



Alexander Groß, BSc.

# **Untersuchung faseroptischer Dehnungsmessung an Felsbolzen**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Schubert Wulf

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Blümel Manfred

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Graz, Juni 2018

---

# EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

## AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

---

## **Abstract**

This master thesis deals with the investigation of the anchors on their strain by using two different measuring systems. The tests were carried out on a tension field with a horizontal load (tensile load). The basics of the measuring systems used and the presetting of the conventional measuring system are described. The main focus of this work is the measurement of the anchor strain by means of distributed fiber optic strain measurement with the high-resolution LUNA OBR 4600. Three main experiments were performed using two different anchor types. The application of the measuring sensor was also differentiated. The main experiments were evaluated and compared using the two measuring systems.

---

## **Kurzfassung**

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung von Ankerb auf ihr Dehnungsverhalten mittels zwei unterschiedlicher Messsysteme. Die Versuche wurden an einem Spannungsfeld mit horizontaler Belastung (Zugkraft) durchgeführt. Die Grundlagen der verwendeten Messsysteme und die Voreinstellung des konventionellen Messsystems werden beschrieben. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Messung der Ankerdehnung mittels verteilter faseroptischer Dehnungsmessung mit dem hochauflösenden LUNA OBR 4600. Es wurden drei Hauptversuche durchgeführt, wobei dafür zwei unterschiedliche Ankertypen verwendet wurden. Das Verfahren der Applizierung des Messensors wurde ebenso unterschieden. Die Hauptversuche wurden anhand der zwei verwendeten Messsysteme ausgewertet und verglichen.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Ankersysteme</b>	<b>2</b>
2.1 Grundlagen.....	2
2.2 Verbundanker.....	2
2.2.1 Mörtelverbundanker.....	2
<b>3. Messsysteme</b>	<b>4</b>
3.1 Konventionelles Messsystem.....	4
3.1.1 Dehnungsaufnehmer .....	4
3.1.2 Kraftaufnehmer .....	5
3.1.3 Druckaufnehmer .....	6
3.1.4 Hohlkolbenzylinder .....	7
3.1.5 Messverstärker .....	8
3.1.6 Software .....	10
3.2 Faseroptisches Messsystem.....	10
3.2.1 BRUsens Strain V9.....	11
3.2.2 FiMT .....	12
<b>4. Bedienung von Catman 4.5</b>	<b>14</b>
4.1 I/O Definition.....	14
4.2 Gerätesetup.....	17
4.3 Online Dokument.....	19
4.4 Messassistent.....	19
4.5 Start der Messung .....	21
4.6 Exportieren der Messdaten.....	22
<b>5. Versuchsaufbau</b>	<b>24</b>
5.1 Kleberauswahl.....	24
5.1.1 INNOTEK Metal Weld.....	24
5.1.2 BASF MasterRoc MP 368.....	25
5.1.3 RS PRO Epoxid Vergussmasse.....	26

---

5.2	Sensorinstallierung .....	27
5.2.1	SN-Anker.....	27
5.2.2	IBO-Anker.....	29
5.3	Spannfeldversuch.....	30
<b>6.</b>	<b>Laborversuch</b> .....	<b>32</b>
6.1	Kalibrierung der Aufnehmer .....	32
6.1.1	Kalibrierung des Dehnungsaufnehmers.....	32
6.1.2	Kalibrierung der Kraftmessdose.....	34
6.2	Vorversuch .....	35
6.3	Hauptversuch .....	36
<b>7.</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>37</b>
7.1	Vorversuch .....	37
7.1.1	SN-Anker.....	38
7.1.2	IBO-Anker.....	40
7.2	Hauptversuch .....	42
7.2.1	Versuch 1: SN-Anker .....	43
7.2.2	Versuch 2: IBO-Anker.....	48
7.2.3	Versuch 3: IBO-Anker.....	53
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>58</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>61</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>62</b>

