

# **Aufbau eines Prüfstands zur Erprobung von Online- Messungen von Seilspannungen im Antrieb eines chirurgischen Instruments zur Verbesserung der Regelbarkeit des Systems**

## **Bachelorarbeit**

Kai Göppner



Bestätigung gemäß § 12 RaPO

---

Name und Vorname

der Studentin / des Studenten: Kai Göppner

---

Ich bestätige, dass ich die Bachelorarbeit mit dem Titel:

Aufbau eines Prüfstands zur Erprobung von Online-Messungen  
von Seilspannungen im Antrieb eines chirurgischen Instruments  
zur Verbesserung der Regelbarkeit des Systems

selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke  
vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel  
benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche  
gekennzeichnet habe.

---

Datum: 14.05.2010

Unterschrift:

---



Hochschule **Amberg-Weiden**  
für angewandte Wissenschaften  
University of Applied Sciences (FH)

Fakultät Maschinenbau / Umwelttechnik

Studiengang: Maschinenbau

Bachelorarbeit

von

Kai G Ö P P N E R

Aufbau eines Prüfstands zur Erprobung von Online-Messungen von Seilspannungen  
im Antrieb eines chirurgischen Instruments zur Verbesserung der Regelbarkeit des  
Systems





Hochschule **Amberg-Weiden**  
für angewandte Wissenschaften  
University of Applied Sciences (FH)

Fakultät Maschinenbau / Umwelttechnik

Studiengang: Maschinenbau

Bachelorarbeit

von

Kai G Ö P P N E R

Aufbau eines Prüfstands zur Erprobung von Online-Messungen von Seilspannungen  
im Antrieb eines chirurgischen Instruments zur Verbesserung der Regelbarkeit des  
Systems

15.02.2010 bis 14.05.2010

1. Prüfer: Prof. Dr. Horst Rönnebeck
2. Prüfer: Dipl. Ing. Sophie Thielmann

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erläuterung der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen</b> . . . . .	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Grundlage der Aufgabenstellung . . . . .	2
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	3
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
1.4 Ausgangspunkt der Arbeit . . . . .	4
1.4.1 Einsatzgebiet des Instruments MICA: Die minimal invasive robotische Chirurgie . . . . .	4
1.4.2 Aufbau des Instruments MICA . . . . .	8
1.5 Stand der Technik . . . . .	9
<b>2 Auswahl der Sensorik</b> . . . . .	<b>11</b>
2.1 Randbedingungen der Seilspannungserfassung . . . . .	11
2.2 Mögliche physikalische Prinzipien zur Erfassung von Seilspannungen . . . . .	12
2.2.1 Schwing-Saiten Aufnehmer . . . . .	13
2.2.2 Folienbasierte Dehnungsmessstreifen (DMS) . . . . .	13
2.2.3 Piezoresistive Dehnungsmessstreifen . . . . .	15
2.2.4 Kapazitive Sensoren . . . . .	16
2.2.5 Magnetoelastischer Sensor . . . . .	16
2.2.6 Elektro-Magnetischer Kompensations Sensor . . . . .	16
2.2.7 Faseroptische Dehnungssensoren . . . . .	17
2.3 Mögliche Messstellen in der Instrumentenschnittstelle . . . . .	17
2.3.1 Messstelle auf Seil . . . . .	18
2.3.2 Messen mit Dehnungselement . . . . .	18
2.3.3 Messstellen auf Rollenträgern . . . . .	19
2.3.4 Messung mit Hilfe von Tastrollen / Tastläufern . . . . .	19
2.4 Bewertung der betrachteten Messverfahren und Messstellen . . . . .	20
2.4.1 Schritt 1: Bewertung der Messverfahren . . . . .	20
2.4.2 Schritt 2: Bewertung der Messstellen . . . . .	24
2.4.3 Schritt 3: Auswahl der Sensorik . . . . .	28

<b>3</b>	<b>Simulation der Seilspannungen</b>	<b>29</b>
3.1	Definition der Lastfälle	29
3.2	Wirkungsweise und bevorzugte Lage der gewählten DMS	30
3.3	Aufbau der Simulation	32
3.3.1	Simulationsaufbau am Beispiel des Rollenträger_oben (RTO)	32
3.3.2	Randbedingungen und Eingangsgrößen des Rollenträger_unten (RTU)	38
3.3.3	Randbedingungen und Eingangsgrößen des Rollenträger_mitte (RTM)	39
3.4	Simulationsergebnisse und Interpretation	41
3.4.1	Auswertung der Simulation zur Definition der Lage der Messstellen	41
3.4.2	Analyse der Simulationsergebnisse zur Überprüfung der linearen Unabhängigkeit	44
<b>4</b>	<b>Prüfstands-aufbau und Messprogramm</b>	<b>48</b>
4.1	Varianten des Prüfstands-aufbaus	48
4.1.1	Variante 1: Horizontaler Aufbau mit Gewichten	49
4.1.2	Variante 2: Vertikaler Aufbau mit Hilfe von Spannschlössern	50
4.1.3	Auswahl der Variante	51
4.2	Konstruktion des Prüfstands	51
4.2.1	Mechanischer Aufbau des Prüfstands	51
4.2.2	Veränderungen des Gehäuses der Werkzeugschnittstelle	54
4.2.3	Aufbau der Elektronik	55
4.3	Aufbau des Messprogramms	58
<b>5</b>	<b>Messdatenerfassung und Analyse</b>	<b>61</b>
5.1	Messdatenerfassung	62
5.2	Messdatenanalyse	63
5.2.1	Messreihe 1: Belastung jeweils eines Rollenträgers mit wechselnden Lasten von 2N bis 100N	63
5.2.2	Messreihe 2: Belastung aller Seile mit wechselnden Lasten von 2N bis 100N	68
5.2.3	Messreihe 3: Dauerbelastung aller Seile mit einer Messlast von 100N	70
5.2.4	Zusammenfassende Analyse	70
5.3	Vorschlag zur Verbesserung der Messdatenerfassung	71
5.3.1	Änderungen an den Rollenträgern der Werkzeugschnittstelle	71
5.3.2	Änderungen am Gehäuse der Werkzeugschnittstelle	71
5.3.3	Änderungen in der Elektronik	71

<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	<b>73</b>
<b>Quellenverzeichnisse</b> . . . . .	<b>75</b>
<b>Anhang</b> . . . . .	<b>77</b>



## Erläuterung der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$A_L$	Querschnittsfläche des Leiters	[m <sup>2</sup> ]
$A_C$	Fläche der Kondensatorplatten	[m <sup>2</sup> ]
$B$	magnetische Flussdichte	[T]
$b$	Breite des Leiters	[m]
$\beta$	m-mal-1 Vektor der Kalibrationswerte	[N],[ $\frac{N}{V}$ ]
$c_{11} \dots c_{22}$	Kalibrationswerte der DMS zur Umrechnung in Kräfte	[-]
$d, d_1, d_2 \dots$	Abstand der Kondensatorplatten zueinander	[m]
$d \dots$	Wirkdurchmesser der Saite	[m]
$DMS_1, DMS_2, DMS_3$	Mittelwerte der Dehnungen der Messstellen DMS_1, DMS_2 und DMS_3	[-]
$\varepsilon$	Dehnung des Bauteils, erfasst durch den DMS	[-]
$\varepsilon_0 \dots$	elektrische Feldkonstante im Vakuum	[ $\frac{As}{Vm}$ ]
$\varepsilon_r \dots$	relative Permittivität des Dielektrikums	[ $\frac{As}{Vm}$ ]
$\epsilon$	m-mal-1 Vektor der Fehler	[-]
$F$	anliegende Kraft	[N]
$f_0 \dots$	Eigenfrequenz der Saite	[Hz]
$F_{S1x}, F_{S1y} \dots$	Last an der Umlenkung von Seil 1, verursacht durch die Seilspannung, in X- und Y-Richtung	[N]
$F_{S21x}, F_{S21y} \dots$	Last an der ersten Umlenkung von Seil 2, verursacht durch die Seilspannung, in X- und Y-Richtung	[N]
$F_{S22x}, F_{S22y} \dots$	Last an der zweiten Umlenkung von Seil 2, verursacht durch die Seilspannung, in X- und Y-Richtung	[N]
$F_{Seil} \dots$	Seillast	[N]
$G$	Verstärkungsfaktor	[-]
$h$	Höhe des Leiters	[m]
$I$	Stromfluss durch die Spule	[A]
$k$	k-Faktor des DMS	[-]

$l_S \dots$	Länge der frei schwingenden Saite	[m]
$l_W \dots$	wirksame Leiterlänge	[m]
$l_0, b_0, h_0 \dots$	Länge, Breite, Höhe des Leiters im Urzustand	[m]
$\Delta l, \Delta b, \Delta h \dots$	Längen-, Breiten-, Höhenänderung des Leiters bei Belastung	[m]
$\lambda_B \dots$	Mittelwellenlänge des reflektierten Lichts	[m]
MIC (engl. MIS)	minimal invasive Chirurgie (minimal invasive surgery)	[-]
MIRC (engl. MIRS)	minimal invasive robotische Chirurgie (minimal invasive robot surgery)	[-]
$m \dots$	Masse der frei schwingenden Saite ( $m = l * \frac{d^2}{4} * \pi * \rho$ )	[kg]
$n_1 \dots$	Brechzahl des unbelichteten Lichtleiters	[-]
$n_2 \dots$	Brechzahl der belichteten Stellen des Lichtleiters	[-]
$R_0 \dots$	Ausgangswiderstand des DMS	[ $\Omega$ ]
$\Delta R \dots$	Widerstandsänderung des DMS	[ $\Omega$ ]
$r$	Näherungsfehler der LLSE-Berechnung	[N]
$\rho \dots$	spezifischer Widerstand des Leitermaterials	[ $\Omega\text{m}$ ]
$\rho_{\text{mat}} \dots$	Dichte des Saitenmaterials	[ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]
$\Delta \rho$	Änderung des spezifischen Widerstands des Leitermaterials	[ $\Omega\text{m}$ ]
$U_{\text{DMS}} \dots$	Eingangsspannung aus DMS-Messbrücke	[V]
$U_{0\text{DMS}} \dots$	Versorgungsspannung der Messbrücke	[V]
$U_{\text{out}} \dots$	Gewünschte Ausgangsspannung	[V]
$X$	Designmatrix des Modells	[-],[V]
$X^T$	Transponierte Designmatrix des Modells	[-],[V]
$y$	n-mal-1 Vektor der Seilkräfte	[N]

## **Kurzfassung**

Diese Abschlussarbeit stellt Möglichkeiten zur Erfassung von Seilspannungen in einem Instrument für die minimal invasive Roboter Chirurgie vor. Die zu entwickelnde Sensorik soll in ein bereits vorhandenes Instrument integriert werden können, um die Regelung des Instruments während des Einsatzes bei Operationen zu verbessern. Das Instrument, genannt MICA, ist auf einem Leichtbau-Roboterarm (MIRO) montiert, welcher frei am Operationstisch befestigt werden kann. Es werden mögliche Erfassungsmethoden auf Basis von physikalischen Wirkprinzipien aufgezeigt und mit Hilfe von festgelegten Kriterien bewertet. Die beste Variante wird mit Hilfe eines Prüfaufbaus verifiziert und auf ihre Eignung getestet. Abschließend werden mögliche Veränderungen im Aufbau des Instruments aufgezeigt, um die Erfassung der Seilspannungen zu verbessern.

## **Danksagung**

Ich möchte hiermit allen danken, die mich während meines Studiums und dieser Abschlussarbeit unterstützt haben. Allen voran Herrn Prof. Dr. Ing. Horst Rönnebeck für seine Unterstützung, nicht nur während meiner Abschlussarbeit. Weiterhin möchte ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Sophie Thielmann, Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Seibold und Herr Dipl.-Ing. Ulrich Alexander Hagn für die Möglichkeit bedanken, diese Abschlussarbeit am Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt schreiben zu dürfen. Ein großer Dank gilt auch meiner Familie und speziell meinem Vater, der mich auch während meiner Tiefen immer unterstützt hat. Abschließend bedanke ich mich noch bei allen Kollegen, Kommilitonen und Freunden, die mich während meines Studiums und dieser Bachelorarbeit unterstützt und begleitet haben.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Operationstisch mit MIRO und MICA . . . . .	2
Abbildung 2	Nahaufnahme des MICA-Seilrollenträgers . . . . .	3
Abbildung 3	Möglicher Aufbau eines Operationsfelds für einen konventionellen (nicht robotergestützten) minimal invasiven Eingriff[1] . . . . .	5
Abbildung 4	Beispiel einer minimal invasive Operation ohne Roboterunterstützung[1] . . . . .	6
Abbildung 5	Vorschlag eines MIROSurge Operationssaals [1] . . . . .	7
Abbildung 6	Aufbau der MICA[2] . . . . .	8
Abbildung 7	Instrumentenschnittstelle des seilbetriebenen Instruments . . . . .	8
Abbildung 8	3D-Modell der Schwenker und des Rollenträgeraufbaus ohne Seile . . . . .	9
Abbildung 9	Messaufnehmer mit Seilklemmen zur Seilspannungsanalyse und Überwachung [3] . . . . .	10
Abbildung 10	Messaufnehmer auf Basis des Schwingsaiteneffekts[4] . . . . .	10
Abbildung 11	Beispiel für Dehnungsmessstreifen[5] . . . . .	15
Abbildung 12	Prinzipskizze: Messstelle auf Seil . . . . .	18
Abbildung 13	Prinzipskizze: Messen mit Dehnungselement . . . . .	18
Abbildung 14	Prinzipskizze: Messstellen auf Rollenträgern . . . . .	19
Abbildung 15	Prinzipskizze: Messung mit Hilfe von Tastrollen . . . . .	19
Abbildung 16	Zielbaum der Methodenauswahl in drei Ebenen . . . . .	21
Abbildung 17	Zielbaum der Methodenauswahl . . . . .	22
Abbildung 18	Zielbaum der Messortauswahl . . . . .	25
Abbildung 19	Zielbaum der Messortauswahl . . . . .	25
Abbildung 20	Ansicht der Rollenträger von Oben . . . . .	28
Abbildung 21	Auszug aus "Transducer - Gages and Accessories" der Firma Vishay . . . . .	30
Abbildung 22	Scherspannungs-DMS mit markierten Messzellen . . . . .	31
Abbildung 23	Scherspannungs-DMS mit Dehnungsrichtungen und Koordinatensystem . . . . .	31
Abbildung 24	CAD-Auszug des Rollenträger_oben mit Skizze zur DMS Anbringung . . . . .	33
Abbildung 25	Darstellung des Seilverlaufs des RTO zur Berechnung der Lasten . . . . .	33
Abbildung 26	Simulationsparameter zur automatischen Netzerstellung mit AutoGEM . . . . .	35
Abbildung 27	Simulationsparameter der statischen Analysen . . . . .	36
Abbildung 28	Simulationsparameter der Rechenläufe . . . . .	37
Abbildung 29	Darstellung des Seilverlauf des RTU zur Berechnung der Lasten . . . . .	38
Abbildung 30	CAD-Auszug des Rollenträger_mitte mit Skizze zur DMS Anbringung . . . . .	40
Abbildung 31	Darstellung des Seilverlauf des RTM zur Berechnung der Lasten . . . . .	40

Abbildung 32 Postprozessorabbildung der maximalen Hauptdehnungen des RTO an den Anbringungsflächen der DMS . . . . .	42
Abbildung 33 Beschreibung der Lage der DMS von Unten gesehen . . . . .	43
Abbildung 34 CAD-Auszug des vertikalen Prüfstandsbaus mit gleichbelasteten Seilen	49
Abbildung 35 CAD-Auszug des senkrechten Prüfstandsbaus mit Federwaagen . . . . .	50
Abbildung 36 Abbildung des Prüfstands . . . . .	52
Abbildung 37 Änderungen an der Instrumentenschnittstelle des seilbetriebenen Instruments . . . . .	54
Abbildung 38 Anschlussplan der DMS am Beispiel des RTO . . . . .	55
Abbildung 39 Abbildung der Verschaltung der DMS am Beispiel des RTO . . . . .	56
Abbildung 40 Grafische Oberfläche des Prüfprogramms . . . . .	59
Abbildung 41 Blockdiagramm des Prüfprogramms . . . . .	59
Abbildung 42 Bezeichnung der Seile und Messstellen des seilbetriebenen Instruments .	61
Abbildung 43 Messreihe 1 Belastung an RTO . . . . .	64
Abbildung 44 Messreihe 1 Belastung an RTU . . . . .	64
Abbildung 45 Messreihe 1 Belastung an RTM . . . . .	66
Abbildung 46 Messkurve Messreihe 2 . . . . .	69
Abbildung 47 Veränderungen an den Rollenträgern zur Optimierung . . . . .	72
Abbildung 48 Modifikationen der Instrumentenschnittstelle . . . . .	72

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Bewertungskriterien zur Auswahl der geeigneten Messmethode . . . . .	20
Tabelle 2 Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien zur Methodenauswahl . . . . .	22
Tabelle 3 Bewertungsmatrix und Wertungsskala der Methodenauswahl . . . . .	23
Tabelle 4 Bewertungskriterien zur Auswahl der geeigneten Messstelle . . . . .	24
Tabelle 5 Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien zur Messortauswahl . . . . .	26
Tabelle 6 Bewertungsmatrix und Wertungsskala der Messstellenauswahl . . . . .	27
Tabelle 7 Lastfälle zur Simulation der Rollenträger . . . . .	29
Tabelle 8 Lastvorgaben zur Simulation des RTO . . . . .	35
Tabelle 9 Lastvorgaben zur Simulation des RTU . . . . .	38
Tabelle 10 Lastvorgaben zur Simulation des RTM . . . . .	39
Tabelle 11 Matlab-Ergebnisse der Simulation am Beispiel des RTO . . . . .	47
Tabelle 12 Erklärung der Messdatenbezeichnung . . . . .	61
Tabelle 13 Vorgabewerte der Messreihe 1 an RTO und RTU in N . . . . .	65

Tabelle 14	Vorgabewerte der Messreihe 1 an RTM in N . . . . .	66
Tabelle 15	Vergleich der Konditionszahl der Messreihe 1 . . . . .	67
Tabelle 16	Konditionszahl der Messreihe 2 . . . . .	68
Tabelle 17	Auszug der Vorgabewerte der Messreihe 2 N . . . . .	69
Tabelle 18	Abweichungen der Anfangs und Endwerte aller Analysen . . . . .	70

# 1 Einleitung

”Quidquid agis, prudenter agas, et respice finem”<sup>1</sup>[6]

Diese antike Weißheit gilt für alle Gelegenheiten und speziell für medizinische Entwicklungen. Die Medizin sollte das Ziel haben, möglichst schnell und schonend die Beschwerden eines Patienten zu verringern. Bei chirurgischen Eingriffen ist eine Verletzung von Gewebe nie gänzlich zu vermeiden, aber durch die Einführung der minimal invasiven Chirurgie (kurz. MIC)<sup>2</sup> konnten lange Hautschnitte, bei denen z.B. die Bauchdecke des Patienten weit geöffnet wurde, durch kleinere Schnitte an definierten Stellen für sogenannte Trokare<sup>3</sup> ersetzt werden. Diese kleinen Einschnitte verheilen weitaus schneller als große und der Patient ist somit schneller wieder mobil. Außerdem sind die Eingriffsnarben bei weitem unauffälliger als bei der offenen Chirurgie. Durch die nun geschlossene Gewebedecke ergibt sich aber das Problem, dass der Chirurg die Hand-Auge-Koordination verliert. Nur mit Hilfe von Endoskop- oder Ultraschallabbildungen kann das Operationsfeld erfasst werden, welche in den meisten Fällen nur als eine 2D-Representation wiedergegeben sind. Auch ist die Bedienung der vorhandenen Instrumente wenig intuitiv und verlangt nach langen Einarbeitungszeiten. Durch Reibung in den eingesetzten Trokaren verliert der Chirurg einen Großteil des taktilen Empfindens.

Seit einigen Jahren werden verstärkt Roboter in der Chirurgie eingesetzt, die Aufgaben übernehmen, die bei einer längeren Operation für den Chirurgen oder seine Assistenten stark ermüdend wirken oder bei welchen erhöhte Präzision gefragt ist. Auch in der MIC werden Roboter zum Führen von Optiken und seit kurzem auch als Instrumententräger eingesetzt. Die minimal invasive robotische Chirurgie (kurz. MIRC) hat dabei immer mit der Entkopplung des Chirurgen vom Patienten zu kämpfen.

Während eines MIRC Eingriffs sitzt der Operateur an einer Eingabestation und bekommt Videobilder zur Verfügung gestellt (Telepräsenz<sup>4</sup>), mit Hilfe derer er die Bewegungen der Instrumente im Situs<sup>5</sup> vorgibt, die von Roboterarmen am Patienten ausgeführt werden (Telemanipulation<sup>6</sup>). Durch die Trennung des Chirurgen vom Patienten und des daraus resultierenden vollständigen Verlustes des taktilen Empfindens können manche Operationsschritte, die das Wissen über die

---

<sup>1</sup>(lat. ”Was immer du tust, tu es mit Verstand und bedenke das Ergebnis”)

<sup>2</sup>Definition: Alle operativen, d.h. unter Verletzung der Körperoberfläche durchgeführten therapeutischen und diagnostischen Maßnahmen, die ohne größeren Hautschnitt (v.a. ohne breite Eröffnung einer Körperhöhle) und bei verhältnismäßig geringer Belastung des Patienten stattfinden können. Dieser Begriff wird vor allem bei endoskopischen Operationsverfahren eingesetzt. Auch Bezeichnung für Operationsverfahren, bei denen lediglich der Operative Zugang verkleinert wurde. [6]

<sup>3</sup>Definition: Instrument, mit dessen Hilfe in der minimal invasiven Chirurgie ein Zugang zu einer Körperhöhle (z. B. Bauchraum, Brustraum) geschaffen und durch ein Rohr (Tubus) offengehalten wird. Dieser Tubus stellt die Führung von Optiken und medizinischen Werkzeugen dar oder dient als sonstiger Zugang zum Operationsort.[6]

<sup>4</sup>Telepräsenz beschreibt den Zustand sich in einer entfernten Umgebung anwesend zu fühlen.

<sup>5</sup>Medizinischer Ausdruck: Operationsort

<sup>6</sup>Telemanipulation beschreibt die Möglichkeit, Tätigkeiten in einer entfernten Umgebung auszuführen.

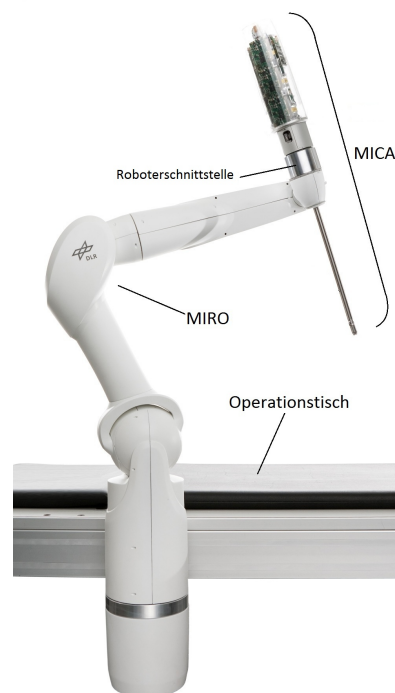


Struktur des Gewebes benötigen, nur durch langwieriges Training und Erfahrung des Chirurgen mit dem eingesetzten System durchgeführt werden. Des Weiteren sind unerwartete Bewegungen des robotergestützten Instruments, bedingt durch bleibende Regelabweichungen oder Überspringen der Aktuatorsteuerungen zu vermeiden, die das Arbeiten an MIRC-Systemen unmöglich machen.

Um dem Chirurgen ein stabiles Arbeiten mit einem MIRC-System zu gewährleisten ist die Regelung der Bewegungen der Instrumente und Roboter sehr wichtig.

## 1.1 Grundlage der Aufgabenstellung

Am Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) wurde ein Telepräsenzsystem (genannt MIROSurge) für die MIRC entwickelt. Das MIROSurge System ermöglicht dem Chirurgen, mit Hilfe einer Stereobildkamera das Operationfeld 3-dimensional wahrzunehmen und bietet ihm eine Rückkopplung der Kräfte des vom Instrument berührten Gewebes. Es besteht aus mehreren Medizin-Leichtbaurobotern (MIRO) (Abbildung 1), die frei am Operationstisch montiert werden können und sowohl als Träger für ein 3D-Endoskop dienen, als auch für das MICA Instrument.



**Abb. 1:** Operationstisch mit MIRO und MICA

Die MICA besteht aus einer Antriebseinheit und verschiedenen, über die Instrumentenschnittstelle ankoppelbaren Werkzeugen. Das aktuelle Werkzeug ist seilbetrieben und besitzt drei aktive Freiheitsgrade (ein 2-Achs-Gelenk und einen Greifer) sowie einen Sensor für sieben

Freiheitsgrade (3 Kräfte, 3 Momente und die Greifkraft) zwischen dem Endeffektor und dem 2-Achs-Gelenk. Die Antriebseinheit besteht aus drei Motormodulen, die mit Hilfe von je einer Linearstange ein Seilzugsystem betätigen. Das Seilzugsystem (Abbildung 2) bewegt nach einigen Umlenkungen und nach einer Durchführung durch einen dünnen Schaft das 2-DOF-Gelenk und betätigt den Endeffektor am Ende des Werkzeugs. Durch die Elastizität der Seile dehnen sich diese während des Betriebs. Diese Tatsache beeinflusst die Regelung des Systems. Diese Abschlussarbeit soll nun erforschen, wie die Seilspannung erfasst werden kann, um diese initial dem Regler zur Verfügung zu stellen.



**Abb. 2:** Nahaufnahme des MICA-Seilrollenträgers

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Ziel der Arbeit ist es ein Konzept zur Messung der Seilspannungen zu entwickeln, welches in der vorhandenen MICA integrierbar ist und dieses an einem Versuchsaufbau zu verifizieren. Als Ergebnis wird die Vorspannung der Seile ermittelt, die eine verlässliche Regelung des Systems gewährleistet. Eine zu geringe Vorspannung der Seile führt dazu, dass trotz der Aktuierung des Seilzuges im ersten Moment keine Bewegung am Gelenk ausgeführt wird, da sich die Seile erst spannen müssen. Bei zu hoher Vorspannung der Seile entsteht in den Lagerstellen zu hohe Reibung, was zu ruckartigen Bewegungen der Gelenke führt.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Nach einem Kurzüberblick über das Einsatzgebiet, den Aufbau der MICA und den Stand der Technik werden in Kapitel 2 Möglichkeiten zur Erfassung von Seilspannungen aus der Vorarbeit aufgezeigt. Anschließend werden die gegebenen Randbedingungen definiert und ein Messverfahren hervorgehoben, das sich besonders zur Erfassung der geforderten Messdaten eignet. Kapitel 3 definiert, aufbauend auf gegebene Spezifikationen, wichtige Lastfälle, die als Randbedingungen in Simulationen eingehen und der Positionierung der Sensorik dienen. Mögliche

Prüfstandsaufbauten werden in Kapitel 4 dargestellt und basierend auf Simulationsergebnissen aus dem vorangegangenen Kapitel ein Testprogramm entwickelt, das während der Prüfbläufe am vorher ausgewählten Versuchsaufbau durchlaufen wird. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 ausgewertet und führen schließlich zu einem Konzept zur verbesserten Aufnahme von Messdaten in der MICA. Abschließend (Kapitel 6) wird noch ein Ausblick auf mögliche weitere Anwendungen des Messsystems und der Prüfstandsanordnung gegeben.

Anhang A befasst sich mit der Simulation, deren Rohdaten und Ergebnissen, während im Anhang B die gewählte Prüfstandsvariante beschrieben wird. Anhang C beinhaltet die Simulationsergebnisse und die Prüfprotokolle. Alle Anhänge befinden sich zusätzlich, zusammen mit weiteren Literaturstellen, Zusatzmaterial sowie den Pro-Engineer Modellen, auf der beigelegten DVD.

## **1.4 Ausgangspunkt der Arbeit**

Zur Hinführung auf das Thema der Abschlussarbeit wird hier kurz das Einsatzgebiet der im DLR entwickelten MICA aufgezeigt und deren Aufbau erklärt.

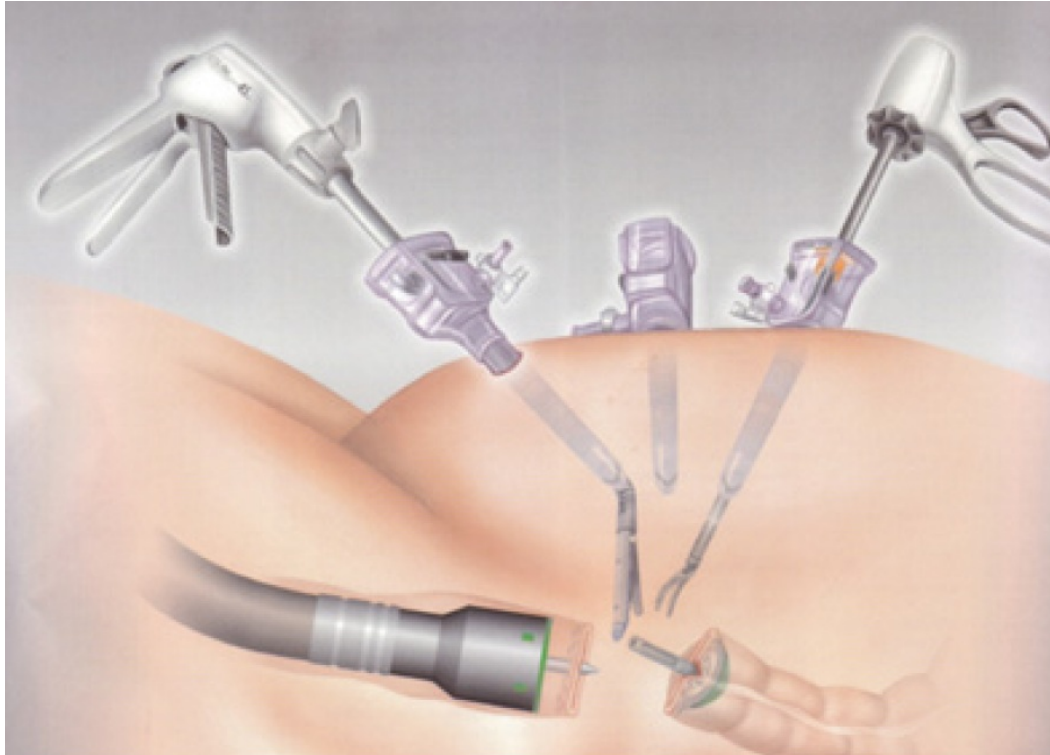
### **1.4.1 Einsatzgebiet des Instruments MICA: Die minimal invasive robotische Chirurgie**

Die MICA, die als Grundlage dieser Arbeit dient, soll in der MIRC in der Gynäkologie, Urologie, Lapraskopie<sup>7</sup> und Thorakoskopie<sup>8</sup> eingesetzt werden. Abbildung 3 stellt einen möglichen Aufbau eines Operationsfelds bei einem minimal invasiven Eingriff, ohne Roboterunterstützung, zur Entfernung eines Teils des Dickdarms dar. Bei (nicht roboterunterstützten) minimalinvasiven Eingriffen stehen die Ärzte, Assistenten und Schwestern am Operationstisch, bedienen Greifer, Scheren und Optiken direkt mit ihren Händen und beobachten den Eingriffsort mit Hilfe eines Bildschirms (Abbildung 4).

---

<sup>7</sup>Definition: Die laparoskopische Chirurgie ist ein Teilgebiet der Chirurgie, bei der mit Hilfe eines optischen Instruments Eingriffe innerhalb der Bauchhöhle vorgenommen werden.[7]

<sup>8</sup>Definition: Die Thorakoskopie bezeichnet eine chirurgische Methode, in die Brusthöhle zu sehen und das Brustfell (Pleura) zu beurteilen sowie durch den gleichen oder weitere Zugänge Instrumente oder Medikamente einzuführen.[7]



**Abb. 3:** Möglicher Aufbau eines Operationsfelds für einen konventionellen (nicht roboterassistierten) minimal invasiven Eingriff[1]  
 (rechts und links zu sehen je ein manuell geführtes Instrument, in der Mitte ein unbenutzter Trokar)

Diese MIC bringt folgende Vorteile:[6]

- ▷ Geringere Infektionsgefahr und verringerte Verwachsungen bedingt durch reduzierte Gewebeerletzungen beim Zugang
- ▷ Häufig geringere postoperative Schmerzen und damit schnellere Mobilisierung
- ▷ Kürzere Krankenhausaufenthalte
- ▷ Weniger Narben
- ▷ Dokumentation der Operation durch Videoaufzeichnung

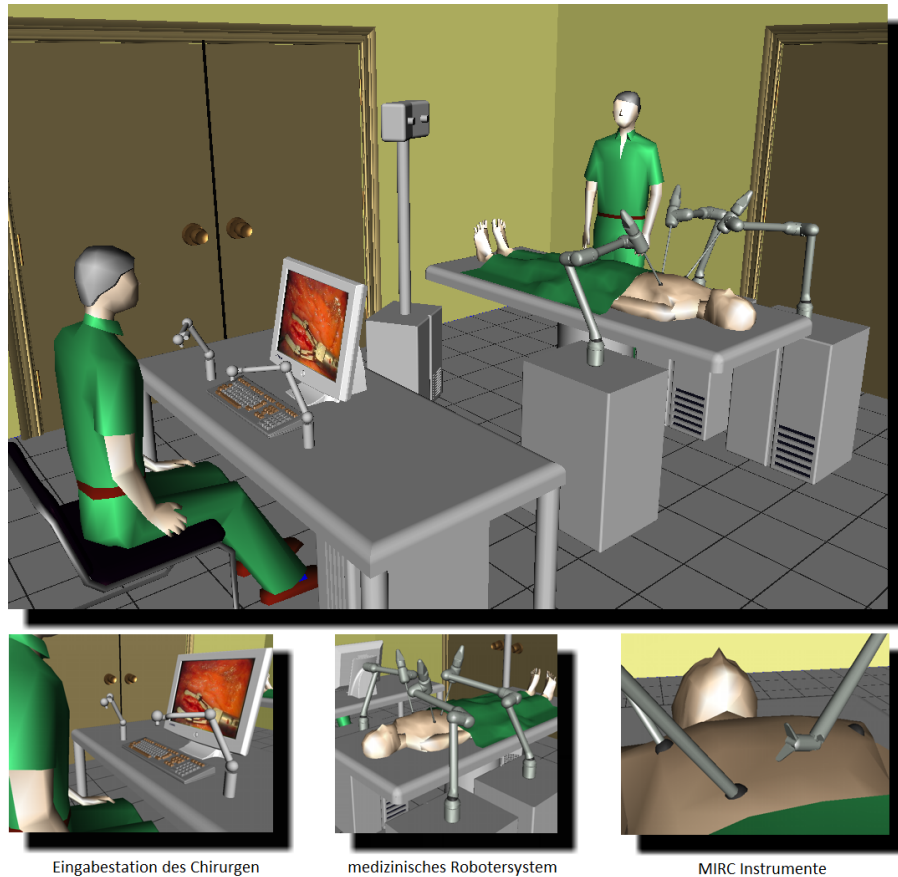
Aber es entstehen auch Nachteile durch die MIC, die gegen die Vorteile abgewogen werden müssten:[6]

- ▷ Intensives Training der Chirurgen nötig
- ▷ Längere Operationsdauer
- ▷ Zweidimensionale Abbildung des Operationsfeldes am Bildschirm
- ▷ Fehlende Hand-Auge-Koordination
- ▷ Teilweiser Verlust des Tastsinns durch Reibung im Trokar
- ▷ Nicht intuitive Bedienung der Instrumente



**Abb. 4:** Beispiel einer minimal invasiven Operation ohne Roboterunterstützung[1]  
(Der Chirurg (Vordergrund) bedient mit den Händen Instrumente und beobachtet das Operationsfeld)  
(Der Assistent (Bildmitte) bedient eine Kamera zur Darstellung des Operationsfelds (oben rechts))  
(Die Schwester im Hintergrund assistiert)

Durch den Einsatz von robotergestützten Instrumenten und Stereobildgebung, sowie der Verlagerung des Chirurgen vom Operationstisch zu einem Telearbeitsplatz (Abbildung 5) konnten weitere Vorteile durch den Übergang von der MIC zur MIRC erzeugt werden:



**Abb. 5:** Vorschlag eines MIROSurge Operationsaals [1]

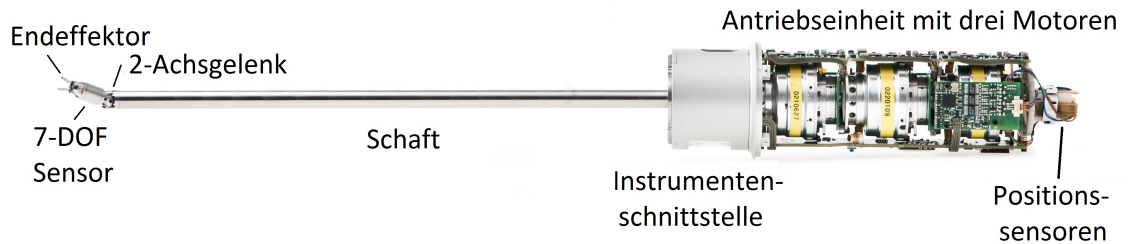
- ▷ Planung der Operationsschritte auf Basis von präoperativen Daten möglich (Arbeitsraumeinschränkung, definierte Wegführung) und online abrufbar
- ▷ Telepräsenz möglich
- ▷ Präzise Führung der Instrumente und Optiken
- ▷ Leichtere Bedienbarkeit zusätzlicher Freiheitsgrade
- ▷ Force-Feedback möglich
- ▷ Verbesserte Dokumentation durch Aufzeichnung der Sensordaten (Kraft, Position, usw.)
- ▷ Zuschaltbarer Tremorfilter<sup>9</sup>
- ▷ Einstellbare Skalierung der Bewegungen<sup>10</sup>

<sup>9</sup>Mit Hilfe des Tremorfilters kann das Zittern des Chirurgen abgefangen werden. Dadurch ist ein präziseres Arbeiten im Operationsbereich möglich.

<sup>10</sup>Eine Skalierung der Bewegung hilft, schnell Positionen anzufahren und bei heiklen Operationsschritten eine verbesserte Genauigkeit zu erreichen.

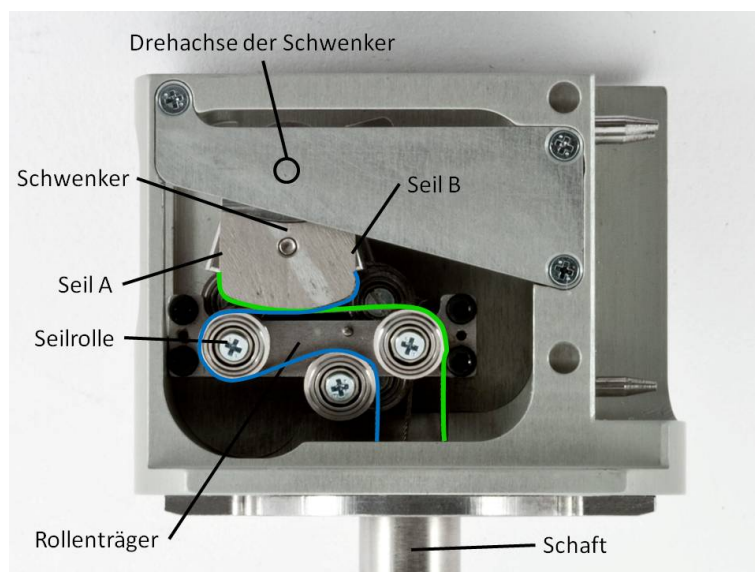
### 1.4.2 Aufbau des Instruments MICA

Abbildung 6 zeigt das Instrument MICA mit einem seilbetätigten Greifer. Die Aktuierung des Greifers und des 2-Achs-Gelenks geschieht durch die in der Antriebseinheit integrierten Motoren. Diese treiben mit Hilfe von Kugelumlaufspindeln Linearstangen an. Die Linearbewegung der Stangen wird in der Instrumentenschnittstelle auf Seile übertragen, die durch den Schaft hindurch das Gelenk und den Greifer aktuieren.

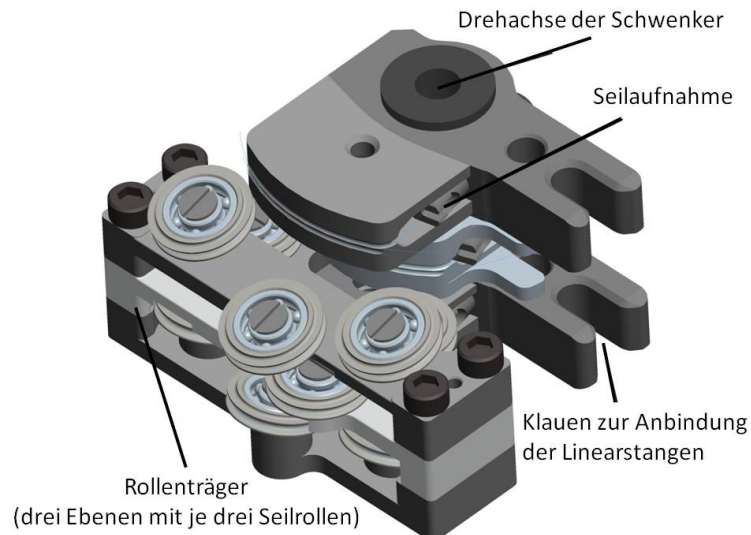


**Abb. 6:** Aufbau der MICA[2]

In Abbildung 7 und Abbildung 8 ist der Aufbau der Umlenkeinheit zu sehen. Die linear betriebenen Stangen der Antriebseinheit greifen mit Hilfe von Zapfen in die Klauen der Schwenker. Diese sind auf einer gemeinsamen Drehachse montiert. An den Schwenkern sind Seile befestigt und können dort definiert vorgespannt werden. Zwei Seile, die für eine Bewegungsachse des Greifers zuständig sind, sind immer so angebracht, dass sie sich gegengleich bewegen. Dies bedeutet, wenn ein Seil gezogen wird, dann wird der entsprechende Partner nachgelassen.



**Abb. 7:** Instrumentenschnittstelle des seilbetriebenen Instruments



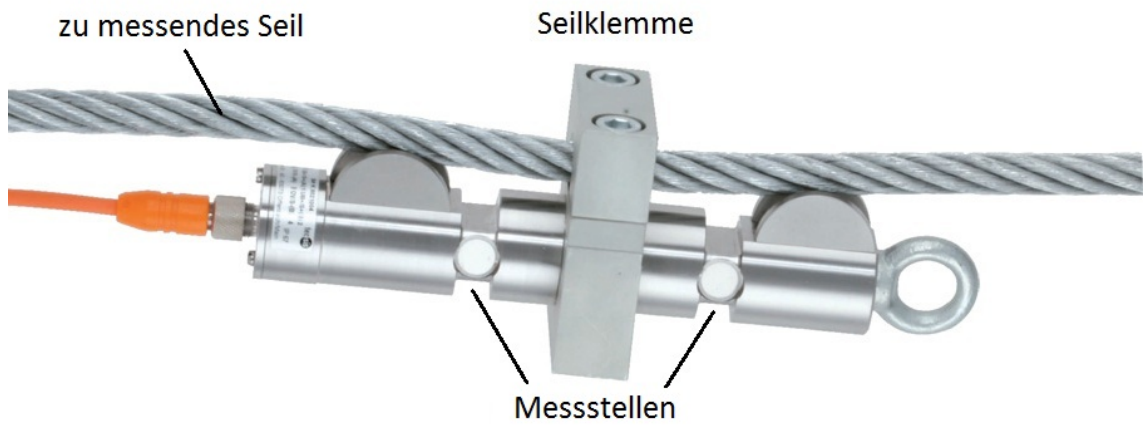
**Abb. 8:** 3D-Modell der Schwenker und des Rollenträgeraufbaus ohne Seile

Um die Seile in die zur Durchführung durch den Schaft benötigte Position zu lenken, werden sie über Seilrollen geführt. Dabei wird pro Ebene das Seil, welches in Abbildung 7 links angebracht ist (Seil A, grün) einmal um die Seilrolle rechts umgelenkt. Das zweite Seil (Seil B, blau) verläuft um die Rolle links und danach um die Rolle in der Mitte der jeweiligen Ebene. Die obere und untere Eben sind für die Bewegungen der Achse des Greifers zuständig. Die mittlere Ebene betätigt den Greifer und schließt diesen gegen die Vorspannkraft einer sich am Greifer selbst befindlichen Feder.

### 1.5 Stand der Technik

Die Technik der Seilspannungsmessung wird hauptsächlich im Kranbau, bei Seilbrücken, Hochspannungsleitungen, Aufzügen und zur Bauwerksüberwachung verwendet. Die Messungen bewegter sowie unbewegter Seile wird häufig über Seilklemmen (Abbildung 9) realisiert. Diese Seilklemmen werden über eine Klemmvorrichtung mit dem zu messenden Seil verbunden. Das Seil wird bei der Klemmung über Umlenkpunkte geführt. Durch diese Umlenkung wird der Messträger verformt und dies als Maß der Seilspannung detektiert. Des Weiteren werden zur Bauwerksüberwachung, z.B. bei Seilbrücken oder Spannbeton, meist Schwingsaitenaufnehmer (Abbildung 10) zur Messung der Spannungen verbaut. Bei Hochspannungsleitungen kommen hauptsächlich Messgeräte auf Basis von Federwaagen oder Kraftmessdosen zum Einsatz. All diese Sensoren können aufgrund der Abmaße nicht in die MICA integriert werden.





**Abb. 9:** Messaufnehmer mit Seilklemmen zur Seilspannungsanalyse und Überwachung [3]



**Abb. 10:** Messaufnehmer auf Basis des Schwingsaiteneffekts[4]

## 2 Auswahl der Sensorik

Als Vorbereitung zu dieser Arbeit wurde eine Reihe von möglichen Sensoren bestimmt, mit welchen sich die Seilspannungen im gegebenen System ermitteln lassen. Anhand von gegebenen Randbedingungen werden diese Messmethoden bewertet und ein geeignetes Messsystem herausgearbeitet.

