	143,05	11,92	54,06	4,50	31,96	2,66	55,31	4,61
$\bar{F}_{z,err}$	0,34	0,03	0,25	0,02	0,80	0,07	0,21	0,02
$\sigma_{F_z}$	31,63	2,64	11,64	0,97	11,12	0,93	13,63	1,14

**Tabelle 6.2:** Kalibrierfehler des Sensors für Momente bei einem zugrundeliegenden Polynom 1., 4., 5. und 7. Grades.

Polynomgrad	1		4		5		7	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]
$M_{x,err,max}$	2,38	1,98	0,53	0,44	0,56	0,47	1,78	1,48
$\bar{M}_{x,err}$	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,01
$\sigma_{M_x}$	0,64	0,54	0,14	0,12	0,16	0,13	0,33	0,28
$M_{y,err,max}$	4,97	4,14	2,30	1,92	1,28	1,06	2,51	2,09
$\bar{M}_{y,err}$	0,07	0,06	0,01	0,01	0,05	0,04	0,05	0,04
$\sigma_{M_y}$	1,30	1,08	0,51	0,42	0,46	0,39	0,59	0,50
$M_{z,err,max}$	51,89	103,78	9,93	19,86	13,72	27,45	41,72	83,44
$\bar{M}_{z,err}$	0,08	0,17	-0,17	-0,34	-0,20	-0,39	-0,69	-1,39
$\sigma_{M_z}$	17,56	35,12	2,00	4,01	2,33	4,67	5,87	11,74

Schon bei den Kalibriermessungen ist zu sehen, dass aufgrund des Umspannens des Prüfstands von der Konfiguration mit vertikalem Mast zur Konfiguration mit horizontalem Mast Abweichungen entstehen. Aufgrund dessen liegt die Vermutung nahe, dass der Kalibrierfehler reduziert werden kann, wenn dieses Umspannen nicht mehr nötig ist. Deswegen wird auch eine Kalibrierung mit reduzierten Datensätzen durchgeführt. Einmal werden nur die Daten verwendet, welche mit vertikalem Mast aufgezeichnet werden und einmal nur die, die mit horizontalem Mast aufgezeichnet werden. Dadurch sind allerdings nicht alle Lastkomponenten vorhanden und die Kalibrierung hat eine begrenzte Aussagekraft. Bei ersterem werden nur  $F_z$ ,  $M_x$  und  $M_y$  berücksichtigt, bei zweiterem sind bis auf  $F_z$  alle Lastkomponenten vorhanden. Für die Messwerte in horizontaler Lage wird wieder die erwähnte Datenbereinigung durchgeführt.

In der vertikalen Konfiguration weist durch die reduzierten Messdaten nicht mehr ein Polynom 4. oder 5. Grades den kleinsten Fehler auf, sondern ein Polynom 3. Grades. Der maximale Fehler bei  $F_z$  ist dadurch ca. um den Faktor 6 kleiner und beträgt 0,74%, die Standardabweichung ist in etwa 5 mal kleiner und beträgt 0,19%. Die Ergebnisse für alle Achsen bei einem Kalibrierverfahren mit Polynom 1., 3., 4. und 7. Grades sind in Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4 zu finden.

**Tabelle 6.3:** Kalibrierfehler des Sensors für Kräfte bei einem zugrundeliegenden Polynom 1., 3., 4. und 7. Grades. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit vertikalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		3		4		7	
	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
$F_{z,err,max}$	51,35	4,28	8,92	0,74	9,65	0,80	40,83	3,40
$\bar{F}_{z,err}$	1,97	0,16	0,35	0,03	0,39	0,03	1,53	0,13
$\sigma_{F_z}$	15,79	1,32	2,27	0,19	2,89	0,24	7,15	0,60

**Tabelle 6.4:** Kalibrierfehler des Sensors für Momente bei einem zugrundeliegenden Polynom 1., 3., 4. und 7. Grades. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit vertikalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		3		4		7	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]
$M_{x,err,max}$	2,05	1,71	0,42	0,35	0,68	0,56	3,20	2,67
$\bar{M}_{x,err}$	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,03	0,06	0,05
$\sigma_{M_x}$	0,59	0,49	0,15	0,13	0,20	0,16	0,57	0,47
$M_{y,err,max}$	1,82	1,52	0,60	0,50	0,80	0,67	3,73	3,10
$\bar{M}_{y,err}$	0,09	0,08	0,01	0,01	0,04	0,04	-0,10	-0,09
$\sigma_{M_y}$	0,60	0,50	0,21	0,17	0,30	0,25	0,65	0,54

In der horizontalen Konfiguration ist durch die reduzierten Messdaten der Messfehler auch bei einem Polynom 3. Grades am geringsten. Die Ausnahme bildet nur  $M_z$ . Dort weist ein Polynom 4. Grades den geringsten Fehler auf. Der maximale Fehler bei  $M_z$  reduziert sich um den Faktor 2,5 auf 7,87% und die Standardabweichung um den Faktor 1,7 auf 2,4%. Die Ergebnisse für alle Achsen bei einem Kalibrierverfahren mit Polynom 1., 3., 4. und 7. Grades sind in Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6 zu finden.

**Tabelle 6.5:** Kalibrierfehler des Sensors für Kräfte bei einem zugrundeliegenden Polynom 1., 3., 4. und 7. Grades. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit horizontalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		3		4		7	
	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
$F_{x,err,max}$	3,07	0,61	0,69	0,14	0,91	0,18	13,23	2,65
$\bar{F}_{x,err}$	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,01	0,00
$\sigma_{F_x}$	1,13	0,23	0,26	0,05	0,36	0,07	4,55	0,91
$F_{y,err,max}$	2,72	0,54	0,63	0,13	2,74	0,55	41,68	8,34
$\bar{F}_{y,err}$	0,09	0,02	-0,01	0,00	-0,17	-0,03	2,59	0,52
$\sigma_{F_y}$	1,01	0,20	0,39	0,08	0,70	0,14	9,72	1,94

**Tabelle 6.6:** Kalibrierfehler des Sensors für Momente bei einem zugrundeliegenden Polynom 1., 3., 4. und 7. Grades. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit horizontalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		3		4		7	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]
$M_{x,err,max}$	0,89	0,74	0,21	0,17	0,93	0,78	13,62	11,35
$\bar{M}_{x,err}$	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,06	0,05	-0,84	-0,70
$\sigma_{M_x}$	0,33	0,28	0,13	0,11	0,24	0,20	3,18	2,65
$M_{y,err,max}$	1,02	0,85	0,20	0,17	0,30	0,25	4,35	3,63
$\bar{M}_{y,err}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
$\sigma_{M_y}$	0,37	0,31	0,08	0,07	0,12	0,10	1,50	1,25
$M_{z,err,max}$	41,57	83,14	9,33	18,67	3,93	7,87	50,40	100,80
$\bar{M}_{z,err}$	-0,21	-0,42	0,61	1,22	-0,02	-0,04	-2,73	-5,46
$\sigma_{M_z}$	22,90	45,81	3,19	6,38	1,20	2,40	13,48	26,95

Warum bei den reduzierten Kalibrierfällen ein Polynom niedrigeren Grades besser abschneidet, lässt sich nicht mit Sicherheit sagen. Einerseits kann der Grund dafür sein, dass weniger verschiedene Lasten betrachtet werden, andererseits ist auch ein Fehler durch das Umspannen merkbar und auch dadurch kann sich der Grad bei Betrachtung aller Messdaten erhöhen. Die Ergebnisse der Auswertung und Beobachtungen bei den Kalibriermessungen, dass sich der Messwert in der Abgleichkonfiguration verändert, legen die Vermutung nahe, dass bei der finalen Kalibrierung mit einem besseren Aufbau und ohne Messverstärker bessere Ergebnisse erzielt werden können. Bei der abschließenden Kalibrierung sollte auf jeden Fall darauf geachtet werden, dass durch das Schwenken keine Fehler entstehen. Dies wäre zum Beispiel durch eine Kalibrierung auf einer 5-Achs Fräsmaschine, wie es bereits Schwiembacher [30] gemacht hat, möglich. Aus der Kalibrierung ist aber deutlich zu sehen, dass ein nichtlineares Verfahren bei diesem Sensor ein deutlich besseres Ergebnis liefert.

Da für verschiedene Lastkomponenten teilweise verschiedene Polynomgrade das beste Ergebnis liefern, wäre es möglich, dies in der Kalibriermatrix, die mit dem Polynom höchsten Grades erstellt wird, zu berücksichtigen. Dazu müssten in der Kalibriermatrix die Zeile, welche zur betreffenden Lastkomponente gehört, mit der gleichen Zeile der Kalibriermatrix, welche mit einem niedrigeren Polynom erstellt wird, ausgetauscht werden. Die letzten Einträge der Zeile sind dann einfach 0.

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ c_{i,0} & c_{i,1} & c_{i,2} & \cdots & c_{i,n-1} & c_{i,n} \\ \vdots \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \vdots \\ c_{i,0} & c_{i,1} & c_{i,2} & \cdots & c_{i,n-1} & 0 \\ \vdots \end{bmatrix}. \quad (6.4)$$

$c_{i,n}$  steht dabei für die  $i$ -te Zeile der Kalibriermatrix, welche mit dem Messvektor hoch  $n$  multipliziert wird. Diese Möglichkeit ist im beschriebenen Algorithmus allerdings noch nicht implementiert.

### Abweichungen zur theoretischen Kalibriermatrix

Zum Vergleich mit der in Gleichung (6.2) beschriebenen theoretischen Kalibriermatrix, wird die Kalibriermatrix herangezogen, welche mit dem linearen Kalibrierverfahren erstellt wird.

Diese lautet:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0,51 & 3,61 & -2,71 & 0,55 & 4,52 & -2,63 & -171,42 & -0,98 & 173,85 \\ -0,24 & 6,30 & -0,68 & -5,84 & -0,04 & 179,27 & -5,58 & -171,39 & -4,32 \\ -94,94 & 202,42 & 168,60 & 198,63 & 166,33 & -102,48 & 168,17 & -107,57 & 24,63 \\ 0 & -0,24 & 7,76 & -0,04 & -8,12 & -0,74 & 0,04 & 0,99 & -0,06 \\ -0,61 & -9,30 & -0,03 & 6,99 & -0,08 & -5,67 & 7,54 & -5,65 & 3,94 \\ 0,20 & 0,70 & 0,16 & 0,88 & 0,03 & 9,68 & -10,07 & 11,05 & -10,67 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Wie zu erwarten, ist die erste Spalte bis auf den Eintrag für  $F_z$  nahe 0. Dies ergibt sich aus der Anfangslast, die durch den Prüfstand auf den Sensor wirkt. Die meisten Einträge, die 0 sein sollten, sind deutlich kleiner als die Einträge, die auf entsprechende Lasten reagieren sollen. Größere Abweichungen zeigen sich bei  $F_z$  und  $M_y$ . Dort gehen auch die seitlichen DMS stark in die Berechnung ein. Auch die Einträge, die betragsmäßig gleich groß sein sollten, weichen nur leicht voneinander ab. Wie jedoch in der Auswertung gezeigt wird, weist eine solche lineare Kalibriermatrix große Fehler auf und ist deswegen für diesen Sensor generell weniger von Interesse.

Zur Validierung des implementierten Kalibrieralgorithmus werden zusätzlich mit der *MATLAB*-Funktion *mvregress()* Kalibriermatrizen mit denselben Ein- und Ausgangsgrößen erstellt. Die Funktion kann eine klassische Maximum-Likelihood Methode, eine Maximum-Likelihood Methode mit einem Erwartungs-Maximierungs-Algorithmus und eine Kovarianz-gewichtete Least-Squares Methode verwenden. Alle diese Methoden werden zur Validierung verwendet und die Kalibriermatrizen sind bis auf minimale Abweichungen, welche durch numerische Fehler entstehen, gleich. Es ist also davon auszugehen, dass der implementierte Algorithmus richtig funktioniert.

# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Prüfstand zum Vergleich von Halbleiter DMS und metallischen DMS vorgestellt. Mithilfe dieses Prüfstands werden an einem Kraft-/Momentensensorgehäuse, wie es bei LOLA verbaut ist, die zwei verschiedenen DMS Typen verglichen. Bei der experimentellen Untersuchung zeigt sich, dass bei diesem Sensor sowohl Halbleiter DMS als auch metallische DMS ein nichtlineares Verhalten zeigen. Bei den metallischen DMS ist dieses Verhalten nicht zu erwarten. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieses Verhalten vom verwendeten Messverstärker oder der mechanischen Sensorstruktur verursacht wird. Dennoch spricht das Ergebnis in diesem Fall dafür, Halbleiter DMS zu verwenden, da der Vorteil der Linearität auch bei metallischen DMS nicht gegeben ist. Auch bei der Temperaturabhängigkeit zeigen die metallischen DMS keine Vorteile. Außerdem weisen sie einen Drift im Messwert auf, obwohl sich die Belastung nicht verändert. Dieses Verhalten ist bei den Halbleiter DMS weniger stark ausgeprägt. Es konnte festgestellt werden, dass dieses Verhalten mit dem Messverstärker zusammenhängt. Eine deutliche Abhängigkeit des Verhaltens von Halbleiter DMS von Lichtverhältnissen konnte nicht nachgewiesen werden. Außerdem sind am Sensor an allen Seiten Deckel angebracht, wodurch die Lichtverhältnisse stets dieselben sind. Des Weiteren zeigen die Halbleiter DMS bei dynamischen Messungen im höheren Frequenzbereich ein besseres Verhalten.