---

## Abkürzungen

2K ..... zwei-Komponenten

DMS ..... Dehnmessstreifen

KMD ..... Kraftmessdose

t ..... Tonnen

kN ..... Kilonewton

MN ..... Meganewton

Hz ..... Hertz

# 1. Einleitung

In der vorliegenden Masterarbeit wird das Thema „Untersuchung der Anker auf ihre Dehnung mittels verteilter faseroptischer Dehnungsmessung mit dem hochauflösenden LUNA OBR 4600“ behandelt. Die Arbeit beinhaltet sowohl theoretische Grundlagen, die dem Thema Verbundanker zugrunde liegen, als auch praktische Vorgehensweisen. Dabei soll der fundamentalen Frage nachgegangen werden, ob die Untersuchung der Anker auf ihre Dehnung mittels faseroptischer Dehnungsmessung überhaupt nachgewiesen werden kann.

Im zweiten Kapitel wird auf die theoretischen Grundlagen, die relevanten Begriffe und die Einbaumöglichkeiten der zu untersuchenden Ankertypen näher eingegangen.

Die Messsysteme, mit dem sich das dritte Kapitel befasst, gibt Auskunft über die verwendeten Messsysteme, die zur Untersuchung der Anker auf ihre Dehnung notwendig sind. Dabei werden das konventionelle und das faseroptische Messsystem behandelt.

Im vierten Kapitel werden zunächst die Bedienungsschritte der Software Catman 4.5 behandelt, die für das konventionelle Messsystem von Bedeutung sind.

Das fünfte Kapitel behandelt den Versuchsaufbau, der sich in die Kleberauswahl, die Ankerinstallation und den Spannfeldversuch gliedert. Dabei wird auf die Eigenschaften des Klebers, die Herstellung der Anker und den Aufbau des Spannfelds näher eingegangen.

Im sechsten Kapitel wird der Laborversuch behandelt. Dabei befasst man sich mit der Kalibrierung der Aufnehmer, den Vorversuch und den Hauptversuch.

Das siebte Kapitel behandelt die Ergebnisse der Vorversuche und der Hauptversuche. Wobei die Vorversuche mittels konventionellem Messsystem und die Hauptversuche mit beiden Messsystemen untersucht werden.



## 2. Ankersysteme

### 2.1 Grundlagen

Ankersysteme werden in drei unterschiedliche Verankerungstechniken (mechanischen Ankern, Verbundankern und als Reibungsankern) untergliedert. In den folgenden Unterkapiteln wird auf den Verbundanker und deren Untergliederung näher eingegangen.

### 2.2 Verbundanker

Wie der Name Verbundanker zu erkennen gibt, werden die Anker mittels Verbund in das Gebirge eingebaut. Der Verbundanker weist unterschiedliche Ankertypen auf, wie z.B. den Mörtelverbundanker, den Injektionsbohranker, den Injektionsrammanker und den Klebeanker. Die Versetzungstechniken als auch die Verbundankertypen unterscheiden sich voneinander, was in folgendem Kapitel besprochen wird (Grimscheider, 2008).

#### 2.2.1 Mörtelverbundanker

Füllmörtel-, Litzen-, Selbstbohr-, Injektions-, Ramm- und Perforationsanker, sind Ankersysteme, die zu den Mörtelverbundankern zählen. Der Einbau der Mörtelverbundanker wird in zwei Varianten unterschieden, selbst die Verfüllung des Bohrlochs wird unterschieden. Bei der ersten Variante wird das Bohrloch mittels Zementmörtel verfüllt und der Anker mithilfe eines Schlagdrehbohrers in das Bohrloch eingedrückt. Bei der zweiten Variante wird der Zementmörtel nachträglich in das Bohrloch injiziert. Um das Versetzen der Mörtelverbundanker zu beschleunigen, werden sogenannte Zement- oder Mörtelpatronen eingesetzt (Grimscheider, 2008).