### 2.1 Randbedingungen der Seilspannungserfassung

Die folgenden Randbedingungen wurden zur Auswahl der Sensorik in Zusammenarbeit mit den Entwicklern des medizinischen Instruments "MICA", Frau Dipl.-Ing. Sophie Thielmann und Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Seibold, aufgestellt.

Sie gliedern sich in Lastvorgaben, Bewegungsvorgaben, Bauraumvorgaben und medizinische Vorgaben.

#### Lastvorgaben

- ▷ Seilvorspannung 10N - 80N
- ▷ Maximaler Zug am Seil 100N

Daraus ergibt sich eine maximale Zugbelastung durch Vorspannung und maximalen Zug am Seil von 180N

#### Bewegungsvorgaben

- ▷ Maximale Seilbewegung:  $\pm 5\text{mm}$
- ▷ Maximale Bewegungsgeschwindigkeit:  $100 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

#### Bauraumvorgaben

- ▷ Innendurchmesser Schaft: 6,3mm
- ▷ Seilquerschnitt: 0,45mm
- ▷ Seile: Feinseile aus Edelstahl 1.4401, Konstruktion 7x7<sup>11</sup>
- ▷ Integrierbarkeit in die Werkzeugschnittstelle oder in den Schaft

---

<sup>11</sup>Aufbauart des Seiles: 7x7 bedeutet, das Seil ist aus 7 Litzen aufgebaut, die je aus 7 Drähten bestehen. [8]

## **Medizinische Vorgaben [9]**

Diese Vorgaben sind für das endgültige System unbedingt zu erfüllen. Für die Realisierung des Prüfstands sind diese Vorgaben nicht zwingend erforderlich, sollten aber nicht vollständig vernachlässigt werden.

- ▷ Wenn möglich biokompatibles Material, andernfalls kapseln
- ▷ Autoklavierbarkeit<sup>12</sup>
- ▷ Alle Teile sterilisationsfähig (temperaturstabil)

## **2.2 Mögliche physikalische Prinzipien zur Erfassung von Seilspannungen**

Vorbereitend zu dieser Abschlussarbeit wurde ein Katalog mit sieben Messmethoden erstellt, die geeignet schienen, die Seilspannung zu erfassen. Die ermittelten Messverfahren lauten wie folgt:

- ▷ Schwing-Saiten Aufnehmer
- ▷ Folienbasierte Dehnungsmessstreifen
- ▷ Piezoresistive Dehnungsmessstreifen
- ▷ Kapazitive Sensoren
- ▷ Magnetoelastische Sensoren
- ▷ Elektro-Magnetische Kompensations Aufnehmer
- ▷ Faseroptische Dehnungssensoren

Diese Messmethoden werden im Folgenden beschrieben. Die Bewertung dieser Methoden wird im Kapitel 2.4 dargelegt.

---

<sup>12</sup>Auto|klav (gr.: auto = selbsttätig | lat.: clavis = Schlüssel, Riegel) ein Druckkessel, der in der Medizin zur Hochdrucksterilisation eingesetzt wird. Dabei werden Instrumente mit gespanntem und gesättigtem Dampf bei 120-134°C und 1-2bar Druck eine vorgegebene, dem Kontaminationsgrad entsprechende Zeit sterilisiert.

## 2.2.1 Schwing-Saiten Aufnehmer

Diese Messmethode beruht auf der Änderung der Eigenfrequenz einer gespannten Saite (bzw. eines Seils) bei Veränderung der anliegenden Zugkraft.[10] [11]

Die Eigenfrequenz der frei schwingenden Saite mit rundem Querschnitt berechnet sich dabei über die folgende Formel:

$$f_0 = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{F}{m * l_S}} = \frac{1}{l_S * d} * \sqrt{\frac{F}{\pi * \rho_{mat}}} = \frac{1}{2 * l_S} * \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_{mat}}}$$

mit:

$f_0 \dots$	Eigenfrequenz der Saite
$l_S \dots$	Länge der frei schwingenden Saite
$\sigma \dots$	mechanische Spannung in der Saite
$\rho_{mat} \dots$	Dichte des Saitenmaterials
$F \dots$	spannende Kraft ( $F = \sigma * \frac{d^2}{4} * \pi$ )
$m \dots$	Masse der frei schwingenden Saite ( $m = l * \frac{d^2}{4} * \pi * \rho$ )
$d \dots$	Wirkdurchmesser der Saite

Schwing-Saiten Aufnehmer sind entweder zyklisch oder kontinuierlich erregt. Bei zyklischen Sensoren wird die zu messende Saite mit einem Impuls erregt und anschließend die Schwingungen über einen Aufnehmer erfasst. Im kontinuierlichen Betrieb wird die Saite mit einer Frequenz zwangsangeregt und die Reaktion der Saite kontinuierlich aufgenommen.

## 2.2.2 Folienbasierte Dehnungsmessstreifen (DMS)

Metallische Folien-DMS basieren auf der Änderung des Widerstands durch Längen- und Querschnittsänderung eines Leiters.[12] [13] [14] Wird ein DMS gedehnt, so vergrößert sich sein Widerstand, wird er gestaucht (negativ gedehnt) so verringert sich sein Widerstand nach folgenden Formeln:

$$R_0 = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{b * h}$$

mit:

$R_0 \dots$	Ausgangswiderstand des DMS
$\rho \dots$	spezifischer Widerstand des Leitermaterials
$l \dots$	Länge des Leiters
$A \dots$	Querschnittsfläche des Leiters
$h \dots$	Höhe des Leiters
$b \dots$	Breite des Leiters

Allgemein gilt für die Widerstandsänderung im Bezug auf den Ausgangswiderstand ( $\frac{\Delta R}{R}$ ):

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l_0} - \frac{\Delta h}{h_0} - \frac{\Delta b}{b_0}$$

mit:

$R_0 \dots$	Ausgangswiderstand des DMS
$\Delta R \dots$	Widerstandsänderung des DMS
$\rho \dots$	spezifischer Widerstand des Leitermaterials
$\Delta \rho \dots$	Änderung des spezifischen Widerstands des Leitermaterials
$l_0, b_0, h_0 \dots$	Länge, Breite, Höhe des Leiters im Urzustand
$\Delta l, \Delta b, \Delta h \dots$	Längen-, Breiten-, Höhenänderung des Leiters bei Belastung

Der Ausdruck  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$  bezeichnet den piezoresistiven Anteil des DMS. Dieser ist bei metallischen DMS vernachlässigbar.

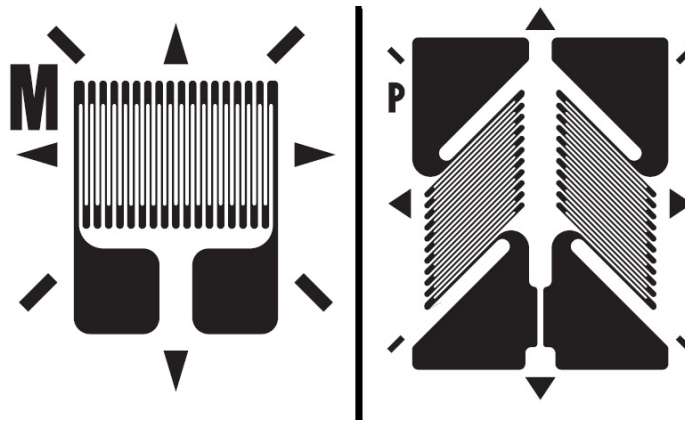
Durch die Einführung des sog. "k-Faktors", der von den Herstellern ermittelt und in Datenblättern bereitgestellt wird, lässt sich diese Formel vereinfachen:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k * \frac{\Delta l}{l_0}$$

mit:

$R_0 \dots$	Ausgangswiderstand des DMS
$k \dots$	k-Faktor des DMS
$l_0 \dots$	Länge des Leiters im Urzustand
$\Delta l \dots$	Längenänderung des Leiters bei Belastung

Metallische Folien-DMS werden auf Trägerfolien geliefert und zusammen mit diesen mit Hilfe von Klebstoffen auf die Oberfläche der Messkörper aufgebracht. Der in Abbildung 11 (links) gezeigte DMS wird hauptsächlich zur Messung linearer Dehnungen und Biegungen eingesetzt. Mit dem in Abbildung 11 (rechts) gezeigten DMS können Torsion und Scherung detektiert werden. Natürlich können beide DMS zur Detektion der Lastfälle des anderen benutzt werden, dazu müssten sie nur um 45° gedreht werden. Für spezielle Anforderungen und bei unbekanntem Spannungszuständen sind auch spezielle Bauformen erhältlich. Diese Folien-DMS werden mit Hilfe eines Spezialklebers auf das Messobjekt aufgebracht und erfassen die Dehnungen an der Oberfläche.



**Abb. 11:** Beispiel für Dehnungsmessstreifen[5]  
 [links zur Normalspannungsmessung, rechts zur Scherspannungsmessung]

### 2.2.3 Piezoresistive Dehnungsmessstreifen

Piezo DMS sind Halbleiter DMS, die im Gegensatz zu den metallischen DMS auf dem piezoresistiven Effekt basieren.[10] [14] Der piezoresistive Effekt tritt bei allen Materialien auf, bei Metallen ist sein Einfluss, im Gegensatz zum Einfluss der Geometrie auf den Widerstand, sehr gering. Bei Halbleitern hingegen tritt dieser Effekt verstärkt auf. Piezo DMS sind empfindlich gegen Feuchtigkeit und müssen gekapselt werden.

Auch für die Piezo-DMS gilt die bereits o.g. Formel:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k * \frac{\Delta l}{l_0}$$

mit:

$R_0 \dots$	Ausgangswiderstand des DMS
$k \dots$	k-Faktor des DMS
$l_0 \dots$	Länge des Leiters im Urzustand
$\Delta l \dots$	Längenänderung des Leiters bei Belastung

Bei Piezo-DMS wird bei der Berechnung des k-Faktors der piezoresistive Anteil  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$  mit einberechnet. Der k-Faktor ist bei piezoresistiven DMS 100mal stärker als bei metallischen Folien-DMS und kann, wie bei den metallischen DMS, aus den Datenblättern der Hersteller entnommen werden. Piezoresistive DMS werden entweder, wie metallische Folien DMS auf Trägerfolien geliefert und mit dem Messobjekt verklebt oder direkt auf das Messobjekt aufgedampft (Dünnschicht DMS).

## 2.2.4 Kapazitive Sensoren

Kapazitive Sensoren arbeiten auf Basis eines oder mehrerer Kondensatoren, dessen Kapazität sich durch Variation des Abstandes der Kondensatorplatten zueinander verändert.[10]

Die nachfolgenden Formeln zeigen den Zusammenhang zwischen Plattenabstand und Kapazität bei einem Plattenkondensator mit konstanten Plattenfläche.

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \frac{A}{d} \Rightarrow \Delta C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * A * \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right)$$

mit:

$\varepsilon_0 \dots$	elektrische Feldkonstante im Vakuum
$\varepsilon_r \dots$	relative Permittivität des Dielektrikums
$A \dots$	Fläche der Kondensatorplatten
$d, d_1, d_2 \dots$	Abstand der Kondensatorplatten zueinander

## 2.2.5 Magnetoelastischer Sensor

Dieser Sensor beruht auf dem magnetoelastischen Effekt (inverse Magnetostriktion). Eine Primär- und eine Sekundärspule werden in einen Messaufnehmer aus ferromagnetischem Material (am besten Invarstahl) eingebettet. Durch die Belastung des Messaufnehmers verändert sich die magnetische Permeabilität  $\mu$ . Somit ist der von der Primärspule an die Sekundärspule übertragene magnetische Fluss ein Maß für die Belastung des Messaufnehmers. [10]

## 2.2.6 Elektro-Magnetischer Kompensations Sensor

Dieser Sensor arbeitet wie ein elektrodynamischer Lautsprecher. In einem Magnetfeld befindet sich eine beweglich aufgehängte Spule.[10] Die Position der Spule wird über eine Lageregelung, die den Stromfluss durch die Spule regelt, immer so eingestellt, dass sie sich in der Mitte des Magnetfeldes befindet. Der Strom durch die Spule ist somit proportional zur auslenkenden Kraft.

$$F = B * I * l_w \text{ wenn } B \perp l_w$$

mit:

$F \dots$	Auslenkende Kraft
$B \dots$	magnetische Flussdichte
$I \dots$	Stromfluss durch die Spule
$l_w \dots$	wirksame Leiterlänge

Sensoren dieser Bauart kommen in Präzisionswaagen zum Einsatz und werden im Allgemeinen zur Erfassung von kleinen Kräften verwendet.

## 2.2.7 Faseroptische Dehnungssensoren

Sensoren dieses Typs bestehen aus Lichtwellenleitern, in die mit Hilfe von hochenergetischem UV-Licht (z.B. mit einem Excimerlaser) optische Reflexionsflächen eingebracht wurden.[15] Jede Reflektionsschicht wirft einen Prozentsatz des Lichts zurück. Diese reflektierten Spektren interferieren und verstärken die Wellenlänge des Lichts, die der Gitterperiode entsprechen. Die Wellenlängen des Lichts, die nicht der Gitterperiode entsprechen, werden ausgelöscht. Durch Dehnung und Stauchung dieser optischen Fasern verändert sich der Abstand zwischen den Reflexionsstellen und es wird Licht einer anderen Wellenlänge verstärkt.

Die Mittelwellenlänge des reflektierten und verstärkten Lichts lässt sich wie folgt darstellen:

$$\lambda_B = \frac{n_1+n_2}{2} * 2 * \Lambda$$

mit:

$\lambda_B \dots$	Mittelwellenlänge des reflektierten Lichts
$n_1 \dots$	Brechzahl des unbelichteten Lichtleiters
$n_2 \dots$	Brechzahl der belichteten Stellen des Lichtleiters
$\Lambda \dots$	Gitterperiode

Die Fasern dieses Sensors werden entweder auf den Messträger aufgeklebt, oder bei der Fertigung von z.B. Kohlefaserstrukturen direkt in das Material eingebunden.

## 2.3 Mögliche Messstellen in der Instrumentenschnittstelle

In diesem Abschnitt werden mögliche Positionen von Messstellen in der Instrumentenschnittstelle, bzw. im Schaft des Seilbetriebenen Instruments beschrieben. Die zur Auswahl stehenden Methoden lauten:

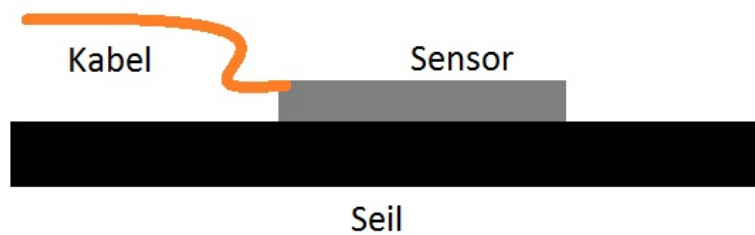
- ▷ Messstelle auf Seil
- ▷ Messstelle auf Dehnungselement
- ▷ Messstellen auf Rollenträgern
- ▷ Messstellen mit Hilfe von Tastrollen / -läufern

Diese Messstellen werden im Folgenden beschrieben. Die Bewertung dieser Messstellen wird im Kapitel 2.4 dargelegt.



### 2.3.1 Messstelle auf Seil

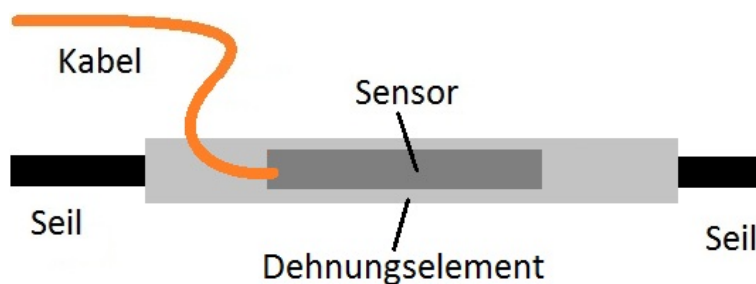
Die erste Überlegung, die in Betracht gezogen wird, ist eine Montage des Sensors direkt auf dem Seil (Abbildung 12). Messstellen direkt auf das Seil aufzubringen, bringt den Vorteil, dass die Seilspannungen direkt über die Dehnung des Seils aufgenommen werden können und dies die Messkette vereinfacht. Durch die Bewegung der Seile müssten sich die Anschlussleitungen der Sensorik mitbewegen. Diese Bewegungen belasten die Anschlussleitungen und lassen diese ermüden und brechen.



**Abb. 12:** Prinzipskizze: Messstelle auf Seil

### 2.3.2 Messen mit Dehnungselement

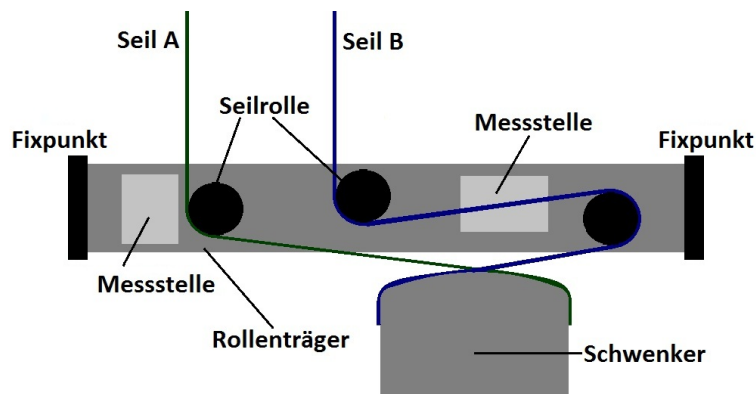
Eine weitere Möglichkeit ist ein Dehnungselement, das in das Seil eingebracht wird, auf dem ein Messgeber aufgebracht ist (Abbildung 13). Dieses Dehnungselement kann so ausgelegt werden, dass die Sensoren maximal ausgenutzt werden können. Weiterhin wäre aber die Bewegung der Seile ein Problem für die Anschlussleitungen.



**Abb. 13:** Prinzipskizze: Messen mit Dehnungselement

### 2.3.3 Messstellen auf Rollenträgern

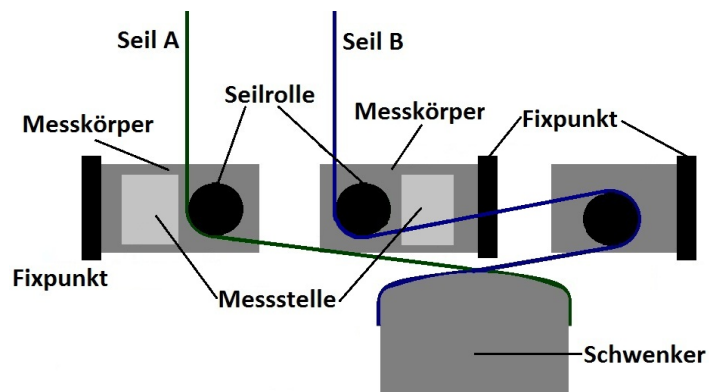
Die Rollenträger, über die die Seile geführt werden um, in richtiger Lage durch den Schaft zu gelangen, werden von den Seilen und deren Spannung belastet. Die Dehnung bzw. Verformung dieser Bauteile ist direkt mit der Spannung in den Seilen gekoppelt. Dies führt zu einer Variante, wie in Abbildung 14 zu sehen, die Dehnungen bzw. Verformungen dieser Bauteile als Maß für die Belastung der Seile heranzuziehen. Der größte Vorteil hierbei ist, dass die Messung an Bauteilen erfolgt, die keine eigene Bewegung vollführen und somit die Anschlussleitungen definiert verlegt werden können und nicht belastet werden.



**Abb. 14:** Prinzipskizze: Messstellen auf Rollenträgern

### 2.3.4 Messung mit Hilfe von Tastrollen / Tastläufern

Um die Seilspannung zu messen, könnten Tastrollen eingebaut werden. Diese können die Funktion der Rollenträger übernehmen und die Seile in die richtige Position am Beginn des Schafts führen. Gleichzeitig würden sie einen definierten Messkörper zur Erfassung der Seilspannung durch Messung der Verformung dieser Messkörper bereitstellen.



**Abb. 15:** Prinzipskizze: Messung mit Hilfe von Tastrollen

## 2.4 Bewertung der betrachteten Messverfahren und Messstellen

Die Bewertung wird auf Grund der großen Anzahl verschiedener Möglichkeiten in zwei Schritten durchgeführt. In Schritt 1 werden die Messverfahren im Hinblick auf ihren theoretischen Einsatz im medizinischen Instrument "MICA" bewertet. In Schritt 2 werden die vorgeschlagenen Messstellen mit Augenmerk auf die vorher ausgewählte Messmethode bewertet.

Zur Bewertung der Messverfahren und der Messstellen wird je eine Nutzwertanalyse mit Hilfe des Zielbaumverfahrens erstellt.[16]

### 2.4.1 Schritt 1: Bewertung der Messverfahren

Zur Bewertung der Messverfahren werden allgemeine Kriterien definiert und diese mit Hilfe der am Anfang des Kapitels gegebenen Randbedingungen gewichtet. Die Bewertungskriterien sind in Tabelle 1 aufgeführt und kurz beschrieben.

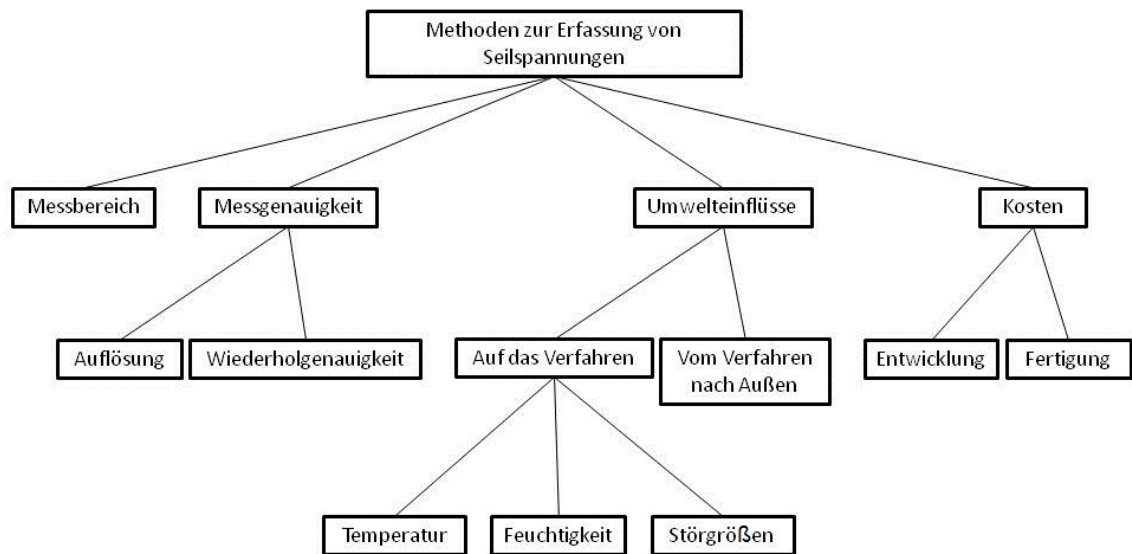
Messbereich:	Wie gut umschließt der erwartete Messbereich den benötigten?
Auflösung:	Wie hoch ist die erwartete Auflösung?
Wiederholgenauigkeit:	In welchem Bereich liegt die erwartete Wiederholgenauigkeit?
Temperatur:	Kann die Sensorik den Temperaturen beim Autoklavieren standhalten?
Feuchtigkeit:	Widersteht die Sensorik dem Wasserdampf im Autoklaven?
Störgrößen:	Gibt es Störgrößen, die die Messung verfälschen können?
Einflüsse der Messung nach außen:	Sind die Materialien biokompatibel und treten gefährliche EM-Felder nach außen aus?
Entwicklungskosten:	In welchem Rahmen befinden sich die erwarteten Entwicklungskosten?
Fertigungskosten:	Wie hoch sind die erwarteten Fertigungskosten?

**Tab. 1:** Bewertungskriterien zur Auswahl der geeigneten Messmethode

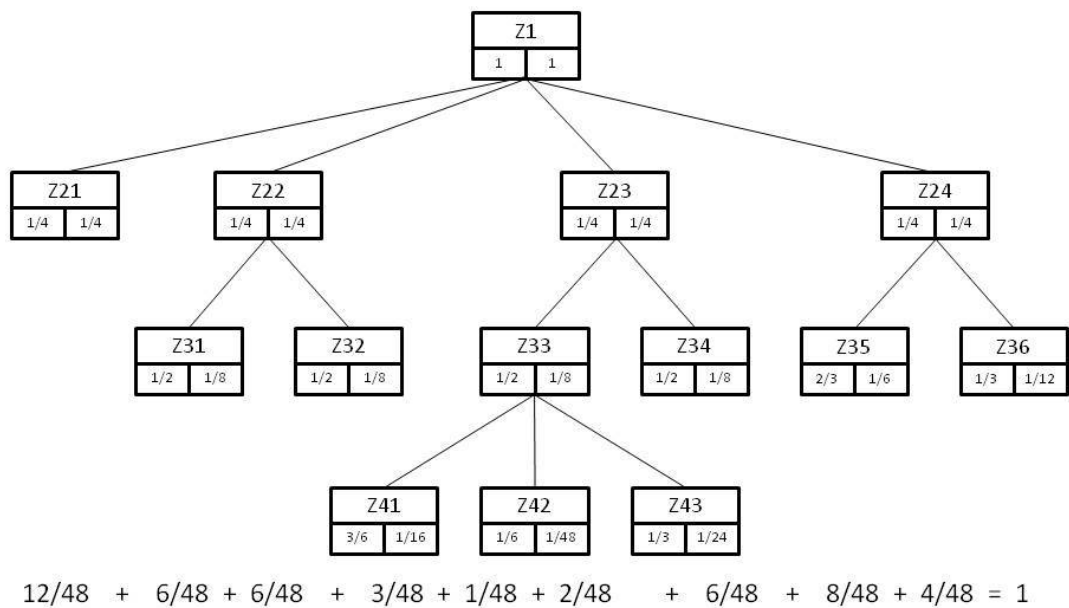
Aus den somit gegebenen Bewertungskriterien entsteht der in Abbildung 16 gezeigte Zielbaum. Die erste Ebene besteht aus den Hauptkriterien Messbereich, Messgenauigkeit, Umwelteinflüsse und Kosten. In der zweiten Ebene werden die Hauptkriterien, wenn nötig, weiter aufgeteilt. Messgenauigkeit erhält zwei Unterpunkte Auflösung und Wiederholgenauigkeit. Die Umwelteinflüsse werden in zwei Kategorien unterteilt (Einflüsse auf das Verfahren und Einflüsse vom Verfahren nach außen). Die Kosten gliedern sich in Entwicklung und Fertigung. In der Dritten Ebene werden die Umwelteinflüsse auf das System noch ein letztes Mal aufgespalten in Temperatur, Feuchtigkeit und Störgrößen.

Diese Kriterien müssen noch gewichtet werden. Hierfür wird der in Abbildung 16 gezeigte Zielbaum als Grundgerüst verwendet und die einzelnen Kriterien mit ihren Gewichten dargestellt.

Hierbei müssen die Gewichte einer Ebene nicht von gleichem Wert sein. Für die Berechnung der Gewichtung ist im linken Teil des Baumobjekts die Gewichtung innerhalb der Untergruppe eingetragen. Der rechte Wert gibt die Gewichtung des Objekts im Bezug zum Gesamtsystem wieder. Dieser Wert errechnet sich als Multiplikation des Gewichtungswerts der Untergruppe (linker Wert des Ausgangsobjekts) mit dem Wert der Gewichtung des Objekts innerhalb der Untergruppe (rechter Wert des betrachteten Objekts). Die Summe aller Gesamtgewichtungen (rechter Wert der Objekte am Ende der Äste) muss "1" ergeben.



**Abb. 16:** Zielbaum der Methodenauswahl in drei Ebenen



**Abb. 17:** Zielbaum der Methodenauswahl  
(Gewichtung)

Aus der Gewichtung in Abbildung 17 ergeben sich die Gewichtungsfaktoren, die in Tabelle 2 zusammengefasst sind und für die weitere Verarbeitung verwendet werden.

Messbereich	$1/4 = 25\%$
Auflösung	$1/8 = 12,5\%$
Wiederholgenauigkeit	$1/8 = 12,5\%$
Temperatur	$1/16 = 6,25\%$
Feuchtigkeit	$1/48 \approx 2,08\%$
Störgrößen	$1/24 \approx 4,17\%$
Einfluss auf Umwelt	$1/8 = 12,5\%$
Entwicklungskosten	$1/12 \approx 8,33\%$
Fertigungskosten	$1/6 \approx 16,67\%$
Gesamt	$1/1 = 100\%$

**Tab. 2:** Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien zur Methodenauswahl

Für diese Gewichte wird eine Werteskala (Tabelle 3) für die Einzelkriterien erarbeitet und Werte von 1-4 mit den Eigenschaften der Kriterien verknüpft. Bei einer Verknüpfung mit dem Wert "1" führt dies zum sofortigen Ausschluss der Methode. Als Ausnahme von dieser Regelung gelten die Entwicklungs- und Fertigungskosten, die bei einer Fertigung in größeren Stückzahlen eine untergeordnete Rolle spielen.

Diese Werte werden mit den Gewichtungen der einzelnen Kriterien verbunden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Nr	Bewertungskriterien	Gewichtung	Schwing-Saite		metallische DMS		Piezo DMS		Kapazitiv		Magnetoelastisch		EM-Kompensation		Faseroptisch	
			Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert
1	Messbereich	0,25	2	0,5	4	1	3	0,75	2	0,5	1	0,25	1	0,25	4	1
2	Auflösung	0,125	2	0,25	3	0,375	3	0,375	2	0,25	3	0,375	4	0,5	4	0,5
3	Wiederholgenauigkeit	0,125	1	0,125	3	0,375	3	0,375	1	0,125	4	0,5	4	0,5	4	0,5
4	Temperatur	0,0625	3	0,1875	3	0,1875	3	0,1875	3	0,1875	4	0,25	3	0,1875	4	0,25
5	Feuchtigkeit	0,0208	2	0,0416	3	0,0624	3	0,0624	4	0,0832	4	0,0832	4	0,0832	3	0,0624
6	Störgrößen	0,0417	2	0,0834	3	0,1251	3	0,1251	2	0,0834	2	0,0834	2	0,0834	3	0,1251
7	Einfluss auf Umwelt	0,125	3	0,375	3	0,375	3	0,375	2	0,25	2	0,25	4	0,5	3	0,375
8	Entwicklungskosten	0,0833	2	0,1666	3	0,2499	3	0,2499	1	0,0833	2	0,1666	1	0,0833	1	0,0833
9	Fertigungskosten	0,1667	2	0,3334	4	0,6668	4	0,6668	1	0,1667	2	0,3334	2	0,3334	1	0,1667
	Summe	1	19	2,0625	29	3,4167	28	3,1667	18	1,7291	24	2,2916	25	2,5208	27	3,0625
Wert	Messbereich	Auflösung	Wiederholgenauigkeit	Temperatur	Feuchtigkeit	Anzahl Störgrößen	Einfluss auf Umwelt	Fertigungskosten	Entwicklungskosten							
4	Sehr Gut	< 1N	< 1%	>120°	unempfindlich	0	kein Einfluss	günstig	keine							
3	Gut	1N	1%	120°	anpassbar	1	eindämmbar	im Rahmen	geringe							
2	Ausreichend	2N	2%	<100°	empfindlich	2	vertretbar	teuer	im Rahmen							
1	Ungenügend	>2N	>2%	<80°	sehr empfindlich	3	nicht vertretbar	zu teuer	zu Hoch							

Tab. 3: Bewertungsmatrix und Wertungsskala der Methodenauswahl

Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, ist eine Messung mit metallischen DMS am besten geeignet für die Erfassung der Seilspannungen. Die Messverfahren "Schwing-Saite", "Kapazitiv", "Magnetoelastisch" und "EM-Kompensation" fallen wegen des Auftretens des Ausschlusskriteriums aus. Der Ausschluss des Schwing-Saiten Aufnehmers im Auswahlkriterium "Wiederholgenauigkeit" begründet sich auf der Tatsache, dass das gesamte System akkustisch gekoppelt ist. Die Eigenfrequenzen der anderen Seile würden bei der Messung eines Seils dessen Frequenz verfälschen. Der Kapazitivempfänger erhält den Wert "1" und damit das Ausschlusskriterium auf Grund der Tatsache, dass bei diesem Messverfahren Ladungen gezählt werden und diese bei einer (Quasi-) statischen Messung, wie bei unserem System, verloren gehen. Die Magnetoelastische und die EM-Kompensations-Methode schließen sich auf Grund des zu geringen Messbereichs aus.

Sollte der Entwicklungs- und Fertigungsaufwand einen geringe Rolle spielen, dann könnte auch eine faseroptische Messung zur Erfassung herangezogen werden. Der Einsatz des "Piezo DMS" kann bei Beachtung des Messbereichs auch in Betracht gezogen werden.

Diese Analyse bringt somit drei Messverfahren als geeignet hervor. Die Wahl des Messsystems fällt auf Grund des höchsten Nutzwertes, der geringen Bearbeitungszeit und der begrenzten Mittel dieses Projektes auf die Messung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen.

#### 2.4.2 Schritt 2: Bewertung der Messstellen

Die Bewertung der Messstellen wird mit der gleichen Methode, wie bereits in Schritt 1 beschrieben, durchgeführt. Die Bewertungskriterien für diesen Schritt zeigt Tabelle 4.

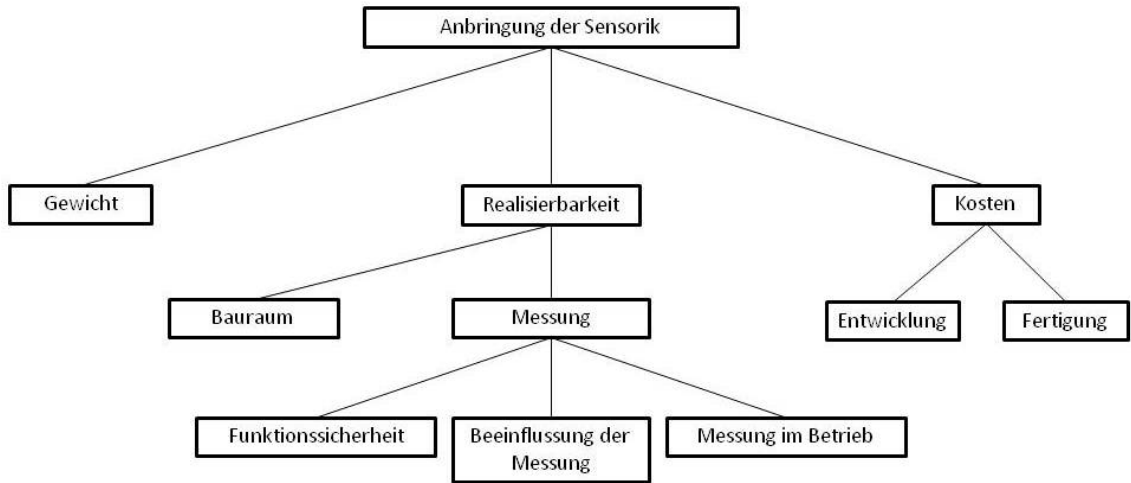
Gewicht:	In welchem Rahmen bewegt sich das erwartete Zusatzgewicht der Sensorik?
Bauraum:	Findet die Sensoranordnung im gegebenen Bauraum platz?
Funktionssicherheit:	Ist die Funktion sichergestellt oder können Ausfälle entstehen?
Beeinflussung der Messung:	Beeinflusst die Messung selbst das Messergebnis?
Messung im Betrieb:	Ist eine Messung im laufenden Betrieb möglich?
Entwicklungskosten:	In welchem Rahmen befinden sich die erwarteten Entwicklungskosten?
Fertigungskosten:	Wie hoch sind die erwarteten Fertigungskosten?

**Tab. 4:** Bewertungskriterien zur Auswahl der geeigneten Messstelle

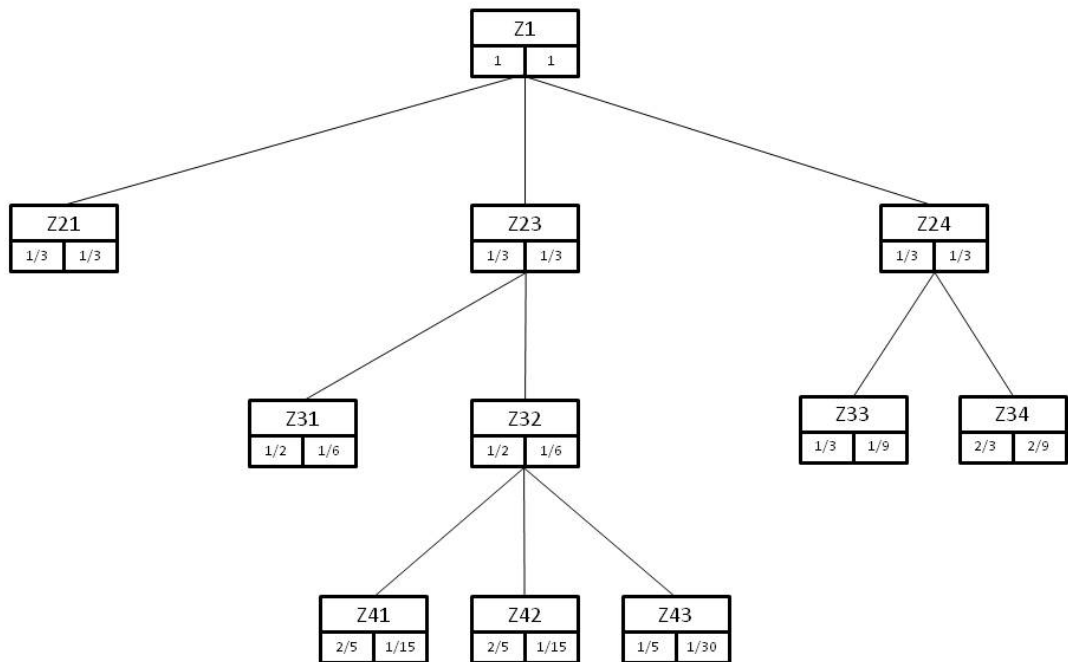
Der Zielbaum ist in Abbildung 18 dargestellt und besitzt ebenfalls drei Ebenen. Dieser Zielbaum wird nach dem gleichen Schema, wie in Schritt 1 bereits beschrieben, aufgebaut.

Die erste Ebene enthält Gewicht sowie Realisierbarkeit und Kosten, die in der zweiten Ebene weiter aufgeteilt werden. Die zweite Ebene besteht aus Bauraum und Messung, die von Rea-

lisierbarkeit abstammen sowie Entwicklung und Fertigung, die den Kosten zugeordnet sind. In der dritten Ebene wird letztendlich noch Messung auf Funktionssicherheit, Beeinflussung der Messung und Messung im Betrieb aufgeschlüsselt.



**Abb. 18:** Zielbaum der Messortauswahl



$$30/90 + 15/90 + 6/90 + 6/90 + 3/90 + 10/90 + 20/90 = 1$$

**Abb. 19:** Zielbaum der Messortauswahl  
(Gewichtung)



Aus der Gewichtung im Zielbaum aus Abbildung 19 lässt sich zur besseren Veranschaulichung und zur weiteren Berechnung wie in Schritt 1 eine Tabelle generieren (Tabelle 5)

Gewicht	$1/3 \approx 33,3\%$
Bauraum	$1/6 \approx 16,67\%$
Funktionssicherheit	$1/15 \approx 6,67\%$
Beeinflussung der Messung	$1/15 \approx 6,67\%$
Messung im Betrieb	$1/30 \approx 3,33\%$
Entwicklungskosten	$1/9 \approx 11,11\%$
Fertigungskosten	$2/9 \approx 22,22\%$
Gesamt	$1/1 = 100\%$

**Tab. 5:** Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien zur Messortauswahl

Diese Faktoren werden wie bereits bei der Auswahl der Messmethoden mit den Werten aus einer Wertungsskala verrechnet und ergeben die Bewertungsmatrix, wie sie in Tabelle 6 zu sehen ist. Auch hier wird der Wert "1" als Ausschlusskriterium angesehen.

Aus dieser Tabelle geht nun hervor, dass die Anbringung der Sensoren am Rollenträger die beste Methode ist. Da aber das Gewicht der Tastrollen noch nicht genau festgelegt werden kann, könnte auch diese Möglichkeit in Betracht gezogen werden.

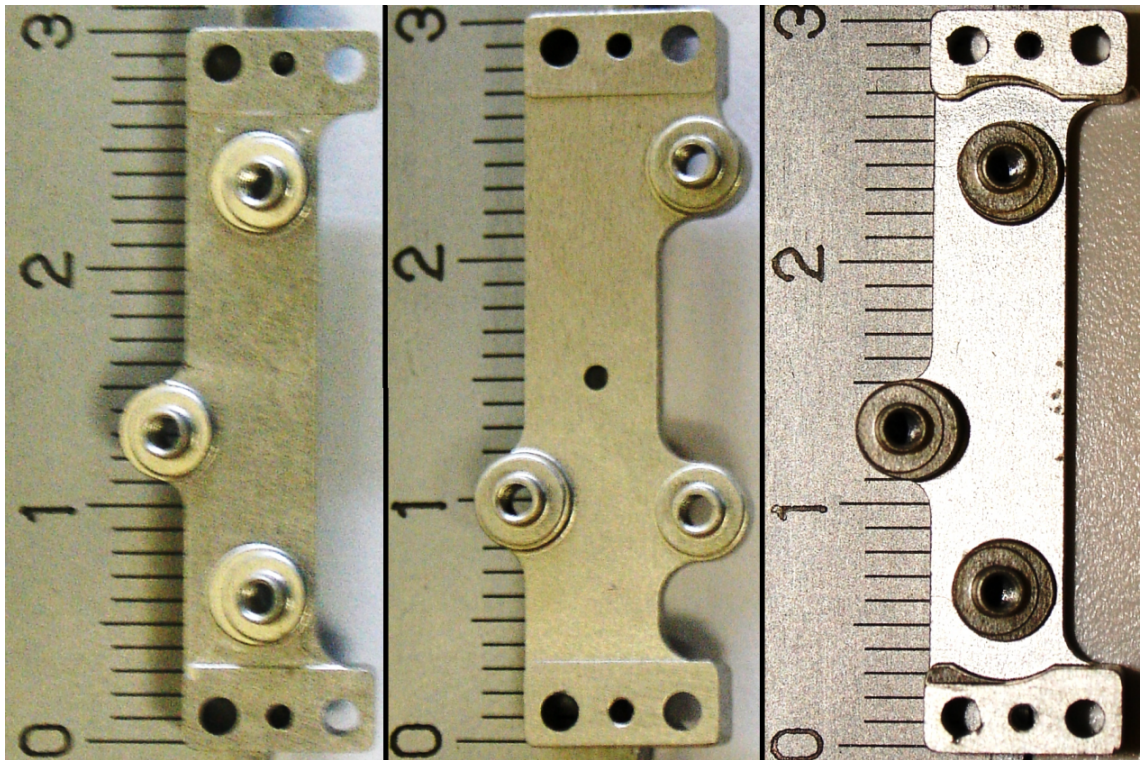
Auf Grund des höchsten Nutzwertes und des geringen Entwicklungs- und Fertigungsaufwandes wird für die Erfassung der Seilspannungen die "Rollenträger"-Variante ausgewählt. Aber die zweite Methode ("Tastrolle/Läufer") wird in die Überlegungen der Veränderungsvorschläge mit einbezogen.

Nr	Bewertungskriterien	Gewichtung		Messstelle auf Seil		Dehnungselement		Rollenträger		Tastrolle / Läufer	
		Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert
1	Gewicht		0,3333	3	0,9999	2	0,6666	3	0,9999	2	0,6666
2	Bauraum		0,1667	2	0,3334	1	0,1667	3	0,5001	3	0,5001
3	Funktionssicherheit		0,0667	1	0,0667	2	0,1334	3	0,2001	3	0,2001
4	Beeinfl. d. Messung		0,0667	1	0,0667	2	0,1334	2	0,1334	3	0,2001
5	Mess. im Betrieb		0,0333	2	0,0666	3	0,0999	3	0,0999	3	0,0999
6	Entwicklungskosten		0,1111	2	0,2222	2	0,2222	3	0,3333	2	0,2222
7	Fertigungskosten		0,2222	2	0,4444	2	0,4444	3	0,6666	2	0,4444
	Summe		1	13	2,1999	14	1,8666	20	2,9333	18	2,3334
	Wert	Bauraum	Funktionssicherheit	Beeinfl. d. Messung	Mess. im Betrieb	Entwicklungskosten	Fertigungskosten				
3	leicht	ausreichend	funktioniert	keine	möglich	gering	gering				
2	annehmbar	machbar	funktioniert bedingt	kaum	bedingt möglich	annehmbar	annehmbar				
1	schwer	zu gering	funktioniert schlecht	starke	unmöglich	hoch	hoch				

**Tab. 6:** Bewertungsmatrix und Wertungsskala der Messstellenauswahl

### 2.4.3 Schritt 3: Auswahl der Sensorik

Zum Abschluss dieses Kapitels werden nun Schritt 1 und Schritt 2 kombiniert und ergeben somit das Messsystem, das zur Simulation und Erfassung der Seilspannung in den folgenden Kapiteln herangezogen wird. Das gewählte Messsystem wird aus DMS bestehen, die auf die bereits vorhandenen Rollenträger (Abbildung 20) appliziert werden und deren Dehnung die an den Seilen anliegende Spannung widerspiegelt.



**Abb. 20:** Ansicht der Rollenträger von Oben  
(v.l. Rollenträger oben, Rollenträger mitte, Rollenträger unten)

### 3 Simulation der Seilspannungen

In diesem Kapitel wird die Lage der Messstellen für Dehnungsmessstreifen mit Hilfe von Simulationen definiert. Als Simulationsprogramm wird hier das im CAD-System ProEngineer Wildfire 4.0 integrierte Simulationsprogramm ProMechanica verwendet.

#### 3.1 Definition der Lastfälle

Um die Simulation durchführen zu können, müssen konkrete Lastfälle definiert werden, welche die Belastungen während des Betriebs des Instruments widerspiegeln. Diese Lastfälle (siehe Tabelle 7) wurden in Zusammenarbeit mit den Entwicklern der MICA ausgearbeitet.