Durch Entwicklung einer neuen Ausricht- und Anpressvorrichtung konnte eine Verklebung der sehr empfindlichen Halbleiter DMS erfolgreich durchgeführt werden. Trotz der neuen Vorrichtungen ist die Ausrichtung der DMS noch etwas problematisch. Durch eine gute Kalibrierung ist aber der leichte Sensitivitätsverlust durch eine nicht perfekte Ausrichtung kein Problem. Die grundlegende Struktur des Sensor ist gleich geblieben, da sie sich seit mehreren Jahren bewährt hat und das Balkendesign durch die Halbleiter DMS nicht geändert werden muss. Zu den wichtigsten konstruktiven Änderungen zählt das Hinzufügen einer zweiten Platine. Der Bauraum für elektronische Bauteile hat sich dadurch mehr als verdoppelt. Des Weiteren wurde festgestellt, dass das zuvor verwendete Konzept zur elektrischen Isolierung nicht funktioniert und wurde deswegen durch eine Erdung des Sensors ersetzt.

Durch das ermittelte nichtlineare Sensorverhalten ist ein neues Kalibrierverfahren nötig. Es wurde ein nichtlineares Least-Squares Verfahren entwickelt. Mit diesem Ansatz wird eine deutlich höhere Genauigkeit als mit einem linearen Least-Squares Verfahren erreicht. Es wird gezeigt, dass ein Kalibrierverfahren mit einem zugrundeliegenden Polynom 4. oder 5. Grades für den Sensor die beste Genauigkeit erzielt. Bei höheren Graden ist der Effekt des Overfittings bemerkbar.

## 7.2 Ausblick

In diesem Abschnitt werden weitere Verbesserungsmöglichkeiten für den Sensor vorgestellt.

### Klebeprozess

Idealerweise wird der Ausricht- und Anpressvorgang in einer Vorrichtung kombiniert. Dadurch ist keine schwierige manuelle Ausrichtung mehr nötig sondern geschieht direkt durch die Vorrichtung beim Anpressen. Außerdem wird dadurch gewährleistet, dass beim Anpressen die Ausrichtung nicht verändert wird.

### Kalibriermessungen

Der entwickelte Prüfstand ist nicht optimal für die Kalibrierung, da er für eine Abdeckung aller Lastkomponenten mehrmals vom Messtisch demontiert werden muss und somit Ungenauigkeiten entstehen. Es ist vorstellbar, wie schon bei der Vorgängerversion des Sensors, den Schwenktisch einer 5-Achs Fräsmaschine zu verwenden [30]. Außerdem wäre es von Vorteil, den Sensor bei der Kalibrierung am Innenflansch zu befestigen und die Lastaufbringung über die äußeren Befestigungsbohrungen zu realisieren, da festgestellt wurde, dass bei einer Befestigung über die äußeren Bohrungen bereits Spannungen im Sensor entstehen. Diese führen zu Ungenauigkeiten. Um alle Fehlerquellen durch das Befestigen in Vorrichtungen zu verhindern, müsste der Sensor an LOLA direkt kalibriert werden. Zusätzlich kann bei einer zukünftigen Kalibrierung ein Temperatursensor im Gehäuse verbaut werden um auch Temperatureinflüsse ins Modell einfließen zu lassen. Es empfiehlt sich außerdem die Kalibrierung an LOLA mehrmals mit Abstand von einigen Wochen oder Monaten zu überprüfen.

### Halbleiter DMS ohne Membran oder Faser-Bragg Sensoren

Die Membran, auf welcher die derzeit verwendeten Halbleiter DMS befestigt sind, ist eine zusätzliche Fehlerquelle. Es sind auch Halbleiter DMS ohne eine solche Membran erhältlich. Der Klebevorgang wird dadurch aber nochmal deutlich diffiziler. Eine weitere sehr vielversprechende Kraftmesstechnologie sind Faser-Bragg Sensoren. Diese haben eine hohe Sensitivität, eine Resistenz gegenüber elektromagnetischen Interferenzen und eine hohe Korrosionsbeständigkeit. Sobald es der Stand der Technik zulässt und solche Sensoren mit passendem Messbereich und in passender Größe kommerziell verfügbar sind, können diese für den Sensor in Betracht gezogen werden.

# Anhang A

## Klebeanleitung für die DMS

Die Beschreibungen sind an die Klebeanleitung von Micro Measurements [39] angelehnt und für den verwendeten Sensor adaptiert.

### A.1 Benötigte Werkzeuge, Vorrichtungen und Materialien

#### Werkzeuge und Vorrichtungen

- Pinzette
- 4H Bleistift
- Schmirgelpapier 320 und rauher
- Glasfaserradierstift
- LötKolben
- Markiervorrichtung oben/unten und seitlich
- Pressvorrichtung oben/unten und seitlich

#### Materialien

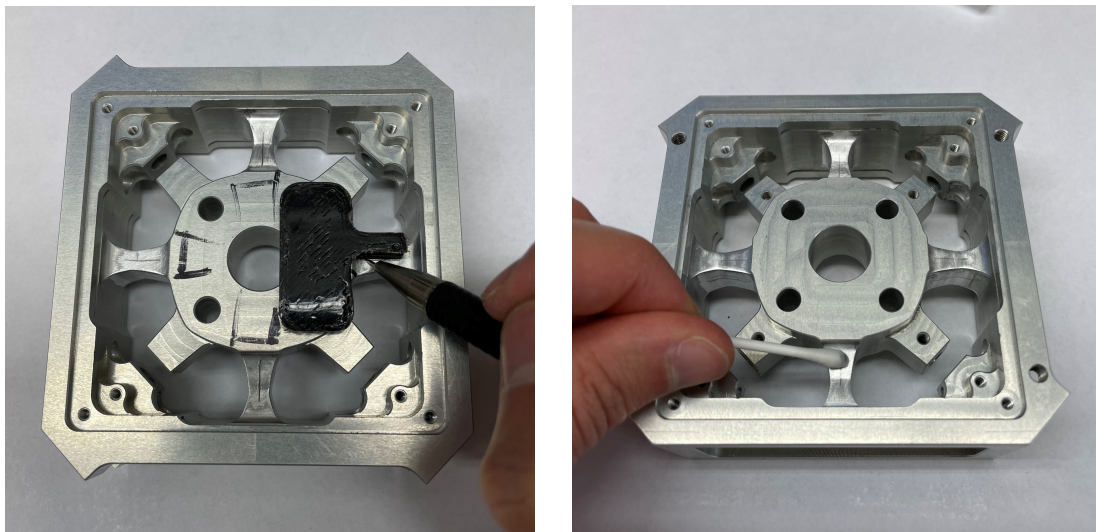
- *Micro Measurements* Klebstoff *M-Bond 610*
- *HBM* Schnellklebstoff *Z70*
- Isopropyl Alkohol
- Wattestäbchen und Wattlepads
- hitzebeständiges *Mylar* Klebeband
- Teflonfilm
- Silikonpads
- *Dow Corning* Silikonüberzug *3140 RTV*
- Kupferlackdrähte  $\varnothing 0,27$  mm
- Lötstützpunkte

### A.2 Oberflächenvorbereitung

1. Falls vorhanden, muss zuerst die Eloxalschicht an der Klebestelle komplett entfernt werden. Dazu können das Schmirgelpapier und der Glasfaserradierstift verwendet werden.

Bei den Radien empfiehlt es sich entweder den Glasfaserradierstift zu verwenden oder ein kleines Stück Schmirgelpapier mit der Pinzette zu spannen um auch dort die Eloxalschicht zu entfernen.

2. Danach muss die Oberfläche mit Isopropyl Alkohol gereinigt und entfettet werden. Dafür sind die Wattestäbchen und Wattedpads zu verwenden.
3. Darauf folgend muss die Klebestelle mit dem Schmirgelpapier 320 aufgeraut werden. Je nach Oberflächenbeschaffenheit kann mit rauherem Schmirgelpapier vorgearbeitet werden.
4. Als nächster Schritt folgt die Markierung der Klebestelle. Dafür wird zuerst die Markiervorrichtung für die Ober- und Unterseite in den Anschraubbohrungen positioniert und bis zur Anschlagfläche in den Sensorkörper gedrückt. Danach kann mit dem 4H Bleistift eine Markierung der Klebepeposition in die Oberfläche poliert werden. Es muss allerdings darauf geachtet werden, das die Markierung nicht eingeritzt wird. Nach der Ober- und Unterseite müssen die seitlichen Klebestellen markiert werden. Dafür muss die entsprechende Markiervorrichtung auf der Oberseite des Sensors in den Anschraubbohrungen positioniert und bis zur Anschlagfläche in den Sensorkörper gedrückt werden. Danach kann die Position wieder mit dem Bleistift markiert werden. Nach dem Markiervorgang muss die Klebestelle wieder solange mit Isopropyl Alkohol gereinigt werden, bis keine Rückstände vom Bleistift am Wattedpad oder Wattestäbchen sichtbar sind.



**Abbildung A.1:** Markieren (links) und reinigen (rechts) der Klebestelle.

### A.3 Klebevorgang

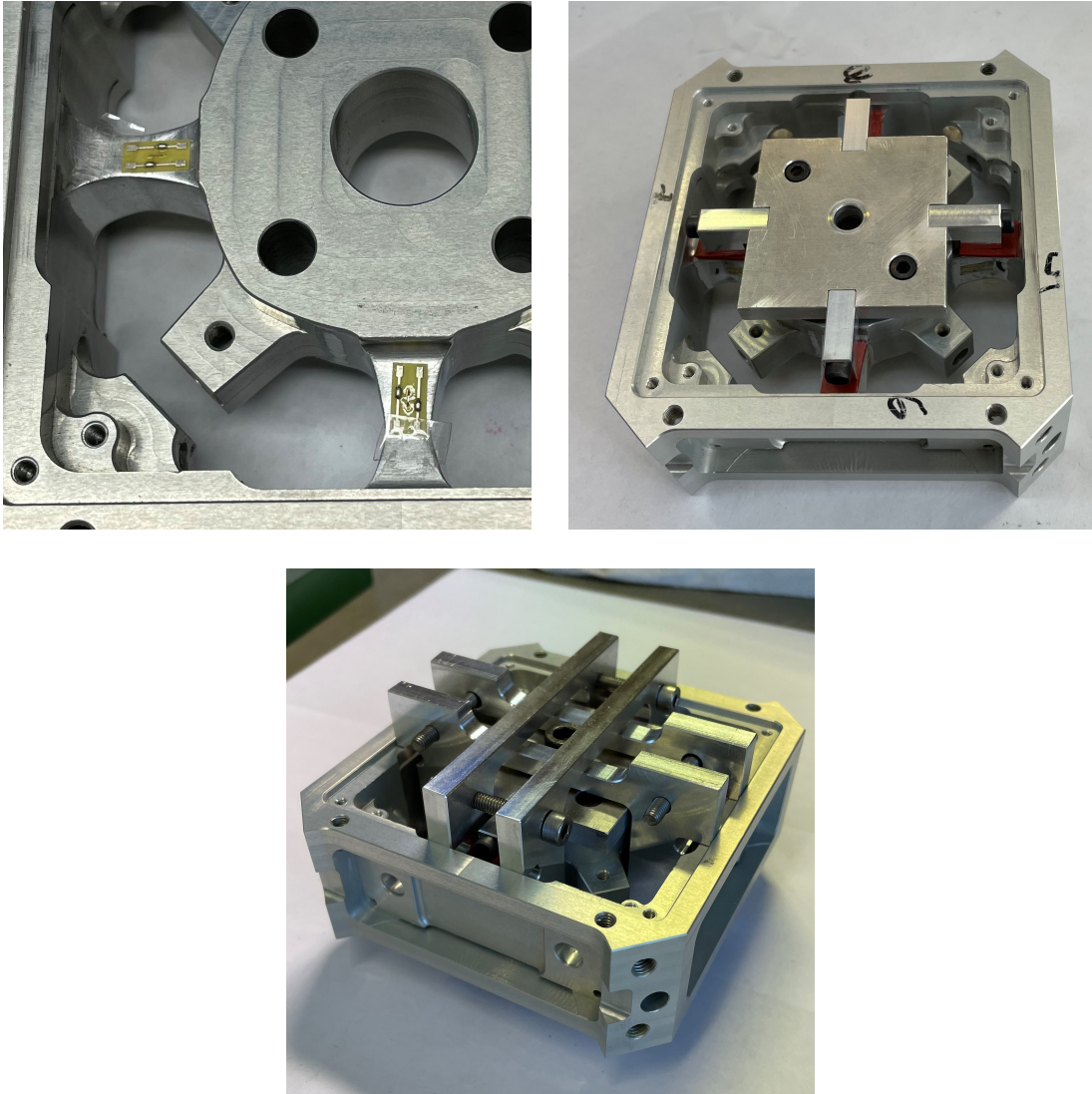
1. Nach Vorbereitung der Oberfläche können die DMS aus der Verpackung entnommen werden und auf eine gereinigte Glasplatte oder zum Beispiel in eine leere DMS Box gelegt werden. Danach kann das hitzebeständige Klebeband am DMS befestigt werden und zwar so, dass der Großteil der DMS Fläche noch frei ist. Es empfiehlt sich die DMS nicht mit den Händen zu berühren um eine Verschmutzung zu vermeiden.