Bei vorgespannten Stab- und Litzenankern, handelt es sich um ein zeitaufwändiges und im Vergleich zu den permanenten Ankern teureres Ankersystem. Um über die freie Ankerlänge die auftretenden Dehnungen sicherzustellen, wird diese mit einem Kunststoffrohr umhüllt oder die Verankerungslänge, vor dem Vorspannen, mittels Suspensionsmasse injiziert. Anders als bei den vorgespannten Ankern, wird bei den permanenten Ankern ein Kunststoffrohr mit einem vor Korrosion schützenden Fett umhüllt, um die Langlebigkeit der Anker zu gewährleisten. Selbstbohrende Injektionsanker oder auch Injektionsbohranker (IBO) genannt, sind für klüftiges Gebirge, porigem Lockergestein und nicht standfestem Bohrlochwandung geeignet. Diese Anker

---

sind mit einer Bohrkronen versehen, die im Bohrloch verbleibt (verlorene Bohrkronen), und über das Stahlrohr, das Bohrloch samt dem Rohr mit Zementmörtel verpresst wird. Bei größeren Tunnelquerschnitten, werden die Verpressanker, zur zusätzlichen Sicherung von Felskeilen, vorgespannt. Die vollkommene Tragfähigkeit eines Ankers ist erst nach dem Erhärten des Mörtels gegeben. Vorgespannte Anker werden mithilfe eines Drehmomentschraubers oder einer hydraulischen Presse vorgespannt (Grimscheider, 2008).

# 3. Messsysteme

## 3.1 Konventionelles Messsystem

Das konventionelle Messsystem besteht, wie in nachfolgenden Abschnitten beschrieben, aus einem Dehnungsaufnehmer, einem Kraftaufnehmer, Druckaufnehmer, einem Hohlschubzylinder, einem Messverstärker und der dazugehörigen Software zur Erfassung der Messwerte. Bis auf den Hohlschubzylinder, der von der Firma ENERPAC stammte, stammten alle Instrumente, die für das Messsystem relevant waren, von der Firma HBM.

### 3.1.1 Dehnungsaufnehmer

Der Dehnungsaufnehmer, oder auch Wegaufnehmer genannt, formt mithilfe von DMS die Verschiebung der Spitze einer Tastzunge in ein elektrisches Signal um. Die messbaren Verschiebungen belaufen sich auf  $s = \pm 2,5$  mm, wobei die Messung vor mechanischer Überlastung mittels Anschlägen, die beidseitig angeordnet sind, gesichert wird. Der Wegaufnehmer ist so kalibriert, dass eine Verschiebung von  $s = 1$  mm ein Signal von 1 mV/V Speisespannung am Messgerät erzeugt wird (HBM, 2018).

Marke:	HBM
Typ:	DD1
Messbereich:	$\pm 2,5$ mm
Nennkennwert:	$\pm 2,5$ mV/V
Elektrisches Messprinzip:	DMS-Vollbrücke



Abbildung 1: Dehnungsaufnehmer DD1 (HBM, 2018)

### 3.1.2 Kraftaufnehmer

Zur Messung von statischen und dynamischen Druckkräften wurde ein Kraftaufnehmer, auch Kraftmessdose (KMD) genannt, eingesetzt. Mithilfe von zusätzlichen Zugelementen und der genauen Einbauanleitung können auch Zugkräfte gemessen werden. Sie können in jeder beliebigen Lage eingebaut werden. Dabei ist zu beachten, dass die Krafteinleitung in Richtung der Aufnehmerachse wirkt und dass mit der KMD sorgfältig umgegangen wird. Das Messelement wird bei einer Belastung in axialer Richtung gestaucht und die daraus resultierende Dehnung wird mittels DMS erfasst (HBM, 2018).

Marke:	HBM
Typ:	C6A
Nennkraft:	2 MN
Nennkennwert:	2 mV/V
Elektrisches Messprinzip:	DMS



Abbildung 2: Kraftaufnehmer C6A (HBM, 2018)

### 3.1.3 Druckaufnehmer

Zur Messung von statischen und dynamischen Flüssigkeits- und Gasdrücke wurde ein Druckaufnehmer des Typs P3MB verwendet. Die Messbereiche reichen von 1 bis 3000 bar und arbeiten nach dem DMS-Prinzip, wobei verschiedene Anschlussoptionen zu beachten sind. Der Druckaufnehmer kann in beliebiger Lage eingeschraubt werden, dabei ist besonders zu beachten, dass das Gewinde am Anschlusszapfen vollständig abgedichtet ist (HBM, 2018).