Lastfall I:	Belastung der Seile durch maximale Vorspannung. (Last an Seil 1 = 80N, Last an Seil 2 = 80N)
Lastfall II:	Maximale Belastung von Seil 1 durch externe Kraft am Endeffektor und dadurch entstehende Entlastung von Seil 2. (Last an Seil 1 = 160N, Last an Seil 2 = 0N)
Lastfall III:	Gegenstück zu Lastfall II. (Last an Seil 1 = 0N, Last an Seil 2 = 160N)
Lastfall IV:	Nachlassen der Vorspannkraft an Seil 1 und Seil 2 bei gleichzeitiger Belastung an Seil 1. (Last an Seil 1 = 80N, Last an Seil 2 = 0N)
Lastfall V:	Gegenstück zu Lastfall IV. (Last an Seil 1 = 0N, Last an Seil 2 = 80N)
Lastfall VI:	Anspannung beider Seile. Könnte möglich sein, wenn sich eines der beiden Seile verhakt hat. (Last an Seil 1 = 160N, Last an Seil 2 = 160N)
Lastfall VII:	Normale Belastung von Seil 1. (Last an Seil 1 = 140N, Last an Seil 2 = 20N)
Lastfall VIII:	Gegenstück zu Lastfall VII (Last an Seil 1 = 20N, Last an Seil 2 = 140N)

**Tab. 7:** Lastfälle zur Simulation der Rollenträger

Der Lastfall I ergibt sich aus den Vorgaben der maximalen Vorspannkraft aus Kapitel 2.1. Mit der gegebenen Kinematik ergeben sich für die weiteren Lastfälle jedoch weitere Einschränkungen: Aufgrund der gegengleichen Bewegung der Seile wird durch die Aktuierung des Gelenks gegen einen Widerstand ein Seil belastet und das andere entspannt. Somit ist der Fall denkbar, dass eines der Seile, trotz maximaler Vorspannung, komplett entspannt wird (Lastfall II und Lastfall III). Dies muss verhindert werden, da die Gefahr besteht, dass das nun entlastete Seil von der Seilrolle springt.

Ebenfalls ist es denkbar, dass beide Seile durch Längung der Seile, Setzung in Verschraubungen oder Verformungen der Rollenträger, die Vorspannung verlieren. Somit würde ein Seil

schon bei geringer Belastung seines Partners komplett entspannt werden (Lastfall IV und Lastfall V) und somit ebenfalls die Gefahr des Aushängens von der Seilrolle bestehen.

Der Lastfall VI wird selten eintreten, sollte dennoch beachtet werden: Verhakt sich eines der beiden Seile in den Rollenträgern, werden bei Aktuierung des anderen Seils beide Partner belastet.

Schließlich wird in den letzten beiden Lastfällen (Lastfall VII und Lastfall VIII) eine Belastung beschrieben, wie sie während einer normalen Aktuierung auftritt. Hierbei wird ein Seil so belastet, dass dessen Gegenspieler nicht vollständig entlastet wird.

### 3.2 Wirkungsweise und bevorzugte Lage der gewählten DMS

Aus den Vorüberlegungen, die zur Auswahl geeigneter Messstellen dienen, geht hervor, dass sich die Rollenträger nicht nur verbiegen, sondern hauptsächlich tordieren. Aus diesem Grund werden zur Messwerterfassung DMS verwendet, die hauptsächlich Scherspannungen detektieren. Die Firma Vishay stellt zu diesem Zweck Standard-DMS (siehe Abbildung 21), die durch ihre geringe Bauform und den ebenfalls geringen Preis hierfür am geeignetsten erscheinen.



Gage Pattern	Actual Matrix Size	Grid Length	Grid Width	Overall Length*	Overall Width	Resistance Ohm	Gage Designation	End-Tab Ratio
Ausführung	Original-Grösse	Messgitter-Länge	Messgitter-Breite	Gesamt-Länge*	Gesamt-Breite	Widerstand Ohm	Modellbezeichnung	Kriechanpassung
	5,1 x 4,1	1,57	0,84	4,01	2,97	350 ±0,2%	FAED-A6363M-35-SXE	7,5:1
		Miniature shear pattern for shear and torque transducers. Miniatur-Messgitter für Scherkraft- und Drehmoment Sensoren.						

Abb. 21: Auszug aus "Transducer - Gages and Accessories" der Firma Vishay

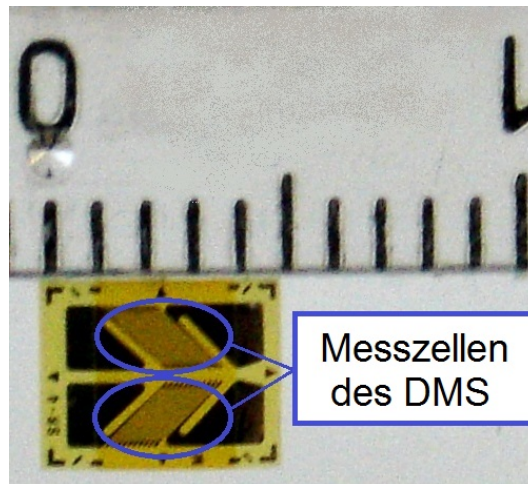
Ab hier werden folgende Begriffe eingeführt, die zur Definition der Lage eines DMS auf den Rollenträgern benötigt werden:

**Messstelle:** Geometrische Lage des Messpunktes auf dem Rollenträger

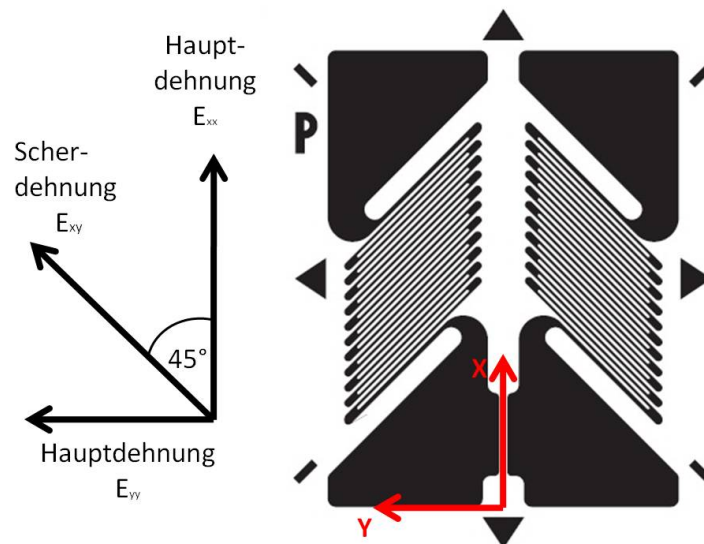
**Messgitter:** Mäanderförmig angeordnete Widerstandsbahn

**Messzelle:** Besteht aus einem oder mehreren Messgitter und dessen Anschlüssen

Um die maximalen Dehnungen zu detektieren, sollten die Messgitter der Dehnungsmessstreifen (siehe Abbildung 22) in Richtung dieser Spannungen liegen, was bedeutet, der DMS sollte für Biegungen in Richtung der Hauptdehnungen ( $E_{xx}$ ,  $E_{yy}$ ) angebracht werden (Abbildung 23). Somit ist ein Messgitter dieses DMS in Richtung der Torsionsdehnung ( $E_{xy}$ ) und das andere Messgitter senkrecht dazu angeordnet.



**Abb. 22:** Scherspannungs-DMS mit markierten Messzellen (Hauptteilung der Skala = 5mm, Hilfsteilung = 1mm)



**Abb. 23:** Scherspannungs-DMS mit Dehnungsrichtungen und Koordinatensystem

Durch diese Anordnung werden die Scherdehnungen durch eine Messzelle voll aufgenommen. Eine zweite Messzelle wird zur Temperaturkompensation verwendet, da sich die Bauteile bei Erwärmung in alle Richtungen gleich ausdehnen, sollten immer vier Messzellen (zwei zur Messung, zwei zur Ergänzung) im Verbund als Vollbrücke verwendet (näheres hierzu im Kapitel 4.2.3) werden.

Mit Hilfe des Postprozessors von "ProMechanica" lässt sich, wie das nächste Unterkapitel zeigt, die Hauptdehnungsrichtung bestimmen und somit die optimale Lage der DMS und ihrer Messzellen ermitteln.

### **3.3 Aufbau der Simulation**

Die Simulation wird in drei Schritten durchgeführt. In jedem Schritt wird je ein Rollenträger simuliert, um die Lage der DMS festzulegen. Die Vorgehensweise zur Erstellung der Simulationen ist für jeden Rollenträger ähnlich, deshalb wird diese nur im Unterkapitel des Rollenträger\_oben ausführlich beschrieben. Somit enthalten die beiden Unterkapitel des Rollenträger\_unten und des Rollenträger\_mitte nur die Unterschiede zur Simulation des Rollenträger\_oben sowie die Anfangsbedingungen, Randbedingungen und die Lastannahmen für die entsprechenden Rollenträger.

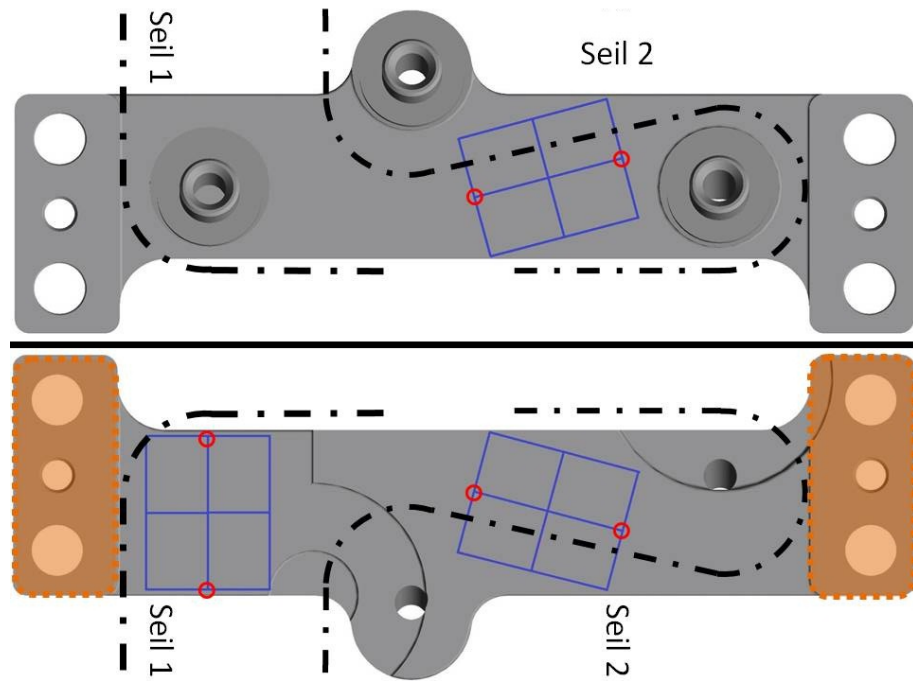
#### **3.3.1 Simulationsaufbau am Beispiel des Rollenträger\_oben (RTO)**

Zur Platzierung der Messstellen auf den Rollenträgern wird folgender Ablauf durchgeführt:

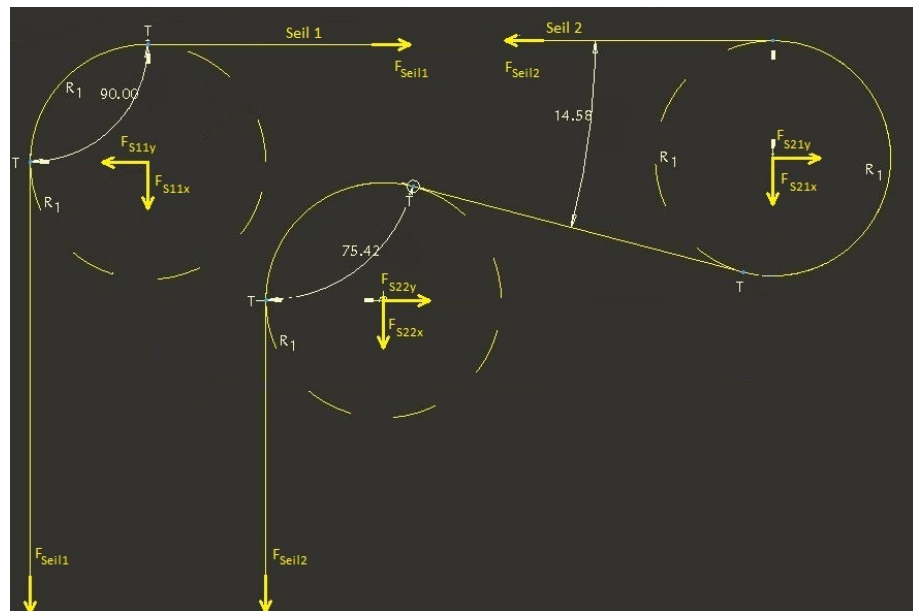
1. Vorläufige Simulation zur Detektion von Bereichen mit großer Dehnung
2. DMS Outline einzeichnen und Messpunkte festlegen (siehe Abbildung 24)
3. Ausführliche Simulation und anschließende Auswertung
4. Schritt 2 und Schritt 3 wiederholen, bis zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden

Die Randbedingung der Simulation werden so definiert, dass die Berührungsflächen der Rollenträger untereinander, bzw. mit dem Gehäuse der Instrumentenschnittstelle (Abbildung 24 orange Flächen) als fest angenommen werden. Die Messpunkte für die Simulation der Dehnungen werden auf die rot markierten Kreuzungspunkte der Skizzen definiert.

Die Zugkräfte der Lastfälle sind so definiert, dass sie den Lastannahmen aus Kapitel 3.1 entsprechen und auf die Lagerstellen der Seilrollen wirken. Für die richtige Orientierung der Kräfte ist in jeder Lagerstelle ein Koordinatensystem eingefügt, das die Ausrichtung der Seilebene angibt und somit als Referenzkoordinatensystem für die entsprechenden Kräfte fungiert. Zur Ermittlung der Kräfte an den Lagerstellen muss der Verlauf der Seile näher betrachtet werden (Abbildung 25).



**Abb. 24:** CAD-Auszug des Rollenträger\_oben mit Skizze zur DMS Anbringung  
(v.o.: Draufsicht, Untersicht)  
(Schwarz: skizzierter Seilverlauf)  
(Orange: Flächen zur Definition der Randbedingungen)  
(Rot: Analysestellen für die Simulation)



**Abb. 25:** Darstellung des Seilverlaufs des RTO zur Berechnung der Lasten



Die X-Y-Ebene wird durch das eingefügte Koordinatensystem vorgegeben, was dazu führt, dass der Z-Anteil der Kräfte immer 0 ist. Die Berechnung der resultierenden Kräfte erfolgt nach folgendem Schema:

Da es sich bei der Umlenkung des Seil 1 um eine Umlenkung um  $90^\circ$  handelt, lassen sich die resultierenden Kräfte direkt ablesen:

$$F_{S1x} = F_{\text{Seil}}$$

$$F_{S1y} = -F_{\text{Seil}}$$

mit:

$F_{S1x}, F_{S1y} \dots$	Last an der Umlenkung von Seil 1, verursacht durch die Seilspannung, in X- und Y-Richtung
$F_{\text{Seil}} \dots$	Seillast

Die beiden Umlenkungen des Seil 2 berechnen sich wie folgt:

$$F_{S21x} = \sin(14,6^\circ) * F_{\text{Seil}}$$

$$F_{S21y} = -(F_{\text{Seil}} + \cos(14,6^\circ) * F_{\text{Seil}})$$

$$F_{S22x} = F_{\text{Seil}} + \cos(75,42^\circ) * F_{\text{Seil}}$$

$$F_{S22y} = \sin(75,42^\circ) * F_{\text{Seil}}$$

mit:

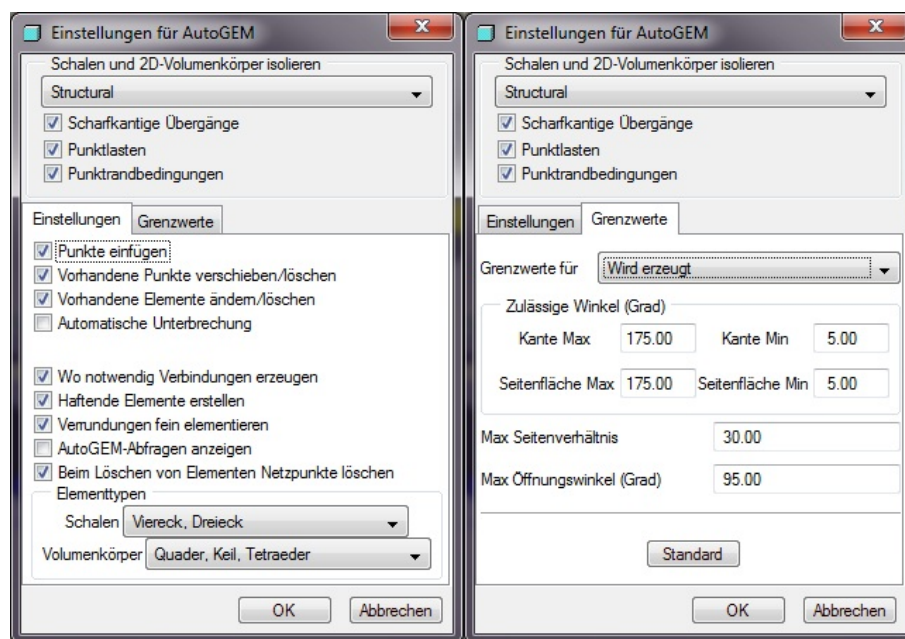
$F_{S21x}, F_{S21y} \dots$	Last an der ersten Umlenkung von Seil 2, verursacht durch die Seilspannung, in X- und Y-Richtung
$F_{S22x}, F_{S22y} \dots$	Last an der zweiten Umlenkung von Seil 2, verursacht durch die Seilspannung, in X- und Y-Richtung
$F_{\text{Seil}} \dots$	Seillast

Für den RTO ergeben sich somit die in Tabelle 8 gezeigten Lastfälle.

Lastfall / Last [N]	$F_{S11x}$	$F_{S11y}$	$F_{S21x}$	$F_{S21y}$	$F_{S22x}$	$F_{S22y}$
1	80	-80	-20,17	-157,42	100,14	77,42
2	160	-160	0	0	0	0
3	0	0	-40,33	-314,83	200,28	154,85
4	80	-80	0	0	0	0
5	0	0	-20,17	-157,42	100,14	77,42
6	160	-160	-40,33	-314,83	200,28	154,85
7	140	-140	-5,04	-39,35	25,03	19,36
8	20	-20	-35,29	-275,48	175,24	135,49

**Tab. 8:** Lastvorgaben zur Simulation des RTO

Um die Simulation durchführen zu können, muss ein Netz erstellt werden. Dazu wird hier das "AutoGEM" Feature benutzt, welches automatisch ein Netz erstellt. Die Einstellungen für die AutoGEM-Funktion zeigt Abbildung 26. Während der Erzeugung kann es zu Warnmeldungen kommen, die besagen, dass keine Keilelemente erzeugt werden können. Diese Meldung hat keinen Einfluss auf das Netz und beruht auf der Grundlage, dass die Bauteile eine zu große Dicke zur Erstellung von Keilelementen haben.

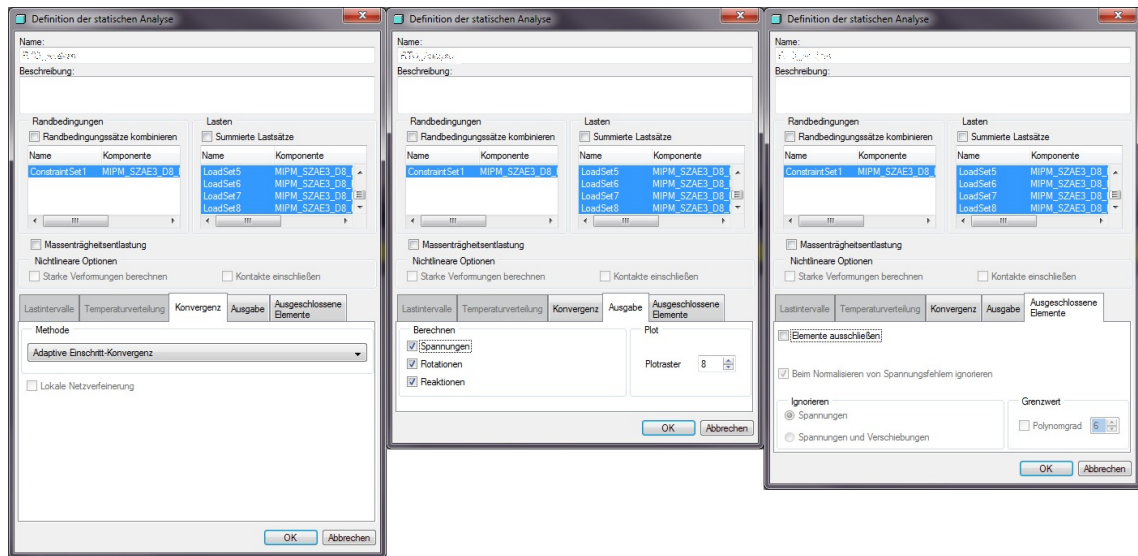


**Abb. 26:** Simulationsparameter zur automatischen Netzerstellung mit AutoGEM

Weiterhin kann es zu Warnmeldungen kommen, die besagen, dass der Minimalwert der Kantenwinkel nicht ausreicht und AutoGEM diese korrigiert. Die Ursache hierfür ist, dass einige Kanten in den Bauteilen in einem zu spitzen Winkel aufeinander treffen. AutoGEM verändert für diese Bereiche die Minimalwinkel und erstellt auch für diese Bereiche ein Netz. Diese Warnungen können somit ignoriert werden, solange keine detaillierte Analyse an diesen Bereichen

durchgeführt werden muss. Für alle anderen Bereiche kann davon ausgegangen werden, dass ein hinreichend genaues Netz erstellt wird.

Die Analyse selbst wird mit den Parametern durchgeführt, wie sie in Abbildung 27 zu sehen sind. Diese Parameter haben sich als günstig herausgestellt, da sie einen guten Kompromiss zwischen Laufzeit und Genauigkeit darstellen.



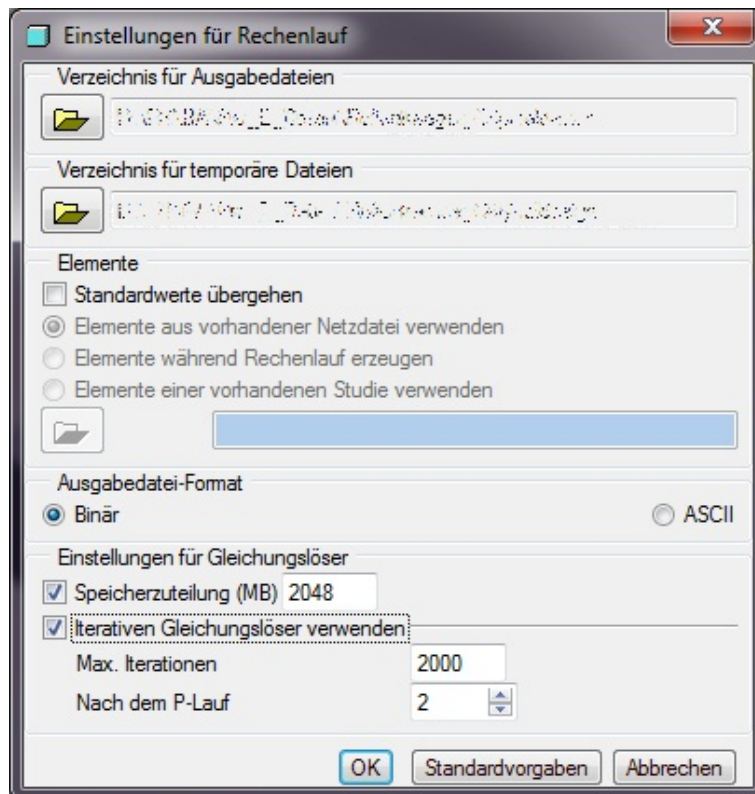
**Abb. 27:** Simulationsparameter der statischen Analysen

Zur weiteren Optimierung der Laufzeit werden noch Einstellungen zum Verhalten des Rechenlaufs wie in Abbildung 28 gezeigt verwendet. Diese führen zu einer verbesserten Speichernutzung und der Eingrenzung der Iterationsschritte, da bereits nach dem zweiten Durchlauf die Konvergenz ausreichend ist.

Die Einstellung der Speichernutzung muss aber hierbei auf den zur Verfügung stehenden Arbeitsspeicher angepasst werden. Bei einem zu hohen Wert kann es zum Abbruch der Simulation auf Grund von Speicherüberschreitungen führen. Auch sollte beachtet werden, dass ProMechanica die Ergebnisse der Berechnung im Arbeitsspeicher zwischenspeichert und somit ebenfalls noch Speicher hierfür zur Verfügung stehen muss um Abstürze zu vermeiden. Das zur Simulation benutzte System hatte 4 GB Arbeitsspeicher und ein 64-Bit Betriebssystem (Windows 7), womit hier etwa 3 GB, nach Abzug des Speichers für das Betriebssystem, zur Verfügung stehen.

Somit sind alle Vorbereitungen zur Simulation abgeschlossen. Sie kann nun entweder direkt ausgeführt werden oder mit Hilfe eines Batch-Files zusammen mit den Analysen der anderen Rollenträger. Diese Batch-Files<sup>13</sup> führen die Simulation auf Konsolenbasis durch und benötigen kein aktives Pro-Engineer. Ein weiterer Vorteil der Benutzung eines Batch-Files ist, dass diese

<sup>13</sup>Definition: Ein Batch-File ist eine Textdatei zur Stapelverarbeitung, die von Windows in der Kommandozeile ausgeführt wird.



**Abb. 28:** Simulationsparameter der Rechenläufe

Analysen dann ausgeführt werden können, wenn der PC nicht benutzt wird. Das benutzte Batch-File ist im Anhang\_6 aufgeführt.

### 3.3.2 Randbedingungen und Eingangsgrößen des Rollenträger\_unten (RTU)

Da die Geometrie der Seilführung des RTU und des RTO einander gleichen (vergleiche Abbildung 25 und Abbildung 29 ) und sie sich nur in der Lage der Seilebenen unterscheiden, können für die Berechnungen die bereits im Abschnitt 3.3.1 gezeigten Formeln verwendet werden. Die Lage der XY-Ebene der Seile wird auch hier durch die Koordinatensysteme der Lagerstellen bestimmt.

Somit ergeben sich die für die Lastvorgaben die Werte, wie Tabelle 9 zeigt. Alle Simulationseinstellungen sind wie bei der Simulation der RTO eingestellt.

Lastfall / Last [N]	$F_{S11x}$	$F_{S11y}$	$F_{S21x}$	$F_{S21y}$	$F_{S22x}$	$F_{S22y}$
1	80	-80	-20,17	-157,42	100,14	77,42
2	160	-160	0	0	0	0
3	0	0	-40,33	-314,83	200,28	154,85
4	80	-80	0	0	0	0
5	0	0	-20,17	-157,42	100,14	77,42
6	160	-160	-40,33	-314,83	200,28	154,85
7	140	-140	-5,04	-39,35	25,03	19,36
8	20	-20	-35,29	-278,48	175,24	135,49

Tab. 9: Lastvorgaben zur Simulation des RTU

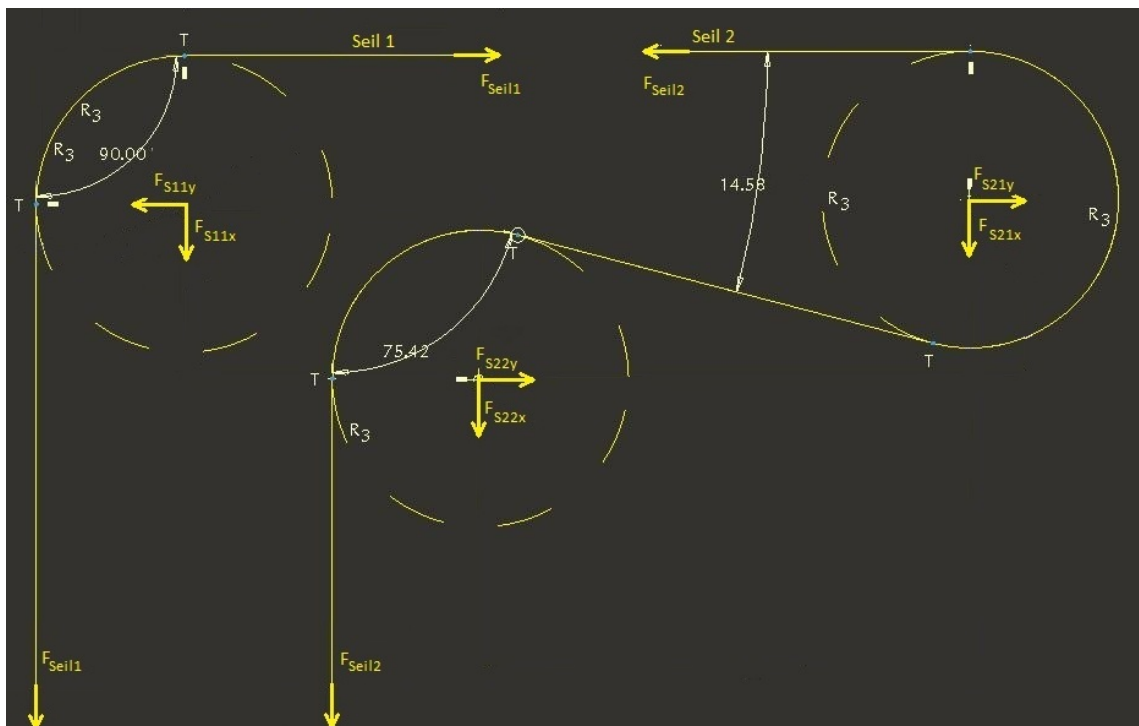


Abb. 29: Darstellung des Seilverlaufes des RTU zur Berechnung der Lasten

### 3.3.3 Randbedingungen und Eingangsgrößen des Rollenträger\_mitte (RTM)

Da sich der Aufbau des RTM von dem der anderen beiden (RTO und RTU) in der Lage der Seilrollen und deren Lagerpunkten unterscheidet (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31) werden hier etwas abgewandelte Formeln zur Berechnung der Lasten benutzt.

Da es sich bei der Umlenkung des Seil 1, wie bei den beiden zuvor gezeigten Rollenträgern auch, um eine 90°-Umlenkung handelt, kann die betreffende Lagerkraft mit der zur Berechnung des RTO und RTU verwendeten Formel errechnet werden. Die beiden Umlenkungen des Seil 2 berechnen sich wie folgt:

$$F_{S21x} = -(\sin(3,14^\circ) * F_{Seil})$$

$$F_{S21y} = -(F_{Seil} + \cos(3,14^\circ) * F_{Seil})$$

$$F_{S22x} = -F_{Seil} + \cos(93,14^\circ) * F_{Seil}$$

$$F_{S22y} = \sin(93,14^\circ) * F_{Seil}$$

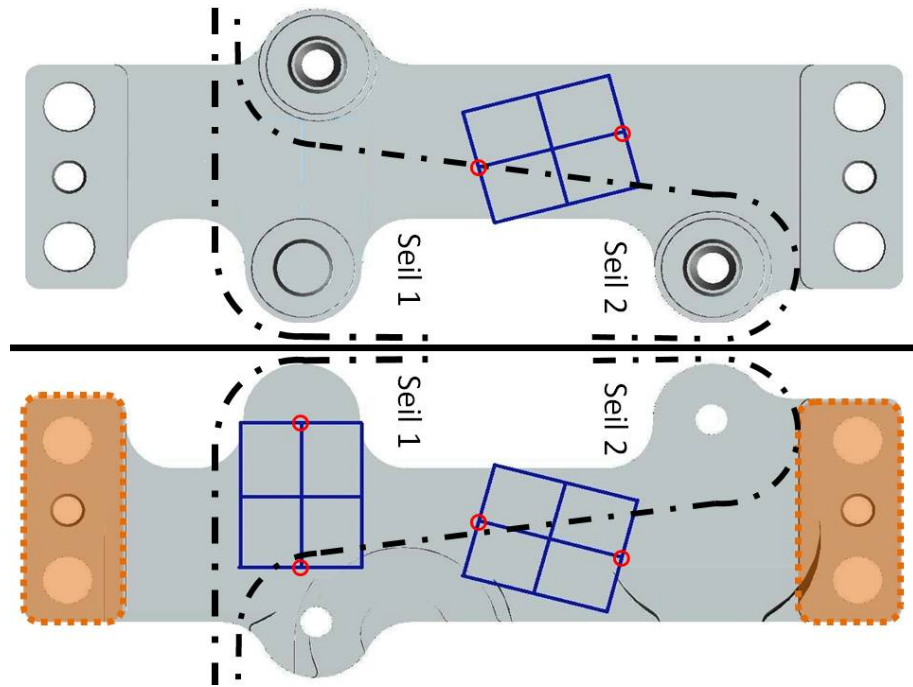
mit:

$F_{S21x}, F_{S21y}$ ..	Last an der ersten Umlenkung von Seil 2, verursacht durch die Seilspannung, in X- und Y-Richtung
$F_{S22x}, F_{S22y}$ ..	Last an der zweiten Umlenkung von Seil 2, verursacht durch die Seilspannung, in X- und Y-Richtung
$F_{Seil}$ ..	Seillast

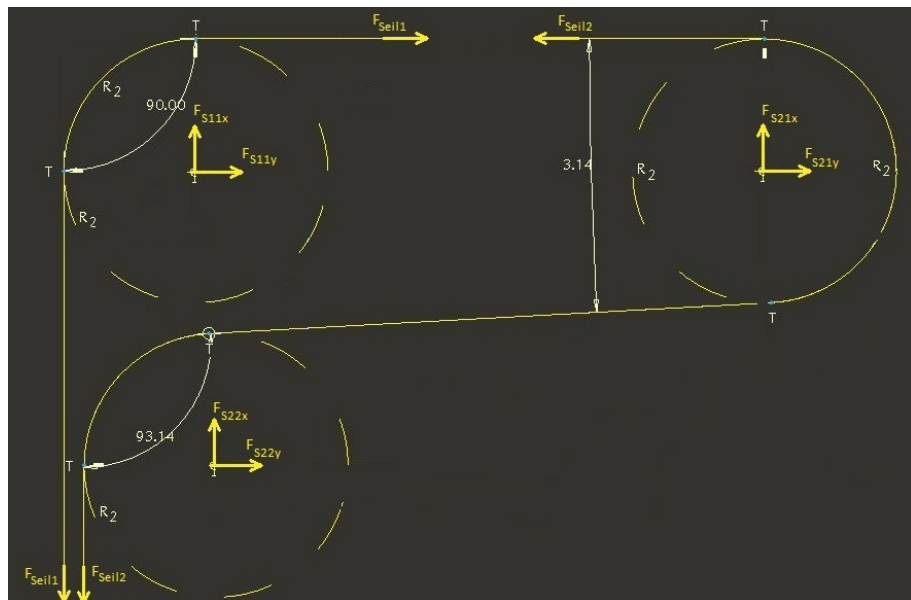
Für den RTM ergeben sich somit die in Tabelle 10 gezeigten Lastfälle. Alle Simulationseinstellungen sind wie bei der Simulation der RTO und RTU eingestellt.

Lastfall / Last [N]	$F_{S11x}$	$F_{S11y}$	$F_{S21x}$	$F_{S21y}$	$F_{S22x}$	$F_{S22y}$
1	-80	80	-4,38	-159,88	-84,38	79,88
2	-160	160	0	0	0	0
3	0	0	-8,76	-319,76	-168,76	159,76
4	-80	80	0	0	0	0
5	0	0	-4,38	-159,88	-84,38	79,88
6	-160	160	-8,76	-319,76	-168,76	159,76
7	-140	140	-1,10	-9,97	-21,10	19,97
8	-20	20	-7,67	-279,79	-147,67	139,79

**Tab. 10:** Lastvorgaben zur Simulation des RTM



**Abb. 30:** CAD-Auszug des Rollenträger\_mitte mit Skizze zur DMS Anbringung  
 (v.o.: Draufsicht, Unteransicht)  
 (Schwarz: skizzierter Seilverlauf)  
 (Orange: Flächen zur Definition der Randbedingungen)  
 (Rot: Analysestellen für die Simulation)



**Abb. 31:** Darstellung des Seilverlauf des RTM zur Berechnung der Lasten

### **3.4 Simulationsergebnisse und Interpretation**

Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Abschnitte. Im ersten Abschnitt werden die Dehnungen der Rollenträger analysiert, um die Lage der DMS zu ermitteln. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden, nach einer erneuten Simulation der Rollenträger mit den neu festgelegten DMS Positionen, die von den DMS erfassten Dehnungen analysiert. Hierbei wird analysiert, ob diese erfassten Dehnungen linear unabhängig voneinander sind.

#### **3.4.1 Auswertung der Simulation zur Definition der Lage der Messstellen**

In Abbildung 32 ist ein Beispiel einer Darstellung der maximalen Hauptdehnung im RTO zu sehen. Die Pfeile geben die Richtung der Hauptdehnung an. Die Farbe der Pfeile spiegelt die Stärke der Dehnung wider. Abbildungen der Hauptdehnungen des RTM und den RTU sind im Anhang\_6 zu finden.

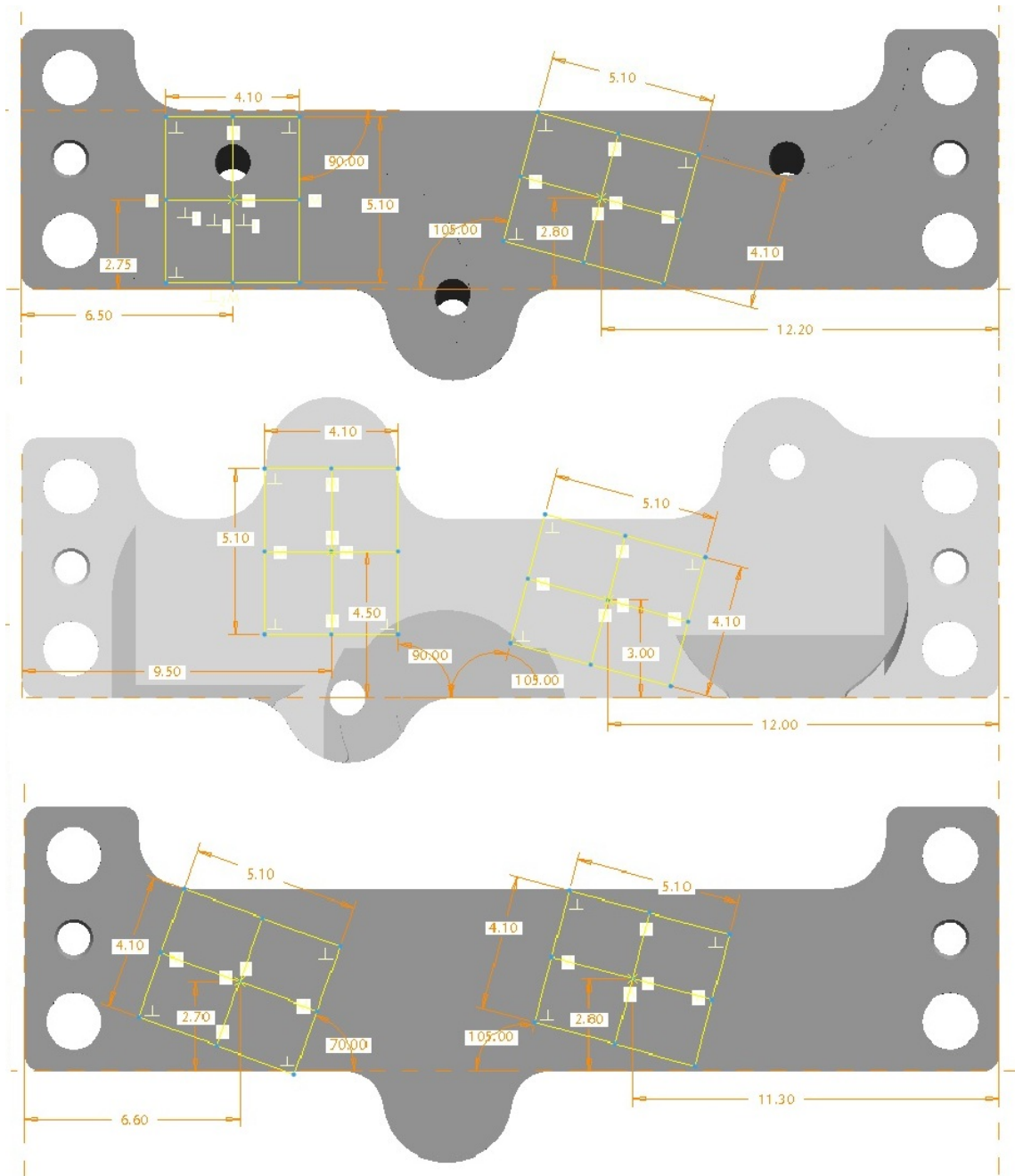
Anhand dieser Darstellungen können nun die Skizzen der DMS-Geometrien im Bauteil ausgerichtet werden. Dabei ist aber darauf zu achten, dass die Außenkontur, dieser Skizzen weitestgehend innerhalb der Körperkontur des Bauteils liegt. Es ist zwar möglich, die Trägerfolie des DMS vor der Montage zu beschneiden, davon wird aber abgeraten, da ein Entfernen dieses Außenbereichs die Haftung des DMS auf dem Messkörper verringert und zur Nichtlinearität der Messung führen kann.

Wegen der im Abschnitt zuvor erwähnten Temperaturkompensation sollten pro Messstelle vier Messgitter als Vollbrücke verschaltet werden. Auf Grund der Geometrie der Rollenträger war es leider nicht möglich, die DMS so in Position zu bringen, dass seine Hauptrichtung im  $45^\circ$  Winkel zur Hauptdehnung liegt und Vollbrücken zu realisieren. Darum musste ein Kompromiss gefunden werden. Dieser Kompromiss besteht darin, dass die Messstreifen in einem Winkel angebracht werden, der es erlaubt, sie am Bauteil zu montieren, aber trotzdem einen großen Teil der Dehnungen zu messen. Außerdem kann nur für die Messstelle DMS\_2 eine Vollbrücke realisiert werden. Für die Messstelle DMS\_1 wird die Vollbrücke durch einen weiteren DMS realisiert, der aber nicht an den Rollenträgern befestigt ist, sich aber in unmittelbarer Nähe auf einem steifen Bauteil befinden. Dadurch wird gewährleistet, dass keine parasitären Dehnungen das Messergebnis verfälschen und gleichzeitig eine Temperaturkompensation zu ermöglichen. In Abbildung 33 wird diese Lage der Messstellen gezeigt. Diese Abbildungen dienen auch zur Beschreibung der Lage für die Montage der DMS und ist in größerer Form nochmals im Anhang\_6 zu finden. Der zweite Teil der Vollbrücke der Messstelle DMS\_2 befindet sich auf der Oberseite des jeweiligen Bauteils, so dass diese Messgitter direkt übereinander liegen und wird im weiteren Verlauf als DMS\_3 bezeichnet.





**Abb. 32:** Postprozessorabbildung der maximalen Hauptdehnungen des RTO an den Anbringungsflächen der DMS  
 (Lastfall 3, Ansicht von unten)



**Abb. 33:** Beschreibung der Lage der DMS von Unten gesehen  
(von Oben nach unten RTO, RTM, RTU)  
(jeweils: Links DMS1, Rechts DMS2)

### 3.4.2 Analyse der Simulationsergebnisse zur Überprüfung der linearen Unabhängigkeit

Nach der Festlegung der DMS-Messstellen sollte nun noch überprüft werden, ob diese Messstellen voneinander linear unabhängig sind. Hierfür wird ein Gleichungssystem entwickelt, das für jeden Rollenträger die Seilkräfte mit den Dehnungen in Relation bringt.

Das Gleichungssystem für die reale Anwendung mit einer Halb- und einer Vollbrücke würde dann wie folgt lauten:

$$S_1 = c_{11} * DMS_1 + c_{12} * (DMS_2 - DMS_3)$$

$$S_2 = c_{21} * DMS_1 + c_{22} * (DMS_2 - DMS_3)$$

mit:

$S_1, S_2 \dots$	Zugkräfte am Seil1, bzw. Seil2
$DMS_1, DMS_2, DMS_3 \dots$	Mittelwerte der Dehnungen der Messstellen DMS_1, DMS_2 und DMS_3
$c_{11} \dots c_{22}$	Kalibrationswerte der DMS zur Umrechnung in Kräfte

Bei dem Gleichungssystem in der Auswertung werden die Messgitter DMS\_2 und DMS\_3 als eigenständige Halbbrücken angesehen. Dies ist gewollt, da somit die Abhängigkeit dieser Messgitter von einander mit überprüft werden kann.

Somit lautet das Gleichungssystem für die Simulation:

$$S_1 = c_{11} * DMS_1 + c_{12} * DMS_2 + c_{13} * DMS_3$$

$$S_2 = c_{21} * DMS_1 + c_{22} * DMS_2 + c_{23} * DMS_3$$

mit:

$S_1, S_2 \dots$	Zugkräfte am Seil1, bzw. Seil2
$DMS_1, DMS_2, DMS_3 \dots$	Mittelwerte der Dehnungen der Messstellen DMS_1, DMS_2 und DMS_3
$c_{11} \dots c_{23}$	Kalibrationswerte der DMS zur Umrechnung in Kräfte

Die Kalibrationswerte werden auf Grund der unterschiedlichen Bauform und Lage für jeden Rollenträger unterschiedlich sein. Zur Berechnung dieser Kalibrationswerte wird hier das Linear Least Square Estimation Verfahren (LLSE, zu Deutsch "Abschätzung durch kleinste Fehlerquadrate") verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass diese Messwerte fehlerbehaftet sind. Die Zahlenwerte der Dehnungen ( $DMS_1, DMS_2, DMS_3$ ) werden durch Mittelwertbildung der betreffenden Messpunkte aus der Simulation errechnet.