2. Im Anschluss kann der DMS an der Klebposition positioniert und mit dem Klebeband befestigt werden. Zur Ausrichtung können das Halbleiterelement am DMS und die Markierung am Sensor verwendet werden. Es ist auf gute Lichtverhältnisse zu achten, da sonst die Markierung schlecht sichtbar ist.
3. Nach dem Positionieren der DMS muss das Klebeband angehoben werden, sodass aber das Klebeband noch mit dem Bauteil verbunden ist, um eine freie Klebestelle zu erhalten. Danach muss eine dünne Schicht vom Klebstoff *M-Bond 610* mit einem Pinsel auf DMS und Klebestelle aufgetragen werden. Der Zweikomponentenklebstoff muss mindestens 1 Stunde vor Verwendung gemischt werden. Ein Pinsel wird mit dem Klebstoff mitgeliefert. Der Klebstoff muss vor dem nächsten Schritt 5 min bis 30 min an der Luft trocknen.
4. Nach Auftragen des Klebstoffs kann der DMS wieder an seine Position zurück geklappt werden. Falls die Position nicht mehr genau übereinstimmt kann jetzt nochmal nachjustiert werden.
5. Als nächster Schritt muss die Anpressvorrichtung am Sensor befestigt werden. Zur Vorbereitung kann an den Anpressstellen noch ein Silikonpad und der Teflonfilm aufgeklebt werden, da es schwierig ist diese danach an der Klebestelle zu positionieren. Das Silikonpad wird zur Verteilung des Drucks und der Teflonfilm um ein zusammenkleben von Silikonpad und DMS zu verhindern, benötigt. Der Teflonfilm liegt zwischen DMS und Silikonpad und das Silikonpad zwischen Teflonfilm und Anpressvorrichtung. Zuerst muss die Anpressvorrichtung für die Ober- und Unterseite angebracht werden. Danach erst die Anpressvorrichtung für die seitlichen DMS. Bei diesen ist auch auf die Reihenfolge zu achten, da ansonsten die zweite nicht montiert werden kann. Der Anpressdruck wird durch anziehen der Schrauben erzeugt. Dieser darf nicht zu hoch sein da sonst die DMS beschädigt werden können.

## A.4 Aushärten

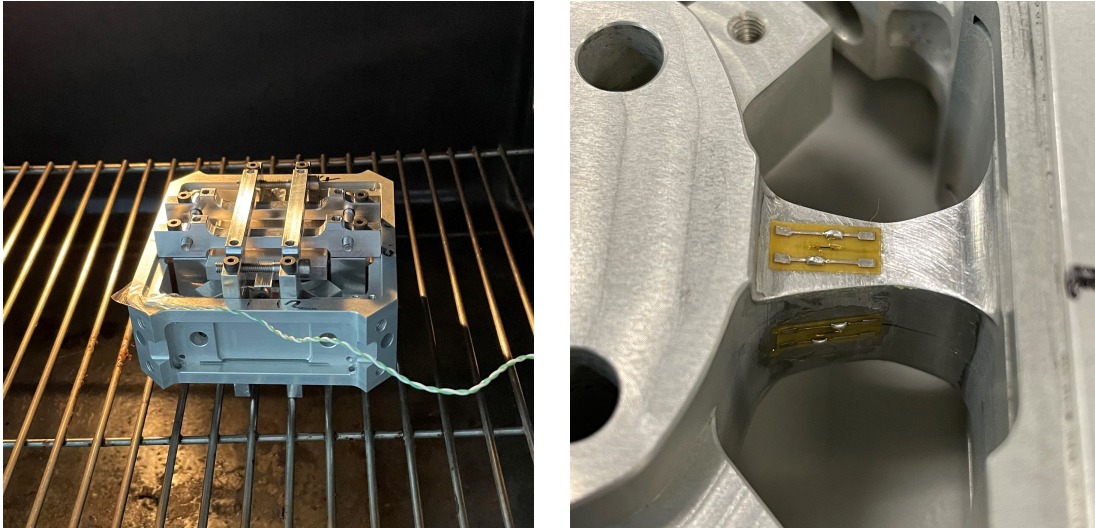
1. Nach Anbringen der Anpressvorrichtung kann der Sensor inklusive Anpressvorrichtung in den kalten Ofen zum Aushärten gegeben werden. Der Ofen sollte dann mit einer Aufheizrate von maximal  $11\text{ °C/min}$  auf Aushärtetemperatur gebracht werden. Bei einer höheren Aufheizrate besteht die Gefahr, dass die Klebestelle uneben wird und sich Eigenspannungen oder Gasblasen in der Klebstoffschicht bilden. Für den gewählten Klebstoff gibt es ein Temperatur/Zeit-Diagramm (Abb. A.4), welches bei der Wahl der Aushärtetemperatur und -zeit berücksichtigt werden muss. Da die hochfeste und wärmebehandelte Aluminiumlegierung EN AW-7075 T651 bei höheren Temperaturen an Festigkeit verlieren kann, wird die niedrigst mögliche Aushärtetemperatur von  $100\text{ °C}$  gewählt und für 4 Stunden ausgehärtet. Bevor der Sensor aus dem Ofen genommen wird, sollte die Temperatur um mindestens  $55\text{ °C}$  sinken.
2. Anschließend kann die Pressvorrichtung und das Klebeband entfernt werden und die Klebestelle gereinigt werden.
3. Zuletzt sollte die Klebestelle nochmals bei  $30\text{ °C}$  bis  $40\text{ °C}$  über Aushärtetemperatur oder Einsatztemperatur, je nachdem welche davon höher ist, für 2 Stunden nachgehärtet werden. Aufgrund des Materials wird eine Nachhärtetemperatur von  $130\text{ °C}$  gewählt.



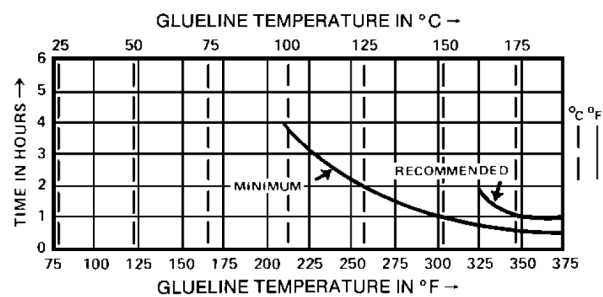
**Abbildung A.2:** DMS mit Klebeband befestigt (oben links), Pressvorrichtung für die oberen und unteren DMS (oben rechts) und gesamte Pressvorrichtung (unten).

## A.5 Verdrahten und Versiegeln

1. Nach Aushärten des Klebstoffs muss der Sensor noch verdrahtet werden. Dafür müssen als erstes Lötstützpunkte am Sensor angebracht werden. Zuerst muss dafür die Klebestelle gereinigt werden. Die Position der Lötstützpunkte befindet sich an Ober- und Unterseite am Ende der Balken. Nach dem Reinigen kann ein kleiner Tropfen des Schnellklebstoffs an der Klebestelle aufgetragen werden. Danach kann der Lötstützpunkt mithilfe einer Pinzette auf der Klebestelle positioniert werden. Zum Aushärten des Klebstoffs muss der Lötstützpunkt 1 Minute lange mit dem Daumen festgedrückt werden. Um ein Zusammenkleben von Daumen und Lötstützpunkt zu verhindern muss ein Teflonfilm dazwischen liegen. Vor der Weiterverarbeitung muss der Klebstoff einige Stunden aushärten.
2. Darauf folgend kann mit dem Verdrahten begonnen werden. Dafür werden an die DMS und Lötstützpunkte Kupferlackdrähte gelötet und so zu Halbbrücken verschaltet.



**Abbildung A.3:** Sensor zum Aushärten im Ofen (links) und fertig verklebte DMS (rechts).



**Abbildung A.4:** Temperatur-Zeit Diagramm für die Verklebung von DMS mit dem Klebstoff *M-Bond 610* [39].

3. Ab den Lötstützpunkten kann dann die weitere Verkabelung zur Platine oder anderen Anschlussstellen erfolgen.
4. Nachdem alle Drähte und Kabel angebracht sind können die Messbrücken, Lötstützpunkte und Drähte mit Flüssigsilikon versiegelt werden. Da das Silikon flüssig ist empfiehlt es sich den Prozess in 2 Schritten durchzuführen. Zuerst die Versiegelung der Oberseite. Diese sollte dann für etwa 2 Stunden aushärten. Danach kann mit der Unterseite das gleiche gemacht werden. Vor Verwendung des Sensors sollte das Silikon mindestens 12 Stunden aushärten.

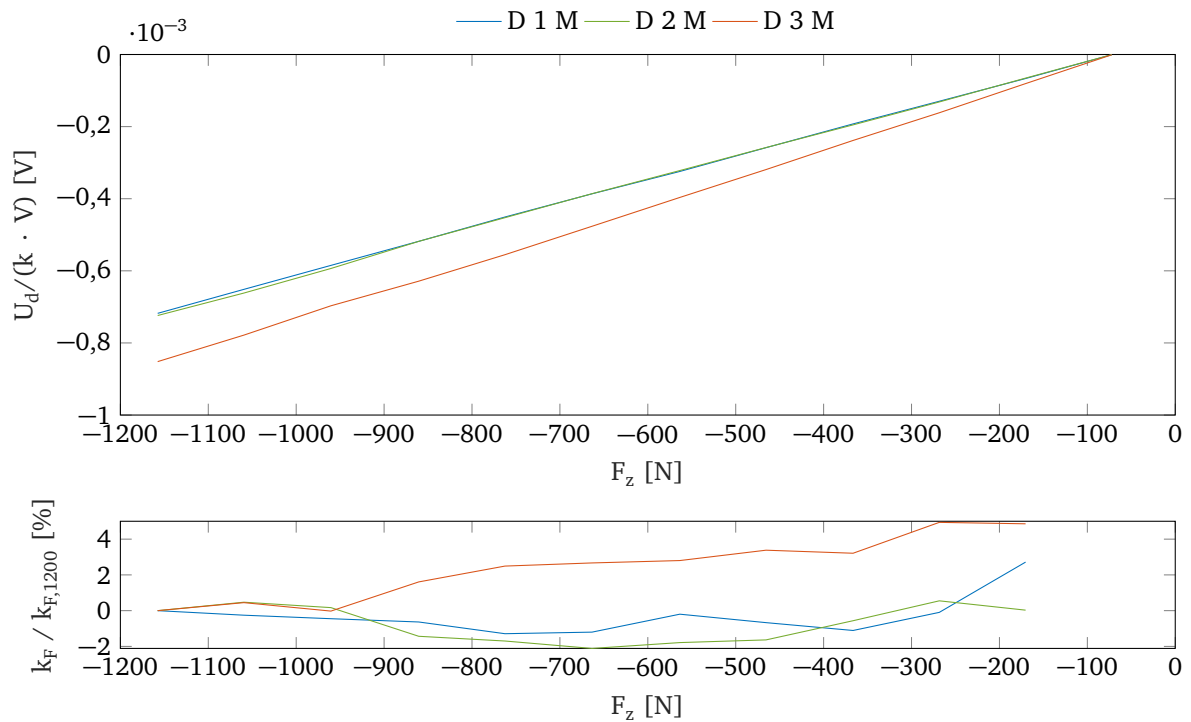


**Abbildung A.5:** Anbringen des Lötstützpunkts (oben links), Bildung der Messbrücken (oben rechts) und versiegelte Messbrücken (unten).