Marke:	HBM
Typ:	P3MB
Druckart:	Absolutdruck
Messbereich:	2000 bar
Nennkennwert:	2 mV/V
Elektrisches Messprinzip:	Folien-DMS



Abbildung 3: Druckaufnehmer P3MB (HBM, 2018)

#### 3.1.4 Hohlkolbenzylinder

Der Hohlkolbenzylinder ist durch seine Konstruktion für Druck- und Zugarbeiten geeignet. Der verwendete Zylinder besitzt eine Arbeitskraft von 60 t, die 567 kN entsprechen. Die eingefahrene Bauhöhe beträgt 323 mm, mit einem Hub von 153 mm, besitzt der Zylinder eine ausgefahrene Bauhöhe von 476 mm (ENERPAC, 2018).

Marke:	ENERPAC
Typ:	RCH-606
Nennkraft:	60 t $\hat{=}$ 567 kN
Druckaufbau:	700 bar



Abbildung 4: Hohlkolbenzylinder der RCH-Serie (ENERPAC, 2018)

### 3.1.5 Messverstärker

Um die Messdaten erfassen zu können und diese an einen PC weiterzuleiten, wurde ein Messverstärker des Typs Spider8 von der Firma HBM eingesetzt.

Beim Spider8 handelt es sich um eine mehrkanalige PC-Messelektronik, die mit einem Rechner parallele dynamische Messdaten erfasst. Die Messaufnehmer werden mit der Trägerfrequenz vom Messverstärker versorgt und die Messdaten werden über eine PC-Schnittstelle (siehe Abbildung 6) an den PC weitergeleitet (Lagger, 2014).

Heutzutage wird der Spider8 nicht mehr vertrieben, dieser wurde durch den Nachfolger Quantum-X ersetzt (HBM, 2018).



Abbildung 5: Messverstärker – Spider 8 (HBM, 2018)

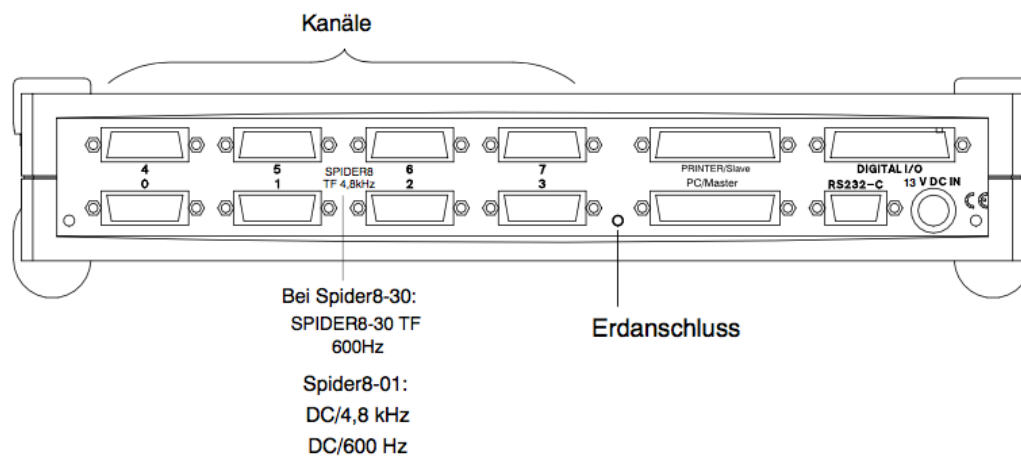


Abb. B 1: Geräterückseite

Das Gerät hat folgende Anschlußmöglichkeiten:

Anschlußmöglichkeit	Bedeutung
Kanal 0 bis 7	Anschluß für Aufnehmer
PRINTER/Slave, 25polige Buchse (IEEE1284)	Anschluß für Drucker, Anschluß für weitere <i>Spider8</i>
PC/Master, 25polige Buchse (IEEE1284)	Anschluß für PC und weitere <i>Spider8</i>
DIGITAL I/O, 25polige Buchse (IEEE1284)	8 digitale Eingänge und 8 digitale Ein/Ausgänge
RS-232-C, 9polige Buchse	Anschluß für PC
13V DC IN, 4polige Buchse	Anschluß für externe Stromversorgung (Netzteil, Batterie)