Somit ergibt sich folgendes Gleichungssystem, wenn alle Messstellen als Halbbrücken angesehen werden:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DMS_1 \\ DMS_2 \\ DMS_3 \end{pmatrix}$$

Da die Matrix  $c_{11} \dots c_{23}$  die Kalibrierungsmatrix des Seilkraftsensors darstellt, lässt sich diese Gleichung so umformen, dass alle Lastfälle integriert werden können:

$$\begin{pmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ S_{12} \\ S_{22} \\ S_{13} \\ S_{23} \\ S_{14} \\ S_{24} \\ S_{15} \\ S_{25} \\ S_{16} \\ S_{26} \\ S_{17} \\ S_{27} \\ S_{18} \\ S_{28} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} DMS_{11} & DMS_{21} & DMS_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DMS_{11} & DMS_{21} & DMS_{31} \\ DMS_{12} & DMS_{22} & DMS_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DMS_{12} & DMS_{22} & DMS_{32} \\ DMS_{13} & DMS_{23} & DMS_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DMS_{13} & DMS_{23} & DMS_{33} \\ DMS_{14} & DMS_{24} & DMS_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DMS_{14} & DMS_{24} & DMS_{34} \\ DMS_{15} & DMS_{25} & DMS_{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DMS_{15} & DMS_{25} & DMS_{35} \\ DMS_{16} & DMS_{26} & DMS_{36} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DMS_{16} & DMS_{26} & DMS_{36} \\ DMS_{17} & DMS_{27} & DMS_{37} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DMS_{17} & DMS_{27} & DMS_{37} \\ DMS_{18} & DMS_{28} & DMS_{38} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DMS_{18} & DMS_{28} & DMS_{38} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{21} \\ c_{22} \\ c_{23} \end{pmatrix} + \epsilon$$

oder:

$$y = X\beta + \epsilon$$

mit:

$y$	n-mal-1 Vektor der Seilkräfte
$X$	Designmatrix des Modells
$\beta$	6m-mal-1 Vektor der Kalibrationswerte
$\epsilon$	n-mal-1 Vektor der Fehler

Die Lösung mit Hilfe der LLSE-Methode ist ein Vektor  $b$ , der den Kalibrierkoeffizienten  $\beta$  abschätzt. Somit ergibt sich die folgende Gleichung:

$$(X^T X) b = X^T y$$

mit:

$X^T$	Transponierte Designmatrix des Modells
-------	--

Aufgelöst nach  $b$  ergibt sich somit:

$$b = \frac{X^T}{(X^T X)} y$$

Diese Umformung ist aber nur für Matrizen  $(X^T X)$  gültig, die nicht singular sind. Des Weiteren führt eine Inversion einer beinahe singulären Matrix  $(X^T X)$  zu hohen numerischen Fehlern und ist somit unakzeptabel.

Der somit errechnete Koeffizient  $b$  kann in das Modell eingesetzt werden um die Seilkräfte abzuschätzen:

$$\hat{y} = Xb = X \frac{X^T}{(X^T X)} y$$

Die Näherungsfehler (Residuen) lassen sich dann einfach als Subtraktion der Lösung  $\hat{y}$  von den Vorgabewerte  $y$  errechnen:

$$r = y - \hat{y}$$

mit:

$r$	Näherungsfehler der LLSE-Berechnung
-----	-------------------------------------

Diese letzte Berechnung ist bei der Analyse der Messwerte in Kapitel 5.2 von Bedeutung um die Messgenauigkeit zu bestimmen.

Die Berechnung dieses Verfahrens wird an Hand eines Matlab-Programmes ausgeführt, welches im Anhang\_6 abgebildet ist. Das Programm öffnet die Ergebnisdatei der Simulation (\*.rpt) und sucht nach bestimmten Schlagwörtern, um die Messwerte der Messstellen herauszulesen. Aus diesen Werten werden die entsprechenden Mittelwerte für die Dehnungen an den Messstellen errechnet und das LLSE durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in zwei Dateien abgespeichert. Die Datei "XXXX\_3x8\_3\_output\_YYYY.txt"<sup>14</sup> beinhaltet die Dehnungsmatrix der DMS, die Kalibrierungsmatrix und die Konditionszahl<sup>15</sup> der Kalibrierungsmatrix.

<sup>14</sup>Anmerkung zur Namensgebung: "XXXX" steht hier für den Namen der Simulation; "YYYY" für das Datum der Auswertung in Matlab)

<sup>15</sup>Die Konditionszahl stellt ein Maß für die Abhängigkeit der Lösung eines Problems von der Störung der Eingangsdaten dar; sie beschreibt den Faktor, um den der Eingangsfehler im ungünstigsten Fall verstärkt wird.[17]

Lastfall / Dehnung	DMS_1	DMS_2	DMS_3
Lastfall I	3.6611199e-004	2.8886200e-004	2.0302440e-004
Lastfall II	2.7338365e-004	2.7105735e-004	2.4637756e-004
Lastfall III	4.6149451e-004	3.0724580e-004	1.6012400e-004
Lastfall IV	2.3077976e-004	1.5336110e-004	7.9907100e-005
Lastfall V	1.3669185e-004	1.3552869e-004	1.2318881e-004
Lastfall VI	7.0013480e-004	5.2755285e-004	3.7745050e-004
Lastfall VIII	2.9657381e-004	2.7554144e-004	2.3555685e-004
Lastfall VIII	7.9907100e-005	1.8488323e-003	1.0818602e-003
Max	7.0013480e-004	1.8488323e-003	1.0818602e-003

Kalibrierungsmatrix 

-5.2085647e+003	-1.8594319e+003
2.5818275e+005	-5.5118246e+004

Konditionszahl 

9.0878669
-----------

**Tab. 11:** Matlab-Ergebnisse der Simulation am Beispiel des RTO

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Analyse am Beispiel des RTO. Der erste Block beschreibt die Dehnungsmatrix, dabei repräsentiert jede Zeile einen Spannungsfall (1 - 8). Die Spalten zeigen die Simulationsergebnisse der Dehnung an den Messstellen ( $DMS_1$ ,  $DMS_2$ ,  $DMS_3$ ). Der zweite Block beschreibt die Kalibrierungsmatrix. Die letzte Zahl (Konditionszahl) gibt eine wichtige Aussage über die Güte des aufgestellten Gleichungssystems. Bei einem Wert der Konditionszahl von "1" ergibt die Multiplikation der Messwerte  $X$  mit der Kalibrierungsmatrix  $\beta$  genau die Vorgabewerte  $y$ , was im Hinblick auf den Aufbau des Systems allerdings nicht erreicht werden kann.

Das Ergebnis dieser Simulationen und deren Auswertung lässt auf Grund der Konditionszahl Werte darauf schließen, dass die Gleichungssysteme zwar verkoppelt sind, diese aber mit Hilfe Kalibrierungsmatrix zur Abschätzung der Seilspannungen dienen können. Für eine genauere Auswertung der Seilspannungen sind aber Änderungen in der Geometrie der Rollenträger dringend empfohlen. Vorschläge zur Anpassung der Messstellen, basierend auf den Simulations- und Versuchsergebnissen werden in Kapitel 5.3 beschrieben.

## 4 Prüfstands Aufbau und Messprogramm

Mit Hilfe der in Kapitel 3.4 definierten Messstellen und gewählten Sensoren wird nun ein Prüfstand konstruiert, um die Funktionsweise des Messprinzips zu verifizieren. Zu diesem Zweck werden zwei Prüfstandsvarianten als Designstudie gezeigt. Die ausgewählte Variante wird anschließend auskonstruiert und als Basis der Messungen verwendet.

Der Aufbau des Prüfstandes soll einfach, leicht bedienbar und günstig sein. Er muss eine Aufnahme zur Befestigung der MICA sowie eine Apparatur zur Simulation der Seilkräfte beinhalten. Als Grundgerüste soll auf ITEM-Profile<sup>16</sup> zurückgegriffen werden, da diese leicht zu beschaffen, stabil und günstig sind.

### 4.1 Varianten des Prüfstands aufbaus

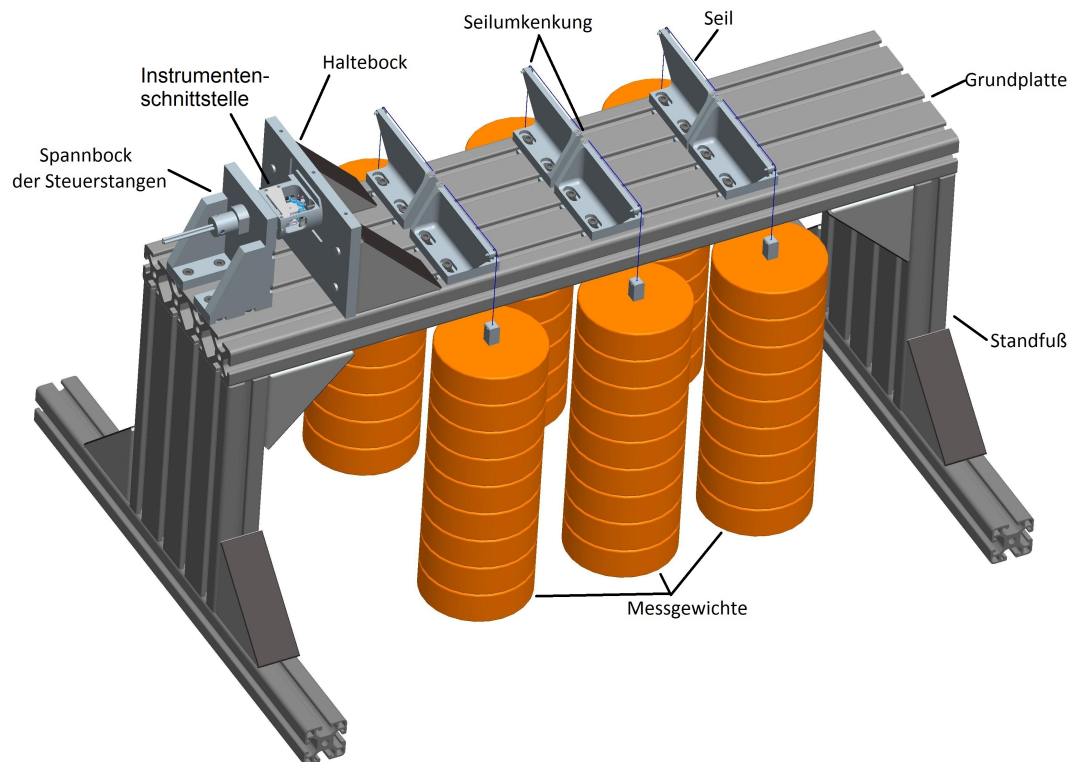
Es werden zwei Varianten des Prüfstandes zur Auswahl vorgestellt. Die erste Variante besteht aus einem horizontalen Aufbau, bei dem die Seilkräfte durch wechselbare Gewichte erzeugt werden. Die zweite Variante erzeugt die Seilkräfte mit Hilfe von Spannschlössern und erfasst diese Kräfte mit Hilfe von Federwaagen oder Kraftmessdosen. Diese Variante ist vertikal aufgebaut. Beide Varianten sollen auf einem Labortisch Platz finden.

---

<sup>16</sup>Das ITEM-Profil ist Teil eines Systembaukastens. Dieser bietet vielfältige Kombinationsmöglichkeiten zum Bau von Maschinen, Vorrichtungen und Anlagen. Das Grundsystem besteht aus Aluminiumprofilen, Verbindungstechnik und den zugehörigen Abdeckungen. Mit den Aluminiumprofilen lassen sich beliebige Konstruktionen sauber und schnell aufbauen.

#### 4.1.1 Variante 1: Horizontaler Aufbau mit Gewichten

Die erste Variante (Abbildung 34) besteht aus einer Grundplatte, die auf zwei Füßen montiert ist. Die Instrumentenschnittstelle ist an einem Haltebock befestigt. Die Seile werden mit Hilfe von Umlenkträgern nach rechts-unten bzw. links-unten geführt. An den Enden der Seile sind Gewichte montiert, welche die Seilspannung erzeugen.

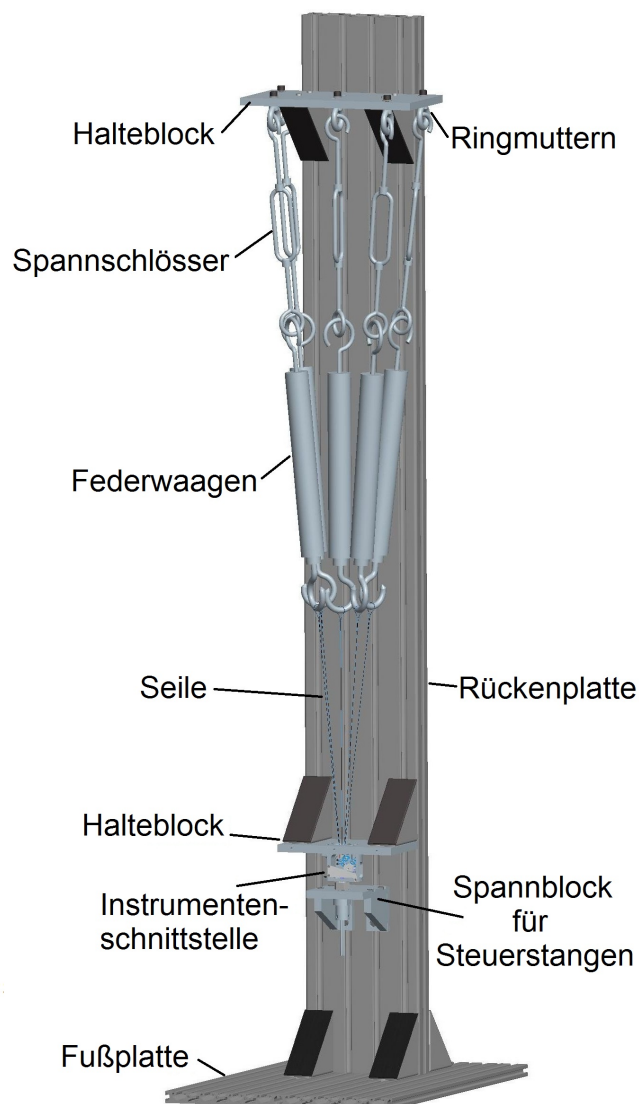


**Abb. 34:** CAD-Auszug des vertikalen Prüfstandsbaus mit gleichbelasteten Seilen (Variante 1)



#### 4.1.2 Variante 2: Vertikaler Aufbau mit Hilfe von Spannschlössern

Variante zwei (Abbildung 35) beschreibt einen vertikalen Aufbau, der mit Hilfe von Federwaagen oder Kraftmessdosen die Seilspannungen wiedergibt, die mit Hilfe von Spannschlössern eingestellt werden. Der Aufbau besteht aus einer Rückenplatte, auf der zwei Halteböcke montiert sind. Der untere Haltebock dient zur Aufnahme der Instrumentenschnittstelle, der obere zum Anbringen von Ringmuttern, an welchen Spannschlösser montiert sind. Die Seile werden mit Hilfe dieser Spannschlösser mit einer definierten Zugkraft beaufschlagt. Die Messung dieser Zugkraft geschieht über die zwischen den Spannschlössern und Seilen angebrachten Federwaagen oder Kraftmessdosen.



**Abb. 35:** CAD-Auszug des senkrechten Prüfstandsbaus mit Federwaagen (Variante 2)

### **4.1.3 Auswahl der Variante**

Für die Messung der Seilspannungen wird im Folgenden die Variante 2 verwendet. Die Entscheidung für Variante 2 und gegen Variante 1 fällt auf Grund des verhältnismäßig großen Fertigungsaufwandes (Gewichte, Umlenkträger, Seilhalter). Bei der Variante 2 besteht der Aufbau, bis auf die Aufnahmen der Instrumentenschnittstelle und der Ringmuttern aus Zukaufteilen. Weiterhin weist die Variante 1 mit Messgewichten eine hohe Gesamtmasse auf. Die Masse der Gewichte allein beträgt bereits 96 kg, wenn alle Seile maximal belastet werden. Dieses hohe Gewicht erhöht die Gefahr von Verletzungen.

## **4.2 Konstruktion des Prüfstands**

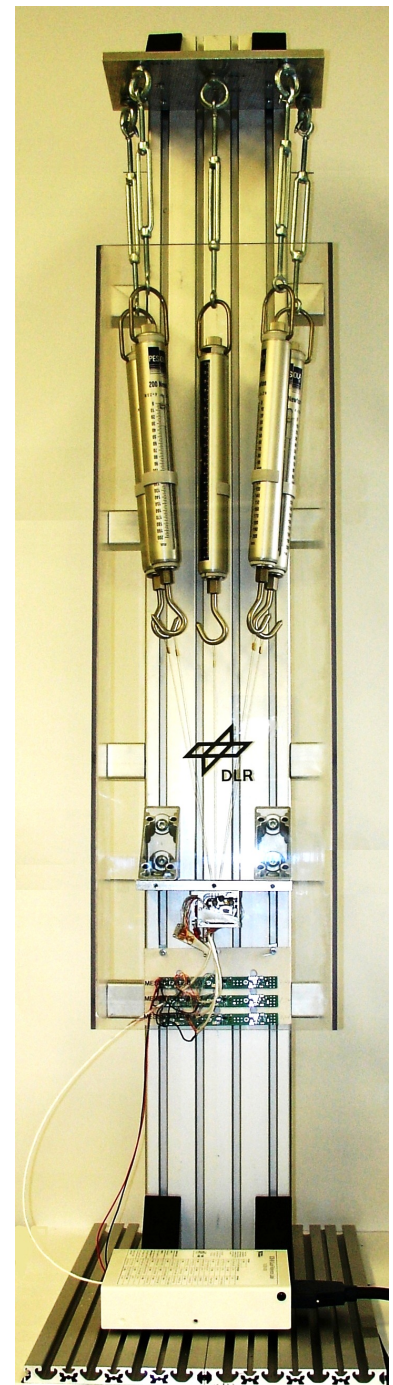
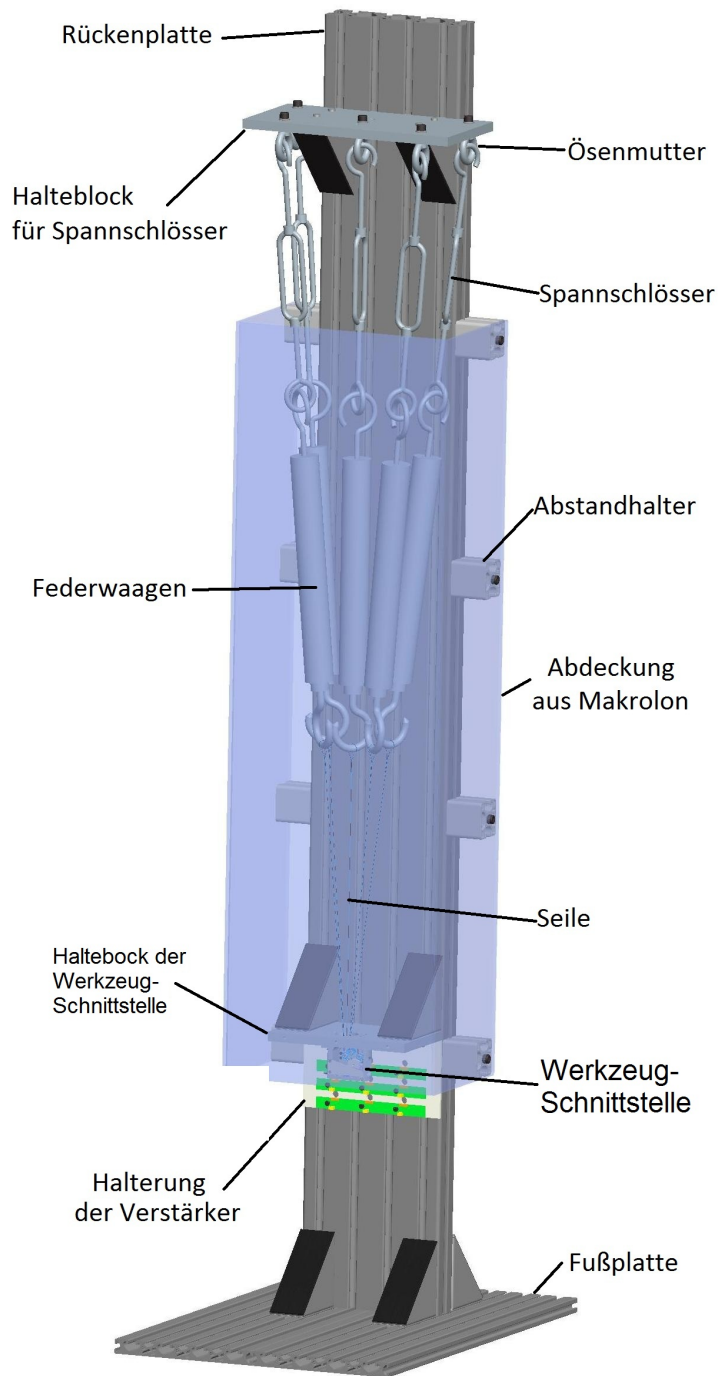
Die aus Kapitel 4.1 hervorgegangene Prüfstandsvariante (Variante 2: Senkrechter Aufbau mit Spannschlössern) wird nun als fertige Konstruktion vorgestellt. Die mechanischen Bauteile sind im Anhang 6 in zwei Stücklisten aufgeführt (Kaufteile und zu fertigende Teile). Eine weitere Stückliste beinhaltet die elektrischen Bauteile, Kabel und DMS sowie die zur Anbringung der DMS benötigten Materialien. Alle Stücklisten sind zusammen mit den Konstruktionszeichnungen im Anhang 6 zu finden.

### **4.2.1 Mechanischer Aufbau des Prüfstands**

Die Konstruktion des Prüfstands wird, wie in Kapitel 4.1.2 bereits vorgestellt, ausgeführt und erweitert. Auf Grund der hohen Kosten für Kraftmessdosen wird die ausgewählte Variante des Prüfstands mit Federwaagen ausgestattet. Die eingesetzten Federwaagen der Firma Pesola sind auf einen Messbereich von 2N - 200N ausgelegt und besitzen eine Skala mit einer Hauptteilung von 2N oder 2,5N und sind, wenn nötig, eichfähig. Somit sind sie für die folgenden Messungen technisch absolut ausreichend.

Des Weiteren kann auf den Spannblock der Steuerstangen, der die Schwenker in der Nulllage fixieren soll, verzichtet werden. Die Schwenker werden mit Hilfe eines Passstiftes im Gehäuse fixiert, was zu einer weiteren Vereinfachung der Konstruktion und Verringerung des Fertigungsaufwands führt. Zur Aufnahme der Messelektronik ist eine Kunststoffplatte vorgesehen und an das ITEM-Profil der Rückenplatte montiert. Aus Arbeitsschutzgründen umschließt eine Makrolon-Einhausung die Konstruktion. Diese verhindert bei einem Versagen der Seile ein Austreten von Splintern, Seilen oder anderen Bauteilen. Außerdem sind die Haken der Spannschlösser mit Sicherungsdraht versehen, um ein ungewolltes Aushängen zu verhindern.

Daraus ergibt sich der Prüfstand, wie in Abbildung 36 zu sehen (links als CAD-Auszug, rechts als Foto).



**Abb. 36:** Abbildung des Prüfstands  
 (links CAD-Auszug, rechts Foto)

## **Basiskonstruktion**

Fußplatte:	2x ITEM-Profil (Profil 8, 160x16, Länge 500mm)
Rückenplatte:	1x ITEM-Profil (Profil 8, 160x40, Länge 1400mm)
Winkelemente:	4x ITEM Winkelsatz (Winkelsatz Profil 8, 80x80)

## **Halteböcke**

Die beiden Halteblöcke bestehen ebenfalls aus Winkelementen der Firma ITEM sowie aus Aluminiumplatten. Die Fertigung der Halteplatten wird durch die institutseigene Werkstatt durchgeführt.

Halteblock der Instr.-schnittstelle:	1x Aluminiumplattenmaterial (AlCuMgPb (F34), 160 x 100 x 10)
Halteblock für Spannschlösser:	1x Aluminiumplattenmaterial (AlCuMgPb (F34), 240 x 120 x 10)
Winkelemente:	4x ITEM Winkelsatz (Winkelsatz Profil 8, 80x80)

## **Spannmittel**

Ringmuttern	6x Ringmutter M6 DIN 580, Stahl, verzinkt
Spannschlösser	6x Spannschloss M6x80 mm, Vverzinkt
Federwaagen	6x PESOLA Präzisionsfederwaage Macro Line, 2 - 200N, d = 2N

## **Sicherheitseinhausung**

Die Sicherheitseinhausung besteht aus 5mm starken, durchsichtigen Polycarbonat-Platten (Macrolon / Lexan), die mit Hilfe von Cyanacrylat-Klebstoff (Sekundenkleber) miteinander verbunden sind. Zur Befestigung an den Prüfstand sind in den Seitenflächen vier Bohrungen ( $\varnothing$  10,1 mm) vorgesehen, in welchen die Zylinderköpfe der Befestigungsschrauben der Abstandhalter einrasten.

Front:	1x Polycarbonat-Platten (820 x 240 x 5)
Seite:	2x Polycarbonat-Platten (820 x 160 x 5)
Abstandhalter:	8x ITEM-Profil (Profil 8 40x40 leicht, Länge 40mm)

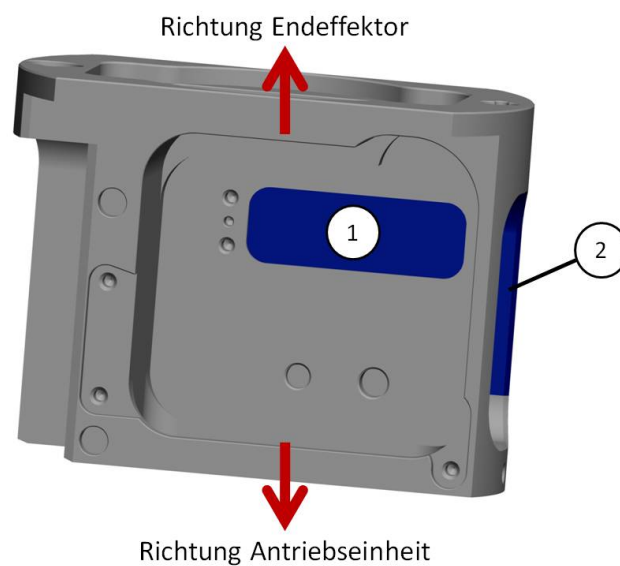
Eine Stückliste mit allen verwendeten Teilen ist zusammen mit allen benötigten Konstruktionszeichnungen im Anhang 6 zu finden.

#### 4.2.2 Veränderungen des Gehäuses der Werkzeugschnittstelle

Zur Anbringung der Messstellen werden kleinere Modifikationen an der Instrumentenschnittstelle des seilbetriebenen Instruments vorgenommen (Abbildung 37, blau markiert).

- 1 An der Grundfläche wird eine Tasche eingefräßt, um einen Kurzschluss des Gehäuses (Massepotential) mit den DMS und deren Kontaktflächen zu verhindern.
- 2 Die seitliche Öffnung des seilbetriebenen Instruments wird erweitert, um Platz für die anzubringenden Lötstützstellen an den Rollenträgern zu schaffen.

Diese geringfügigen Modifikationen können schnell in der institutseigenen Werkstatt durchgeführt werden.

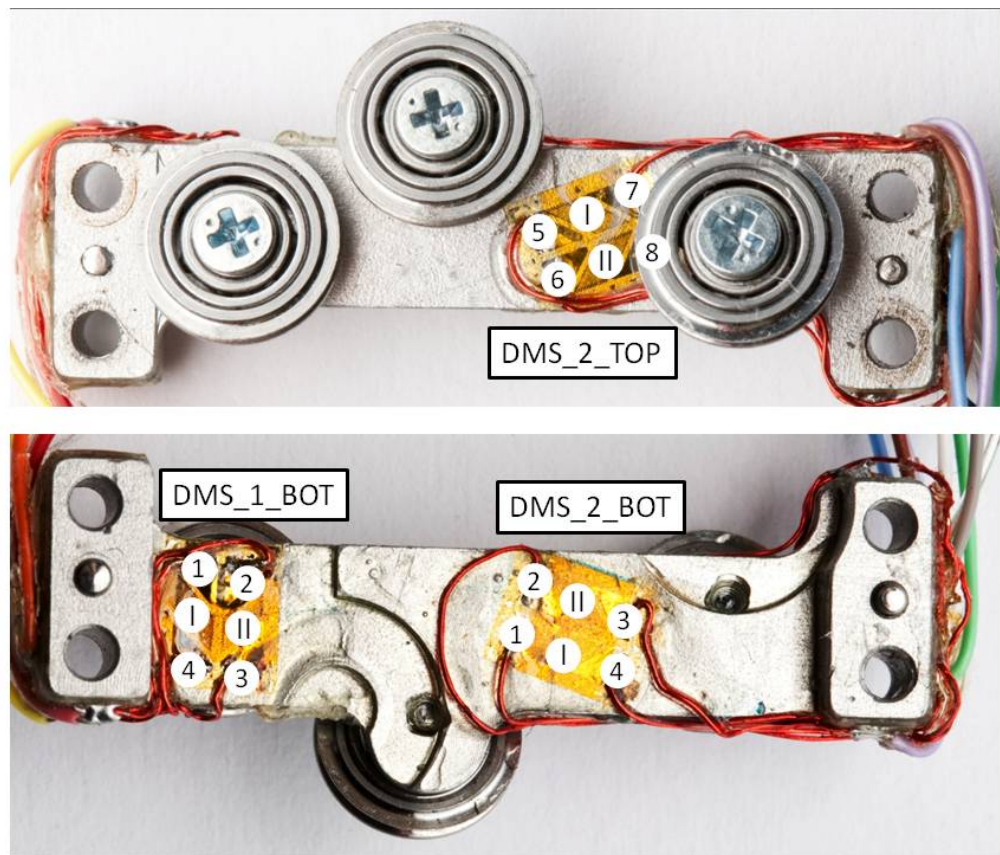


**Abb. 37:** Änderungen an der Instrumentenschnittstelle des seilbetriebenen Instruments

### 4.2.3 Aufbau der Elektronik

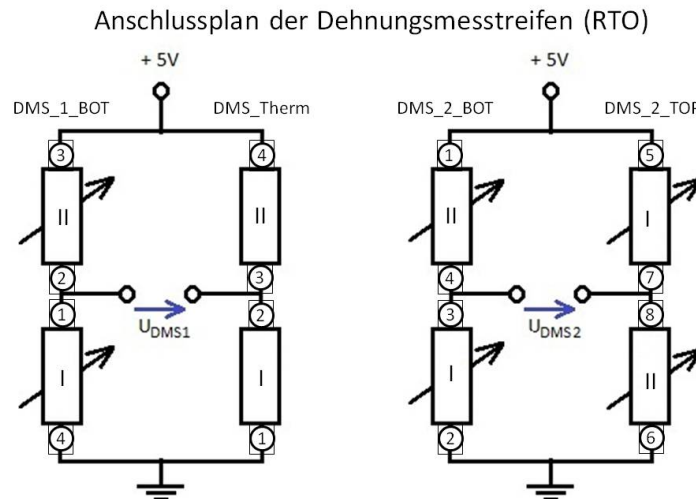
Für den Prüfstands Aufbau werden neben den DMS der Firma Vishay auch Lötstützstellen, geschirmte Messkabel und Verstärker benötigt. Lötstützstellen werden als Zugentlastung und zum Schutz der DMS verbaut. Die Verbindung der DMS mit den Lötstützstellen wird mit Hilfe von Lackdraht hergestellt. Die Montage der DMS und der Lötstützstellen auf den Rollenträgern wird hausintern von Herrn Benedikt Pleintinger ausgeführt. Die Datenblätter der hierfür verwendeten Chemikalien und Klebstoffe befinden sich im Anhang 6.

- DMS: Vishay (FAED-A6363M-35-S13E) (5 Stk. / Packung)
- Lötstützstellen: Micro Measurement (CEG-25C) bondable terminals (70 Stk. / Packung)
- Lackdraht: Micro Measurement (134-AWN-B) Single Conductor (50m / Spule)
- Messkabel: Vishay (STC-32T12) 12-adriges, geschirmtes Messkabel (50 m / Spule)



**Abb. 38:** Anschlussplan der DMS am Beispiel des RTO

Die DMS werden mit Hilfe einer Vollbrücken-Schaltung ausgewertet. Diese Verschaltung ermöglicht eine temperaturkompensierte Messung. Auf Grund der Platzverhältnisse kann nur die Messstelle DMS2 als Vollbrücke ausgelegt werden. Zur Ergänzung der Messstelle DMS1 werden im Gerät pro Rollenträger ein weiterer DMS angebracht (DMST). Abbildung 39 zeigt die elektrische Verschaltung der DMS.



**Abb. 39:** Abbildung der Verschaltung der DMS am Beispiel des RTO (links Messstelle DMS1, rechts Messstelle DMS2)

Zur Verstärkung der Brückenspannungen ( $U_{DMS1}$  und  $U_{DMS2}$ ) wird eine bereits erprobte Messschaltung verwendet, die die Spannungssignale der DMS um einen voreinstellbaren Wert verstärkt. Der Schaltplan des Messverstärkers, der Anschlussplan der DMS, sowie die Stückliste der benutzten elektrischen Bauteile befinden sich ebenfalls im Anhang 6.

Der Verstärkungsfaktor lässt sich an Hand der folgenden Formel errechnen:

$$U_{out} = G * U_{DMS} \rightarrow G = \frac{U_{out}}{U_{DMS}}$$

mit:

$U_{out}$ ...	Gewünschte Ausgangsspannung
$U_{DMS}$ ...	Eingangsspannung aus DMS-Messbrücke
$G$ ...	Verstärkungsfaktor

Die Spannung der DMS kann aus den erwarteten Spannungen berechnet werden. Hierfür benutzt man die Formel der Messbrückenschaltung:

$$U_{\text{DMS}} = U_{0\text{DMS}} * \frac{\Delta R}{R}$$

mit:

$U_{\text{DMS}} \dots$	Spannung der DMS Messbrücke
$U_{0\text{DMS}} \dots$	Versorgungsspannung der Messbrücke ( $U_{0\text{DMS}} = 5V$ )
$R \dots$	Ausgangswiderstand des DMS
$\Delta R \dots$	Widerstandsänderung des DMS durch Dehnung

Mit Hilfe der Gleichung  $\frac{\Delta R}{R} = K * \varepsilon$  aus Kapitel 2.2.2 kann die Veränderung des Widerstands  $\frac{\Delta R}{R}$  mit der Dehnung  $\varepsilon$  in Relation gebracht werden. Der Faktor  $K$  wird vom Hersteller der DMS bereitgestellt (hier  $K = 1,98$ ).

Daraus folgt:

$$U_{\text{DMS}} = U_{0\text{DMS}} * K * \varepsilon = 5V * 1,98 * \varepsilon$$

mit:

$U_{\text{DMS}} \dots$	Spannung der DMS Messbrücke
$U_{0\text{DMS}} \dots$	Versorgungsspannung der Messbrücke ( $U_{0\text{DMS}} = 5V$ )
$K \dots$	K-Faktor des DMS (hier $K = 1,98$ )
$\varepsilon$	Dehnung des Bauteils, erfasst durch den DMS

Dies setzt man nun in die erste Gleichung ein und erhält für die Verstärkung:

$$G = \frac{U_{\text{out}}}{5V * 1,98 * \varepsilon}$$

Der Messbereich für die spätere Messung beträgt  $0 - 5V$  daraus folgt  $U_{\text{out}} = 2,5V$  :

$$G = \frac{2,5V}{5V * 1,98 * \varepsilon}$$

Mit Hilfe dieses Ansatzes lässt sich nun aus den Simulationsergebnissen der Verstärkungsfaktor abschätzen. Die höchsten Werte der Dehnungen werden im Lastfall VI am RTU erreicht. Die gemessenen Dehnungen berechnen wie folgt:

$$\varepsilon_{\text{DMS}_2\text{DMS}_3} = \varepsilon_{\text{DMS}_2} - \varepsilon_{\text{DMS}_3} = 1,570 * 10^{-3} - (-0,575 * 10^{-3}) = 2,045 * 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{\text{DMS}_1} = -9,78 * 10^{-4}$$



Somit ergibt sich eine Verstärkung von:

$$G_{DMS_2 DMS_3} = \frac{2,5V}{5V * 1,98 * 2,045 * 10^{-3}} = 123$$

$$G_{DMS_2 DMS_3} = \frac{-2,5V}{5V * 1,98 * (-0,978) * 10^{-3}} = 258$$

Da in den Messungen nicht der Maximalwert der Simulationslasten von 160N eingestellt werden kann, wird die Verstärkung auf den Wert 200 eingestellt. Eine höhere Verstärkung würde den Messbereich zwar voll ausnutzen, kann aber dazu führen, dass unerwünschte Rauschsignale zu stark verstärkt und somit die Messsignale verfälscht werden.

### 4.3 Aufbau des Messprogramms

Zur Auswertung werden die analogen Messsignale mit einer Break-Out-Box (National Instruments SCB-86) an eine Messkarte von National Instruments (NI-6034 E) angeschlossen. Die Signale werden mit LabView 8.2 aufgezeichnet.

Abbildung 40 zeigt die grafische Oberfläche des entwickelten LabView-Programms. Der Benutzer gibt in der ersten Zeile die an den Seilen anliegenden Seilkräfte ein, in Zeile zwei den Namen der Ausgabedatei. Durch den Druck auf den Ausführen-Button (oben-links rot markiert) startet eine Einzelmessung. Das Programm überträgt die Messdaten in eine Excel Datei. Das Programm ist so konfiguriert, dass die Ausgabedatei nicht überschrieben wird, sondern die neuen Messdaten am Ende angefügt werden. Dies bietet dem Benutzer die Möglichkeit, mehrere Messungen nacheinander durchzuführen und in der gleichen Datei abzuspeichern. Die zwei Oszilloskop-Anzeigen in der Mitte zeigen die Messwerte (links ungefiltert, rechts gefiltert) an. Darunter befinden sich zwei Drehknöpfe, die die Auswahl eines bestimmten Messsignals ermöglichen. Sie sind redundant zu den Anzeigen in der letzte Zeile. Diese Anzeigen zeigen die elektrischen Spannungswerte, die in der Ausgabedatei abgespeichert werden, an.

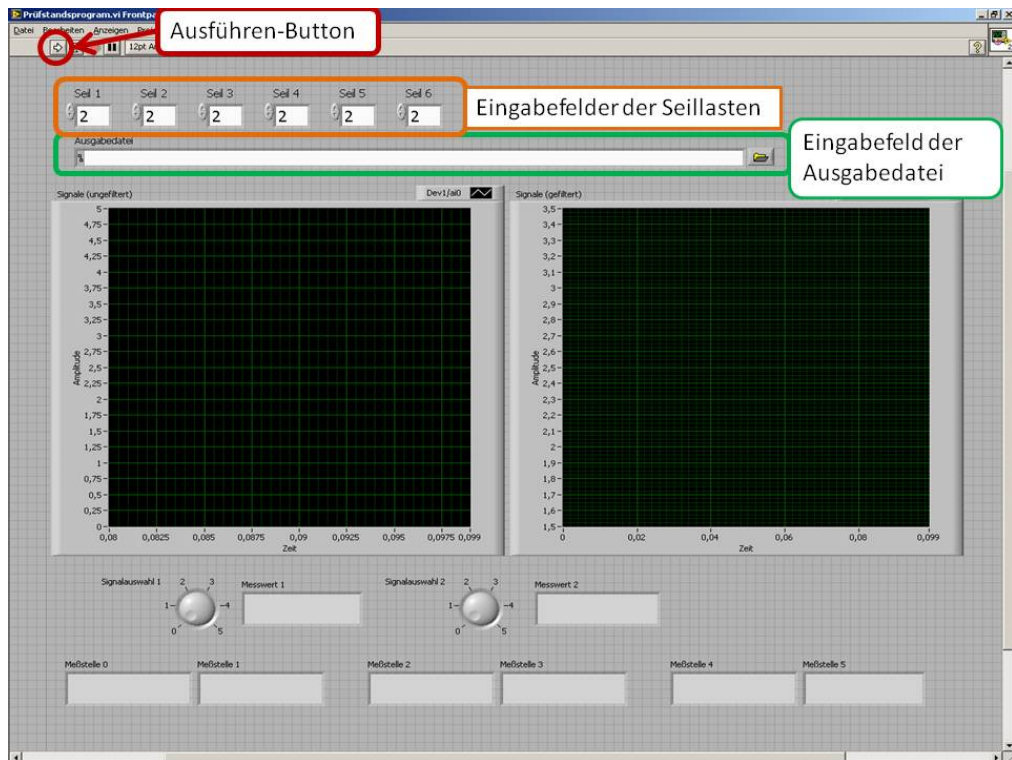


Abb. 40: Grafische Oberfläche des Prüfprogramms

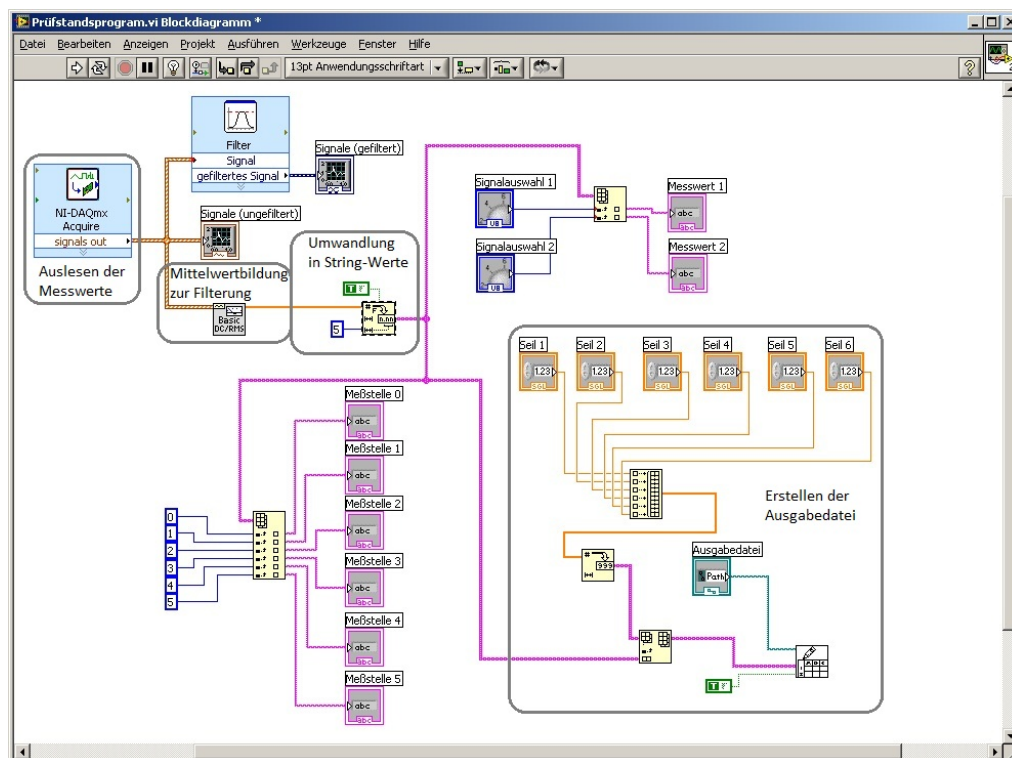


Abb. 41: Blockdiagramm des Prüfprogramms

In Abbildung 41 ist das Blockdiagramm des Prüfstandsprogramms zu sehen. Der linke Block übernimmt die Datenerfassung der an den Eingängen anliegenden Analogsignale (100 Signale werden pro Aktivierung erfasst). Der Datenstrom wird in drei verschiedene Abschnitte geleitet. Der obere Teil filtert den Datenstrom mit Hilfe eines Glättungsfilters und gibt dieses gefilterte Signal auf eine Oszilloskop-Anzeige aus (Signale (gefiltert)). Der mittlere Teil wird direkt als Oszilloskop ausgegeben (Signale (ungefiltert)). Diese beiden Anzeigen sind nur zur Veranschaulichung der Signale eingebaut. Der untere Teil wird mit Hilfe einer Mittelwertbildung (über alle erfassten Signale) gefiltert und in String-Werte umgewandelt. Nur diese Werte werden zusammen mit den Eingabewerten aus der grafischen Benutzeroberfläche in eine Excel-Datei übertragen. Der Name und der Pfad der Excel-Datei wird vom Benutzer eingegeben. Die anderen Bereiche des Blockschaltbildes sind zur Anzeige der Messwerte in der Oberfläche des Programms.

Die Excel-Datei, die durch das Messprogramm erstellt wird enthält somit die Vorgaben der Seilspannungen und die verstärkten Ausgangswerte der DMS-Messbrücken. Diese Werte werden danach in Messprotokolle kopiert, die im Anhang 6 zu finden sind.

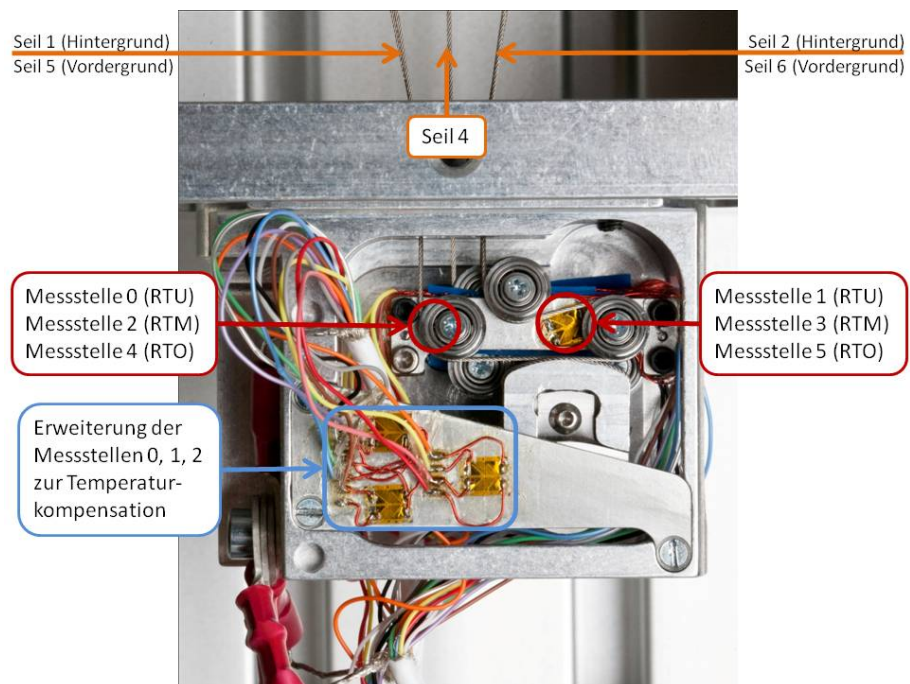
## 5 Messdatenerfassung und Analyse

Mit Hilfe der im Kapitel 4 beschriebenen Testanordnung (Prüfstand, Elektronik und Prüfstandsprogramm) werden nun verschiedene Prüfmuster durchlaufen. Es wird analysiert, ob durch die Messwerte der Sensoren die vorgegebenen Seilspannungen wiedergegeben werden können. Im Anschluss an diese Analyse werden Vorschläge für Veränderungen an der Hardware des seilbetriebenen Instruments vorgeschlagen, wodurch eine Erfassung der Seilspannungen weiter verbessert werden kann.