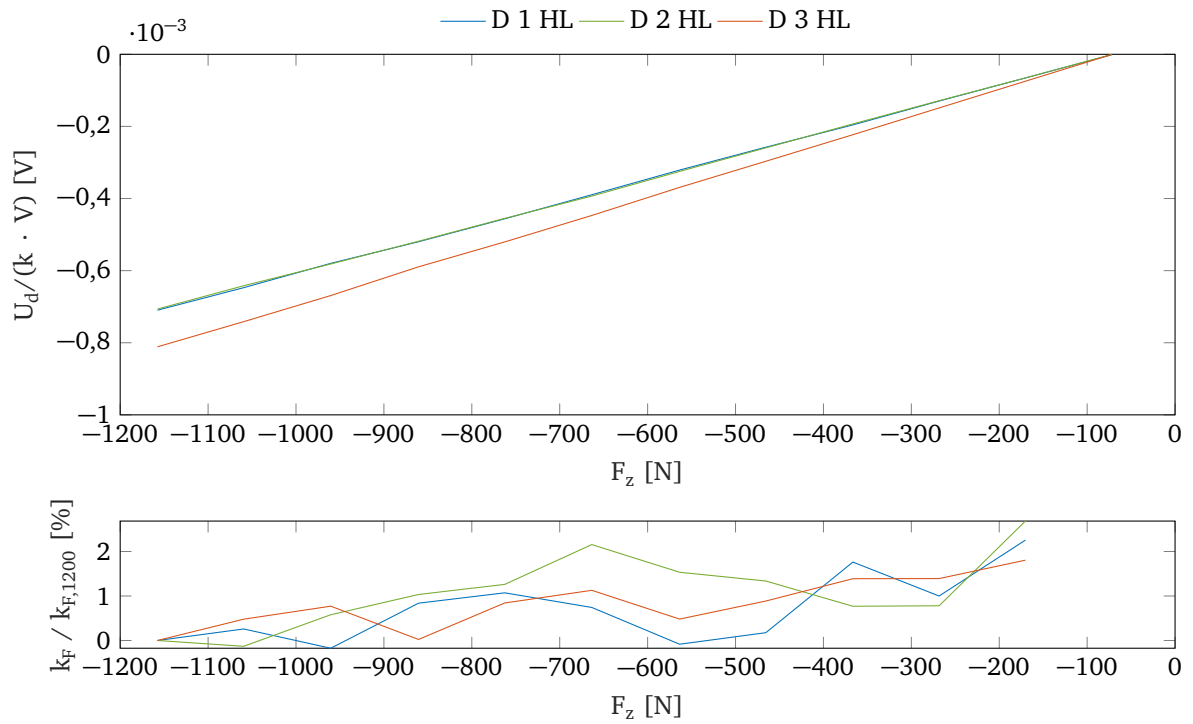
## Anhang B

### Diagramme aus der experimentellen Untersuchung der DMS

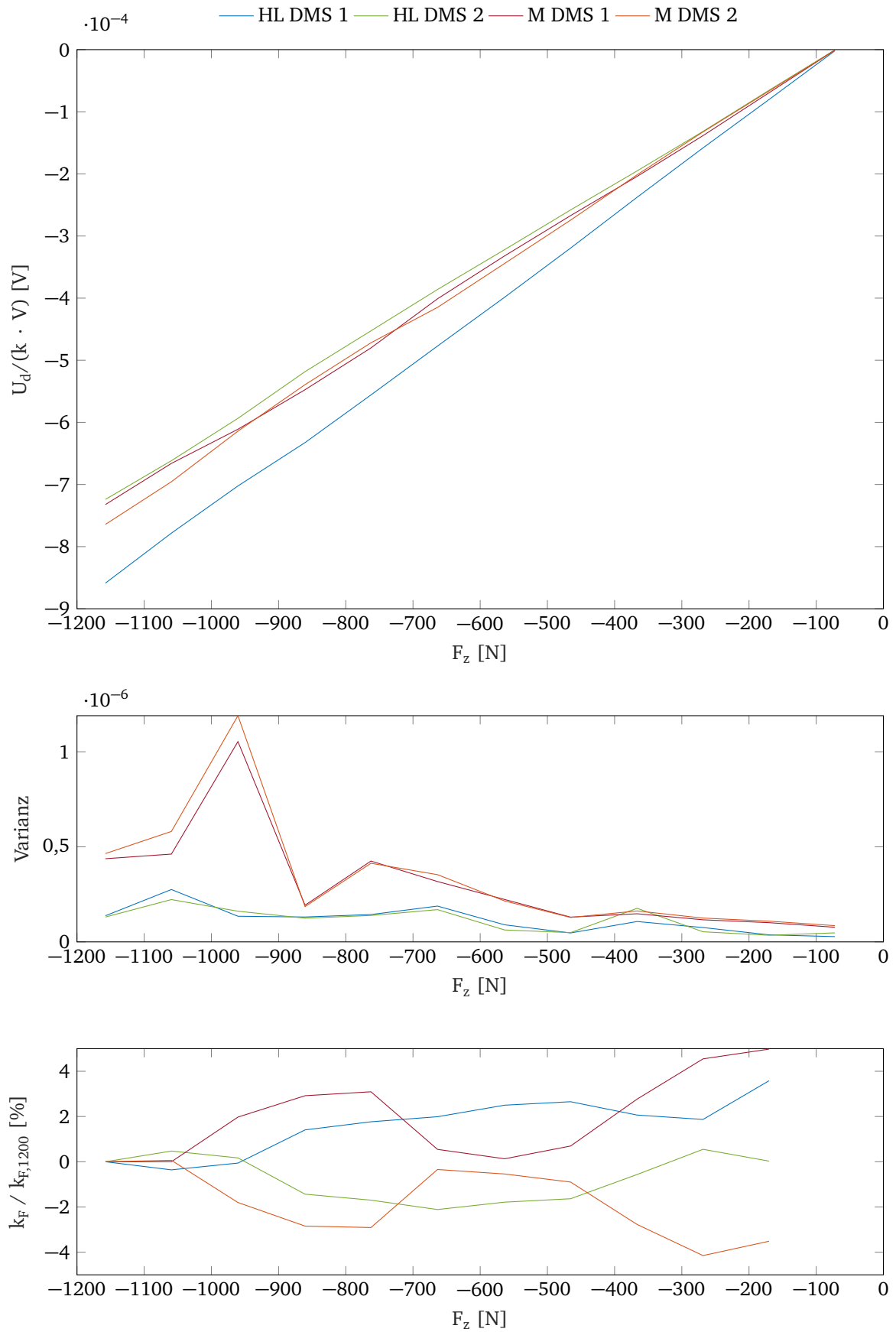
In diesem Abschnitt sind weitere Diagramme aus der experimentellen Untersuchung von Halbleiter DMS und metallischen DMS zu finden.



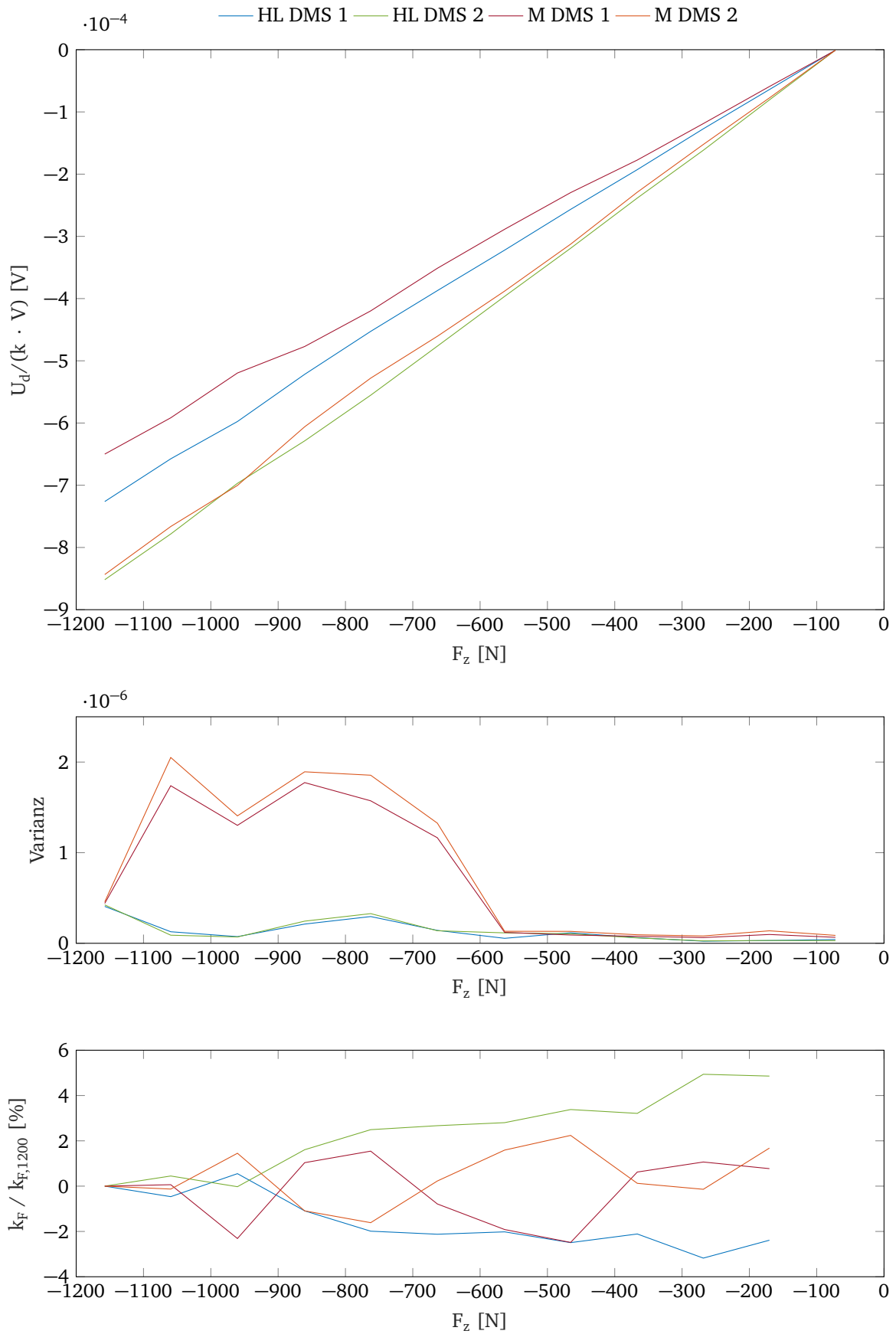
**Abbildung B.1:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben) und Änderung der k-Faktoren (unten) der Brücke HL DMS 2 für die Datensätze 1 bis 3.



**Abbildung B.2:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben) und Änderung der k-Faktoren (unten) der Brücke M DMS 2 für die Datensätze 1 bis 3.

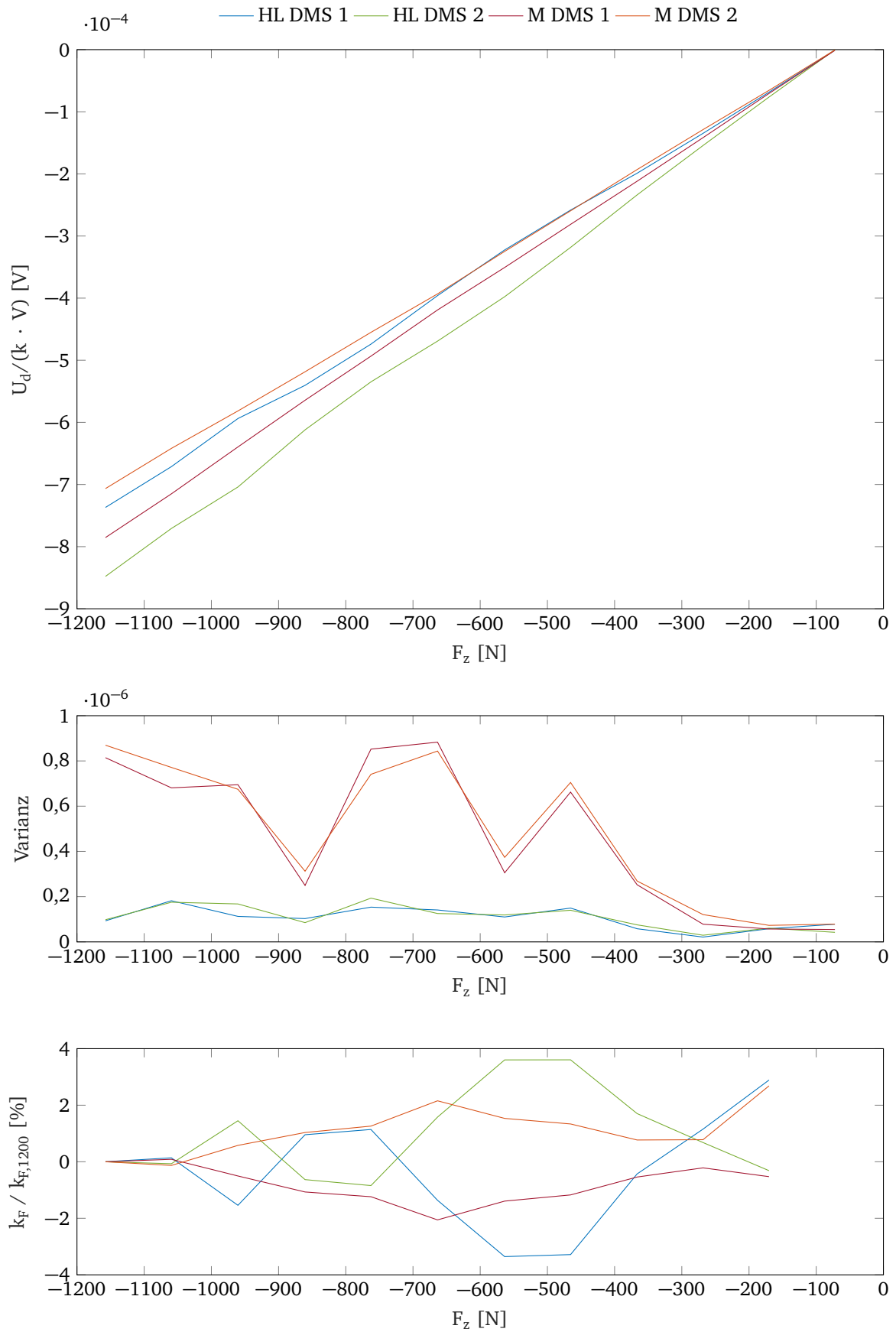


**Abbildung B.3:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben), Varianz (mittig) und Änderung der k-Faktoren (unten) des Datensatzes D 2 M.