Abbildung 6: Spider 8 – Anschlussmöglichkeiten (HBM, 2018)



Marke:	HBM
Typ:	Spider 8/SR55
Verstärkeranzahl	4/1
Trägerfrequenz	4800 Hz (Sinus – Welle)

### 3.1.6 Software

Neben der Hardware wurde auch eine Software benötigt, um ein funktionales Gesamtmesssystem bereitstellen zu können. Für die Messdatenerfassung kam die Software Catman 4.5 zum Einsatz, die benötigten Einstellungsschritte der Messsoftware werden im Kapitel 4 beschrieben.

## 3.2 Faseroptisches Messsystem

Als faseroptisches Messsystem wurde ein Optical Backscatter Reflectometer (OBR) vom Hersteller Luna Technologies, LUNA OBR 4600, eingesetzt. Basierend auf der Rayleigh-Streuung, führt dieses Messsystem hochauflösende verteilte faseroptische Dehnungs- und Temperaturmessungen durch, welche verteilt über die gesamte Glasfaser abgeleitet werden können (Monsberger, 2015).

Sämtliche Messungen wurden mit einer eigens vom Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme entwickelter Software, basierend auf SDK (Software-Development-Kit), durchgeführt.

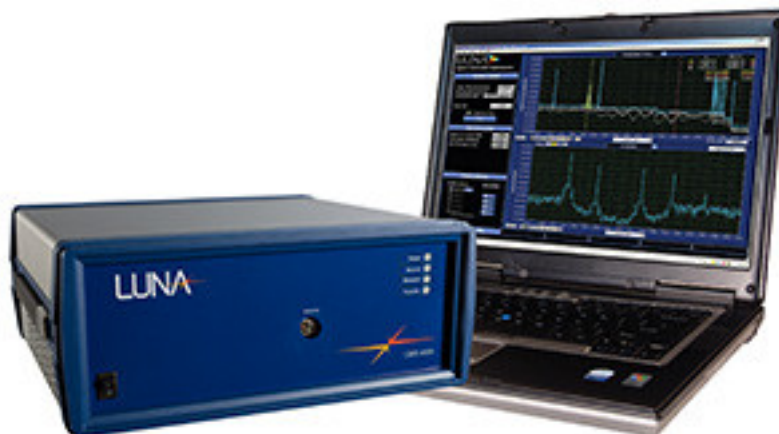


Abbildung 7: LUNA OBR 4600 (Luna, 2018)

Im Allgemeinen können die Elemente einer Glasfaser in den Kern, den Mantel und die Beschichtung untergliedert werden. Der Kern besteht meist aus reinem Glas ( $\text{SiO}_2$ ). Durch minimale Unterschiede in den strukturellen Eigenschaften des Glases des Mantels ergeben andere Reflexionseigenschaften, wodurch sich das Licht aufgrund der sogenannten Totalreflexion im Glasfaserkern entlang der Faser ausbreitet. Die Beschichtung, welche standardmäßig aus Kunststoff (z.B. Acrylat) hergestellt wird, schützt die Glasfaser vor äußerer Beschädigung. Damit die Dehnungen auf den Kern übertragen werden, ist eine feste Verbindung zwischen Kern und Mantel, wie auch zwischen Mantel und Beschichtung von großer Bedeutung (Monsberger, 2015). Die blanke Glasfaser ist aufgrund Ihrer Fragilität für Anwendungen in der Felsmechanik nicht geeignet. Hierfür dienen speziell entwickelte Sensorkabel, welche den rauen Umgebungsbedingungen z.B. im Tunnel standhalten können. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Sensorkabel der Firma Brugg Kabel AG (Schweiz) verwendet, welche nachfolgend beschrieben werden.