Für alle folgenden Analysen gelten die in Tabelle 12 beschriebenen Bezeichnungen.

Bezeichnung der Messgröße	Beschreibung
Messstelle 0	Linke Messstelle (DMS_1 erweitert mit DMS_T) des RTU
Messstelle 1	Rechte Messstelle (DMS_2) des RTU
Messstelle 2	Linke Messstelle (DMS_1 erweitert mit DMS_T) des RTM
Messstelle 3	Rechte Messstelle (DMS_2) des RTM
Messstelle 4	Linke Messstelle (DMS_1 erweitert mit DMS_T) des RTO
Messstelle 5	Rechte Messstelle (DMS_2) des RTO

**Tab. 12:** Erklärung der Messdatenbezeichnung



**Abb. 42:** Bezeichnung der Seile und Messstellen des seilbetriebenen Instruments

## 5.1 Messdatenerfassung

Um die Messdaten mit den Simulationsdaten vergleichen zu können, sollten bei den Messungen die gleichen Lastfälle wie in den Simulationen verwendet werden. Auf Grund eines Problems mit den Pressklemmen der Firma CarlStahl, die zur Befestigung der Seile an den Federwaagen benutzt werden, konnte aber nicht die maximale Belastung von 160 N erreicht werden. Die gelieferten Messingklemmen, die für die Seile vorgesehen waren, ließen sich nicht mit der zugehörigen Pressklemme so verpressen, dass die Seile fest umschlossen wurden. Die Analyse des Problems durch den Hersteller der Seile und der Pressklemmen und der Presszange (Firma CarlStahl) sollte bis zu vier Wochen dauern.<sup>17</sup> Eine solch lange Verzögerung kann nicht abgewartet werden. Aus diesem Grund werden die Hülsen auf andere Weise verpresst und die Maximallast an den Seilen heruntergesetzt.

Dies führte zu einer Änderung der Lastfälle für den Prüfstandsbetrieb. Das Augenmerk liegt nun mehr auf den möglichen Verkoppelungen der Messstellen untereinander, als auf der Wiedergabe der möglichen Lastfälle aus Kapitel 3.1. Somit werden für die Messungen neue Messreihen definiert.

- |              |   |
|--------------|---|
| Messreihe 1: | Belastung der einzelnen Seile eines Rollenträgers mit Lasten von 2 N (Nulllage) bis 100 N (Maximallast) in Schritten von 10 N |
| Messreihe 2: | Variierende Belastung aller Seile mit Lasten von 2 N bis 100 N  |
| Messreihe 3: | Dauerbelastung der Seile über einen längeren Zeitraum   |

Diese Messreihen versprechen eine gute Aussage über eine mögliche Verkopplung der Messstellen innerhalb eines Rollenträgers und zwischen den einzelnen Rollenträgern. Des Weiteren wird mit diesen Messreihen eine Aussage über die Messbarkeit der Seilspannungen mit diesem Messsystem erwartet.

---

<sup>17</sup>Ergebnis der Analyse durch CarlStahl: Das verwendete Verpresswerkzeug funktioniert tadellos, aber die gelieferten Messingklemmen lagen außerhalb des Toleranzbereichs. Analysen im Labor mit neuen Messingklemmen ergab, dass die Pressverbindung einer Zugkraft von 160N widerstehen kann, wenn zwei Messingklemmen hintereinander verwendet werden.

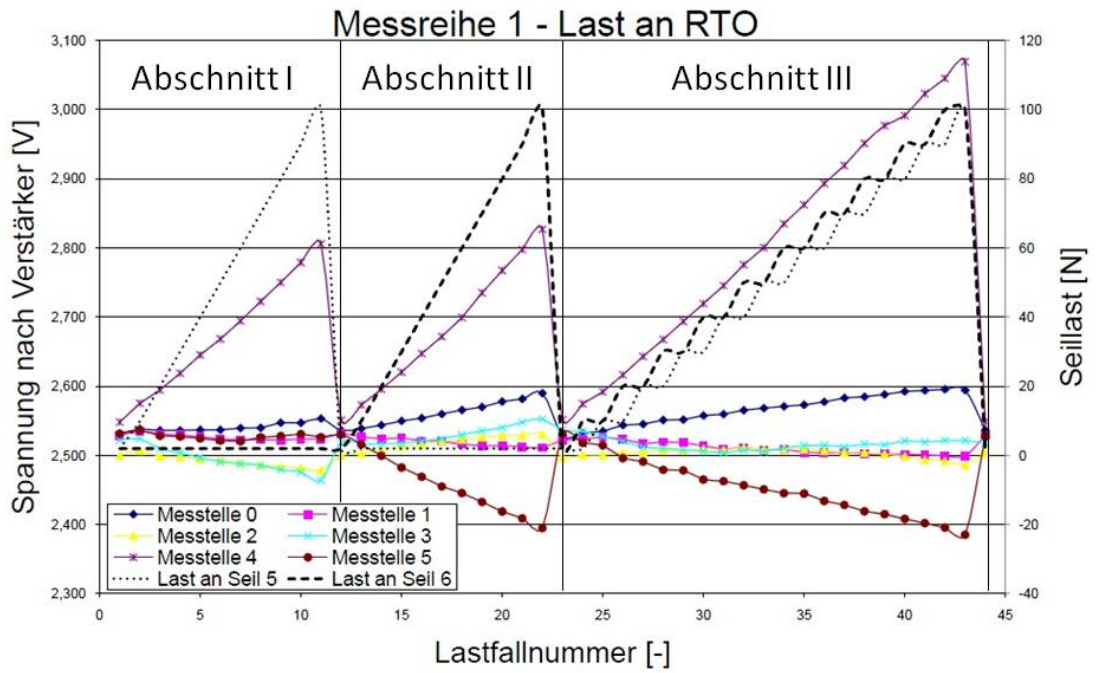
## **5.2 Messdatenanalyse**

Zur Analyse der Messdaten wird eine Modifikation des bereits im Kapitel 3.4.2 entwickelten Matlab-Programms verwendet. Dieses Programm ist so modifiziert, dass es die Messdaten aus den Messprotokollen ausliest und mit diesen Werten eine LLSE-Berechnung durchgeföhrt. Anschließend wird die errechnete Kalibrierungsmatrix verwendet, um aus den DMS-Spannungswerten Seilspannungen zu berechnen. Die somit berechneten Seilspannungen vergleicht das Programm anschließend mit den Vorgabewerten aus dem Messprotokoll. Die Abweichungen, die einen definierten Wert überschreiten, werden anschließend erfasst und ausgegeben. Somit kann eine Aussage über die Genauigkeit der Erfassung der Messwerte mit der entwickelten Sensorik getroffen werden. Ebenfalls wird die Kondition der Kalibrierungsmatrix ausgegeben, welche aber auf Grund von Messungenauigkeiten und Störeinflüssen in einem Bereich erwartet wird, der weit höher liegt, als die in den Simulationen errechneten Werte. Der Programmcode des MatLab-Programms befindet sich im Anhang\_6.

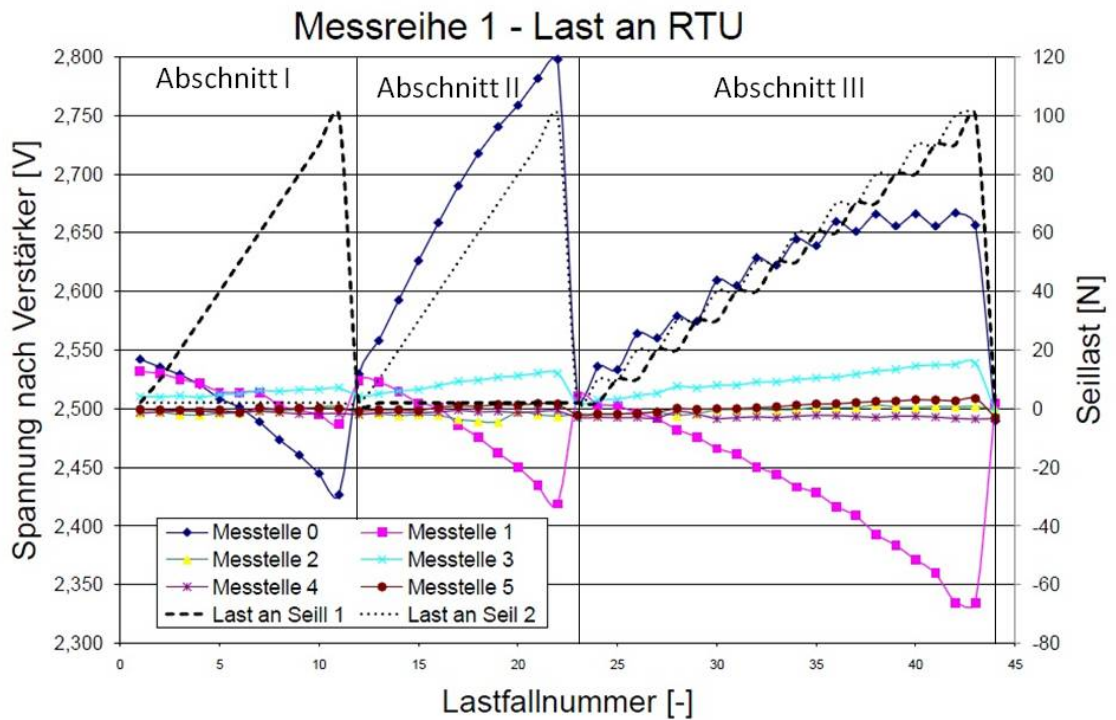
### **5.2.1 Messreihe 1: Belastung jeweils eines Rollenträgers mit wechselnden Lasten von 2N bis 100N**

Der Schwerpunkt der Messreihe 1 liegt in der Analyse der Verkopplung der Messstellen innerhalb eines Rollenträgers. Sie gibt auch gleichzeitig einen Eindruck über die Verkopplung der Rollenträger untereinander.

Die Seillasten (Tabelle 13 und Tabelle 14) werden, bei RTO und RTU, im ersten und zweiten Abschnitt erst am linken, dann am rechten Seil von 2N bis 100N in einer Schrittweite von 10N erhöht. Im dritten Abschnitt dieser Messreihen werden abwechselnd die Seillasten am rechten und linken Seil in der selben Schrittweite von 10N, bis zu einer Seillast von 100N, erhöht (Abbildung 43). Am RTM wird hier nur am Seil 4 eine Last angelegt, da hier auch in der Realität nur ein Seil zum Schließen des Greifers benötigt wird (Abbildung 45).



**Abb. 43:** Messreihe 1 Belastung an RTO

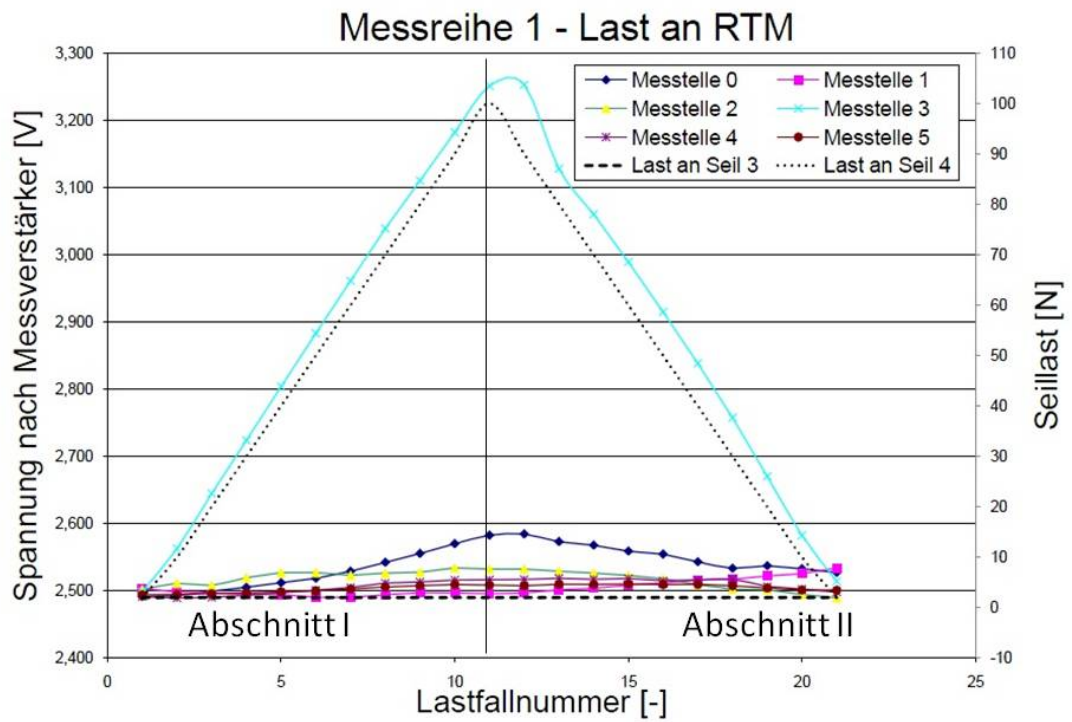


**Abb. 44:** Messreihe 1 Belastung an RTU

Abschnitt	Lastfall	RTO						RTU					
		Seil						Seil					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
I	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
I	2	2	2	2	2	10	2	10	2	2	2	2	2
I	3	2	2	2	2	20	2	20	2	2	2	2	2
I	4	2	2	2	2	30	2	30	2	2	2	2	2
I	5	2	2	2	2	40	2	40	2	2	2	2	2
I	6	2	2	2	2	50	2	50	2	2	2	2	2
I	7	2	2	2	2	60	2	60	2	2	2	2	2
I	8	2	2	2	2	70	2	70	2	2	2	2	2
I	9	2	2	2	2	80	2	80	2	2	2	2	2
I	10	2	2	2	2	90	2	90	2	2	2	2	2
I	11	2	2	2	2	100	2	100	2	2	2	2	2
II	12	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
II	13	2	2	2	2	2	10	2	10	2	2	2	2
II	14	2	2	2	2	2	20	2	20	2	2	2	2
II	15	2	2	2	2	2	30	2	30	2	2	2	2
II	16	2	2	2	2	2	40	2	40	2	2	2	2
II	17	2	2	2	2	2	50	2	50	2	2	2	2
II	18	2	2	2	2	2	60	2	60	2	2	2	2
II	19	2	2	2	2	2	70	2	70	2	2	2	2
II	20	2	2	2	2	2	80	2	80	2	2	2	2
II	21	2	2	2	2	2	90	2	90	2	2	2	2
II	22	2	2	2	2	2	100	2	100	2	2	2	2
III	23	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
III	24	2	2	2	2	2	10	2	10	2	2	2	2
III	25	2	2	2	2	10	10	10	10	2	2	2	2
III	26	2	2	2	2	10	20	10	20	2	2	2	2
III	27	2	2	2	2	20	20	20	20	2	2	2	2
III	28	2	2	2	2	20	30	20	30	2	2	2	2
III	29	2	2	2	2	30	30	30	30	2	2	2	2
III	30	2	2	2	2	30	40	30	40	2	2	2	2
III	31	2	2	2	2	40	40	40	40	2	2	2	2
III	32	2	2	2	2	40	50	40	50	2	2	2	2
III	33	2	2	2	2	50	50	50	50	2	2	2	2
III	34	2	2	2	2	50	60	50	60	2	2	2	2
III	35	2	2	2	2	60	60	60	60	2	2	2	2
III	36	2	2	2	2	60	70	60	70	2	2	2	2
III	37	2	2	2	2	70	70	70	70	2	2	2	2
III	38	2	2	2	2	70	80	70	80	2	2	2	2
III	39	2	2	2	2	80	80	80	80	2	2	2	2
III	40	2	2	2	2	80	90	80	90	2	2	2	2
III	41	2	2	2	2	90	90	90	90	2	2	2	2
III	42	2	2	2	2	90	100	90	100	2	2	2	2
III	43	2	2	2	2	100	100	100	100	2	2	2	2

**Tab. 13:** Vorgabewerte der Messreihe 1 an RTO und RTU in N





**Abb. 45:** Messreihe 1 Belastung an RTM

Abschnitt	Lastfall	RTM Seil					
		1	2	3	4	5	6
I	1	2	2	2	2	2	2
I	2	2	2	2	10	2	2
I	3	2	2	2	20	2	2
I	4	2	2	2	30	2	2
I	5	2	2	2	40	2	2
I	6	2	2	2	50	2	2
I	7	2	2	2	60	2	2
I	8	2	2	2	70	2	2
I	9	2	2	2	80	2	2
I	10	2	2	2	90	2	2
I	11	2	2	2	100	2	2
II	12	2	2	2	100	2	2
II	13	2	2	2	90	2	2
II	14	2	2	2	80	2	2
II	15	2	2	2	70	2	2
II	16	2	2	2	60	2	2
II	17	2	2	2	50	2	2
II	18	2	2	2	40	2	2
II	19	2	2	2	30	2	2
II	20	2	2	2	20	2	2
II	21	2	2	2	10	2	2
II	22	2	2	2	2	2	2

**Tab. 14:** Vorgabewerte der Messreihe 1 an RTM in N

Die kompletten Messprotokolle sind im Anhang 6 zu sehen und werden mit Hilfe des vorbereiteten Matlab-Programms ausgewertet. Wie zu erwarten war, liegt der Wert der Konditionszahl der Kalibrierungsmatrix aus der Matlab-Berechnung weit über den Werten der Simulation.

Messreihe 1 RTO	Messreihe 1 RTM	Messreihe 2 RTU
$2,488 * 10^8$	$4,989 * 10^{10}$	$8,885 * 10^8$

**Tab. 15:** Vergleich der Konditionszahl der Messreihe 1

Dies kann mehrere Gründe haben.

1. Während der Messungen werden immer nur Seilkräfte eines Rollenträgers variiert. Somit sollten die Spannungswerte dieser Messstellen konstant bleiben. Durch Signalrauschen und Messungenauigkeiten verändern sich diese aber, trotz der Filterung durch Mittelwertbildung über 50 Signale kontinuierlich. Dies beeinflusst die Kondition negativ.
2. Durch Verformungen kommt es zu Berührungen zwischen den Rollenträgern und somit einer mechanischen Verkoppelung zwischen den Rollenträgern. Somit wird der berührte Rollenträger mit einer zusätzlichen Größe beaufschlagt, die nicht in den Vorgabewerten vorhanden ist. Dies verschlechtert die Konditionierung der Kalibrierungsmatrix ebenfalls.
3. Die hohe Belastung des Materials führt zu einer plastischen Verformung, wodurch sich die Nulllage während der Messungen verändert. Somit kann die Messung nicht auf einen festen Nullpunkt definiert werden.

Die Analyse mit Matlab zeigt aber, dass die Spannungswerte der DMS-Messstellen voneinander unabhängig sind, da sonst der Wert des Konditionszahl-Ergebnisses als "INF" ausgegeben werden würde. Weiterhin zeigt die Analyse, dass die Umrechnung der Spannungswerte in Kräfte mit Hilfe der Kalibrierungsmatrix möglich, aber mit großen Fehlern behaftet ist.

### 5.2.2 Messreihe 2: Belastung aller Seile mit wechselnden Lasten von 2N bis 100N

Messreihe 2 soll zeigen, wie stark die Verkopplung zwischen den einzelnen Rollenträgern ist. Gleichzeitig soll die erste Vermutung 1 aus Unterkapitel 5.2.1 durch die Variation der Seilkräfte über alle Rollenträger hinweg untersucht werden.

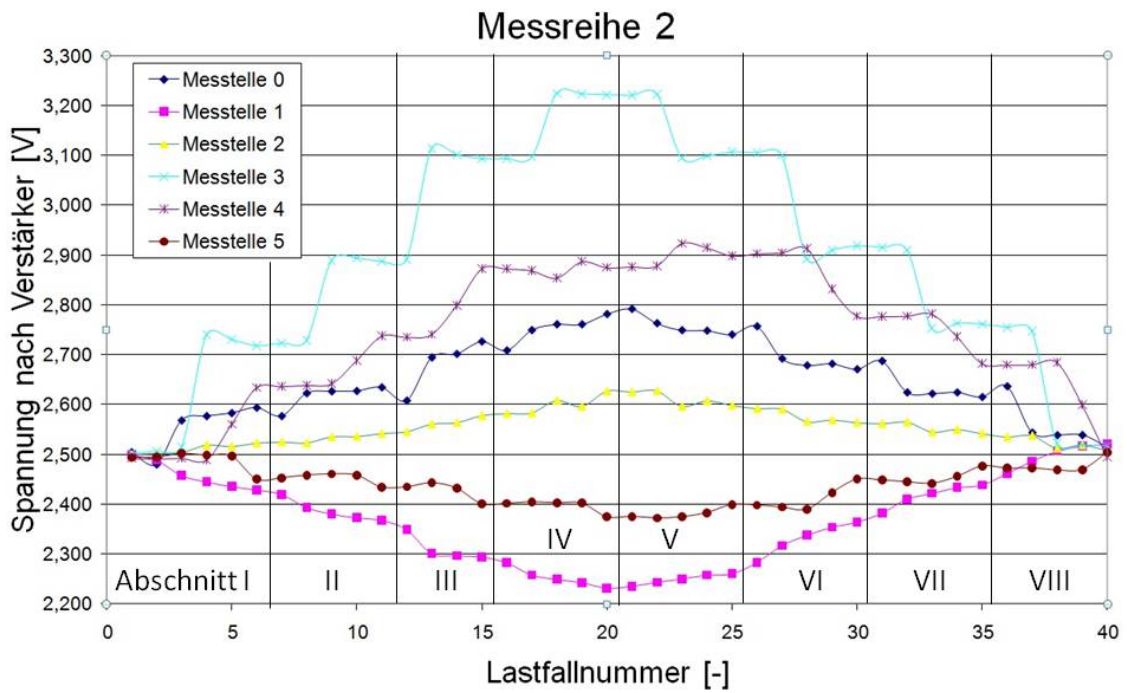
Bei dieser Messreihe wird ein Muster (Tabelle 17) für die anzulegenden Kräfte verwendet, bei dem immer genau eine Seilkraft verändert wird. Zur Verminderung des Messaufwands wird die Schrittweite hier verändert. Es werden Kräfte von 2N, 30N, 50N, 80N und 100N an jedes Seil angelegt. Die so entstandene Messkurve ist in Abbildung 46 zu sehen.

Die Ergebnisse dieser Messungen bestätigen den Verdacht, dass die Rollenträger untereinander mechanisch verkopfelt sind. Dies ist am besten an Messstelle 1 zu erkennen. Der Messwert dieser Messstelle verändert sich trotz der gleichbleibenden Last an den Seilen des Rollenträger\_unten. Auch zeigt die Messstelle 3, dass die Messung der Seilspannungen mit dem entwickelten System möglich ist, da der Verlauf der Messwertkurve dem der Vorgabewerte der anliegenden Seile entsprechen.

Weiterhin ist nach Analyse durch das Matlab-Programm zu erkennen, dass sich der Konditionswert stark verbessert hat. Dies kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass nun über alle Rollenträger hinweg die Seilspannungen variiert werden, somit kann die Kalibrierungsmatrix weitaus genauer berechnet werden. Dennoch ist das Ergebnis dieser Analyse noch nicht zufriedenstellend, da der Konditionierungswert immer noch weit von dem optimalen Wert "1" abweicht. Darum soll mit Hilfe der dritten Messreihe und der Anfangs und Endwerte der Messreihen 1 und 2 eine dauerhafte Verformung ausgeschlossen werden.

Messreihe 2 $3,45 * 10^3$
------------------------------

**Tab. 16:** Konditionszahl der Messreihe 2



**Abb. 46:** Messkurve Messreihe 2

Abschnitt	Lastfall	Seil					
		1	2	3	4	5	6
I	1	2	2	2	2	2	2
I	2	30	2	2	2	2	2
I	3	30	30	2	2	2	2
I	4	30	30	2	30	2	2
I	5	30	30	2	30	30	2
I	6	30	30	2	30	30	30
II	7	50	30	2	30	30	30
II	8	50	50	2	30	30	30
II	9	50	50	2	50	30	30
II	10	50	50	2	50	50	30
II	11	50	50	2	50	50	50
III	12	80	50	2	50	50	50
III	13	80	80	2	50	50	50
III	14	80	80	2	80	50	50
III	15	80	80	2	80	80	50
IV	16	100	80	2	80	80	80
IV	17	100	100	2	80	80	80
IV	18	100	100	2	100	80	80
IV	19	100	100	2	100	100	80
...	...	...	...	...	...	...	...

**Tab. 17:** Auszug der Vorgabewerte der Messreihe 2 N

### 5.2.3 Messreihe 3: Dauerbelastung aller Seile mit einer Messlast von 100N

Schließlich soll mit Hilfe der Messreihe 3 überprüft werden, ob sich die durch die Seilspannung belasteten Bauteile bleibend verformen. Es wurden auch bei den vorangegangenen Messungen jeweils die Werte der Messspannungen vor und nach der Messung mit aufgezeichnet. Dies soll zusammen mit der Messreihe 3, die über einen längeren Zeitpunkt ausgeführt wird, eine plastische Verformung der Bauteile aufzeigen, falls diese vorhanden sein sollte.

Messstelle / Messreihe	Messreihe 1 RTO	Messreihe 1 RTM	Messreihe 1 RTU	Messreihe 2	Messreihe 3
Messstelle 0	-0,054V	0,038V	0,000V	0,016V	-0,017V
Messstelle 1	-0,028V	0,030V	-0,001V	0,019V	-0,015V
Messstelle 2	-0,004V	-0,012V	-0,002V	0,009V	0,014V
Messstelle 3	-0,011V	0,014V	-0,006V	0,012V	-0,0027V
Messstelle 4	-0,004V	0,008V	0,000V	0,003V	-0,013V
Messstelle 5	-0,005V	0,004V	-0,006V	0,008V	0,003V

**Tab. 18:** Abweichungen der Anfangs und Endwerte aller Analysen

Der Anfangswert der Messstellen weicht bei jeder Messreihe vom Endwert ab. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass es zu einer Veränderung an den Rollenträgern kommt. Ob diese Veränderung durch eine dauerhafte Verformung, Setzerscheinungen in Verschraubungen und an Lagerstellen oder durch eine Veränderung der Lage der Rollenträger im Gehäuse verursacht wird, kann nicht festgestellt werden.

### 5.2.4 Zusammenfassende Analyse

Die Messungen an den vorhandenen Messstellen haben gezeigt, dass eine Erfassung der Seilspannungen an diesen Bauteilen zwar möglich ist, aber mit den gegebenen Messkörpern keine definitive Aussage über die Höhe der Seilspannungen erfolgen kann. Die Gründe hierfür sind die mechanische Verkoppelung der Rollenträger untereinander durch die hohen Verformungen und die Verkoppelung der Messstellen innerhalb des Rollenträgers. Des Weiteren lassen die Messungen vermuten, dass sich die Messkörper dauerhaft verformen, was die Messgenauigkeit weiter negativ beeinflusst.

Darum wird hier eine Konstruktion vorgeschlagen, die mit wenigen Änderungen am inneren Aufbau des seilbetriebenen Werkzeugs der MICA eine Erfassung der Seilkräfte verbessern soll.

### **5.3 Vorschlag zur Verbesserung der Messdatenerfassung**

Für diese Konstruktion müssten Veränderungen an der Werkzeugschnittstelle des seilbetriebenen Instruments vorgenommen werden. Für die Änderungen im Gehäuse der Werkzeugschnittstelle müsste kein neues Bauteil gefertigt, sondern es kann das bestehende Gehäuse modifiziert werden. Die Veränderungen an den Rollenträgern bedingen eine Fertigung neuer Bauteile.

#### **5.3.1 Änderungen an den Rollenträgern der Werkzeugschnittstelle**

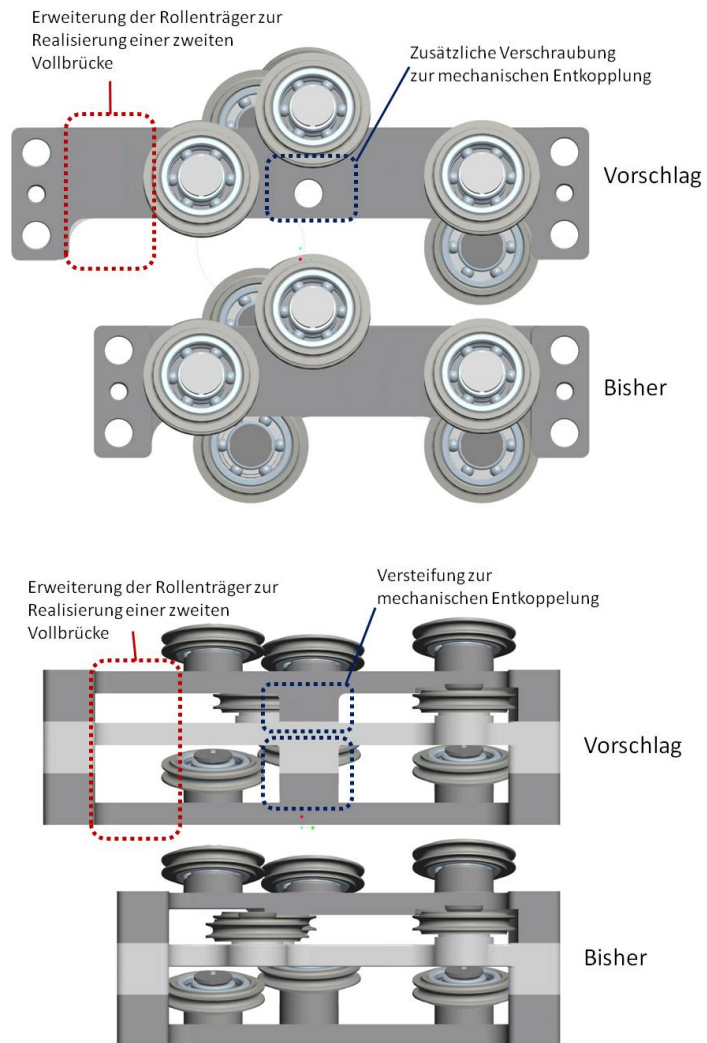
Die Optimierung der Rollenträger wird im Hinblick auf die Verkoppelung der Messstellen untereinander nötig. Die Messstellen beeinflussen sich durch die Übertragung der Verformungen zwischen den Umlenkpunkten. Deshalb wird dieser Bereich ausgesteift und zusätzlich mit dem Gehäuse verschraubt (Abbildung 47 (blau)). Des Weiteren werden die Rollenträger zur linken Seite hin verlängert, um für eine Vollbrücke Platz zu schaffen (Abbildung 47 (rot)). Zuletzt wird, zur Vereinfachung des Messsystems, eine Rolle und die linke Messstelle des RTM entfernt, da im bestehenden System kein zweites Seil zur Betätigung des Greifers benötigt wird. Für diese Umkonstruktion müssen somit die Rollenträger neu gefertigt werden.

#### **5.3.2 Änderungen am Gehäuse der Werkzeugschnittstelle**

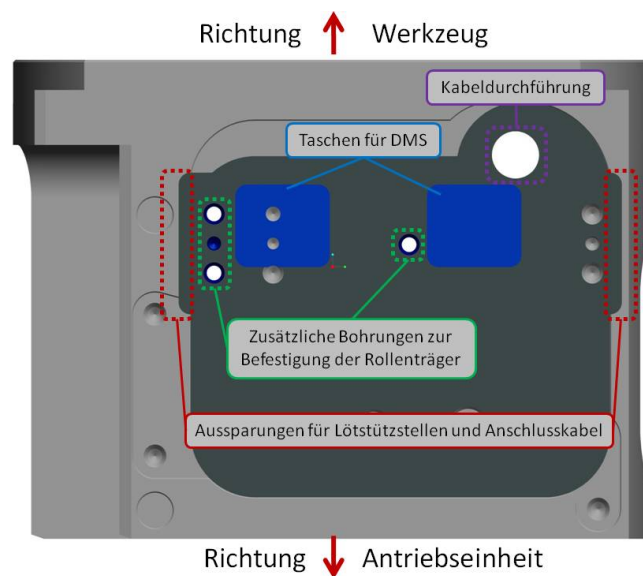
Das Gehäuse, in welchem die neuen Rollenträger eingebaut werden, muss auf die neuen Bedingungen angepasst sein. Es sind neue Bohrungen zur Befestigung der Rollenträger und der Passstifte zu setzen (Abbildung 48 (grün)). Des Weiteren ist die Innenkontur zu beiden Seiten zu erweitern (Abbildung 48 (rot)) und es sind zwei Taschen am Boden des Gehäuses nötig (Abbildung 48 (blau)), um eine elektrisch leitende Verbindung zwischen Kontaktstellen des DMS des RTU und dem Gehäuse zu verhindern. Zum Schluss wird eine weitere Bohrung am Boden eingefügt, um die elektrische Verbindung zwischen DMS und Verstärker herstellen zu können (Abbildung 48 (lila)).

#### **5.3.3 Änderungen in der Elektronik**

Die zur Messung verwendeten Messverstärker können in schon vorhandene Platinen integriert werden. Nach einer solchen Integration in bereits vorhandene Platinen wird sich die Kabellänge zwischen den DMS und den Verstärkern drastisch verkürzen, was den Einfluss von Störstrahlungen vermindert. Weiterhin kann ein Hardwarefilter am Eingang des Verstärkers ebenfalls den Einfluss der Störgrößen reduzieren. Abschließend sollte der Verstärkungsfaktor nochmals überdacht werden, er erscheint bei abschließende Betrachtung zu gering.



**Abb. 47:** Veränderungen an den Rollenträgern zur Optimierung



**Abb. 48:** Modifikationen der Instrumentenschnittstelle

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das medizinische Instrument MICA, welches als Basis dieser Abschlussarbeit dient, wird bei minimal invasiven robotergestützten Eingriffen eingesetzt. Bei diesen Eingriffen, wie bei allen chirurgischen Eingriffen, ist ein Höchstmaß an Präzision unerlässlich. Deshalb muss die Regelung solcher Systeme einwandfrei funktionieren. Um Regelabweichungen aufgrund von Elastizitäten und Reibung zu verhindern, müssen den Reglern Daten über das Systemverhalten übergeben werden. Da das aktuelle medizinische Instrument der MICA über Seilzüge aktuiert wird, ist eine genaue Kenntnis über die Zugkräfte und Vorspannungen der Seile von großer Bedeutung für die Regelung des Gesamtsystems. Die Erfassung dieser Seilspannungen innerhalb dieses am Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelten medizinischen Instruments MICA war das Ziel dieser Abschlussarbeit. Zu diesem Zweck wurde eine Auswahl von Messverfahren bewertet, die es ermöglichen, Zugkräfte in Seilen direkt oder indirekt zu detektieren. Die Analyse des inneren Aufbaus der Instrumentenschnittstelle zeigte mögliche Messpunkte, die sich zur Anbringung von Sensoren eignen. Auf Basis der Bewertung der Messmethoden und der Analyse möglicher Messstellen wurde ein Messsystem vorgeschlagen, das ohne größere Umbauten in das Instrument integriert werden kann. Die genaue Lage der Messstellen konnte mit Hilfe von Simulationen definiert werden. Für die Erprobung und Analyse des Messverfahrens auf Basis von Dehnungsmesstreifen ist ein Prüfstand konstruiert und aufgebaut worden. Die Messungen an diesem Prüfstand zeigten, dass es möglich ist, mit dem entwickelten Messsystem Rückschlüsse auf die Spannungen der Seile zu ziehen.

Jedoch zeigte sich bei den Analysen der Tests, dass weitere Veränderungen an der Werkzeugschnittstelle des seilbetriebenen Instrument und Tests nötig sind, um ein effektives Messsystem zu entwickeln, das die Seilspannungen mit ausreichender Genauigkeit erfassen kann. Im Anschluss an die Analyse der Messwerte wird eine Möglichkeit aufgezeigt, mit der durch geringfügige Änderungen am inneren Aufbau der Werkzeugschnittstelle die Messung der Seilspannungen mit Dehnungsmesstreifen deutlich verbessert werden kann.

Aufbauend auf diese Abschlussarbeit können mit Hilfe des entwickelten Prüfstandes weitere Analysen an den vorgeschlagenen Messstellen durchgeführt werden, um die Seilspannungen zu analysieren. Hierzu müssen lediglich die Rollenträger und, wenn nötig, das Gehäuse getauscht werden. Der Prüfstandsaufbau, das Messwerterfassungs- sowie das Analyseprogramm können für diese Aufgaben direkt übernommen werden.

Die Analyse der Seilspannungen in einem Komplettsystem kann ebenfalls mit diesem Prüfstand und dem neuen Messsystem durchgeführt werden. Hierzu wird nach Einbau der Messstellen in



ein komplettes System mit Motoreinheit der Endeffektor fixiert. Nun wird das Gelenk mit Hilfe der Motoreinheit über das Seilzugsystem vorsichtig aktuiert. Dadurch liefert der 7-Achs-Sensor im Endeffektor eine Rückmeldung über die am Endeffektor angreifenden Kräfte, die über das Gelenk mit den Seilkräften gekoppelt sind. Die Analyse der Seilspannungen kann dann als Vergleich zwischen der entwickelten Sensorik mit den Messwerten des 7-Achs-Sensors im Endeffektor durchgeführt werden.

Somit bieten das entwickelte Messsystem und der hierfür entwickelte Prüfstand eine gute Basis für Weiterentwicklungen zur Verbesserung der Regelbarkeit des Gesamtsystems durch die Messung und Analyse der Seilspannungen.

# Quellenverzeichnis

## Literatur

- [1] G. H. U. Seibold, B. Kuebler, "Prototypic force feedback instrument for minimally invasive robotic surgery," tech. rep., DLR (German Aerospace Center), Germany.
- [2] u. S. Thielmann, U. Seibold, "Mica - a new generation of versatile instruments in robotic surgery," tech. rep., DLR (German Aerospace Center), Germany.
- [3] Tecsis-GmbH, "Seilkraftaufnehmer," *Datenblatt Baureihe F9304*. [www.tecsis.de](http://www.tecsis.de).
- [4] Gloetzl-GmbH, "Schwingsaiten-stahldehnungsaufnehmer," *Datenblatt System Maihak*. [www.gloetzl.org](http://www.gloetzl.org).
- [5] G. Haberzettl, "Dehnungsmessstreifen (dms) für die feindehnungsmessung in der experimentellen spannungsanalyse," *Vishay Electronic GmbH*. [www.vishay.com](http://www.vishay.com).
- [6] I. B. B. u. K. Schoenleben, *Laparo-Endoskopische Chirurgie*. Hans Marseille Verlag GmbH, München, 1993.
- [7] U. u. Fischer, *Roche Lexikon Medizin*. Elsevier, München, 2007.
- [8] K.-H. Wehking, *Laufende Seile: Bemessung und Überwachung, 3. Auflage*. Expert Verlag, Renningen, 2005.
- [9] E. W. u. Suk-Woo Ha, *Medizintechnik, 4. Auflage*. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [10] J. Hoffmann, *Taschenbuch der Messtechnik, 5. Auflage*. Hanser Fachbuchverlag, München, 2007.
- [11] P. D. H. Ziegler, "Physikalische messtechnik b," tech. rep., Universität Paderborn.
- [12] K. Hoffmann, *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Druckerei Drach, Pfungstadt, 1987.
- [13] P. Giesecke, *Dehnungsmeßstreifentechnik*. Vieweg Verlagsgesellschaft, Wiesbaden, 1994.
- [14] P. Braun, "Einsatz von dms- und piezomeßtechnik zur direkten schubspannungsermittlung in der kapillarrheometrie," *Rheologica acta 1990 vol.29 No.3*. Springer Verlag, Berlin.
- [15] M. Kreuzer, "Dehnungsmessung mit faser-bragg-gitter-sensoren," tech. rep., HBM Darmstadt.

- [16] D.-I. H. E. Aurnhammer, *Verfahren zur Bestimmung von Wertminderungen bei (Bau-) Mängeln und (Bau-)Sachschäden*. Baurecht (BauR) , Heft 5, 1978.
- [17] P. D. u. A. Hohmann, *Numerische Mathematik I, 3. Auflage*. de Gruyter, Berlin, 2002.
- [18] A. Kern, *Entwicklung Haptischer Geräte*. Springer Verlag, Berlin, 1994.
- [19] S. Thielmann, "Antriebseinheit für ein robotergeführtes minimal invasives instrument," tech. rep., DLR (German Aerospace Center), Germany.