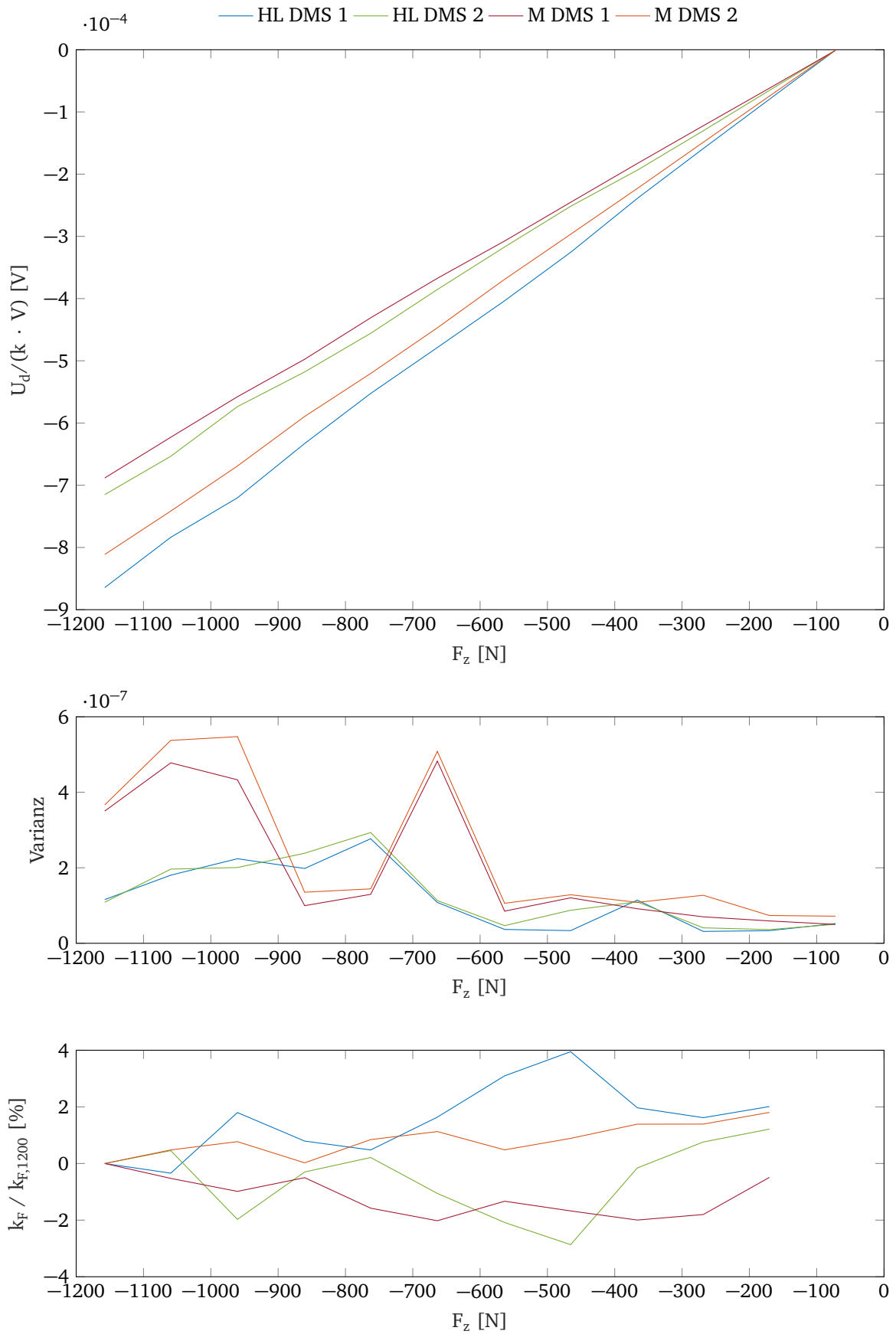


**Abbildung B.4:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben), Varianz (mittig) und Änderung der k-Faktoren (unten) des Datensatzes D 3 M.

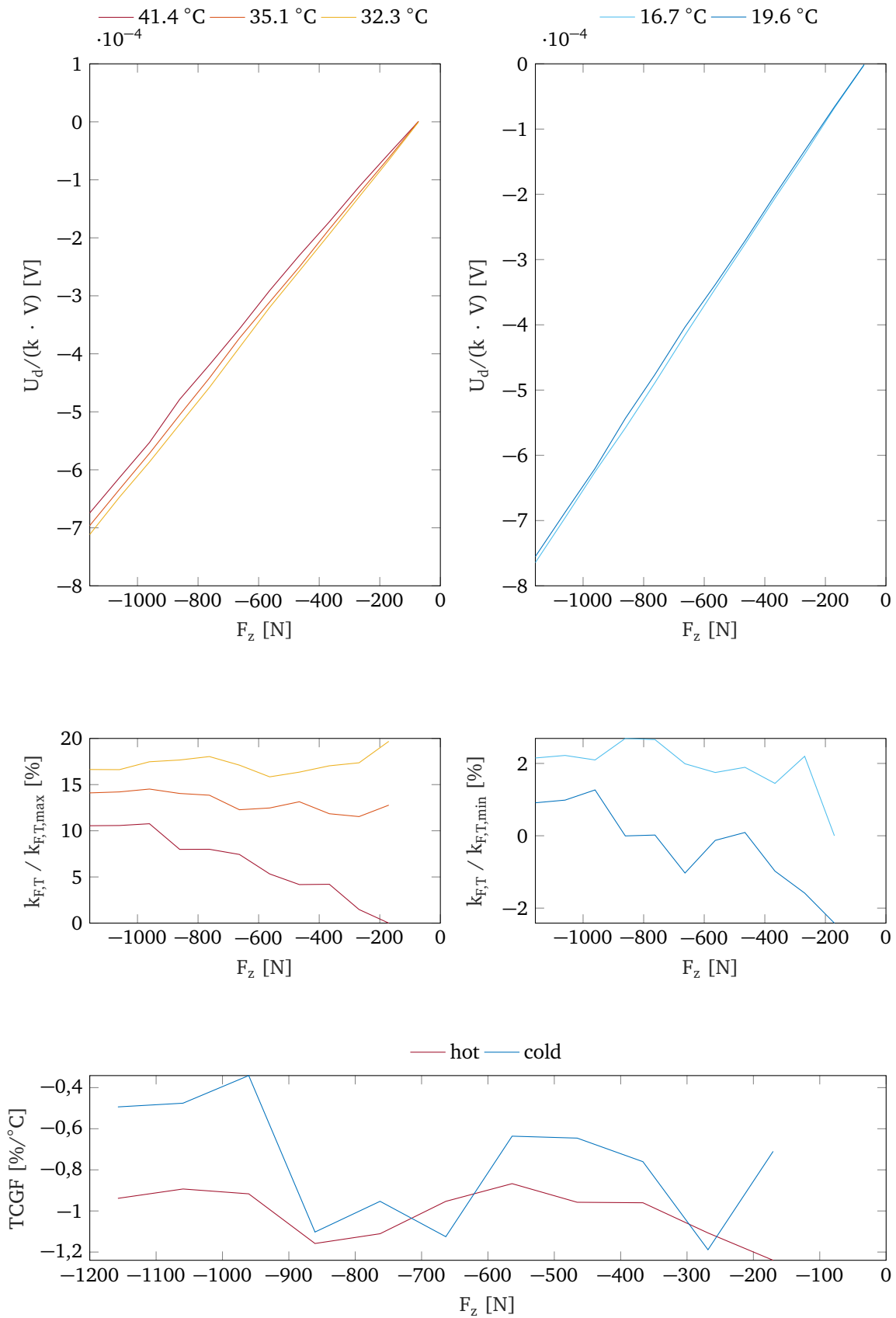




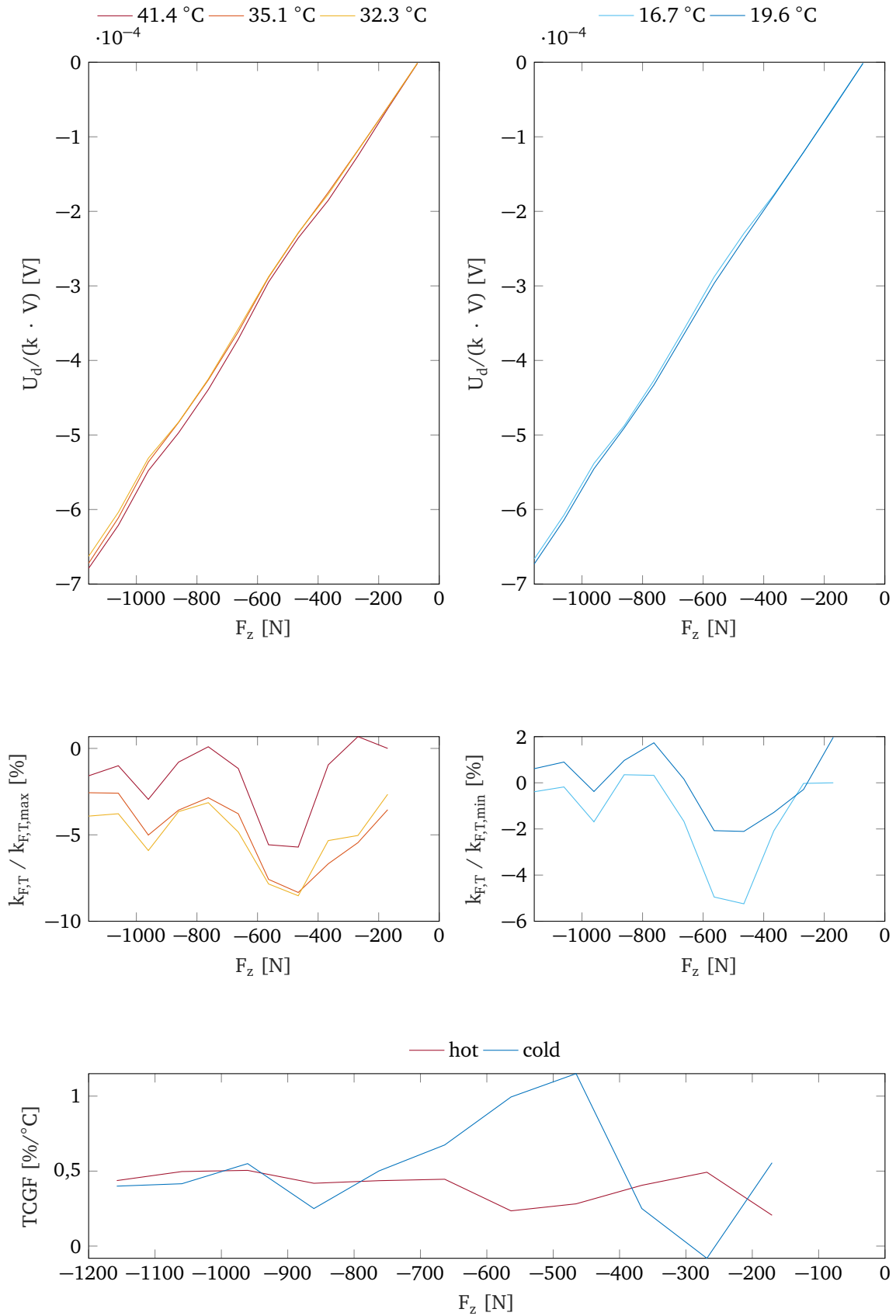
**Abbildung B.5:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben), Varianz (mittig) und Änderung der k-Faktoren (unten) des Datensatzes D 2 HL.



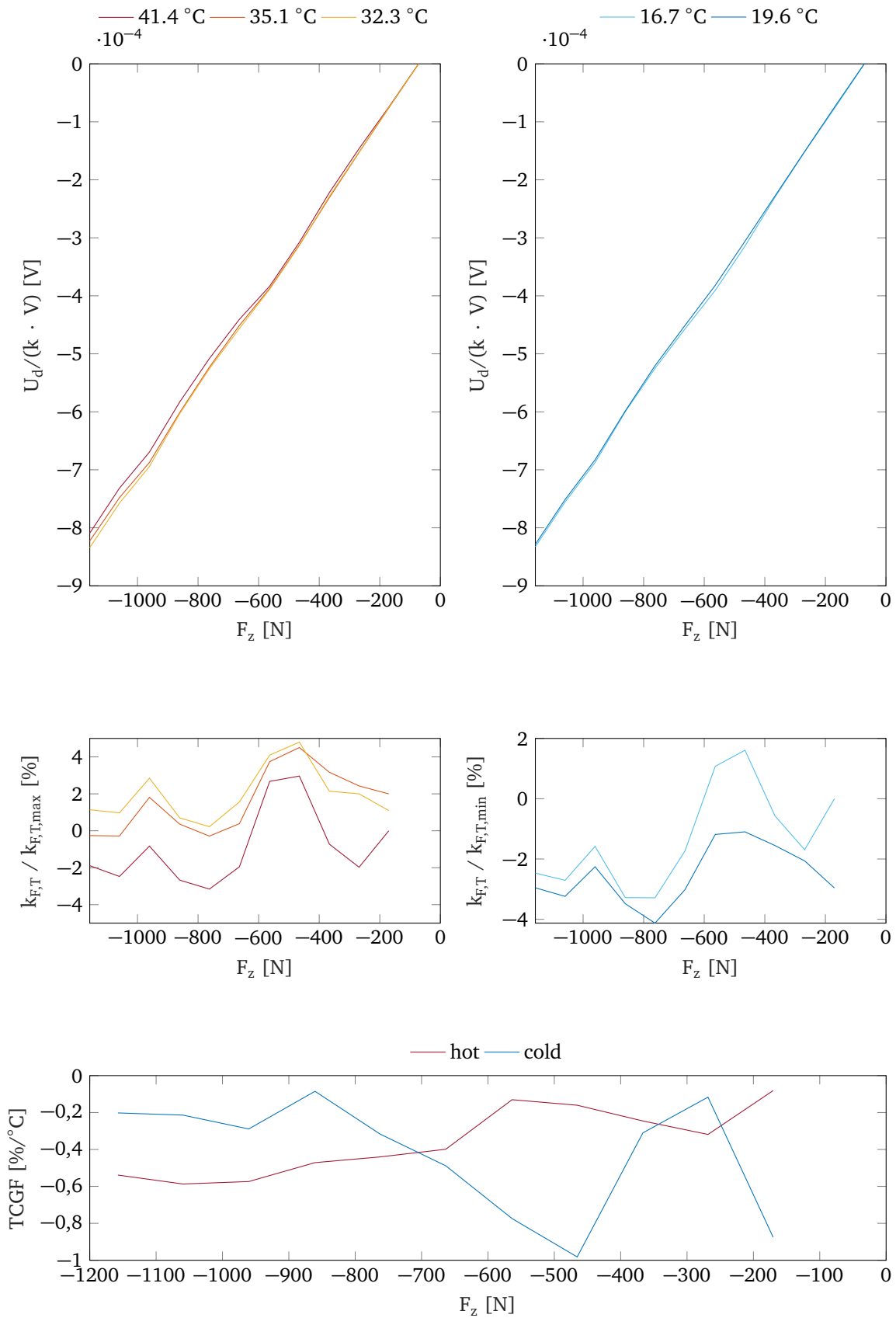
**Abbildung B.6:** Kraft-Spannungs Kennlinien (oben), Varianz (mittig) und Änderung der k-Faktoren (unten) des Datensatzes D 3 HL.