## **Anhang**

### **Anhang A: Simulationsparameter, Ergebnisse, Analysetool, Analyseergebnisse**

## **Anhang B: Prüfstandsaufbau, Stücklisten, Prüfstandsprogramm**

## **Anhang C: Messprotokolle, Analysetool**

## **Anhang D: Vorschlag einer verbesserten Variante**

mecbatch\_originaldesing.bat

@echo off

Echo ----- Start der Berechnung -----

REM Batch file written from:  
REM     Mechanica Structure L-01-51 - PTC (tm). 2006  
REM Tue May 04 08:58:31 2010

Echo ----- Design Study Name " RTO\_Analyse\_Originaldesign" -----

call "C:\Program Files\proewildfire 4.0\mech\bin\msengine.bat" "RTO\_Analyse\_Originaldesign" -i  
"D:\FH\BA\Pro\_E\_Daten\Rollentraeger\_Originaldesign" -w "D:\FH\BA\Pro\_E\_Daten\Rollentraeger\_Originaldesign" -solram 2048 -iter 2  
-modeltype mdb           -num\_threads ALL

REM Batch file written from:  
REM     Mechanica Structure L-01-51 - PTC (tm). 2006  
REM Tue May 04 09:03:31 2010

Echo ----- Design Study Name " RTM\_Analyse\_Originaldesign " -----

call "C:\Program Files\proewildfire 4.0\mech\bin\msengine.bat" "RTM\_Analyse\_Originaldesign" -i  
"D:\FH\BA\Pro\_E\_Daten\Rollentraeger\_Originaldesign" -w "D:\FH\BA\Pro\_E\_Daten\Rollentraeger\_Originaldesign" -solram 2048 -iter 2  
-modeltype mdb           -num\_threads ALL

REM Batch file written from:  
REM     Mechanica Structure L-01-51 - PTC (tm). 2006  
REM Tue May 04 09:06:45 2010

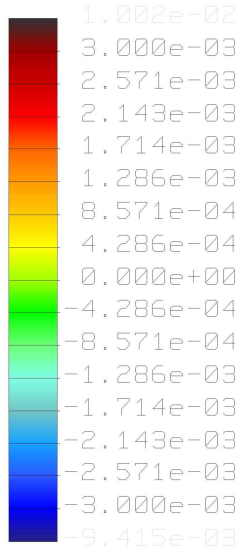
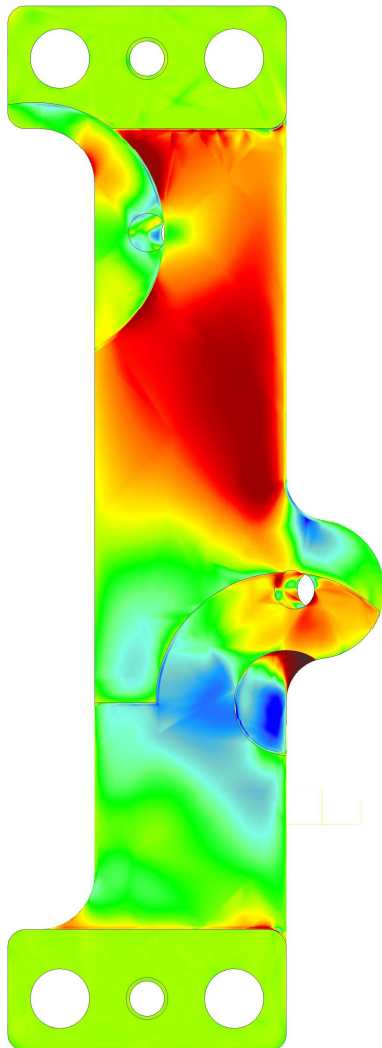
Echo ----- Design Study Name " RTU\_Analyse\_Originaldesign " -----

call "C:\Program Files\proewildfire 4.0\mech\bin\msengine.bat" "RTU\_Analyse\_Originaldesign" -i  
"D:\FH\BA\Pro\_E\_Daten\Rollentraeger\_Originaldesign" -w "D:\FH\BA\Pro\_E\_Daten\Rollentraeger\_Originaldesign" -solram 2048 -iter 2  
-modeltype mdb           -num\_threads ALL

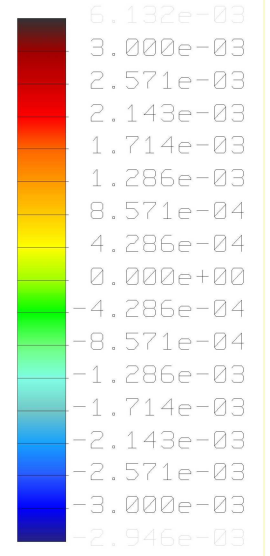
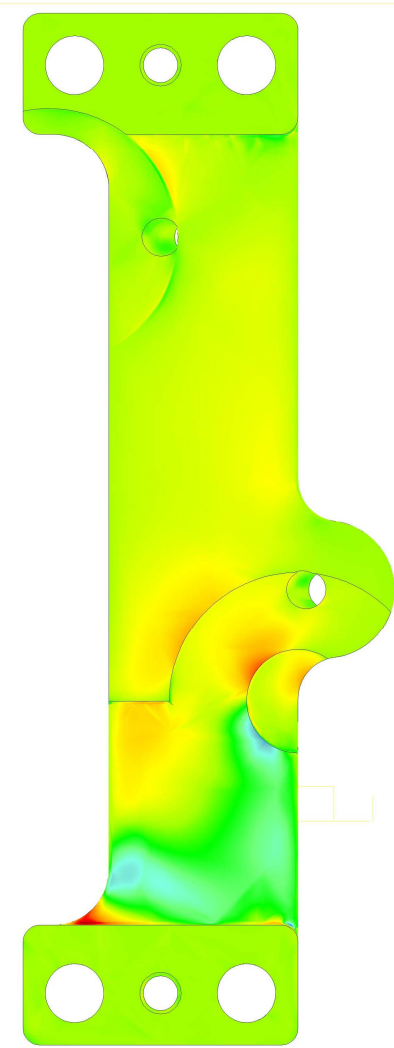
Echo ----- Berechnung abgeschlossen -----

@echo on

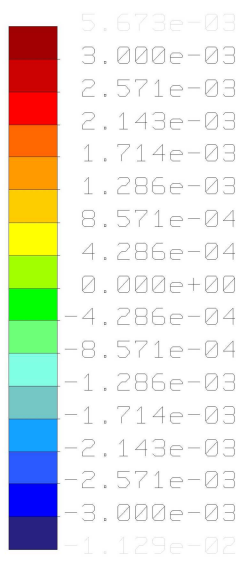
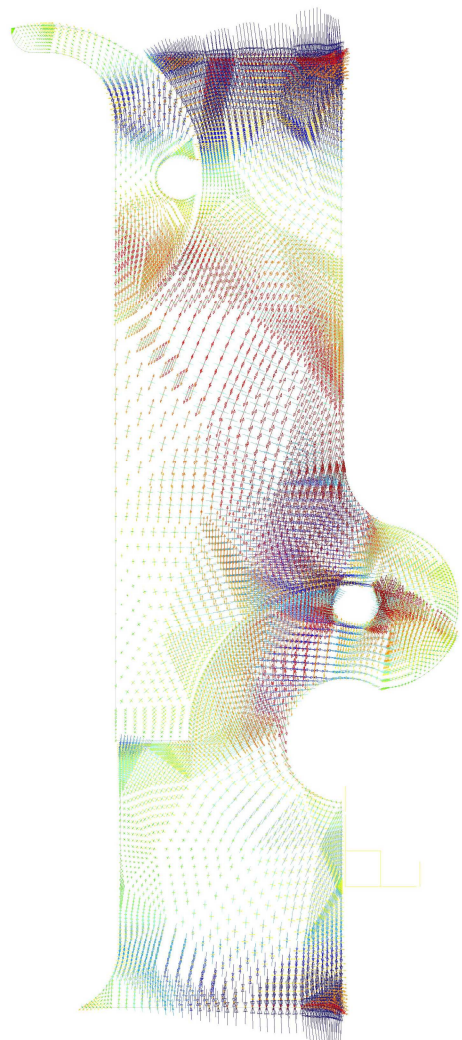




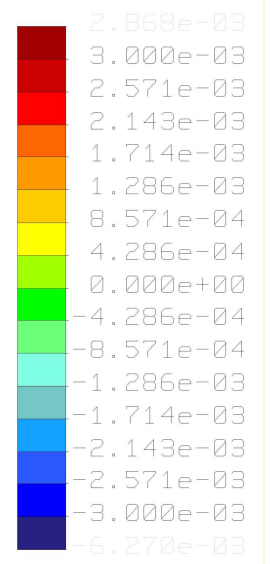
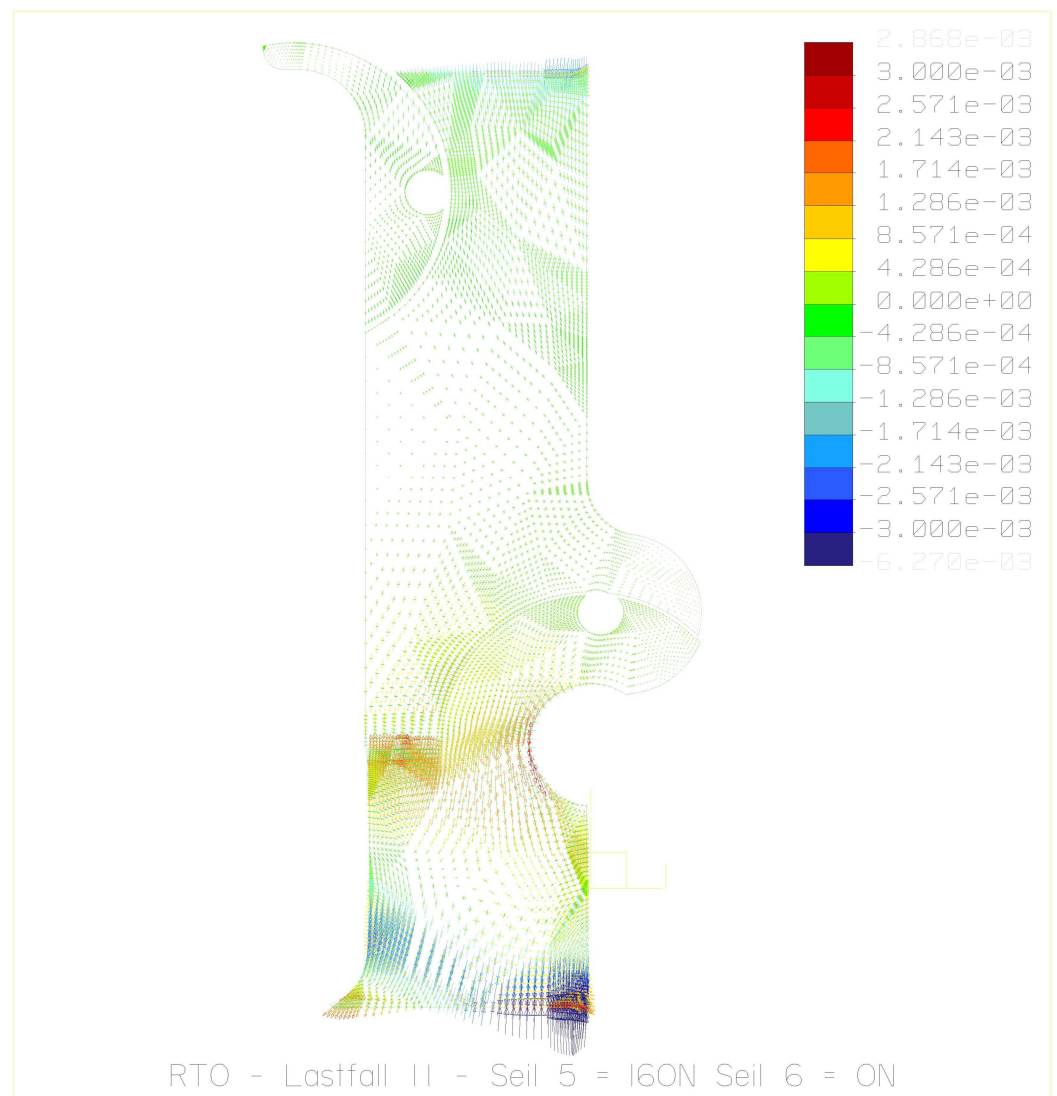
RTO - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N



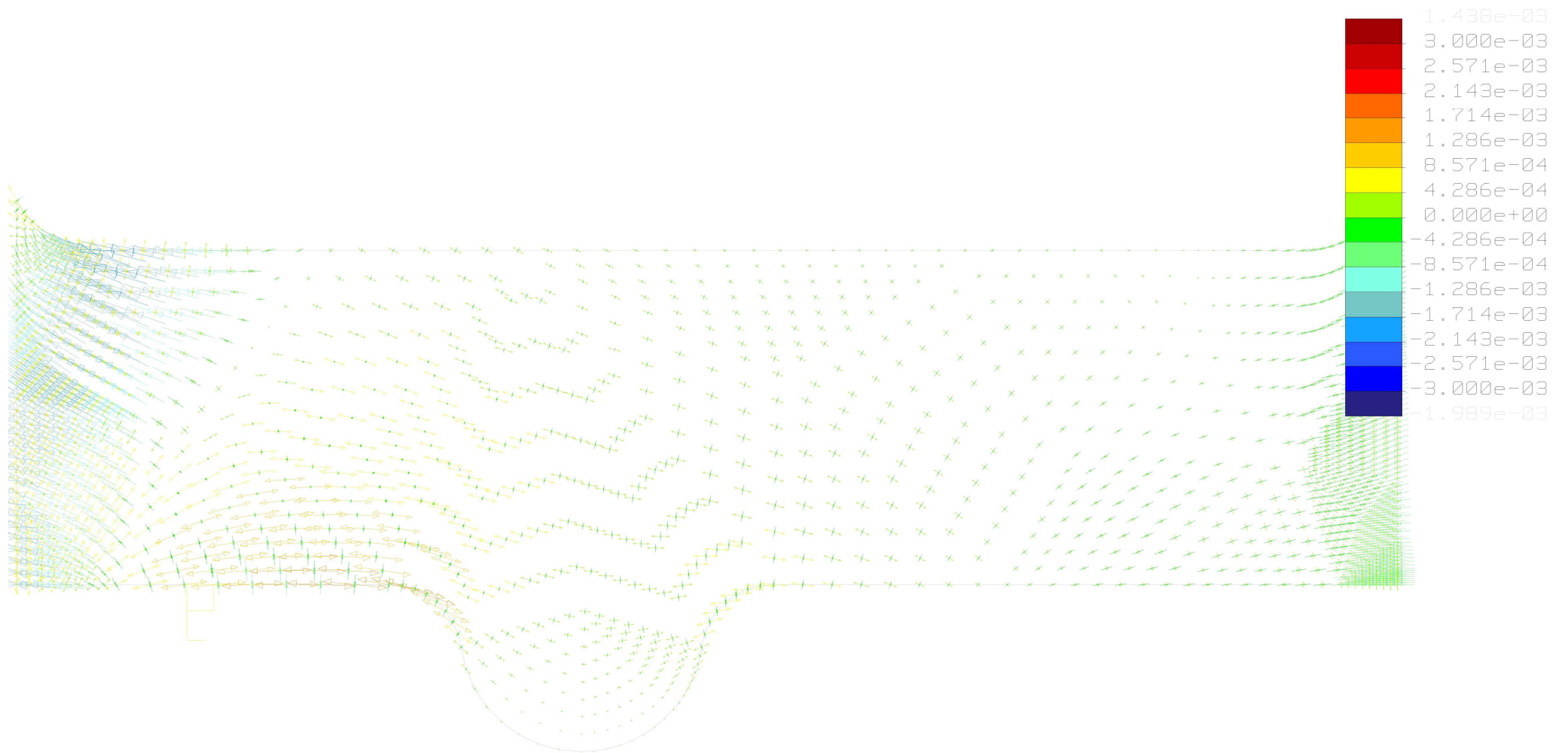
RTO - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = ON



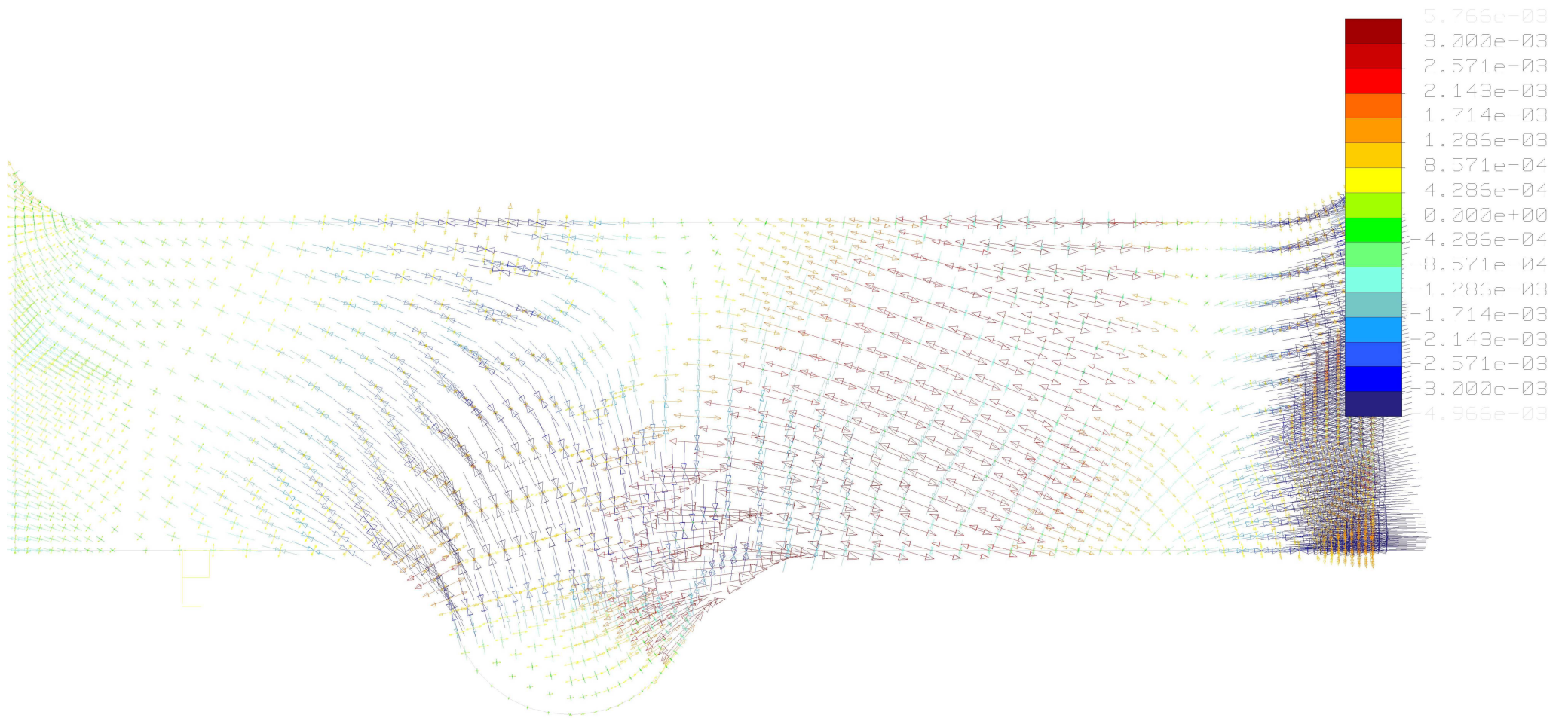
RTO - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N



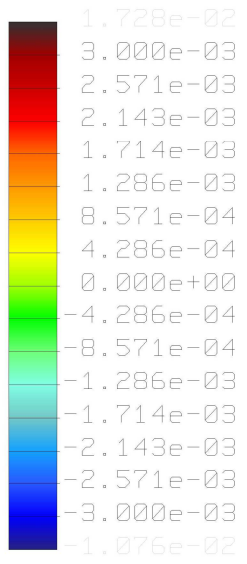
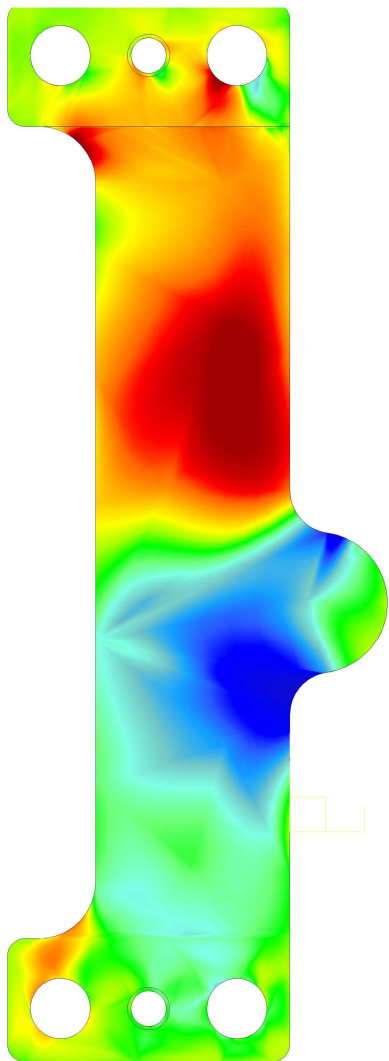
RTO - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = ON



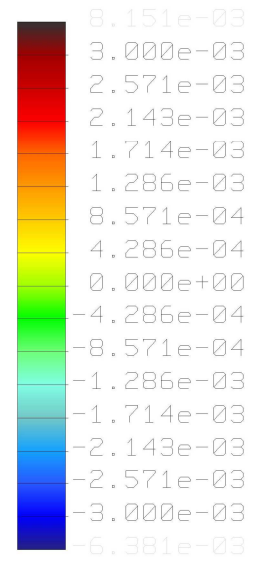
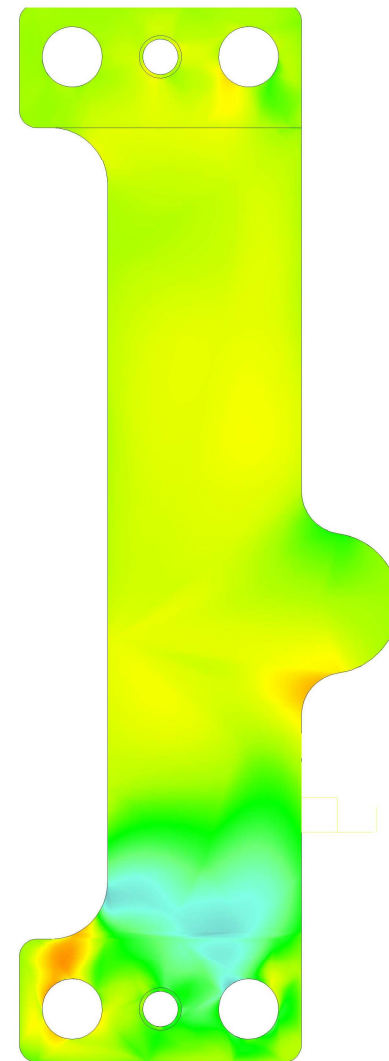
RTU - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = 0N



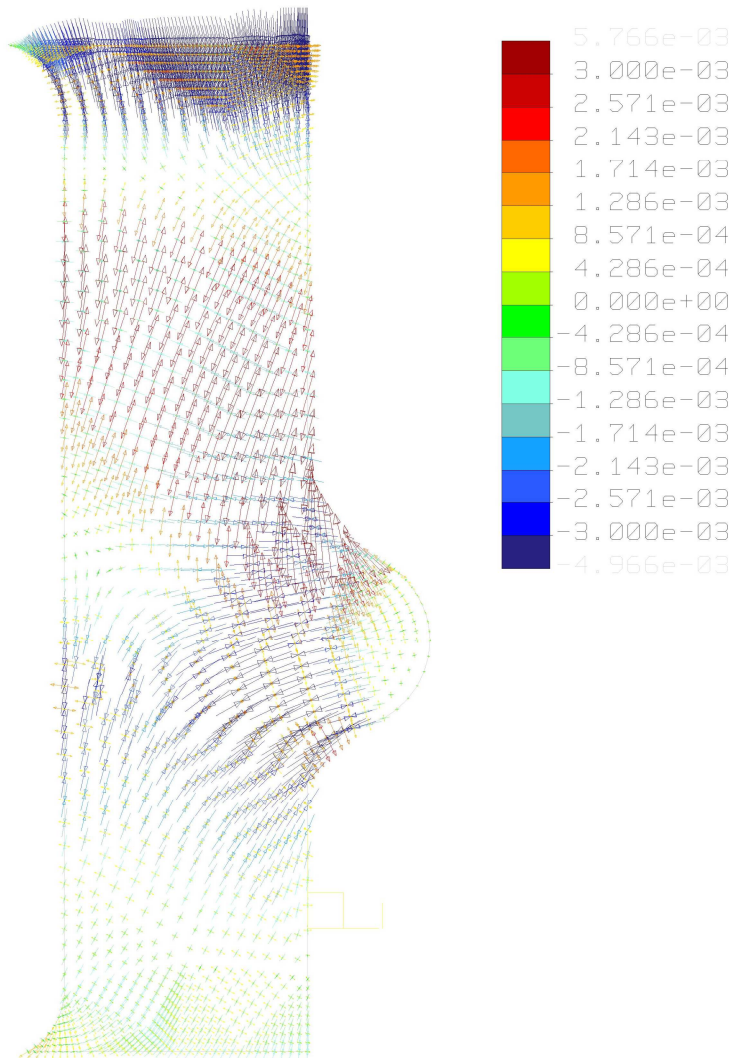
RTU - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N



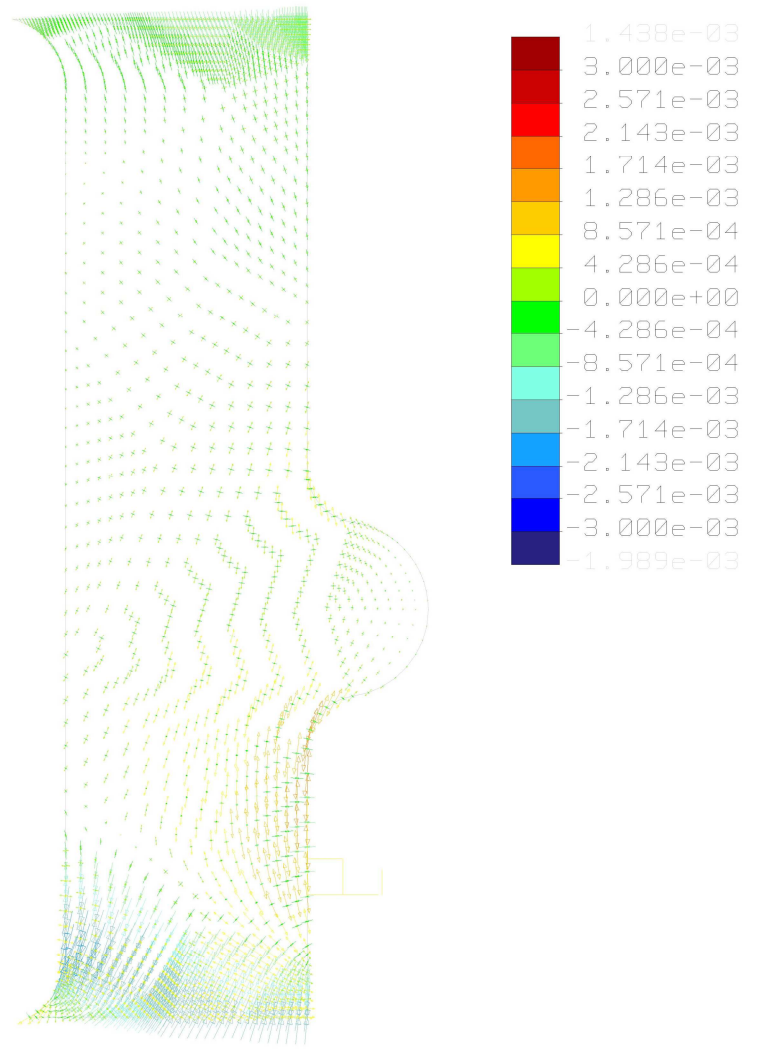
RTU - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N



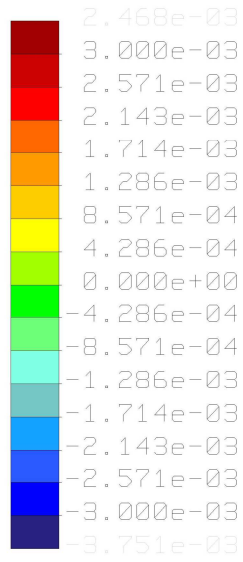
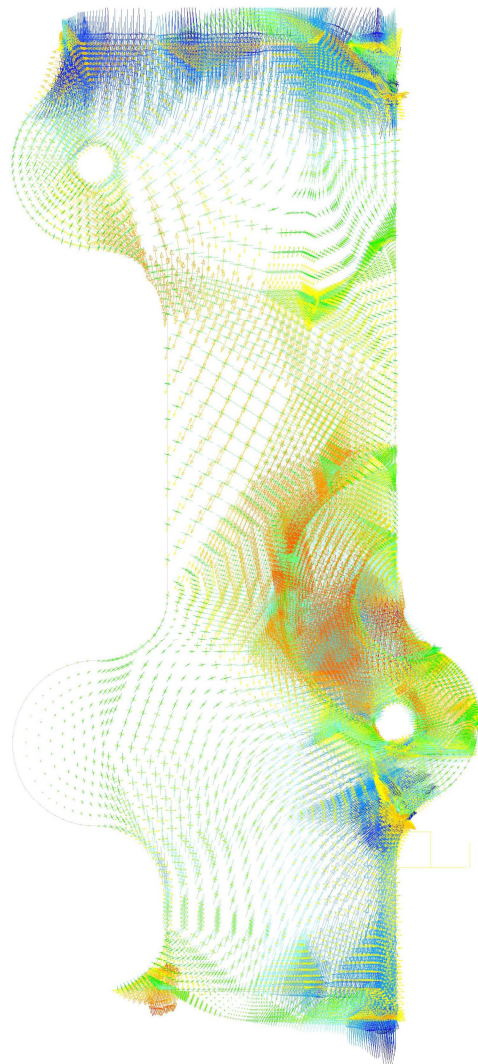
RTU - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = ON



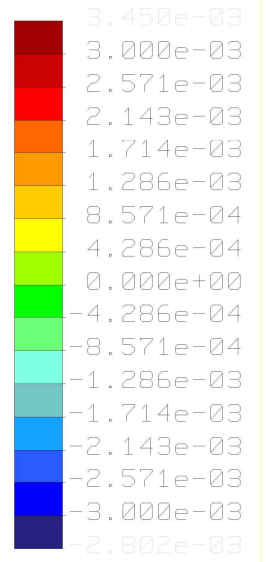
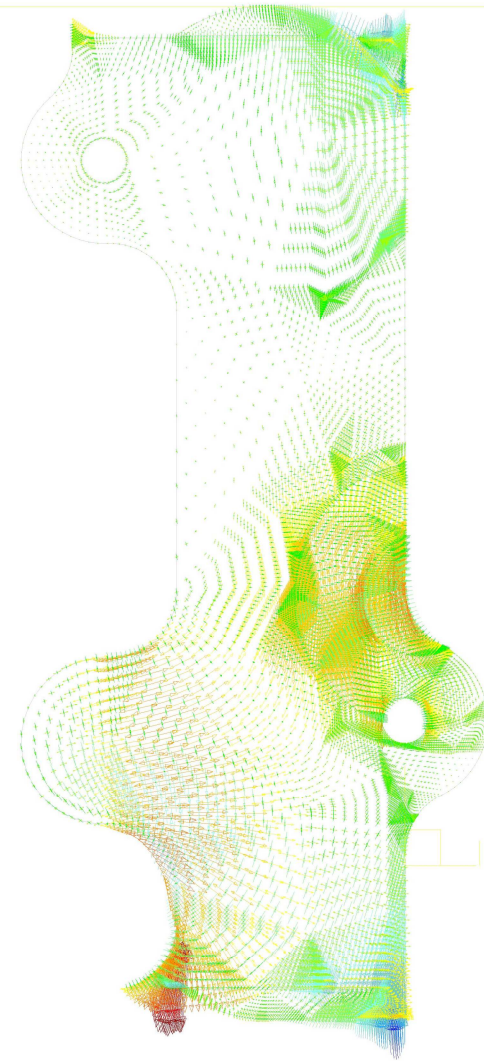
RTU - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N



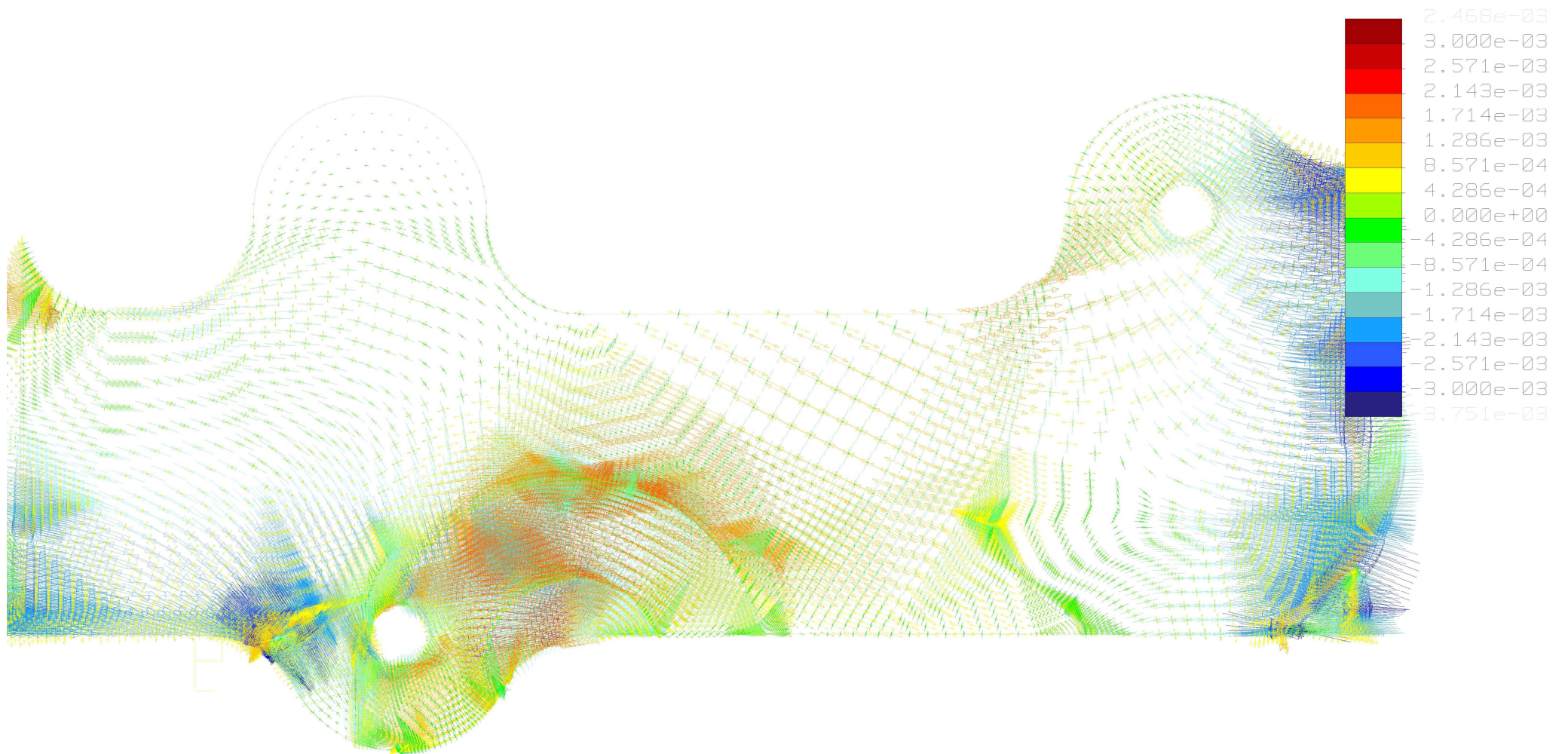
RTU - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = ON



RTM - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N

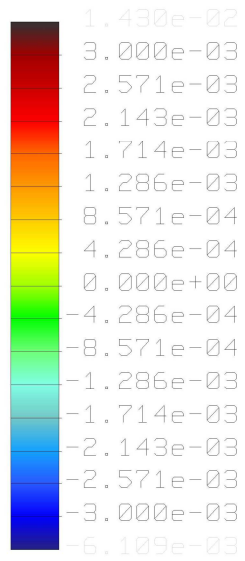
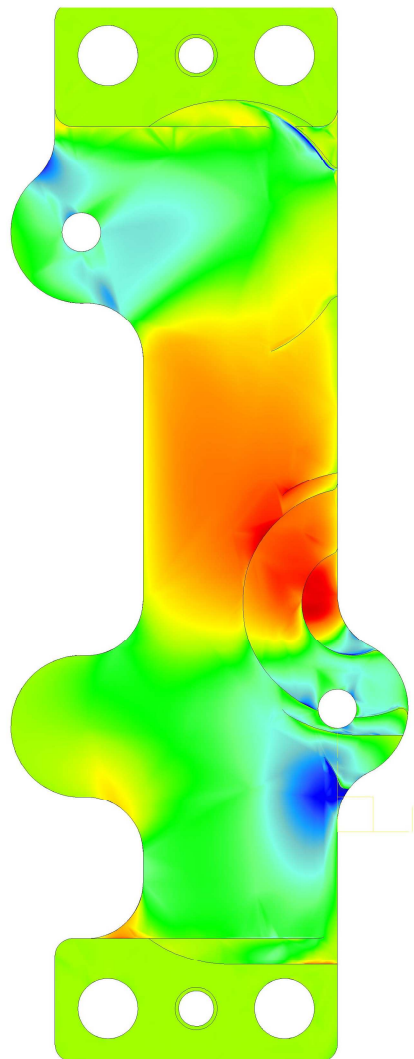


RTM - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = ON

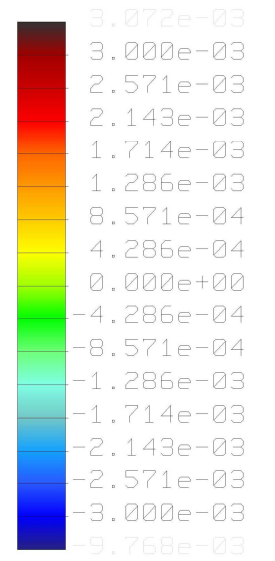
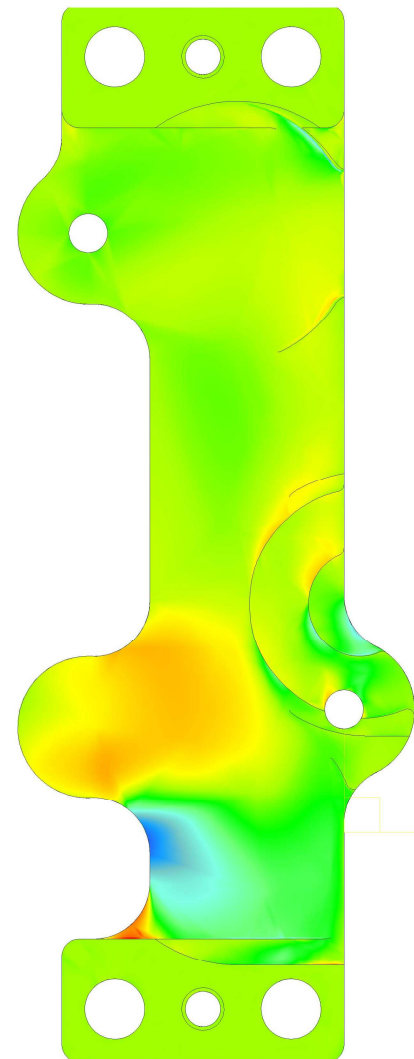


RTM - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N

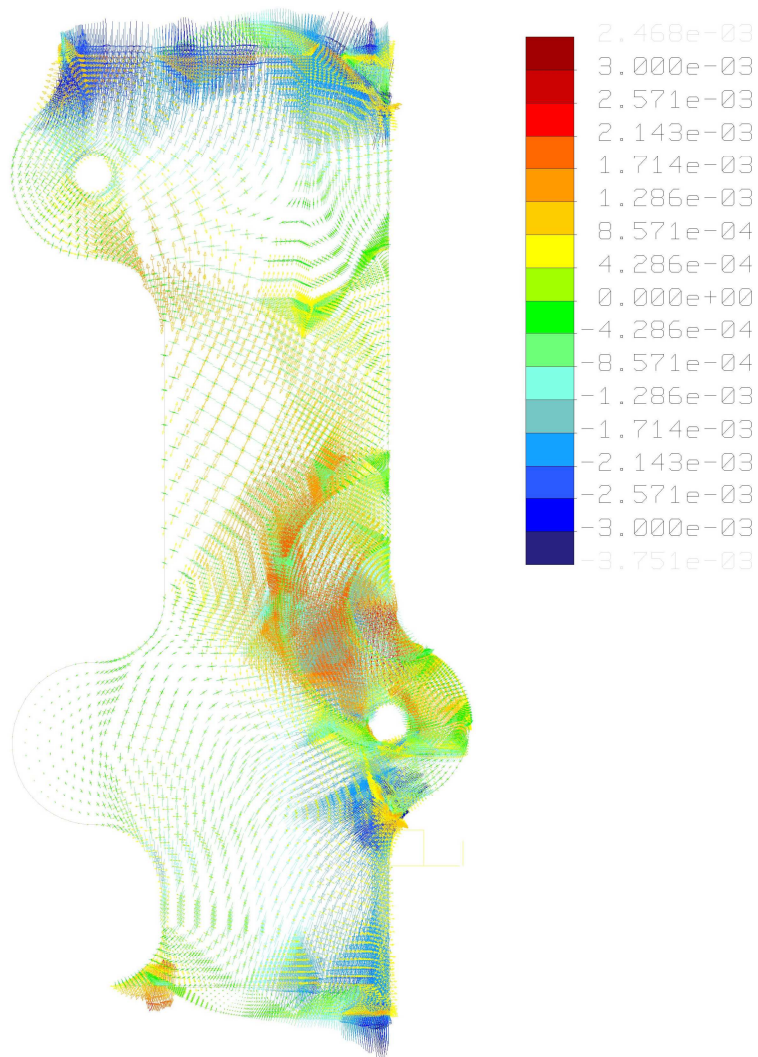




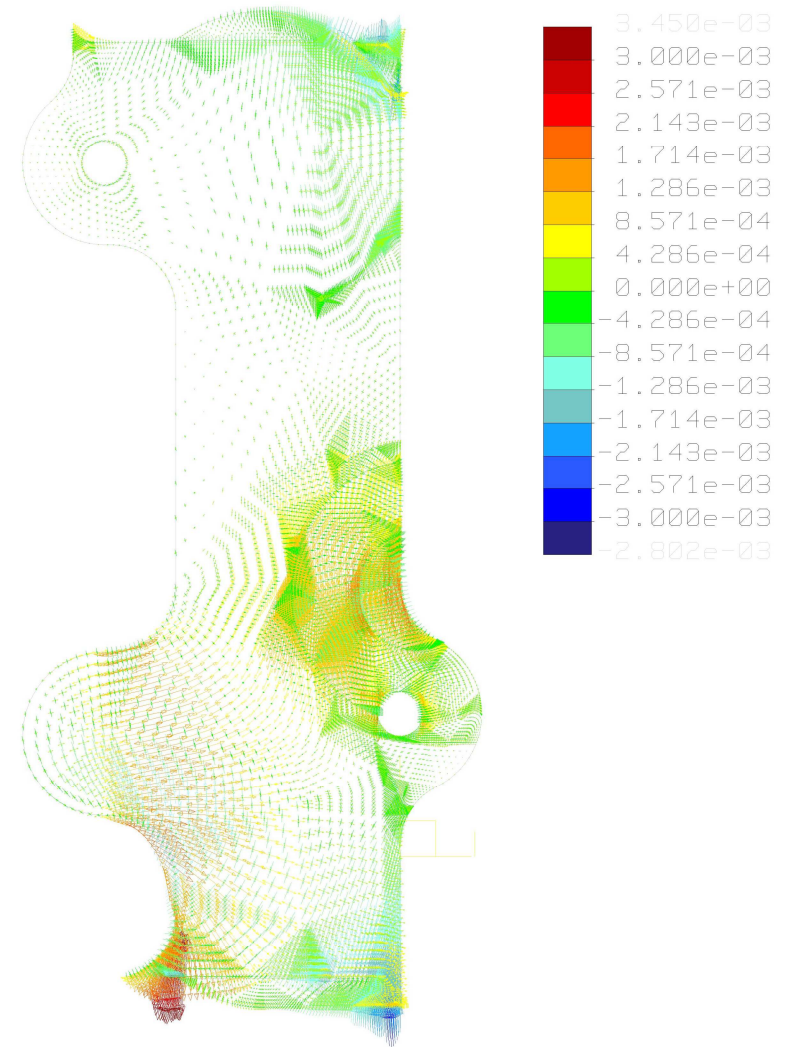
RTM - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N



RTM - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = ON



RTO - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N



RTO - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = ON



RTO - Lastfall II - Seil 5 = 160N Seil 6 = 0N



RTO - Lastfall III - Seil 5 = ON Seil 6 = 160N

```
%-----  
%M-File zum auslesen und verarbeiten von 3 DMS-Messstellen und 8 Lastfällen  
%  
%Messtelle 1: Halbbrücke aus zwei Messpunkten  
%Messtelle 2: Halbbrücke aus zwei Messpunkten  
%Messtelle 3: Halbbrücke aus zwei Messpunkten  
%  
%Vorgehensweise:  
%  
%Die Datei mit dem Übergebenen Namen wird geöffnet, der Inhalt  
%zwischengespeichert ('response') und wieder geschlossen.  
%  
%Der Inhalt wird nach dem Schlagwort 'Measure' durchsucht und die Gefundenen  
%Stellen gemerkt ('index').  
%  
%Die Messwerte werden Ausgelesen ('index(i)+1') und zur weiteren  
%Verarbeitung zwischengespeichert ('Strain').  
%  
%Die Messergebnisse werden danach Aufbereitet und zusammengefasst, sodas  
%eine Matrix für die Verarbeitung im LLSE-Verfahren zur Verfügung steht  
%('Strainx').  
%  
%
```

```
function [Calib,Strainx] = mechread_3x8_3(filename);  
%Eingabeprüfung  
  
%Erstellen der Pfadbezeichnung  
pfad=["",filename,'\',filename, '.rpt'];  
%Öffnen der Datei  
fid=fopen(pfad);  
%Auslesen der Datei  
response=textscan(fid,'%s');  
%Schließen der Datei  
fclose(fid);  
  
%Suche nach Bezeichnung 'Measure' und merken der Position  
index = strmatch('Measure_',response{1});  
  
i = 1;  
  
%Auslesen der Werte hinter den gefundenen Positionen  
for row = 1 : 8  
    for column = 1 : 6  
        %Wert, der ausgelesen werden soll steht eine Position hinter dem  
        %gefundenen 'Measure'-Ausdruck  
        answercell = response{1}(index(i)+1);  
        Strain(row,column) = str2num(answercell{1});  
        i = i + 1;  
    end  
end  
  
i = 0;  
  
%-- Mittelwertbildung zwischen den beiden Messtellen eines DMS --%  
for row = 1 : 8  
    Arr1(row, 1) = Strain(row, 1);  
    Arr1(row, 2) = Strain(row, 2);  
    Arr2(row, 1) = Strain(row, 3);  
    Arr2(row, 2) = Strain(row, 4);  
    Arr3(row, 1) = Strain(row, 5);  
    Arr3(row, 2) = Strain(row, 6);  
end  
  
meanArr = mean(Strain,6);  
  
ArrMean1 = mean(Arr1,2);
```

```
ArrMean2 = mean(Arr2,2);
ArrMean3 = mean(Arr3,2);

i = 1;
for row = 1 : 8
    Strainx(row, 1)= ArrMean1(row);
    Strainx(row, 2)= ArrMean2(row);
    Strainx(row, 3)= ArrMean3(row);
end

%Beginn der LLSE-Berechnung

dof=2;
hight=8;
width=3;

%Lastfallmatrix
L=[ 80,80,80;
    160,0,0;
    0,160,160;
    0,80,80;
    80,0,0;
    160,160,160;
    140,20,20;
    20,140,140];

Strainz=[Strainx,L];

A=zeros(hight*2,width*2);

for dataset = 1 : hight
    for coord = 1 : width
        b(((dataset-1)*(dof))+coord)=Strainz(dataset,dof+coord);
        A(((dataset-1)*dof)+coord,((coord-1)*dof)+1:((coord-1)*dof)+dof)=Strainz(dataset,1:dof);
    end
end
x = ((inv(A*A))*A)*b';
for m=1:dof
    Calib(m,1:dof)=x(((m-1)*dof)+1:((m-1)*dof)+dof);
end
Calib;
condition = cond(Calib)

Strainx
RankStrainX=rank(Strainx)

space = sprintf("");

%Ausgabe der Einzelwerte, wird in output zusammengefasst

output=[filename,'_3x8_3_output_',date,'.txt'];

save(output, 'Strainx', 'space', 'Calib', 'space', 'condition', '-ascii');
```

Analyse\_Originaldesign\_Zusammenfassung.txt  
Zusammenfassung der Matlab-Analysen der Rollenträger im Originaldesign