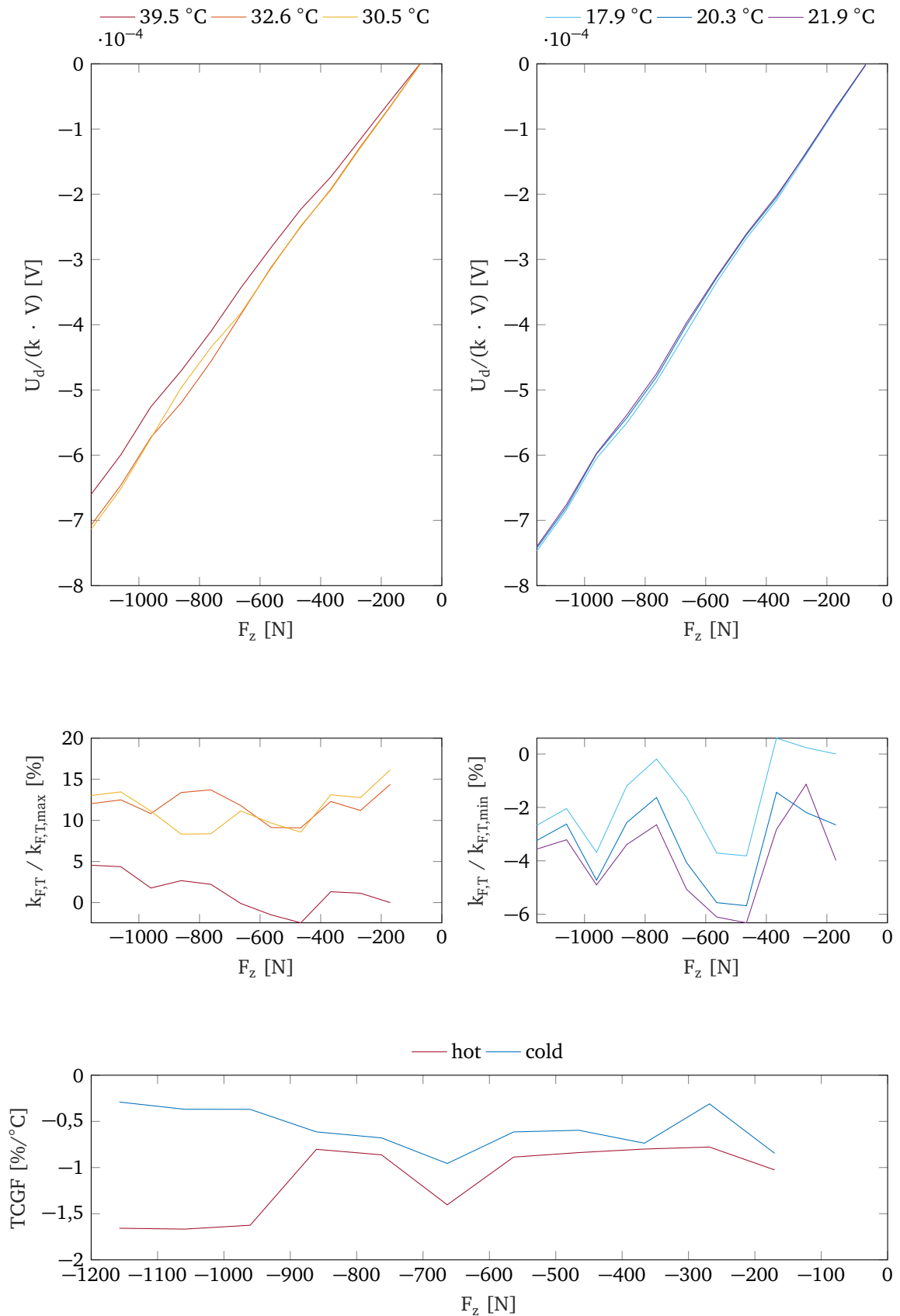
**Abbildung B.7:** Kraft-Spannungs Kennlinien im heißen Fall (oben links), im kalten Fall (oben rechts), Änderung der k-Faktoren im heißen Fall (mittig links), im kalten Fall (mittig rechts) und Änderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperatur (unten) bei HL DMS 1. Das Moment wirkt auf die metallischen DMS.



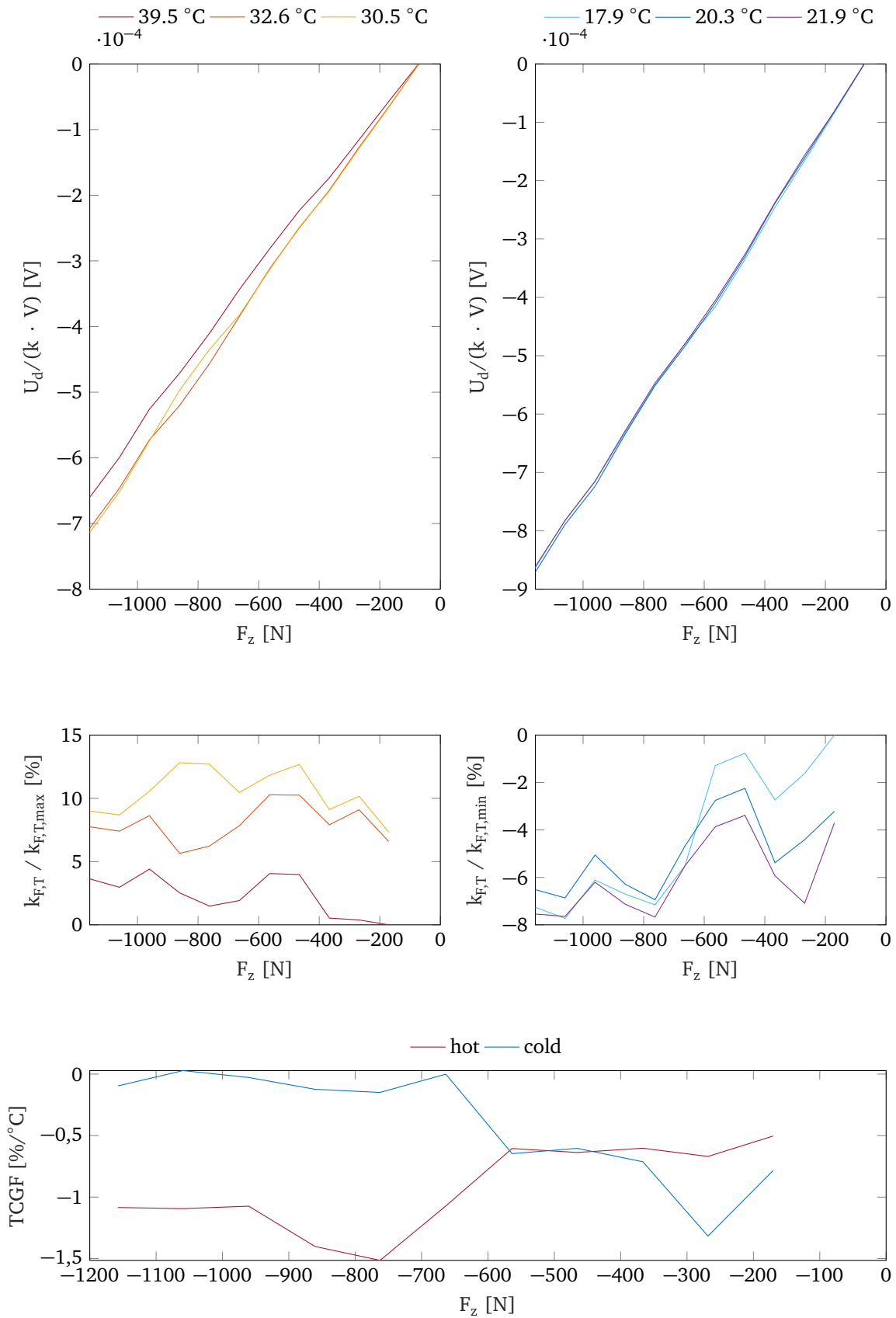
**Abbildung B.8:** Kraft-Spannungs Kennlinien im heißen Fall (oben links), im kalten Fall (oben rechts), Änderung der k-Faktoren im heißen Fall (mittig links), im kalten Fall (mittig rechts) und Änderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperatur (unten) bei M DMS 1. Das Moment wirkt auf die metallischen DMS.



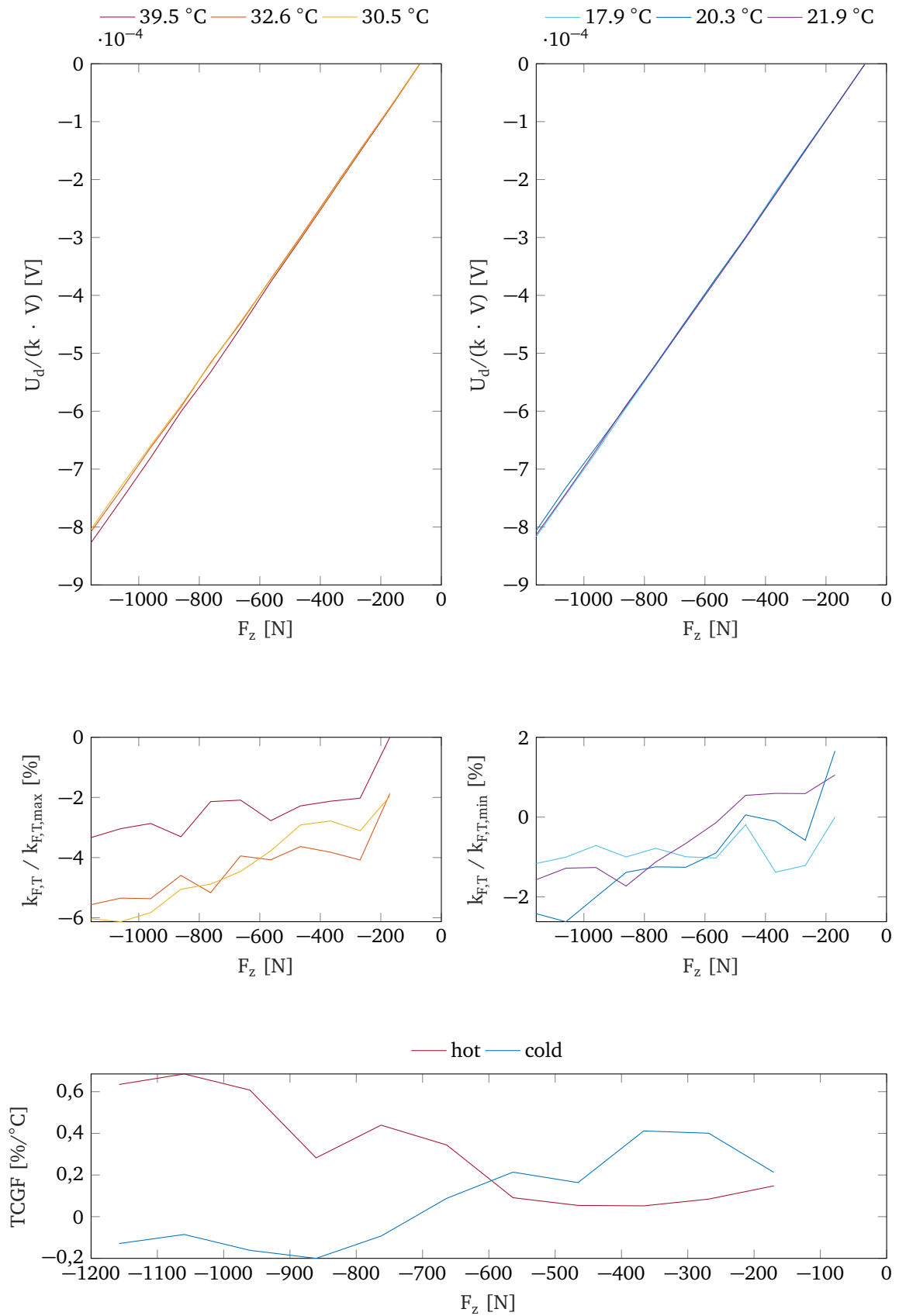
**Abbildung B.9:** Kraft-Spannungs Kennlinien im heißen Fall (oben links), im kalten Fall (oben rechts), Änderung der k-Faktoren im heißen Fall (mittig links), im kalten Fall (mittig rechts) und Änderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperatur (unten) bei M DMS 2. Das Moment wirkt auf die metallischen DMS.



**Abbildung B.10:** Kraft-Spannungs Kennlinien im heißen Fall (oben links), im kalten Fall (oben rechts), Änderung der k-Faktoren im heißen Fall (mittig links), im kalten Fall (mittig rechts) und Änderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperatur (unten) bei HL DMS 1. Das Moment wirkt auf die Halbleiter DMS.



**Abbildung B.11:** Kraft-Spannungs Kennlinien im heißen Fall (oben links), im kalten Fall (oben rechts), Änderung der k-Faktoren im heißen Fall (mittig links), im kalten Fall (mittig rechts) und Änderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperatur (unten) bei HL DMS 2. Das Moment wirkt auf die Halbleiter DMS.



**Abbildung B.12:** Kraft-Spannungs Kennlinien im heißen Fall (oben links), im kalten Fall (oben rechts), Änderung der k-Faktoren im heißen Fall (mittig links), im kalten Fall (mittig rechts) und Änderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperatur (unten) bei M DMS 1. Das Moment wirkt auf die Halbleiter DMS.



## **Anhang C**

### **Kalibrierfehler**

**Tabelle C.1:** Kalibrierfehler des Sensors für Kräfte bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades mit Datenbereinigung.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		6		7	
	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
$F_{x,err,max}$	3,69	0,74	3,55	0,71	3,95	0,79	1,72	0,34	2,86	0,57	2,45	0,49	1,94	0,39
$\bar{F}_{x,err}$	0,01	0,00	0,11	0,02	0,07	0,01	-0,07	-0,01	-0,08	-0,02	-0,10	-0,02	-0,11	-0,02
$\sigma_{F_x}$	1,14	0,23	0,76	0,15	0,78	0,16	0,58	0,12	0,64	0,13	0,64	0,13	0,64	0,13
$F_{y,err,max}$	7,66	1,53	2,76	0,55	2,65	0,53	2,92	0,58	4,16	0,83	3,82	0,76	4,97	0,99
$\bar{F}_{y,err}$	0,04	0,01	0,02	0,00	0,06	0,01	-0,04	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
$\sigma_{F_y}$	1,95	0,39	0,96	0,19	0,78	0,16	0,68	0,14	0,97	0,19	0,98	0,20	1,10	0,22
$F_{z,err,max}$	143,05	11,92	48,52	4,04	43,91	3,66	54,06	4,50	31,96	2,66	53,00	4,42	55,31	4,61
$\bar{F}_{z,err}$	0,34	0,03	2,03	0,17	-2,25	-0,19	0,25	0,02	0,80	0,07	-1,58	-0,13	0,21	0,02
$\sigma_{F_z}$	31,63	2,64	14,35	1,20	11,88	0,99	11,64	0,97	11,12	0,93	12,56	1,05	13,63	1,14

**Tabelle C.2:** Kalibrierfehler des Sensors für Momente bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades mit Datenbereinigung.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		6		7	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]
$M_{x,err,max}$	2,38	1,98	2,69	2,24	0,40	0,33	0,53	0,44	0,56	0,47	0,50	0,42	1,78	1,48
$\bar{M}_{x,err}$	0,04	0,03	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,01
$\sigma_{M_x}$	0,64	0,54	0,58	0,48	0,16	0,13	0,14	0,12	0,16	0,13	0,15	0,13	0,33	0,28
$M_{y,err,max}$	4,97	4,14	3,61	3,01	1,46	1,22	2,30	1,92	1,28	1,06	2,63	2,20	2,51	2,09
$\bar{M}_{y,err}$	0,07	0,06	0,07	0,06	0,08	0,07	0,01	0,01	0,05	0,04	-0,07	-0,06	0,05	0,04
$\sigma_{M_y}$	1,30	1,08	0,90	0,75	0,53	0,44	0,51	0,42	0,46	0,39	0,61	0,51	0,59	0,50
$M_{z,err,max}$	51,89	103,78	23,31	46,62	8,86	17,72	9,93	19,86	13,72	27,45	29,75	59,50	41,72	83,44
$\bar{M}_{z,err}$	0,08	0,17	0,39	0,78	-0,31	-0,62	-0,17	-0,34	-0,20	-0,39	-0,59	-1,18	-0,69	-1,39
$\sigma_{M_z}$	17,56	35,12	5,33	10,67	2,07	4,14	2,00	4,01	2,33	4,67	4,31	8,62	5,87	11,74

**Tabelle C.3:** Kalibrierfehler des Sensors für Kräfte bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades ohne Datenbereinigung.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		6		7	
	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
$F_{x,err,max}$	2,96	0,59	3,51	0,70	3,46	0,69	1,89	0,38	4,11	0,82	2,61	0,52	5,69	1,14
$\bar{F}_{x,err}$	0,03	0,01	-0,10	-0,02	0,09	0,02	0,02	0,00	-0,08	-0,02	-0,03	-0,01	-0,23	-0,05
$\sigma_{F_x}$	1,10	0,22	0,81	0,16	0,79	0,16	0,67	0,13	0,88	0,18	0,78	0,16	1,11	0,22
$F_{y,err,max}$	7,14	1,43	2,84	0,57	2,82	0,56	2,71	0,54	4,13	0,83	3,66	0,73	3,80	0,76
$\bar{F}_{y,err}$	0,06	0,01	0,00	0,00	0,05	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,04	0,01	0,06	0,01
$\sigma_{F_y}$	1,87	0,37	0,97	0,19	0,78	0,16	0,68	0,14	0,87	0,17	0,86	0,17	0,97	0,19
$F_{z,err,max}$	82,25	6,85	42,26	3,52	39,24	3,27	47,32	3,94	44,97	3,75	44,30	3,69	42,89	3,57
$\bar{F}_{z,err}$	3,29	0,27	1,68	0,14	-1,91	-0,16	0,10	0,01	0,21	0,02	-0,93	-0,08	-0,12	-0,01
$\sigma_{F_z}$	29,17	2,43	12,83	1,07	10,48	0,87	10,00	0,83	9,74	0,81	9,97	0,83	11,52	0,96

**Tabelle C.4:** Kalibrierfehler des Sensors für Momente bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades ohne Datenbereinigung.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		4		7	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]
$M_{x,err,max}$	2,39	1,99	2,69	2,24	0,40	0,33	0,53	0,44	0,52	0,43	0,53	0,44	1,69	1,40
$\bar{M}_{x,err}$	0,04	0,04	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,01
$\sigma_{M_x}$	0,64	0,53	0,58	0,48	0,15	0,13	0,14	0,12	0,16	0,13	0,15	0,13	0,33	0,27
$M_{y,err,max}$	3,67	3,06	3,47	2,90	1,26	1,05	2,03	1,69	1,95	1,63	2,14	1,78	2,05	1,71
$\bar{M}_{y,err}$	0,05	0,04	0,06	0,05	0,06	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,04	0,03	0,03
$\sigma_{M_y}$	1,17	0,97	0,86	0,72	0,48	0,40	0,45	0,37	0,43	0,36	0,50	0,42	0,53	0,44
$M_{z,err,max}$	51,98	103,97	23,48	46,95	10,93	21,87	10,93	21,85	14,82	29,65	31,68	63,36	45,66	91,32
$\bar{M}_{z,err}$	0,11	0,22	0,42	0,84	-0,40	-0,80	-0,38	-0,76	-0,15	-0,31	-0,57	-1,15	-0,72	-1,43
$\sigma_{M_z}$	17,59	35,18	5,34	10,69	2,27	4,54	2,04	4,08	2,44	4,89	4,54	9,08	6,37	12,74

**Tabelle C.5:** Kalibrierfehler des Sensors für Kräfte bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit vertikalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		2		3		3		5		6		7	
	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
$F_{z,err,max}$	51,35	4,28	14,01	1,17	8,92	0,74	9,65	0,80	10,78	0,90	28,47	2,37	40,83	3,40
$\bar{F}_{z,err}$	1,97	0,16	0,81	0,07	0,35	0,03	0,39	0,03	-0,52	-0,04	-2,58	-0,22	1,53	0,13
$\sigma_{F_z}$	15,79	1,32	4,95	0,41	2,27	0,19	2,89	0,24	3,31	0,28	6,86	0,57	7,15	0,60

**Tabelle C.6:** Kalibrierfehler des Sensors für Momente bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit vertikalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		6		7	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]
$M_{x,err,max}$	2,05	1,71	0,59	0,49	0,42	0,35	0,68	0,56	0,42	0,35	2,11	1,76	3,20	2,67
$\bar{M}_{x,err}$	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,03	0,03	-0,10	-0,09	0,06	0,05
$\sigma_{M_x}$	0,59	0,49	0,25	0,21	0,15	0,13	0,20	0,16	0,18	0,15	0,41	0,34	0,57	0,47
$M_{y,err,max}$	1,82	1,52	1,37	1,14	0,60	0,50	0,80	0,67	2,03	1,69	1,60	1,33	3,73	3,10
$\bar{M}_{y,err}$	0,09	0,08	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,04	-0,06	-0,05	-0,02	-0,02	-0,10	-0,09
$\sigma_{M_y}$	0,60	0,50	0,43	0,36	0,21	0,17	0,30	0,25	0,45	0,37	0,38	0,32	0,65	0,54

**Tabelle C.7:** Kalibrierfehler des Sensors für Kräfte bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades mit Datenbereinigung. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit horizontalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		6		7	
	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
$F_{x,err,max}$	3,07	0,61	1,03	0,21	0,69	0,14	0,91	0,18	1,00	0,20	5,55	1,11	13,23	2,65
$\bar{F}_{x,err}$	-0,02	0,00	0,08	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,10	-0,02	-0,01	0,00
$\sigma_{F_x}$	1,13	0,23	0,44	0,09	0,26	0,05	0,36	0,07	0,45	0,09	1,39	0,28	4,55	0,91
$F_{y,err,max}$	2,72	0,54	0,89	0,18	0,63	0,13	2,74	0,55	5,23	1,05	11,37	2,27	41,68	8,34
$\bar{F}_{y,err}$	0,09	0,02	-0,05	-0,01	-0,01	0,00	-0,17	-0,03	-0,29	-0,06	-0,42	-0,08	2,59	0,52
$\sigma_{F_y}$	1,01	0,20	0,55	0,11	0,39	0,08	0,70	0,14	1,22	0,24	2,81	0,56	9,72	1,94

**Tabelle C.8:** Kalibrierfehler des Sensors für Momente bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades mit Datenbereinigung. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit horizontalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		6		7	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]
$M_{x,err,max}$	0,89	0,74	0,29	0,24	0,21	0,17	0,93	0,78	1,77	1,47	3,76	3,14	13,62	11,35
$\bar{M}_{x,err}$	-0,02	-0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,06	0,05	0,10	0,08	0,14	0,12	-0,84	-0,70
$\sigma_{M_x}$	0,33	0,28	0,19	0,15	0,13	0,11	0,24	0,20	0,41	0,34	0,93	0,77	3,18	2,65
$M_{y,err,max}$	1,02	0,85	0,34	0,28	0,20	0,17	0,30	0,25	0,32	0,27	1,78	1,48	4,35	3,63
$\bar{M}_{y,err}$	0,00	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,03	-0,03	0,00	0,00
$\sigma_{M_y}$	0,37	0,31	0,14	0,12	0,08	0,07	0,12	0,10	0,14	0,12	0,45	0,37	1,50	1,25
$M_{z,err,max}$	41,57	83,14	38,43	76,87	9,33	18,67	3,93	7,87	6,24	12,47	9,93	19,86	50,40	100,80
$\bar{M}_{z,err}$	-0,21	-0,42	-2,31	-4,62	0,61	1,22	-0,02	-0,04	0,41	0,82	0,19	0,38	-2,73	-5,46
$\sigma_{M_z}$	22,90	45,81	10,43	20,86	3,19	6,38	1,20	2,40	1,60	3,19	3,22	6,45	13,48	26,95

**Tabelle C.9:** Kalibrierfehler des Sensors für Kräfte bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades ohne Datenbereinigung. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit horizontalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		6		7	
	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
$F_{x,err,max}$	3,02	0,60	0,98	0,20	0,70	0,14	0,91	0,18	1,06	0,21	5,41	1,08	14,73	2,95
$\bar{F}_{x,err}$	-0,02	0,00	0,08	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,01	0,00	-0,11	-0,02	-1,79	-0,36
$\sigma_{F_x}$	1,13	0,23	0,44	0,09	0,27	0,05	0,37	0,07	0,42	0,08	1,35	0,27	4,69	0,94
$F_{y,err,max}$	2,71	0,54	0,94	0,19	1,00	0,20	2,52	0,50	5,43	1,09	12,68	2,54	45,54	9,11
$\bar{F}_{y,err}$	0,09	0,02	-0,05	-0,01	0,02	0,00	-0,17	-0,03	-0,29	-0,06	-0,48	-0,10	2,78	0,56
$\sigma_{F_y}$	1,01	0,20	0,55	0,11	0,39	0,08	0,65	0,13	1,27	0,25	3,16	0,63	10,67	2,13

**Tabelle C.10:** Kalibrierfehler des Sensors für Momente bei einem zugrundeliegenden Polynom 1. bis 7. Grades ohne Datenbereinigung. Es werden nur Daten verwendet, welche in der Konfiguration mit horizontalem Mast aufgenommen werden.