Ergebnisse der Analyse des RTO vom 04.Mai 2010

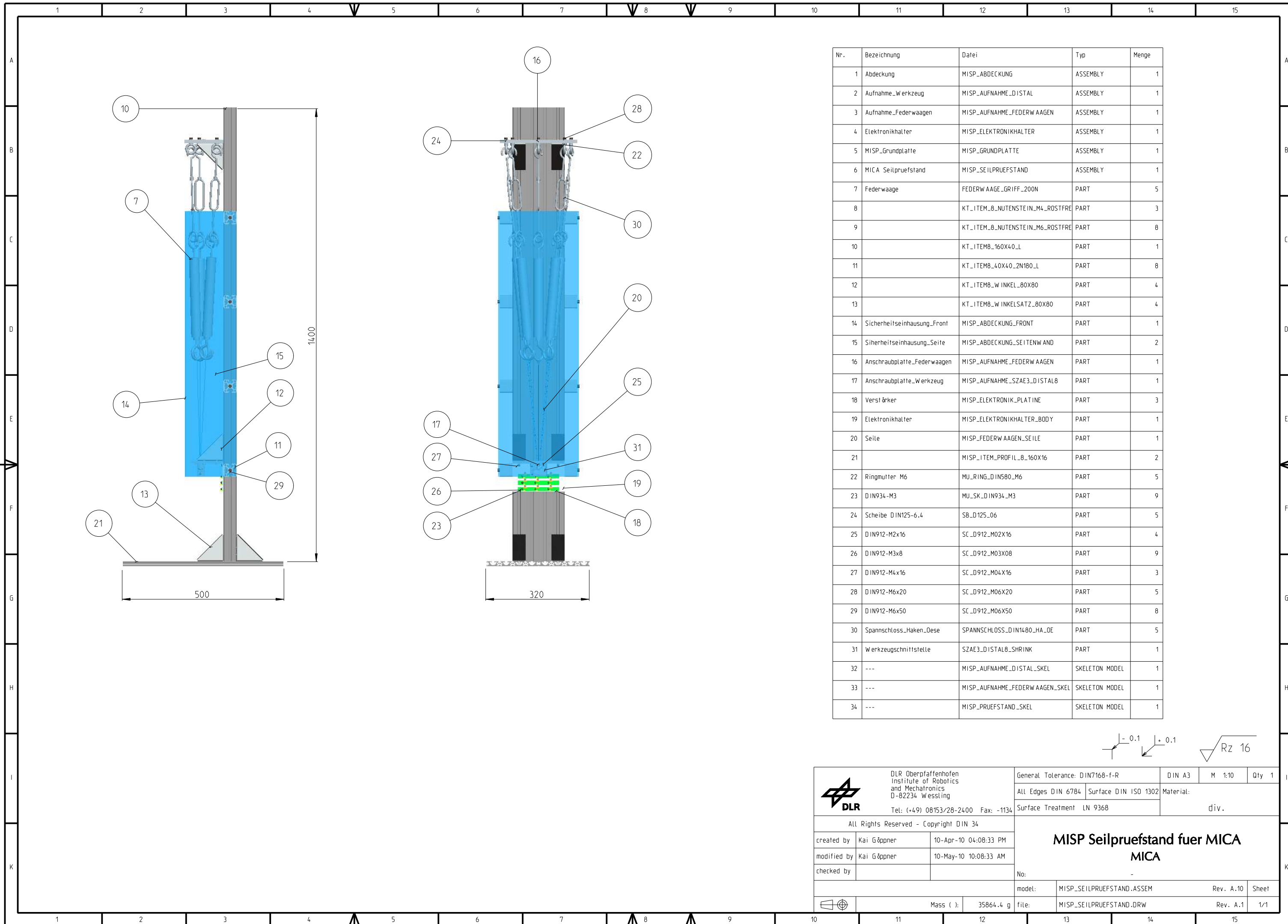
3.6611199e-004	2.8886200e-004	2.0302440e-004
2.7338365e-004	2.7105735e-004	2.4637756e-004
4.6149451e-004	3.0724580e-004	1.6012400e-004
2.3077976e-004	1.5336110e-004	7.9907100e-005
1.3669185e-004	1.3552869e-004	1.2318881e-004
7.0013480e-004	5.2755285e-004	3.7745050e-004
2.9657381e-004	2.7554144e-004	2.3555685e-004
5.1943510e-004	1.8488323e-003	1.0818602e-003
-5.2085647e+003	-1.8594319e+003	
2.5818275e+005	-5.5118246e+004	
9.0878669e+000		

Ergebnisse der Analyse des RTM vom 04.Mai 2010

1.6476635e-004	-5.4712820e-004	2.3611890e-004
-3.6981770e-004	-5.3356955e-004	-3.7410000e-006
6.9931955e-004	-5.6067375e-004	4.7609680e-004
-1.8490890e-004	-2.6678480e-004	-1.8705100e-006
3.4960985e-004	-2.8032420e-004	2.3801906e-004
3.2963110e-004	-1.0942811e-003	4.7229805e-004
-2.3612070e-004	-5.3700875e-004	5.6224880e-005
5.6569806e-004	-5.5731435e-004	4.1613295e-004
8.4348579e+004	6.5739539e+004	
-1.1294223e+005	-1.8023077e+005	
7.1472466e+000		

Ergebnisse der Analyse des RTU vom 04.Mai 2010

-4.8587245e-004	7.8483175e-004	-2.8728692e-004
-3.5377155e-004	4.8350930e-004	-1.9479230e-004
-6.1823630e-004	1.0855105e-003	-3.7982660e-004
-3.0902781e-004	5.4284120e-004	-1.8989715e-004
-1.7688575e-004	2.4175465e-004	-9.7396175e-005
-9.7180145e-004	1.5696775e-003	-5.7462525e-004
-3.8678215e-004	5.5866845e-004	-2.1789553e-004
-2.4808481e-004	8.5484330e-004	-1.1894720e-004
5.3518416e+004	4.3857378e+004	
-4.3156472e+005	-1.6236685e+005	
2.1187963e+000		

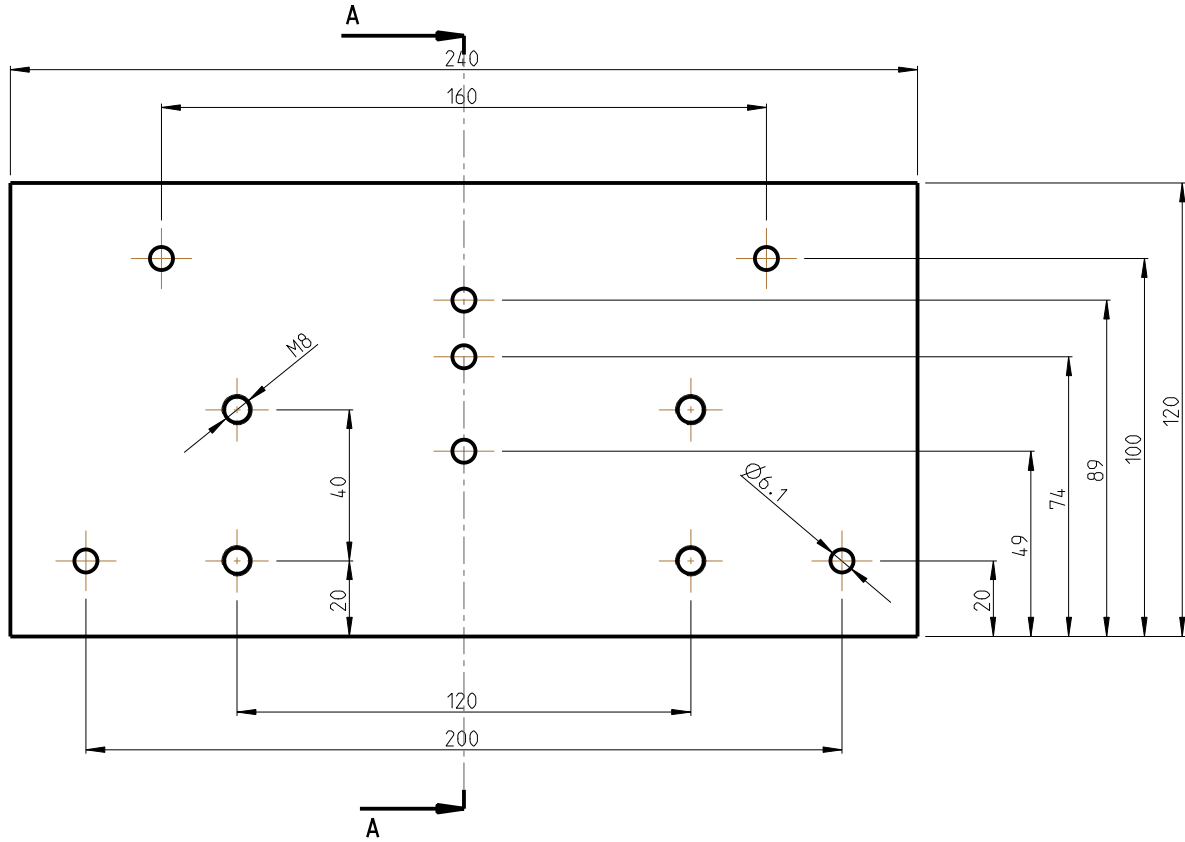


Nr.	Bezeichnung	Datei	Typ	Menge
1	Abdeckung	MISP_ABDECKUNG	ASSEMBLY	1
2	Aufnahme_Werkzeug	MISP_AUFNAHME_DISTAL	ASSEMBLY	1
3	Aufnahme_Federwaagen	MISP_AUFNAHME_FEDERW AAGEN	ASSEMBLY	1
4	Elektronikhalter	MISP_ELEKTRONIKHALTER	ASSEMBLY	1
5	MISP_Grundplatte	MISP_GRUNDPLATTE	ASSEMBLY	1
6	MICA Seilpruefstand	MISP_SEILPRUEFSTAND	ASSEMBLY	1
7	Federwaage	FEDERW AAGE_GRIFF_200N	PART	5
8		KT_ITEM8_NUTENSTEIN_M4_ROSTFRE	PART	3
9		KT_ITEM8_NUTENSTEIN_M6_ROSTFRE	PART	8
10		KT_ITEM8_160X40_L	PART	1
11		KT_ITEM8_40X40_2N180_L	PART	8
12		KT_ITEM8_W INKEL_80X80	PART	4
13		KT_ITEM8_W INKELSATZ_80X80	PART	4
14	Sicherheitseinhausung_Front	MISP_ABDECKUNG_FRONT	PART	1
15	Sicherheitseinhausung_Seite	MISP_ABDECKUNG_SEITENW AND	PART	2
16	Anschraubplatte_Federwaagen	MISP_AUFNAHME_FEDERW AAGEN	PART	1
17	Anschraubplatte_Werkzeug	MISP_AUFNAHME_SZAE3_DISTAL8	PART	1
18	Verstärker	MISP_ELEKTRONIK_PLATINE	PART	3
19	Elektronikhalter	MISP_ELEKTRONIKHALTER_BODY	PART	1
20	Seile	MISP_FEDERW AAGEN_SEILE	PART	1
21		MISP_ITEM_PROFIL_8_160X16	PART	2
22	Ringmutter M6	MU_RING_DIN580_M6	PART	5
23	DIN934-M3	MU_SK_DIN934_M3	PART	9
24	Scheibe DIN125-6.4	SB_D125_06	PART	5
25	DIN912-M2x16	SC_D912_M02X16	PART	4
26	DIN912-M3x8	SC_D912_M03X08	PART	9
27	DIN912-M4x16	SC_D912_M04X16	PART	3
28	DIN912-M6x20	SC_D912_M06X20	PART	5
29	DIN912-M6x50	SC_D912_M06X50	PART	8
30	Spannschloss_Haken_Oese	SPANNSCHLOSS_DIN1480_HA_OE	PART	5
31	Werkzeugschnittstelle	SZAE3_DISTAL8_SHRINK	PART	1
32	---	MISP_AUFNAHME_DISTAL_SKEL	SKELETON MODEL	1
33	---	MISP_AUFNAHME_FEDERW AAGEN_SKEL	SKELETON MODEL	1
34	---	MISP_PRUEFSTAND_SKEL	SKELETON MODEL	1

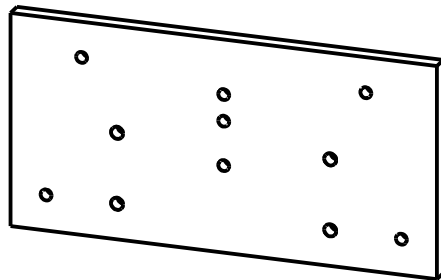
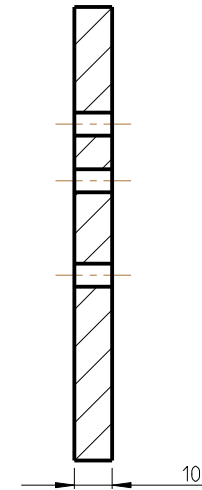
$\sqrt{Rz\ 16}$   
 $\begin{matrix} -0.1 \\ +0.1 \end{matrix}$

DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Wessling Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134	General Tolerance: DIN7168-f-R	DIN A3	M 1:10	Qty 1
	All Edges DIN 6784	Surface DIN ISO 1302	Material: div.	
All Rights Reserved - Copyright DIN 34		Surface Treatment LN 9368		
created by Kai Göppner	10-Apr-10 04:08:33 PM	<b>MISP Seilpruefstand fuer MICA</b> <b>MICA</b>		
modified by Kai Göppner	10-May-10 10:08:33 AM			
checked by				
No: -		model: MISP_SEILPRUEFSTAND.ASSEM	Rev. A.10	Sheet
Mass ( ): 35864.4 g		file: MISP_SEILPRUEFSTAND.DRW	Rev. A.1	1/1

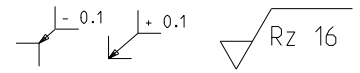





SCHNITT A-A



MASSTAB 1:4



 DLR DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Wessling Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134	General Tolerance: DIN7168-f-R		DIN A4	M 1:2	Qty 1
	All Edges DIN 6784	Surface DIN ISO 1302	Material:		
	Surface Treatment LN 9368		Al Cu Mg Pb (F34)		
All Rights Reserved - Copyright DIN 34					
created by	Kai Göppner	12-Apr-10 9:30:07 PM			
modified by	Kai Göppner	11-May-10 08:37:02 AM			
checked by					
		No: -			
		model:	MISP_AUFNAHME_FEDERW AAGEN.PART	Rev. A.1	Sheet
		file:	MISP_AUFNAHME_FEDERW AAGEN.DRW	Rev. A.1	1/1
		Mass (ALU):	810.0 g		

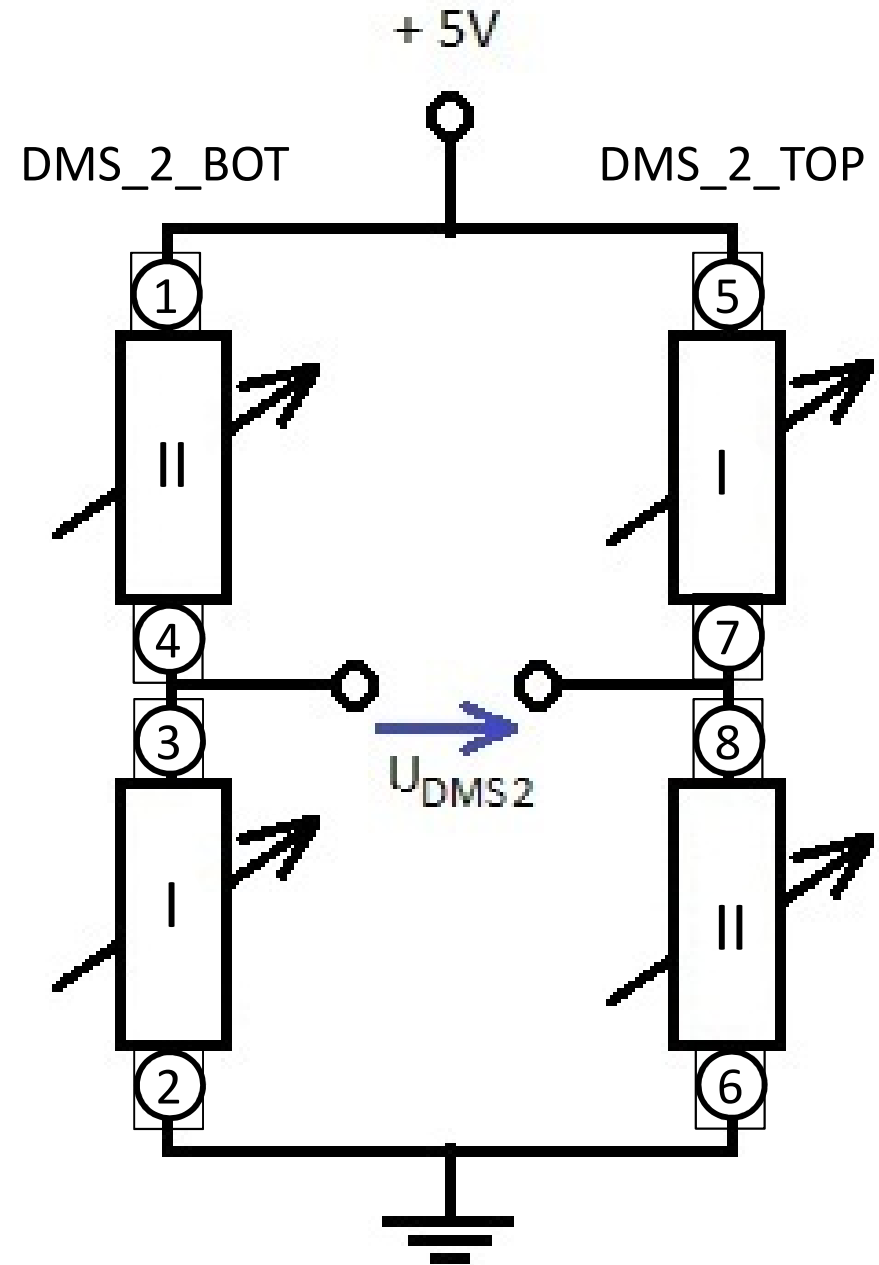
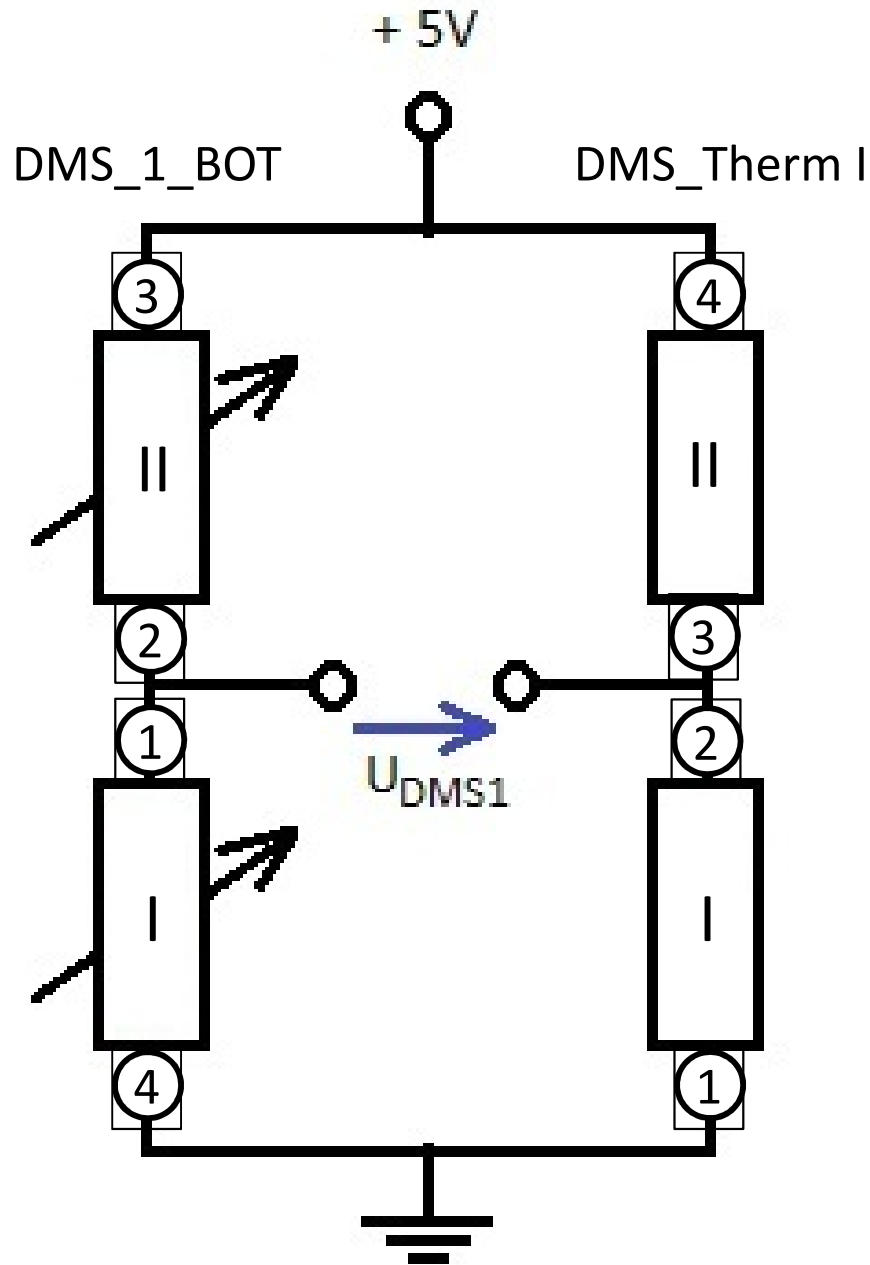






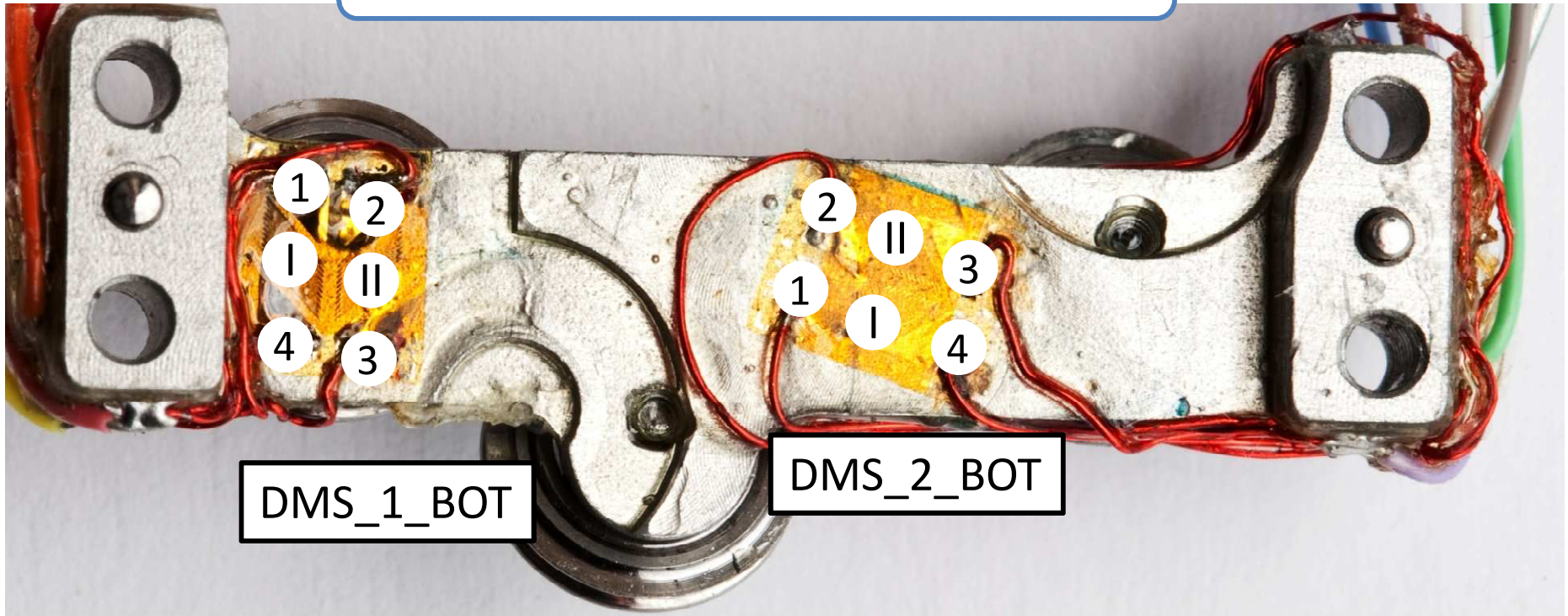


# Anschlussplan der Dehnungsmesstreifen (RTO)

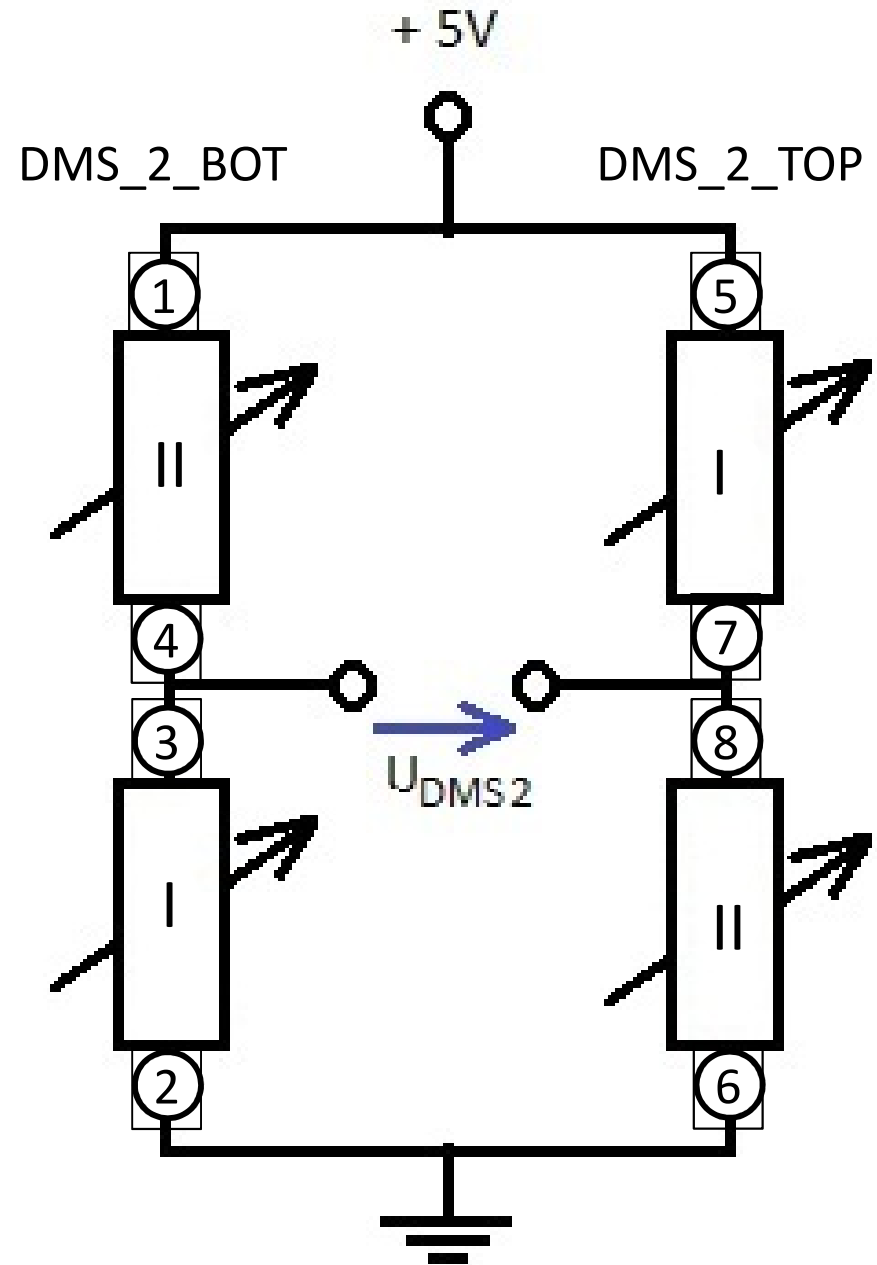
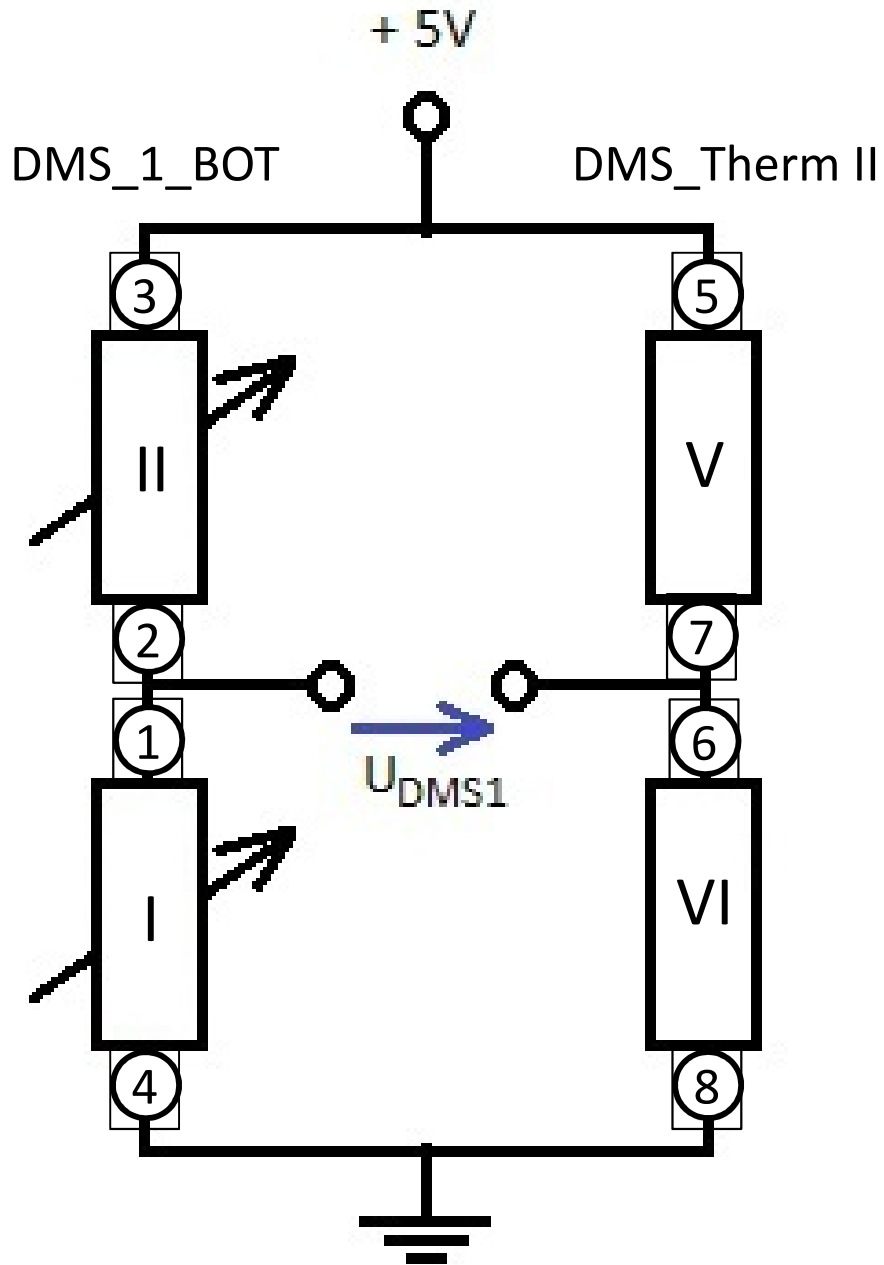




Pinbelegung des RTO



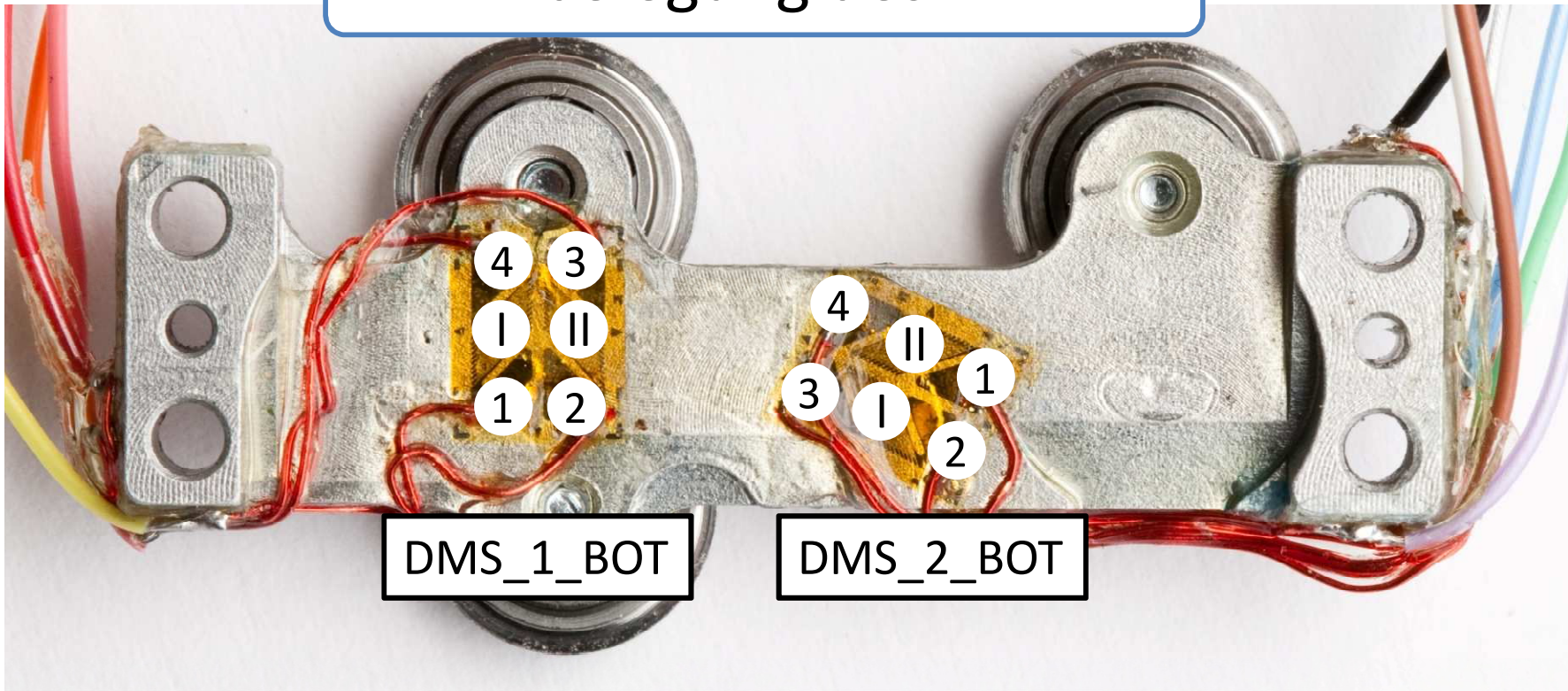
# Anschlussplan der Dehnungsmesstreifen (RTM)



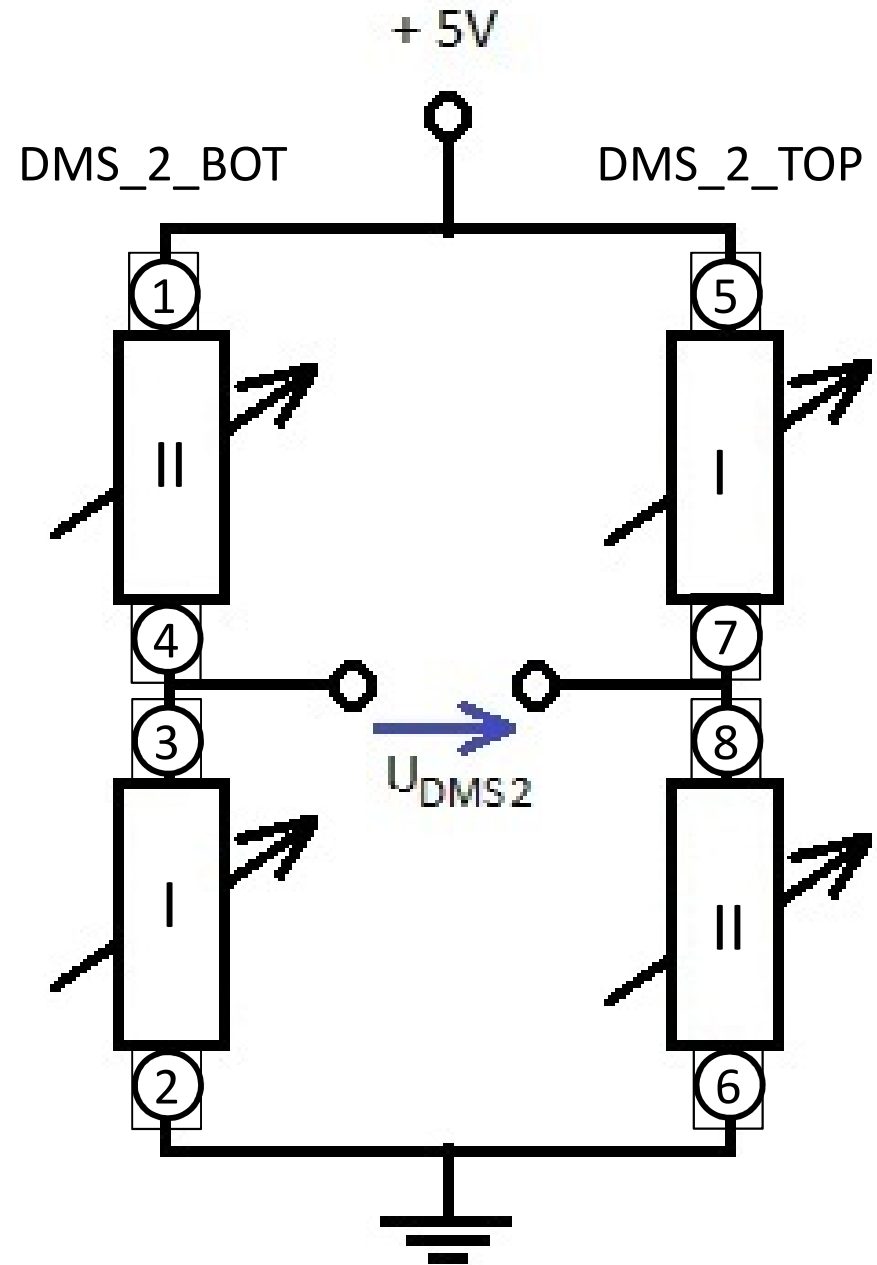
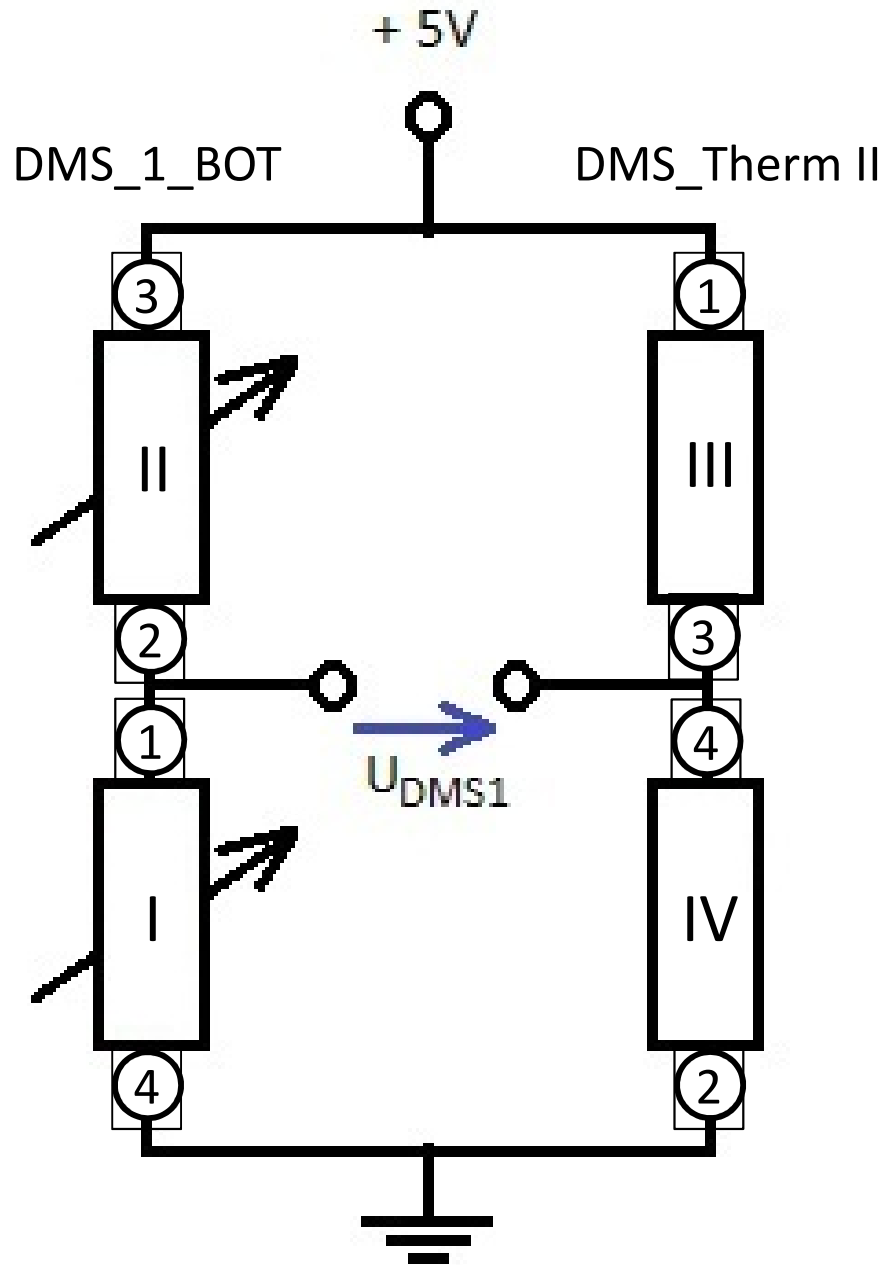


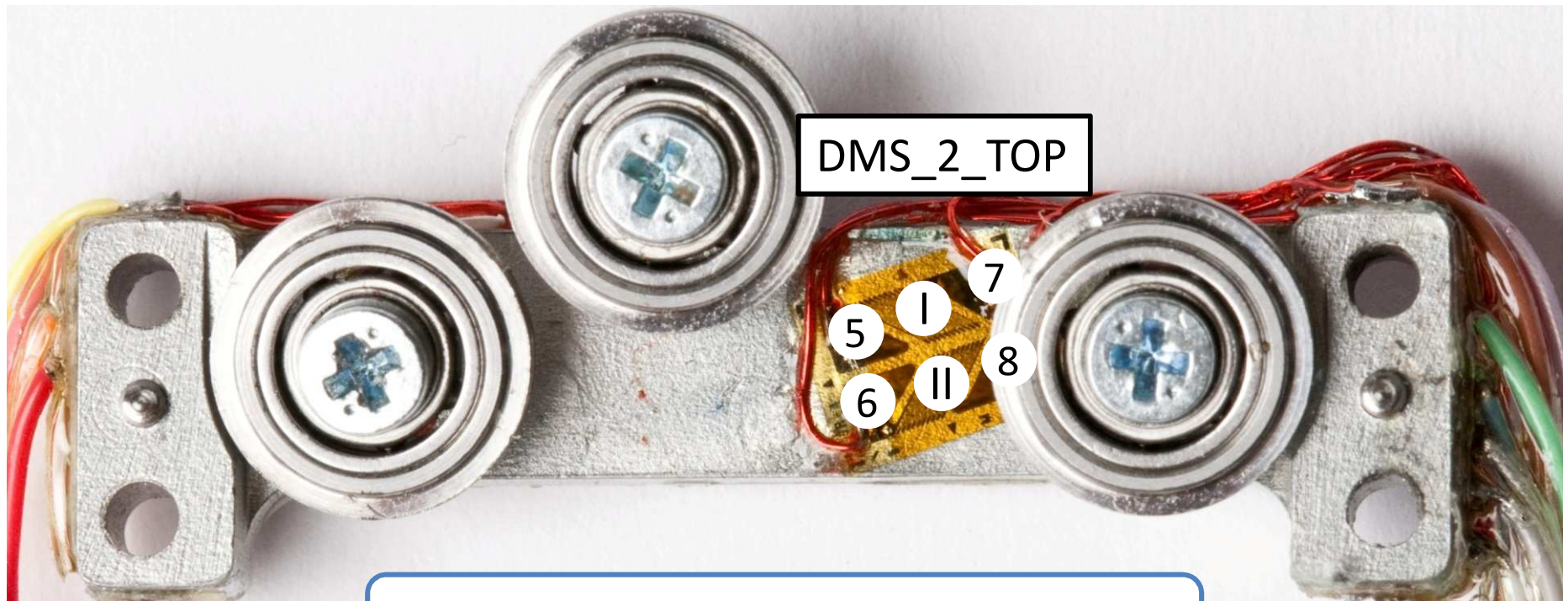


Pinbelegung des RTM



# Anschlussplan der Dehnungsmesstreifen (RTU)

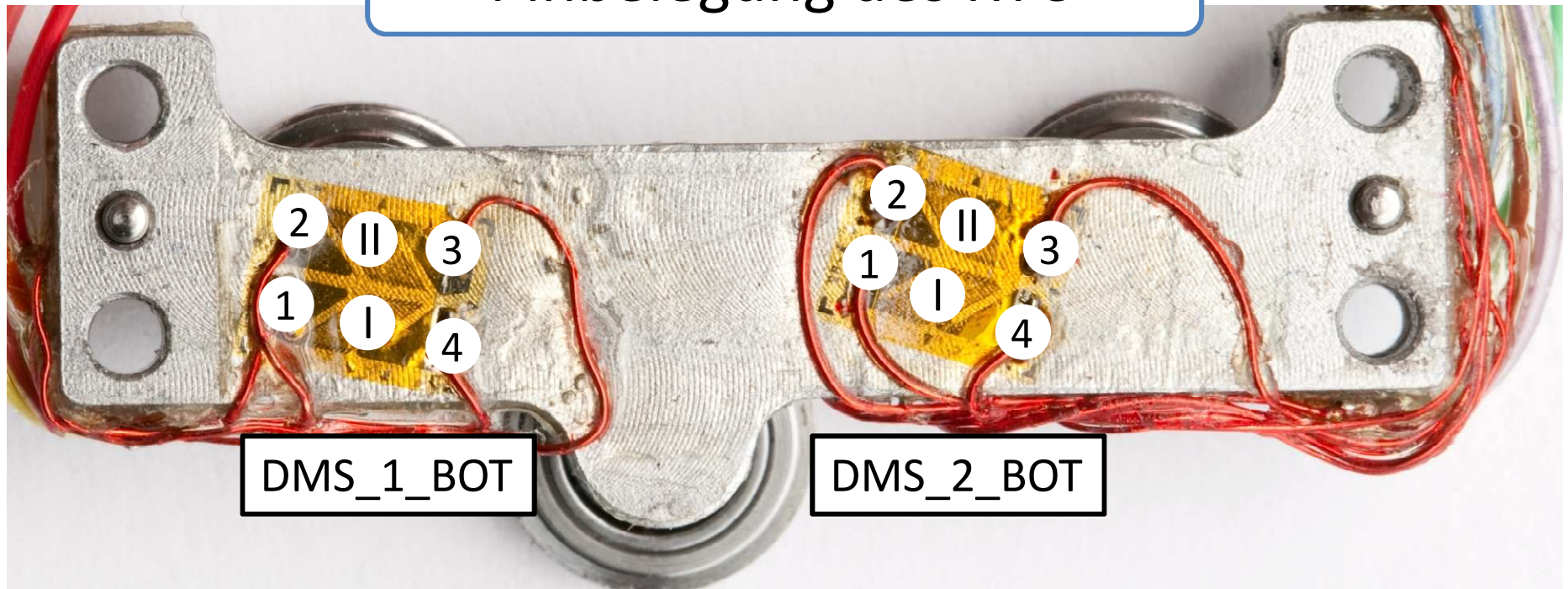




DMS\_2\_TOP

5 I 7  
6 II 8

Pinbelegung des RTU



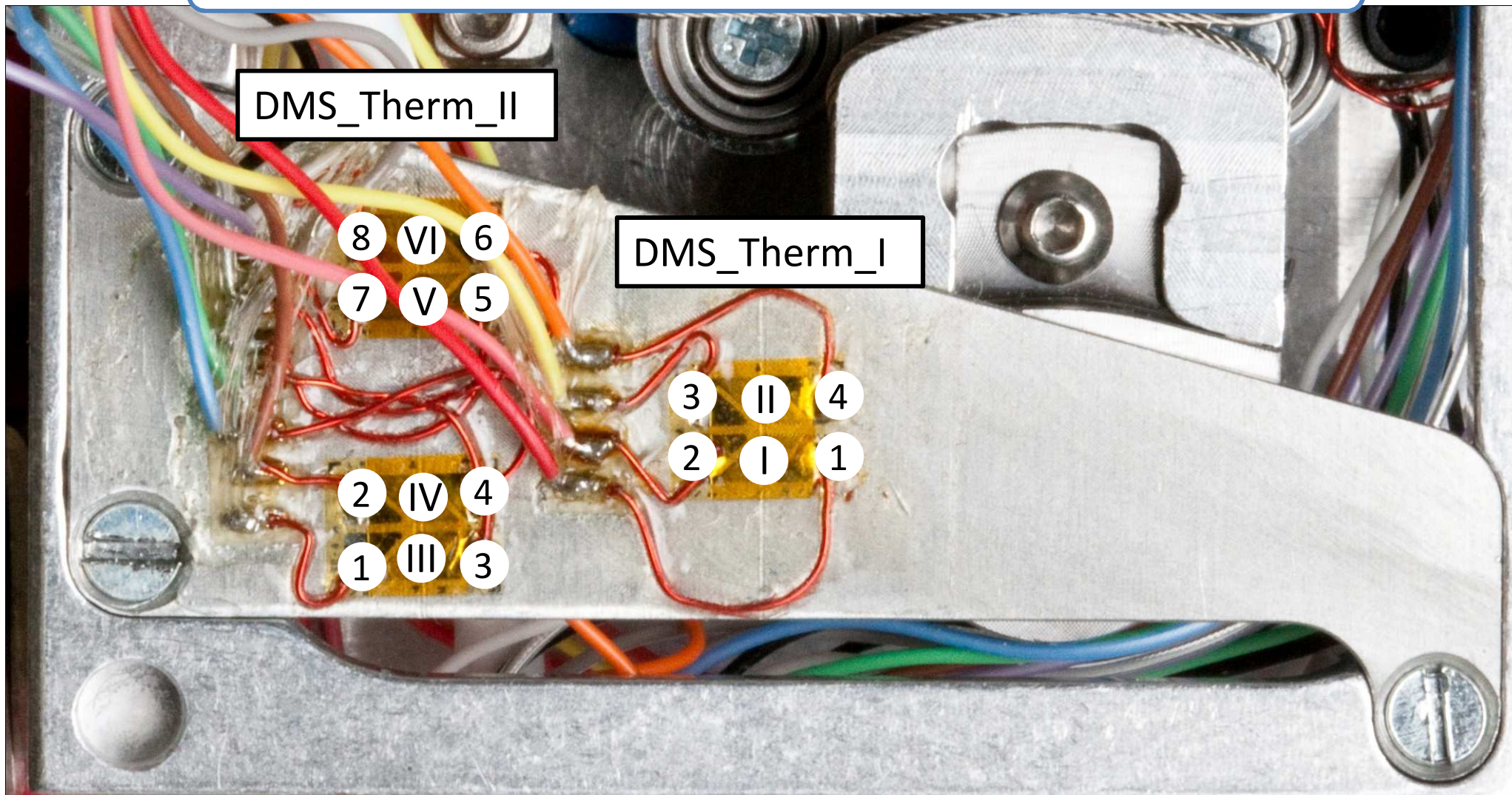
DMS\_1\_BOT

DMS\_2\_BOT

2 II 3  
1 I 4

2 II 3  
1 I 4

# Pinbelegung der Temperaturkompensation



## Strain Gage Adhesive



### OTHER ACCESSORIES USED IN AN M-BOND 610 INSTALLATION:

- CSM Degreaser or GC-6 Isopropyl Alcohol
- Silicon-Carbide Paper
- M-Prep Conditioner A
- M-Prep Neutralizer 5A
- GSP-1 Gauze Sponges
- CSP-1 Cotton Applicators
- MJG-2 Mylar® Tape
- TFE-1 Teflon® Film
- HSC Spring Clamp
- GT-14 Pressure Pads and Backup Plates



**RoHS**  
COMPLIANT

### DESCRIPTION

Two-component, solvent-thinned, epoxy-phenolic adhesive for high-performance applications, including high-precision transducers. Solids content 22%. Widest temperature range general-purpose adhesive available. Low viscosity, capable

of gluelines <0.0002 in [0.005mm]. Extremely thin, hard, void-free gluelines minimize creep, hysteresis, and linearity problems. Cure must begin within four hours of application.