Polynomgrad	1		2		3		4		5		6		7	
	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]	[Nm]	[%]
$M_{x,err,max}$	0,89	0,74	0,31	0,25	0,21	0,18	0,85	0,71	1,83	1,53	4,20	3,50	14,90	12,42
$\bar{M}_{x,err}$	-0,02	-0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,06	0,05	0,10	0,08	0,16	0,13	-0,91	-0,76
$\sigma_{M_x}$	0,33	0,28	0,18	0,15	0,13	0,11	0,22	0,18	0,43	0,36	1,04	0,87	3,49	2,91
$M_{y,err,max}$	1,00	0,83	0,32	0,27	0,22	0,19	0,29	0,25	0,34	0,29	1,74	1,45	4,80	4,00
$\bar{M}_{y,err}$	-0,01	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,03	-0,03	-0,59	-0,49
$\sigma_{M_y}$	0,37	0,31	0,14	0,12	0,08	0,07	0,12	0,10	0,13	0,11	0,43	0,36	1,53	1,27
$M_{z,err,max}$	40,83	81,66	34,53	69,06	5,82	11,64	4,74	9,47	7,20	14,41	13,40	26,81	56,30	112,59
$\bar{M}_{z,err}$	-0,11	-0,21	-1,81	-3,61	0,34	0,67	0,04	0,08	0,45	0,91	0,42	0,85	-3,07	-6,15
$\sigma_{M_z}$	22,65	45,30	9,30	18,60	2,34	4,69	1,45	2,89	1,78	3,56	4,20	8,39	14,86	29,72

## Literatur

- [1] Beyeler, F., Muntwyler, S. und Nelson, B. J. „A Six-Axis MEMS Force – Torque Sensor With Micro-Newton and Nano-Newtonmeter Resolution“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 18.2 (2009), S. 433–441. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2013387.
- [2] Bishop, C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. ISBN: 0387310738.
- [3] Brookhuis, R. A., Droogendijk, H., De Boer, M. J., Sanders, R. G., Lammerink, T. S., Wiegerink, R. J. und Krijnen, G. J. „Six-axis force-torque sensor with a large range for biomechanical applications“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 24.3 (2014). ISSN: 13616439. DOI: 10.1088/0960-1317/24/3/035015.
- [4] Buschmann, T. *Simulation and Control of Biped Walking Robots*. Dissertation. Technische Universität München, 2010. URL: <http://mediatum.ub.tum.de/eaccess.ub.tum.de/?id=997204>.
- [5] Chavez, F. J. A., Traversaro, S. und Pucci, D. „Six-axis force torque sensor model-based in situ calibration method and its impact in floating-based robot dynamic performance“. In: *Sensors (Switzerland)* 19.24 (2019), S. 1–29. ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s19245521.
- [6] Estevez, P., Bank, J. M., Porta, M., Wei, J., Sarro, P. M., Tichem, M. und Stauffer, U. „6 DOF force and torque sensor for micro-manipulation applications“. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 186 (2012), S. 86–93. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/j.sna.2012.02.037.
- [7] HAPTICA s.r.l. *BACKED STRAIN GAUGES DATASHEET*. Milano (Italien), 2019. URL: <http://www.hapticasensing.com/products/strain-gauges-on-membrane/>.
- [8] Huang, J., Wong, C. Y., Pham, D. T., Wang, Y., Ji, C., Su, S., Xu, W., Liu, Q. und Zhou, Z. „Design of a novel six-axis force/torque sensor based on optical fibre sensing for robotic applications“. In: *ICINCO 2018 - Proceedings of the 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* 1.Icinco (2018), S. 517–524. DOI: 10.5220/0006911705170524.
- [9] Ill-Woo Park, Jung-Yup Kim, Jungho Lee und Jun-Ho Oh. „Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot 3: HUBO)“. In: *5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005*. 2005, S. 321–326. DOI: 10.1109/ICHR.2005.1573587.
- [10] Jung-Yup Kim, Ill-Woo Park, Jungho Lee, Min-Su Kim, Baek-kyu Cho und Jun-Ho Oh. „System Design and Dynamic Walking of Humanoid Robot KHR-2“. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2005, S. 1431–1436. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570316.

- [11] Kang, C. G. „Closed-form force sensing of a 6-axis force transducer based on the stewart platform“. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 90.1-2 (2001), S. 31–37. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/S0924-4247(00)00564-1.
- [12] Kang, M., Lee, S. und Kim, J.-H. „Optimal design of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor based on the principal cross coupling minimization“. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Bd. 9061. März 2014, 90612N. DOI: 10.1117/12.2044744.
- [13] Keil, S. *Dehnungsmessstreifen*. 2. Aufl. Springer, 2017. ISBN: 9783658136116. DOI: 10.1007/978-3-658-13612-3.
- [14] Kim, G., Kang, D. und Rhee, S. „Design and fabrication of a six-component force/moment sensor“. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 77.3 (1999), S. 209–220. DOI: 10.1016/S0924-4247(99)00208-3.
- [15] Kim, J. „Multi-Axis Force-Torque Sensors for Measuring Zero-Moment Point in Humanoid Robots: A Review“. In: *IEEE Sensors Journal* 20.3 (2020), S. 1126–1141. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2947719.
- [16] Knabner, P. und Barth, W. *Lineare Algebra: Grundlagen und Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 9783662555996. DOI: 10.1007/978-3-662-55600-9.
- [17] Lee, D., Kim, U., Jung, H. und Choi, H. R. „A Capacitive-Type Novel Six-Axis Force/Torque Sensor for Robotic Applications“. In: *IEEE Sensors Journal* 16.8 (2016), S. 2290–2299. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2504267.
- [18] Lin, C., Su, C., Lin, S., Chen, C., Yeh, C., Lin, C., Wang, L., Kuo, S. und Chien, L. „6-DoF Force/Torque Sensor“. In: *2019 14th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*. 2019, S. 191–194. DOI: 10.1109/IMPACT47228.2019.9024986.
- [19] Liu, J., Li, M., Qin, L. und Liu, J. „Active Design Method for the Static Characteristics of a Piezoelectric Six-Axis Force/Torque Sensor“. In: *Sensors* 14.1 (2014), S. 659–671. DOI: 10.3390/s140100659.
- [20] Lohmeier, S. *Design and Realization of a Humanoid Robot for Fast and Autonomous Bipedal Locomotion*. Dissertation. Technische Universität München, 2010. URL: <http://mediatum.ub.tum.de.eaccess.ub.tum.de/?id=980754>.
- [21] Ma, Y., Xie, S., Zhang, X. und Luo, Y. „Hybrid calibration method for six-component force/torque transducers of wind tunnel balance based on support vector machines“. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 26.3 (2013), S. 554–562. ISSN: 1000-9361. DOI: 10.1016/j.cja.2013.04.056.
- [22] Nishiwaki, K., Murakami, Y., Kagami, S., Kuniyoshi, Y., Inaba, M. und Inoue, H. „A six-axis force sensor with parallel support mechanism to measure the ground reaction force of humanoid robot“. In: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*. Bd. 3. 2002, 2277–2282 vol.3. DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1013571.
- [23] Oddo, C. M., Valdastrì, P., Beccai, L., Roccella, S., Carrozza, M. C. und Dario, P. „Investigation on calibration methods for multi-axis, linear and redundant force sensors“. In: *Measurement Science and Technology* 18.3 (2007), S. 623–631. ISSN: 13616501. DOI: 10.1088/0957-0233/18/3/011.
- [24] Oh, H. S., Kim, U., Kang, G., Seo, J. K. und Choi, H. R. „Multi-Axial Force/Torque Sensor Calibration Method Based on Deep-Learning“. In: *IEEE Sensors Journal* 18.13 (2018), S. 5485–5496. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2834727.



- [25] Okumura, D., Sakaino, S. und Tsuji, T. „Development of a multistage six-axis force sensor with a high dynamic range“. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics 1* (2017), S. 1386–1391. DOI: 10.1109/ISIE.2017.8001448.
- [26] Ott, C., Baumgärtner, C., Mayr, J., Fuchs, M., Burger, R., Lee, D., Eiberger, O., Albuschäffer, A., Grebenstein, M. und Hirzinger, G. „Development of a biped robot with torque controlled joints“. In: *2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. 2010, S. 167–173. DOI: 10.1109/ICHR.2010.5686340.
- [27] Parmiggiani, A., Maggiali, M., Natale, L., Nori, F., Schmitz, A., Tsagarakis, N., Victor, J. S., Becchi, F., Sandini, G. und Metta, G. „The design of the iCub humanoid robot“. In: *International Journal of Humanoid Robotics 9.4* (2012), S. 1–24. ISSN: 02198436. DOI: 10.1142/S0219843612500272.
- [28] Parthier, R. *Messtechnik*. 9. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2020. ISBN: 978-3-658-27130-5. DOI: 10.1007/978-3-658-27131-2.
- [29] Schrüfer, E. *Elektrische Messtechnik*. 9. Aufl. Hanser, 2007. ISBN: 978-3-446-40904-0.
- [30] Schwienbacher, M. *Entwicklung eines Kraft-/Momentensensors für einen humanoiden Roboter*. Diplomarbeit. Technische Universität München, 2007.
- [31] Shimano, B. und Roth, B. „On Force Sensing Information and Its Use in Controlling Manipulators“. In: *IFAC Proceedings Volumes 10.11* (1977), S. 119–126. ISSN: 14746670. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)66591-1.
- [32] Sun, Y. X., Cao, H. B., Li, M., Lin, R. H., Pan, H. Q., Shuang, F., Gao, L. F. und Ge, Y. J. „Design and calibration of a torque sensor based on sectional redundant measurements“. In: *2015 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2015 August* (2015), S. 262–267. DOI: 10.1109/ICInfA.2015.7279296.
- [33] Templeman, J. O., Sheil, B. B. und Sun, T. „Multi-axis force sensors: A state-of-the-art review“. In: *Sensors and Actuators, A: Physical 304* (2020), S. 111772. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111772.
- [34] Tomasi, C. und Kanade, T. „Shape and motion from image streams: a factorization method“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences 90.21* (1993), S. 9795–9802. ISSN: 0027-8424. DOI: 10.1073/pnas.90.21.9795.
- [35] Tran, T. H., Wang, Y. J., Cheng, C. K., Chao, P. C. und Wang, C. C. „Using maximum likelihood to calibrate a six-DOF force/torque sensor“. In: *Microsystem Technologies 24.11* (2018), S. 4493–4509. ISSN: 09467076. DOI: 10.1007/s00542-018-4009-9.
- [36] Traversaro, S., Pucci, D. und Nori, F. „In situ calibration of six-axis force-torque sensors using accelerometer measurements“. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2015, S. 2111–2116. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139477.
- [37] Vishay Measurements Group GmbH. *DMS für die Spannungsanalyse (Strain Gages for Stress Analysis) - Catalog-No.215-A*. Produktkatalog. Heilbronn, 2001.
- [38] Vishay Precision Group, Inc. *Strain Gage Product Catalog - Linear Patterns - Single Grid*. Malvern, PA (USA), 2014. URL: <http://www.vishaypg.com/docs/11554/linsingr.pdf>.
- [39] Vishay Precision Group, Inc. *Strain Gage Installations with M-Bond 43-B, 600, and 610 Adhesive Systems*. Malvern, PA (USA), 2017. URL: <http://www.vishaypg.com/docs/11130/11130B130.pdf>.
- [40] Voyles, R. M. *Toward Gesture-Based Programming: Agent-Based Haptic Skill Acquisition and Interpretation*. Dissertation. Pittsburg, PA (USA), 1997.

- [41] Voyles, R. M., Morrow, J. D. und Khosla, P. K. „Shape from motion approach to rapid and precise force/torque sensor calibration“. In: *1995 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Bd. 57-1. San Francisco, 1995, S. 67–73. DOI: 10.1184/R1/6625757.v1.
- [42] Weiyi, H., Hongming, J. und Hanqing, Z. „Mechanical analysis of a novel six-degree-of-freedom wrist force sensor“. In: *Sensors and Actuators: A. Physical* 35.3 (1993), S. 203–208. ISSN: 09244247. DOI: 10.1016/0924-4247(93)80153-8.
- [43] Xin, Z. „Design of a new type six-axis force sensor“. In: *2009 2nd International Conference on Intelligent Computing Technology and Automation, ICICTA 2009 2* (2009), S. 446–449. DOI: 10.1109/ICICTA.2009.343.
- [44] Yao, Z., Wang, F., Wang, W. und Qin, Y. „Neural-Network-Based Six-axis Force/Torque Robot Sensor Calibration“. In: *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*. 2010, S. 1336–1338. DOI: 10.1109/iCECE.2010.332.
- [45] Yuan, C., Luo, L. P., Shin, K. S. und Han, C. S. „Design and analysis of a 6-DOF force/torque sensor for human gait analysis“. In: *International Conference on Control, Automation and Systems Iccas* (2013), S. 1788–1793. ISSN: 15987833. DOI: 10.1109/ICCAS.2013.6704229.
- [46] ZSE Electronic Mess-Systeme Sensortechnik GmbH. *Technisches Informationsblatt 02/01 Halbleiter-DMS*. Bietigheim-Bissingen.

## Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Garching, 9. Dezember 2020

---

(Unterschrift)