### CHARACTERISTICS

#### Operating Temperature Range:

**Short Term:** -452° to +700°F [-269° to +370°C].

**Long Term:** -452° to +500°F [-269° to +260°C].

**Transducers:** to +450°F [+230°C].

#### Elongation Capabilities:

1% at -452°F [-269°C];

3% at +75°F [+24°C];

3% at +500°F [+260°C].

#### Shelf Life:

9 months at +75°F [+24°C]; 15 months at +40°F [+5°C].

#### Pot Life:

6 weeks at +75°F [+24°C]; 12 weeks at +40°F [+5°C].

#### Clamping Pressure:

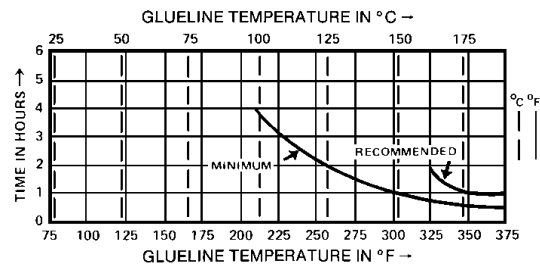
10 to 70psi [70 to 480kN/m<sup>2</sup>].

30 to 40psi optimum [200 to 275kN/m<sup>2</sup>].

#### Cure Requirements:

**Recommended Postcure:** 2 hours at 50° to 75°F [30° to 40°C] above maximum operating temperature or cure temperature, whichever is higher.

**High Precision Transducer Postcure:** 2 hours at +400° to +450°F [+205° to +230°C] after wiring.



### PACKAGING OPTIONS

#### Kit:

- 4 bottles [11g ea] Curing Agent
- 4 bottles [14g ea] Resin
- 4 brush caps for dispensing mixed adhesive
- 4 disposable mixing funnels

#### Single Mix Kit:

- 1 bottle [11g ea] Curing Agent
- 1 bottle [14g ea] Resin
- 1 brush cap for dispensing mixed adhesive
- 1 disposable mixing funnel

**References:** Instruction Bulletin B-130, "Strain Gage Installations with M-Bond 43-B, 600 and 610 Adhesive Systems," included in each kit.

Mylar and Teflon are Registered Trademarks of DuPont



## Disclaimer

All product specifications and data are subject to change without notice.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained herein or in any other disclosure relating to any product.

Vishay disclaims any and all liability arising out of the use or application of any product described herein or of any information provided herein to the maximum extent permitted by law. The product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein, which apply to these products.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay.

The products shown herein are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications unless otherwise expressly indicated. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so entirely at their own risk and agree to fully indemnify Vishay for any damages arising or resulting from such use or sale. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

## Protective Coating



### FEATURES

- Easy to use
- Transparent
- Good general-purpose coating for laboratory use



**RoHS**  
COMPLIANT

### DESCRIPTION

Air-drying solvent-thinned (xylene) polyurethane. Transparent. Moderate hardness; good flexibility. Can be removed with *M-LINE* Rosin Solvent or toluene. Film thickness 0.005-0.01 in [0.1-0.25mm] per coat.

General-purpose coating for lab use, and as base coating for field applications. Must be fully cured before addition of other coatings. Fair moisture resistance. Not readily attacked by many solvents. Convenient to use.

### CHARACTERISTICS

#### Cure Requirements:

Dries tack-free at room temperature in 20 minutes. Completely dry in 2 hours.

Normal cure 24 hours at room temperature. Chemical resistance and coating hardness increase for 6 to 7 days.

#### Operating Temperature Range:

**Short Term:** -100° to +300°F [-75° to +150°C].

**Long Term:** -100° to +250°F [-75° to +120°C].

#### Shelf Life:

1 year at +75°F [+24°C].

### PACKAGING OPTIONS

#### Kit:

4 brush-cap bottles (1oz [30ml] ea)

#### Bulk:

Quart container



## Disclaimer

All product specifications and data are subject to change without notice.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained herein or in any other disclosure relating to any product.

Vishay disclaims any and all liability arising out of the use or application of any product described herein or of any information provided herein to the maximum extent permitted by law. The product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein, which apply to these products.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay.

The products shown herein are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications unless otherwise expressly indicated. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so entirely at their own risk and agree to fully indemnify Vishay for any damages arising or resulting from such use or sale. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.



# MISP Testprotokoll

Protokollnummer: 20100320\_1 Datum: 15.03.2010  
 Last an Seil 1 und Seil 2 bis 100 N

Abgleich zu Testbeginn Uhrzeit: 10:24

	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
Abgleichzugkraft:	2N	2N	2N	2N	2N	2N
Abgleichspannung:	2,542	2,532	2,496	2,510	2,497	2,499

Verstärkung des Messverstärkers: 200

Messergebnisse:

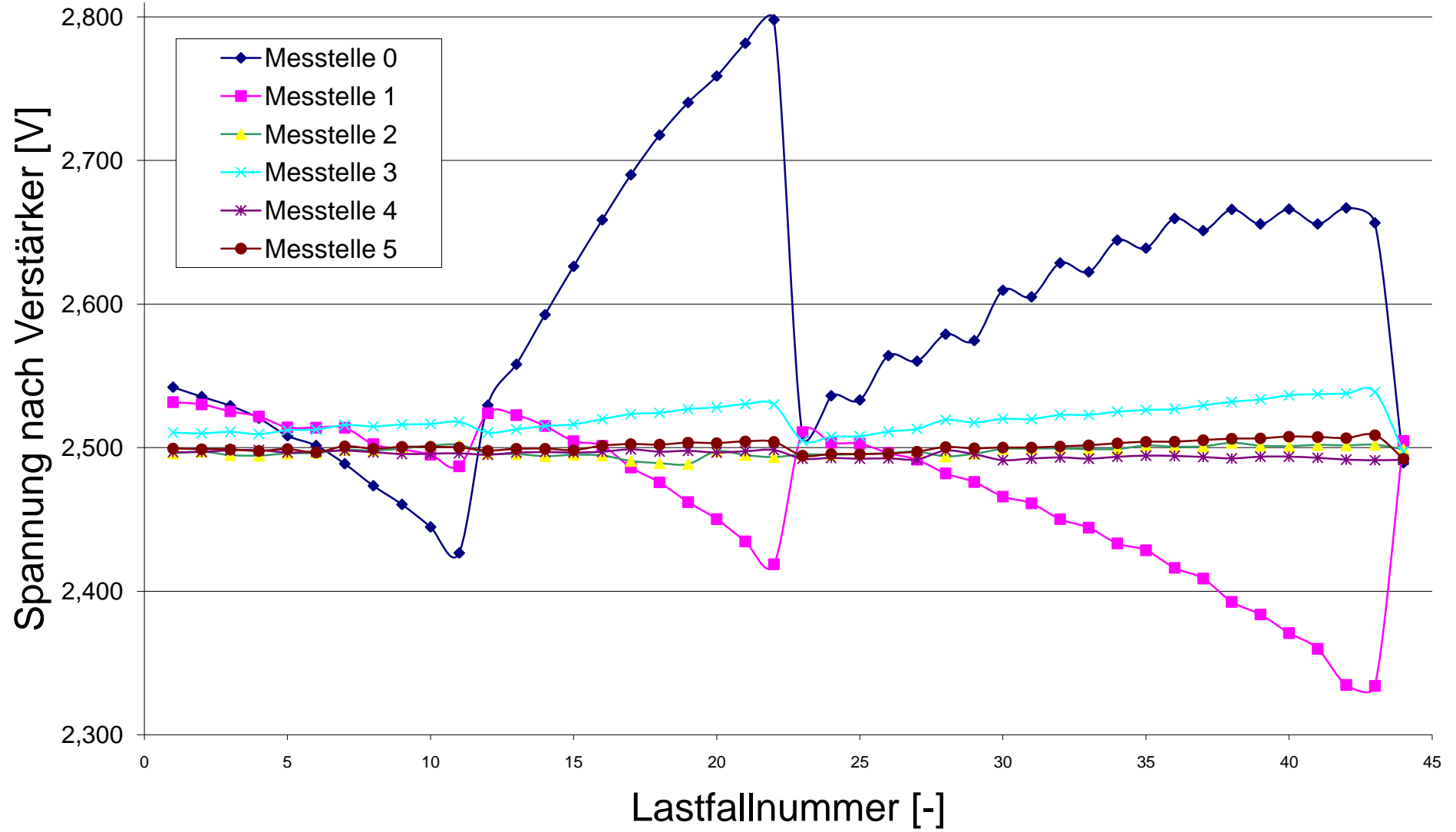
Zugkraft (N) / Brückenspannung (V)

S1	S2	S3	S4	S5	S6	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
2	2	2	2	2	2	2,542	2,532	2,496	2,510	2,497	2,499
10	2	2	2	2	2	2,535	2,530	2,497	2,510	2,497	2,499
20	2	2	2	2	2	2,529	2,525	2,495	2,511	2,498	2,499
30	2	2	2	2	2	2,521	2,522	2,494	2,509	2,498	2,498
40	2	2	2	2	2	2,508	2,514	2,496	2,512	2,497	2,499
50	2	2	2	2	2	2,501	2,514	2,496	2,513	2,497	2,497
60	2	2	2	2	2	2,489	2,514	2,498	2,516	2,498	2,501
70	2	2	2	2	2	2,473	2,502	2,498	2,515	2,497	2,499
80	2	2	2	2	2	2,460	2,499	2,499	2,516	2,496	2,501
90	2	2	2	2	2	2,445	2,495	2,501	2,516	2,496	2,501
100	2	2	2	2	2	2,427	2,487	2,502	2,518	2,496	2,500
2	2	2	2	2	2	2,529	2,524	2,496	2,511	2,495	2,498
2	10	2	2	2	2	2,558	2,523	2,496	2,513	2,497	2,499
2	20	2	2	2	2	2,593	2,515	2,494	2,515	2,497	2,499
2	30	2	2	2	2	2,626	2,505	2,495	2,516	2,497	2,498
2	40	2	2	2	2	2,659	2,501	2,495	2,520	2,497	2,501
2	50	2	2	2	2	2,690	2,486	2,491	2,523	2,499	2,502
2	60	2	2	2	2	2,718	2,476	2,489	2,524	2,497	2,502
2	70	2	2	2	2	2,740	2,462	2,489	2,527	2,498	2,503
2	80	2	2	2	2	2,759	2,450	2,497	2,528	2,497	2,503
2	90	2	2	2	2	2,781	2,435	2,495	2,530	2,498	2,504
2	100	2	2	2	2	2,798	2,419	2,493	2,530	2,498	2,504
2	2	2	2	2	2	2,508	2,511	2,495	2,505	2,492	2,494
2	10	2	2	2	2	2,536	2,503	2,495	2,508	2,493	2,496
10	10	2	2	2	2	2,533	2,503	2,496	2,508	2,492	2,496
10	20	2	2	2	2	2,564	2,496	2,496	2,511	2,493	2,496
20	20	2	2	2	2	2,560	2,492	2,497	2,513	2,492	2,497
20	30	2	2	2	2	2,579	2,482	2,494	2,519	2,498	2,500
30	30	2	2	2	2	2,575	2,476	2,496	2,518	2,495	2,500
30	40	2	2	2	2	2,610	2,466	2,499	2,520	2,491	2,500
40	40	2	2	2	2	2,605	2,461	2,499	2,520	2,492	2,500
40	50	2	2	2	2	2,629	2,450	2,499	2,523	2,493	2,501
50	50	2	2	2	2	2,622	2,444	2,499	2,523	2,492	2,502
50	60	2	2	2	2	2,644	2,433	2,499	2,525	2,494	2,503
60	60	2	2	2	2	2,639	2,429	2,501	2,526	2,494	2,504
60	70	2	2	2	2	2,660	2,416	2,501	2,527	2,494	2,504
70	70	2	2	2	2	2,651	2,409	2,501	2,529	2,493	2,505
70	80	2	2	2	2	2,666	2,393	2,503	2,532	2,493	2,506
80	80	2	2	2	2	2,656	2,384	2,501	2,534	2,494	2,506
80	90	2	2	2	2	2,666	2,371	2,501	2,536	2,494	2,508
90	90	2	2	2	2	2,656	2,360	2,502	2,537	2,493	2,507
90	100	2	2	2	2	2,667	2,335	2,502	2,538	2,492	2,507
100	100	2	2	2	2	2,656	2,334	2,502	2,539	2,491	2,509
2	2	2	2	2	2	2,490	2,505	2,499	2,497	2,492	2,492

Abgleich zu Testende Uhrzeit: 11:10

	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
Abgleichzugkraft:	2N	2N	2N	2N	2N	2N
Abgleichspannung:	2,488	2,504	2,500	2,499	2,493	2,494
Abweichung zum Testbeginn:	-0,054	-0,028	0,004	-0,011	-0,004	-0,005

# Messreihe 1 - Last an RTU



# MISP Testprotokoll

Protokollnummer: 20100322\_2  
 Seillast an Seil 4 bis 100 N

Datum: 22.03.2010

Abgleich zu Testbeginn Uhrzeit: 11:36

	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
Abgleichzugkraft:	2N	2N	2N	2N	2N	2N
Abgleichspannung:	2,492	2,504	2,502	2,499	2,492	2,494

Verstärkung des Messverstärkers: 200

Messergebnisse:

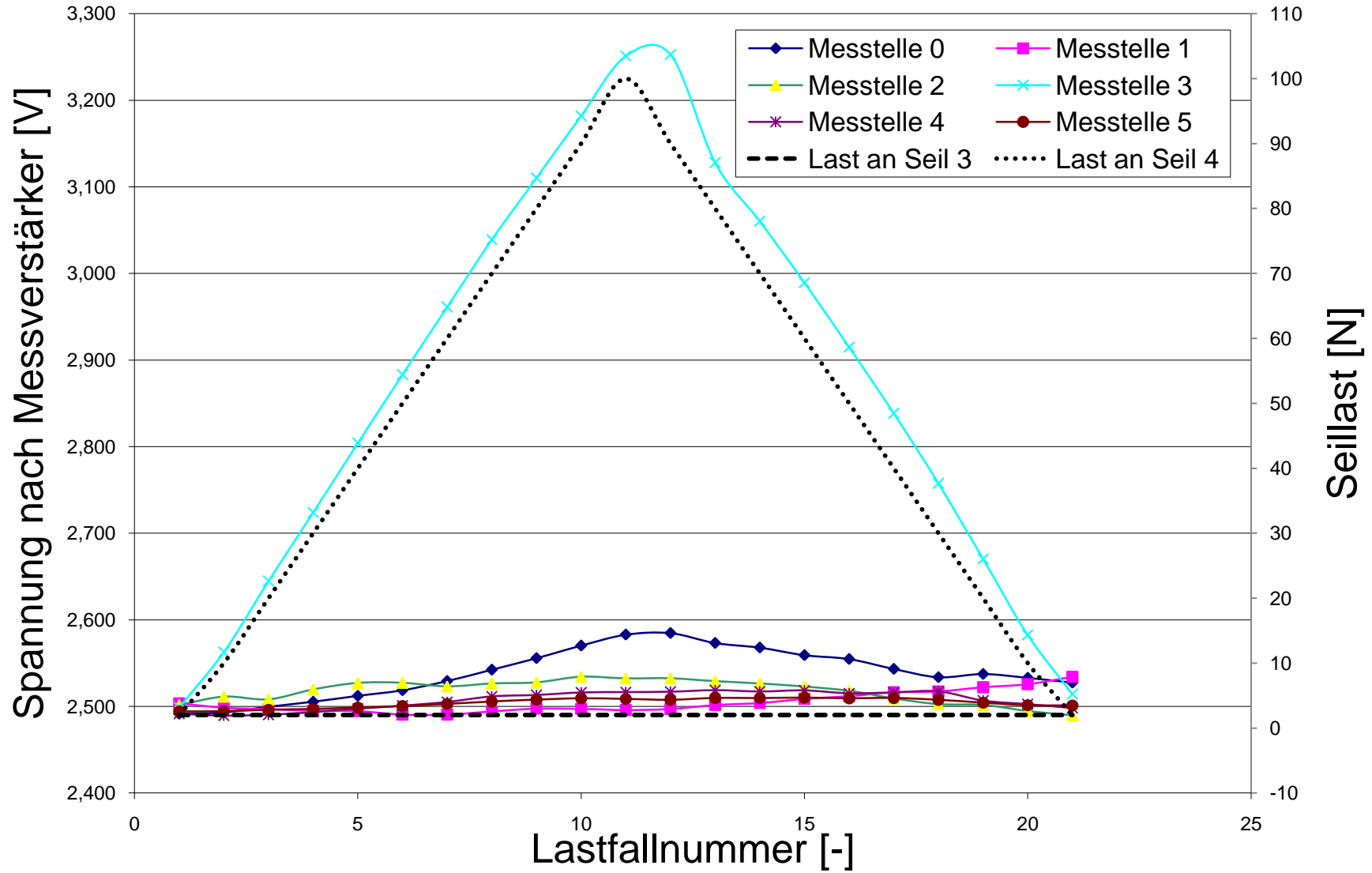
Zugkraft (N) / Brückenspannung (V)

S1	S2	S3	S4	S5	S6	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
2	2	2	2	2	2	2,492	2,504	2,502	2,499	2,492	2,494
2	2	2	10	2	2	2,493	2,499	2,511	2,563	2,489	2,494
2	2	2	20	2	2	2,500	2,497	2,508	2,645	2,490	2,496
2	2	2	30	2	2	2,505	2,495	2,520	2,724	2,493	2,497
2	2	2	40	2	2	2,512	2,495	2,527	2,804	2,497	2,499
2	2	2	50	2	2	2,519	2,491	2,527	2,883	2,501	2,500
2	2	2	60	2	2	2,529	2,491	2,523	2,961	2,505	2,503
2	2	2	70	2	2	2,542	2,494	2,526	3,039	2,512	2,506
2	2	2	80	2	2	2,556	2,498	2,528	3,110	2,513	2,508
2	2	2	90	2	2	2,570	2,497	2,534	3,182	2,516	2,509
2	2	2	100	2	2	2,583	2,496	2,532	3,251	2,516	2,509
2	2	2	90	2	2	2,585	2,497	2,532	3,253	2,517	2,508
2	2	2	80	2	2	2,573	2,502	2,529	3,128	2,519	2,510
2	2	2	70	2	2	2,568	2,504	2,526	3,060	2,517	2,510
2	2	2	60	2	2	2,559	2,509	2,523	2,989	2,518	2,510
2	2	2	50	2	2	2,555	2,512	2,518	2,915	2,515	2,509
2	2	2	40	2	2	2,543	2,516	2,509	2,839	2,516	2,510
2	2	2	30	2	2	2,534	2,517	2,503	2,758	2,517	2,508
2	2	2	20	2	2	2,537	2,522	2,502	2,670	2,507	2,504
2	2	2	10	2	2	2,533	2,526	2,495	2,583	2,503	2,501
2	2	2	2	2	2	2,527	2,534	2,490	2,514	2,498	2,501

Abgleich zu Testende Uhrzeit: 11:43

	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
Abgleichzugkraft:	2N	2N	2N	2N	2N	2N
Abgleichspannung:	2,529	2,533	2,490	2,513	2,499	2,498
Abweichung zum Testbeginn:	0,038	0,030	-0,012	0,014	0,008	0,004

# Messreihe 1 - Last an RTM



## MISP Testprotokoll

Protokollnummer: 20100322\_3  
Seillast an Seil 5 und Seil 6 bis 100N

Datum: 22.03.2010

Abgleich zu Testbeginn Uhrzeit: 13:01

	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
Abgleichzugkraft:	2N	2N	2N	2N	2N	2N
Abgleichspannung:	2,535	2,531	2,501	2,522	2,550	2,532

Verstärkung des Messverstärkers: 200

Messergebnisse:

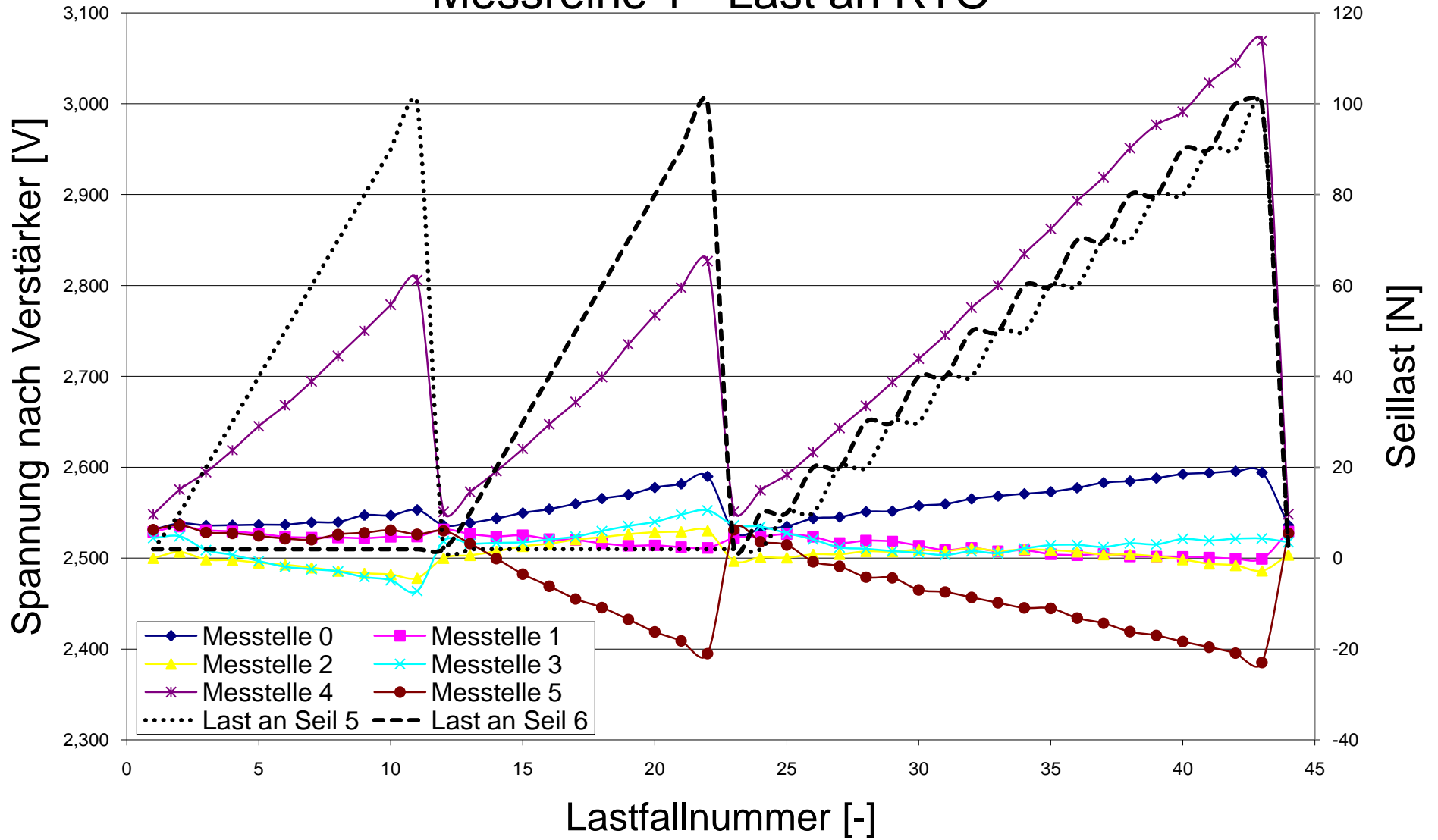
Zugkraft (N) / Brückenspannung (V)

S1	S2	S3	S4	S5	S6	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
2	2	2	2	2	2	2,531	2,529	2,500	2,522	2,548	2,531
2	2	2	2	10	2	2,538	2,535	2,507	2,524	2,575	2,536
2	2	2	2	20	2	2,536	2,531	2,499	2,509	2,595	2,528
2	2	2	2	30	2	2,536	2,529	2,498	2,504	2,619	2,527
2	2	2	2	40	2	2,537	2,527	2,495	2,497	2,645	2,525
2	2	2	2	50	2	2,537	2,524	2,493	2,491	2,668	2,522
2	2	2	2	60	2	2,539	2,523	2,490	2,488	2,694	2,520
2	2	2	2	70	2	2,540	2,523	2,486	2,485	2,723	2,526
2	2	2	2	80	2	2,547	2,522	2,484	2,479	2,750	2,528
2	2	2	2	90	2	2,547	2,524	2,482	2,476	2,779	2,531
2	2	2	2	100	2	2,553	2,524	2,478	2,464	2,806	2,526
2	2	2	2	2	2	2,536	2,532	2,500	2,519	2,551	2,530
2	2	2	2	2	10	2,539	2,527	2,503	2,516	2,573	2,516
2	2	2	2	2	20	2,544	2,524	2,508	2,517	2,596	2,500
2	2	2	2	2	30	2,550	2,525	2,513	2,518	2,620	2,483
2	2	2	2	2	40	2,554	2,521	2,516	2,521	2,647	2,469
2	2	2	2	2	50	2,560	2,520	2,521	2,524	2,672	2,455
2	2	2	2	2	60	2,566	2,516	2,523	2,530	2,699	2,446
2	2	2	2	2	70	2,570	2,514	2,526	2,535	2,735	2,433
2	2	2	2	2	80	2,578	2,514	2,529	2,540	2,767	2,419
2	2	2	2	2	90	2,582	2,512	2,529	2,548	2,798	2,409
2	2	2	2	2	100	2,590	2,511	2,530	2,553	2,827	2,395
2	2	2	2	2	2	2,529	2,522	2,497	2,536	2,551	2,531
2	2	2	2	2	10	2,532	2,524	2,501	2,535	2,575	2,518
2	2	2	2	2	10	2,535	2,526	2,501	2,528	2,592	2,515
2	2	2	2	2	10	2,544	2,523	2,504	2,521	2,617	2,496
2	2	2	2	2	20	2,545	2,517	2,504	2,512	2,643	2,491
2	2	2	2	2	20	2,551	2,519	2,508	2,510	2,668	2,479
2	2	2	2	2	30	2,552	2,518	2,507	2,508	2,694	2,478
2	2	2	2	2	30	2,558	2,514	2,509	2,506	2,719	2,465
2	2	2	2	2	40	2,560	2,509	2,508	2,503	2,745	2,463
2	2	2	2	2	40	2,565	2,511	2,511	2,508	2,776	2,457
2	2	2	2	2	50	2,568	2,508	2,508	2,505	2,800	2,451
2	2	2	2	2	50	2,571	2,509	2,510	2,511	2,835	2,445
2	2	2	2	2	60	2,573	2,504	2,509	2,514	2,862	2,445
2	2	2	2	2	60	2,577	2,503	2,507	2,515	2,893	2,434
2	2	2	2	2	70	2,583	2,505	2,504	2,512	2,919	2,428
2	2	2	2	2	70	2,585	2,502	2,504	2,516	2,951	2,419
2	2	2	2	2	80	2,588	2,502	2,502	2,515	2,977	2,415
2	2	2	2	2	80	2,592	2,502	2,499	2,521	2,991	2,408
2	2	2	2	2	90	2,594	2,501	2,494	2,519	3,023	2,402
2	2	2	2	2	90	2,596	2,499	2,492	2,521	3,045	2,396
2	2	2	2	2	100	2,594	2,499	2,486	2,522	3,069	2,385
2	2	2	2	2	2	2,536	2,529	2,504	2,518	2,548	2,528

Abgleich zu Testende Uhrzeit: 13:43

	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
Abgleichzugkraft:	2N	2N	2N	2N	2N	2N
Abgleichspannung:	2,535	2,530	2,503	2,516	2,550	2,527
Abweichung zum Testbeginn:	0,000	-0,001	0,002	-0,006	0,000	-0,006

# Messreihe 1 - Last an RTO



# MISP Testprotokoll

Protokollnummer: 20100322\_4  
 Seillast an allen Seilen bis 100N

Datum: 22.03.2010

Abgleich zu Testbeginn

Uhrzeit: 14:24

	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
Abgleichzugkraft:	2N	2N	2N	2N	2N	2N
Abgleichspannung:	2,501	2,498	2,500	2,504	2,492	2,496

Verstärkung des Messverstärkers: 200

Messergebnisse:

Zugkraft (N) / Brückenspannung (V)

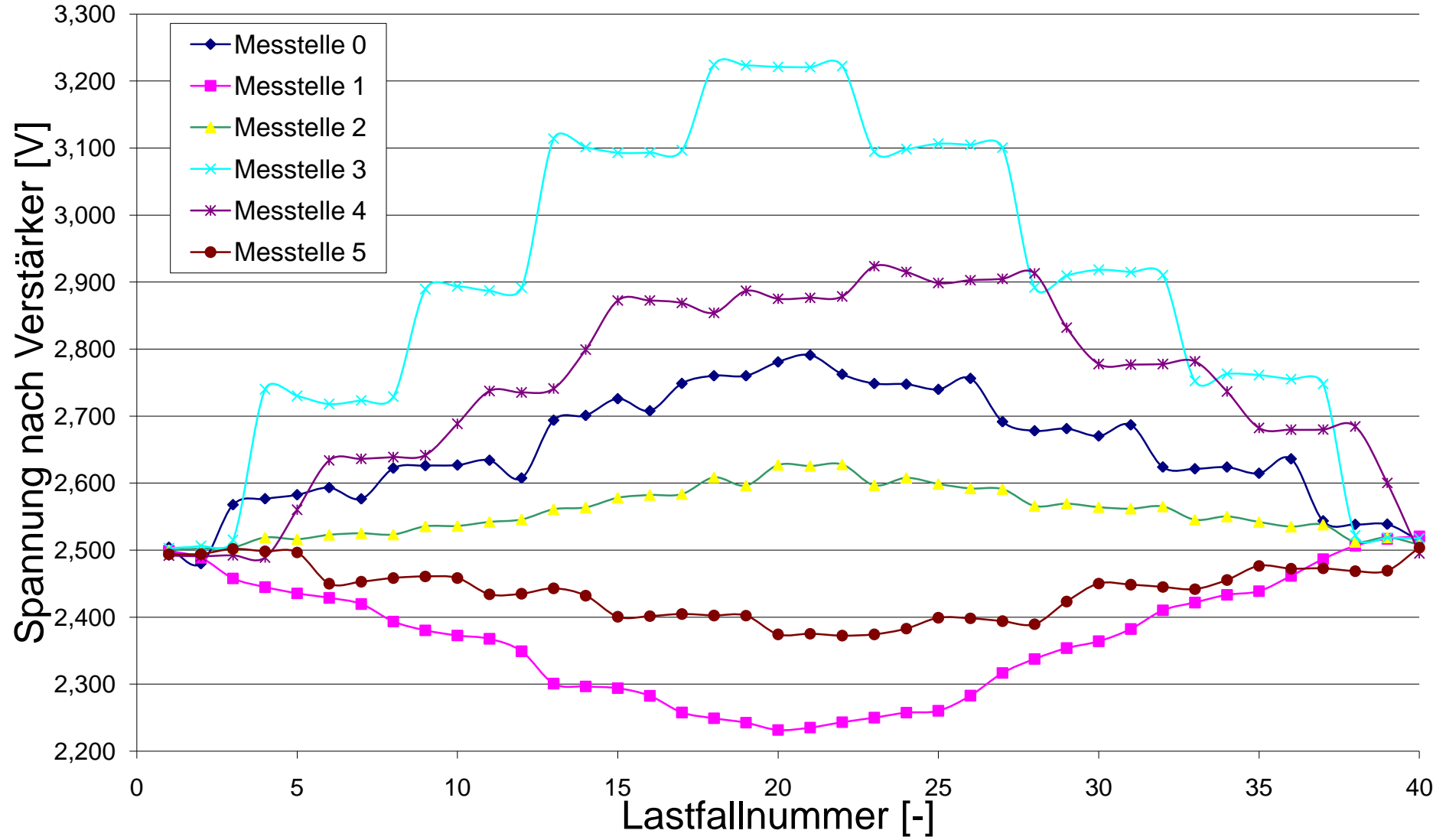
S1	S2	S3	S4	S5	S6	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
2	2	2	2	2	2	2,504	2,499	2,500	2,503	2,492	2,494
30	2	2	2	2	2	2,480	2,489	2,502	2,506	2,491	2,494
30	30	2	2	2	2	2,568	2,458	2,504	2,515	2,492	2,502
30	30	2	30	2	2	2,577	2,445	2,519	2,740	2,489	2,498
30	30	2	30	30	2	2,582	2,436	2,516	2,730	2,560	2,497
30	30	2	30	30	30	2,593	2,429	2,523	2,718	2,634	2,450
50	30	2	30	30	30	2,576	2,420	2,525	2,723	2,636	2,453
50	50	2	30	30	30	2,622	2,393	2,523	2,729	2,639	2,458
50	50	2	50	30	30	2,626	2,380	2,535	2,889	2,642	2,461
50	50	2	50	50	30	2,627	2,373	2,536	2,894	2,689	2,458
50	50	2	50	50	50	2,634	2,368	2,542	2,887	2,737	2,434
80	50	2	50	50	50	2,607	2,349	2,546	2,892	2,735	2,435
80	80	2	80	50	50	2,694	2,301	2,561	3,114	2,741	2,443
80	80	2	80	80	50	2,701	2,297	2,564	3,101	2,799	2,432
80	80	2	80	80	80	2,726	2,294	2,578	3,093	2,872	2,401
100	80	2	80	80	80	2,708	2,283	2,582	3,093	2,872	2,401
100	100	2	80	80	80	2,749	2,258	2,584	3,097	2,869	2,405
100	100	2	100	80	80	2,760	2,249	2,609	3,224	2,854	2,403
100	100	2	100	100	80	2,760	2,243	2,596	3,223	2,887	2,402
100	100	2	100	100	100	2,781	2,232	2,627	3,221	2,875	2,374
80	100	2	100	100	100	2,791	2,235	2,626	3,221	2,877	2,375
80	80	2	100	100	100	2,762	2,243	2,628	3,222	2,879	2,372
80	80	2	80	100	100	2,748	2,250	2,597	3,095	2,924	2,374
80	80	2	80	80	100	2,748	2,258	2,608	3,098	2,915	2,383
80	80	2	80	80	80	2,740	2,260	2,599	3,106	2,899	2,399
50	80	2	80	80	80	2,756	2,283	2,592	3,105	2,903	2,398
50	50	2	80	80	80	2,692	2,317	2,591	3,101	2,905	2,394
50	50	2	50	80	80	2,678	2,338	2,566	2,892	2,913	2,389
50	50	2	50	50	80	2,681	2,354	2,569	2,910	2,832	2,423
50	50	2	50	50	50	2,670	2,364	2,564	2,918	2,778	2,450
30	50	2	50	50	50	2,687	2,382	2,562	2,915	2,777	2,448
30	30	2	50	50	50	2,624	2,410	2,565	2,910	2,778	2,445
30	30	2	30	50	50	2,621	2,422	2,545	2,753	2,782	2,442
30	30	2	30	30	50	2,624	2,433	2,550	2,763	2,737	2,455
30	30	2	30	30	30	2,615	2,439	2,542	2,761	2,682	2,476
2	30	2	30	30	30	2,636	2,462	2,535	2,755	2,680	2,472
2	2	2	30	30	30	2,543	2,487	2,538	2,748	2,680	2,473
2	2	2	2	30	30	2,538	2,506	2,512	2,522	2,685	2,469
2	2	2	2	2	30	2,539	2,517	2,519	2,519	2,600	2,469
2	2	2	2	2	2	2,514	2,520	2,508	2,518	2,495	2,504

Abgleich zu Testende

Uhrzeit: 15:42

	Messtelle 0	Messtelle 1	Messtelle 2	Messtelle 3	Messtelle 4	Messtelle 5
Abgleichzugkraft:	2N	2N	2N	2N	2N	2N
Abgleichspannung:	2,517	2,518	2,508	2,517	2,495	2,503
Abweichung zum Testbeginn:	0,016	0,019	0,009	0,012	0,003	0,008

# Messreihe 2





```

%-----
% M-File zum Auslesen und Verarbeiten der Spannungen von "N" DMS-Messstellen und "M" Lastfällen
%
%
% Vorgabewerte:
%
% filename: Name der Messdatendatei (ohne Endung XLS) die ausgewertet werden soll
% precision: Zulässige Abweichung in N
%
% Eingabewert:
%
% count_of_meas: Anzahl "N" der vorhandenen Messstellen
%
%
% Programmablauf:
%
% Die vorgegebene Datei wird geöffnet und die Mess- und Vorgabewerte ausgelesen.
% Im nächsten Schritt wird eine LLSE-Berechnung mit diesen Daten durchgeführt.
% Abschließend wird die errechnete Kalibrierungsmatrix ("Calib") benutzt um
% eine Abschätzung der Fehler durchzuführen. Hierzu wird die
% Kalibrierungsmatrix mit der Messwertmatrix multipliziert. Dies ergibt
% eine Matrix der berechneten Seilspannungswerte ("Kraft_berechnet").
% Diese Matrix wird mit der Matrix der Vorgabewerte verglichen und eine
% Fehlermatrix erstellt ("Abweichungen_arr"). Anschließend werden die
% Abweichungen erfasst, die ausserhalb des, durch "precision" definierten,
% Wertebereichs liegen.
% Abschließend werden die Berechneten Kräfte, die zu hohen Abweichungen,
% die Kalibrierungsmatrix und die erfassten Werte in Dateien ausgegeben.%
%
%

function [Calib, Voltage] = Auswertung_DMS(filename, precision);
%Eingabepfung

%Erstellen der Pfadbezeichnung
pfad = [filename, '.xls'];
%Öffnen der Datei
[nums, text] = xlsread(pfad);

%Eingabe der Anzahl der Messstellen
count_of_meas = input('Anzahl der Messtellen: ');

[l_max, c_max] = size(nums);

not_a_number = isnan(nums);

%Auslesen der Werte
l = 1;

% Fehlerkontrolle %
if c_max ~= count_of_meas*2
    display(sprintf('FEHLER: Die eingegebene Anzahl der Messstellen ( %d ) stimmt nicht mit der Anzahl der Spalten ( %d ) ↙
    überein, bitte prüfen Sie Ihre Eingabe.', count_of_meas, c_max));
else
    for line = 1 : l_max
        if ~not_a_number(line, 1)
            for column = 1 : count_of_meas
                %Auslesen der Lastfallmatrix
                Load(l, column) = nums(line, column);
                %Auslesen der Spannungswerte
                Voltage(l, column) = nums(line, column + count_of_meas);
            end
            l = l + 1;
        end
    end
end

[l_max_v, r_max_v] = size(Voltage);
[l_max_l, r_max_l] = size(Load);

```

```
%Beginn der LLSE-Berechnung

dof=count_of_meas;
hight=l_max_v;
windth=r_max_v;

Voltage_Load=[Voltage,Load];

for line = 1 : hight
    for column = 1 : windth
        b(((line-1)*(dof))+column)=Voltage_Load(line,dof+column);
        A(((line-1)*dof)+column,((column-1)*dof)+1:((column-1)*dof)+dof)=Voltage_Load(line,1:dof);
    end
end
b;
A;
x = ((inv(A*A))*A')*b;

for m=1:dof
    Calib(m,1:dof)=x(((m-1)*dof)+1:((m-1)*dof)+dof);
end
Calib;
condition = cond(Calib)
Voltage;
RankStrain=rank(Voltage);
Load;
RankL=rank(Load);

% Fehlerberechnung

Kraft_berechnet = (A * x);
Abweichungen = b - Kraft_berechnet;

for count = 1 : (length(Kraft_berechnet) / dof)
    Abweichungen_arr (count, :) = Abweichungen((((count-1)*dof)+1) : (((count-1)* dof) + dof));
end

[err_Messstellen, err_Lastfaelle] = find(abs(Abweichungen_arr) > precision);

err(:,1) = err_Lastfaelle';
err(:,2) = err_Messstellen';

for count = 1 : length(err_Messstellen)
    err (count,3) = Abweichungen_arr(err_Messstellen(count), err_Lastfaelle(count));
end

for count = 1 : (length(Kraft_berechnet)/6)
    for count2 = 1 : 6
        Kraft_berechnet_arr (count, count2) = Kraft_berechnet(count2+((count-1)*6));
    end
end

outputForcecalc=[filename,'_Kraft_berechnet_',date,'.txt'];
outputAbweichung=[filename,'_Abweichungen_',date,'.txt'];
save(outputForcecalc, 'Kraft_berechnet', '-ascii', '-tabs');
save(outputAbweichung, 'err', '-ascii', '-tabs');

outputvolt=[filename,'_voltage_',date,'.txt'];
outputcalib=[filename,'_calib_',date,'.txt'];
save(outputvolt, 'Voltage', '-ascii');
save(outputcalib, 'Calib', '-ascii');
```

```
end
```