### 3.2.1 BRUsens Strain V9

Das faseroptische Dehnungsmesskabel BRUsens Strain V9, mit einem Dehnungsbereich  $< 1\%$  ( $10000 \mu\text{strain}$ ), von Brugg Kabel AG, ist wie folgt aufgebaut (siehe Abbildung 8):

- Kunststoff Außenmantel mit strukturierter Oberfläche (1)
- Metallrohr SS316L, zum Schutz und zur Abdichtung (2)
- Dehnungsübertragungsschicht (3)
- Glasfaser (4)

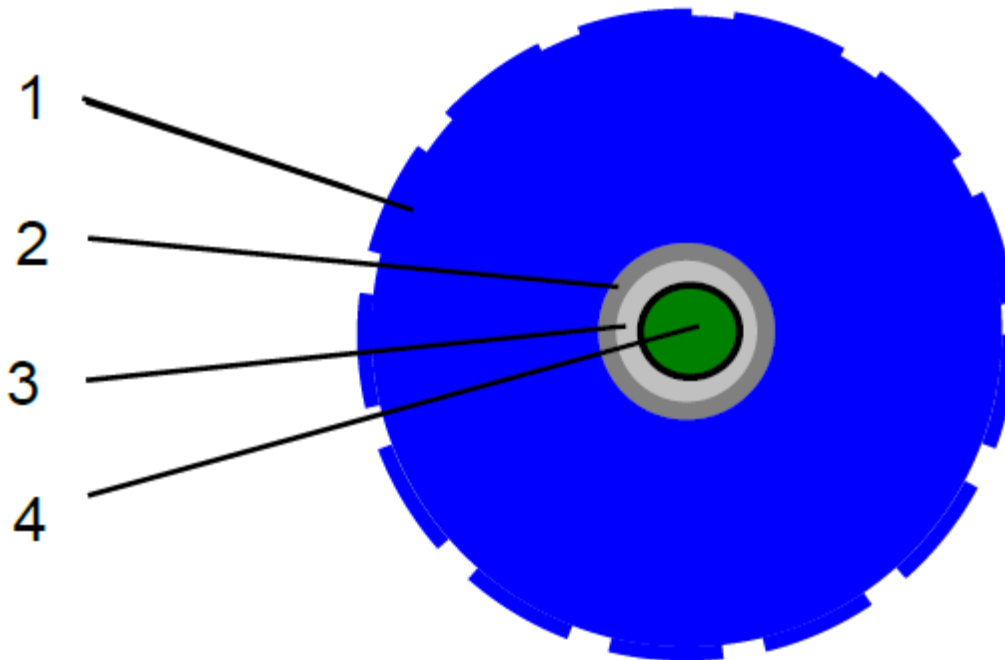


Abbildung 8: BRUens strain V9 (Brugg Kabel, 2012)

### 3.2.2 FiMT

Das FiMT (Fiber in Metal Tube) Dehnungsmesskabel, welches lediglich einen Durchmesser von 0,9 mm aufweist und ebenso von Brugg Kabel AG hergestellt wird. Der Aufbau und die Eigenschaften von FiMT können mit dem BRUens Strain V9 verglichen werden. Das FiMT Dehnungsmesskabel ist wie folgt aufgebaut (Abbildung 9):

- Glasfaser (I)
- Dehnungsübertragungsschicht (II)
- Metallrohr (III)

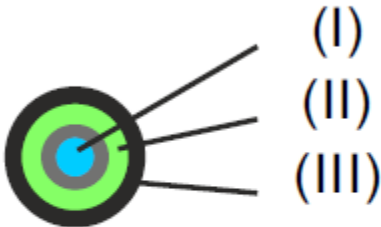


Abbildung 9: FiMT-Kabel (Monsberger, 2017)

## 4. Bedienung von Catman 4.5

In folgendem Kapitel werden die einzelnen Arbeitsabläufe und Einstellungen beschrieben, die notwendig waren, um den Versuch durchzuführen.

Beim Start von Catman 4.5 wird man zunächst aufgefordert den gewünschten Arbeitsmodus zu wählen. Wie in Abbildung 10 ersichtlich, wird der Arbeitsmodus „Professional“ gewählt und mit dem Bestätigen des „Start“-Buttons wird die Software geöffnet.

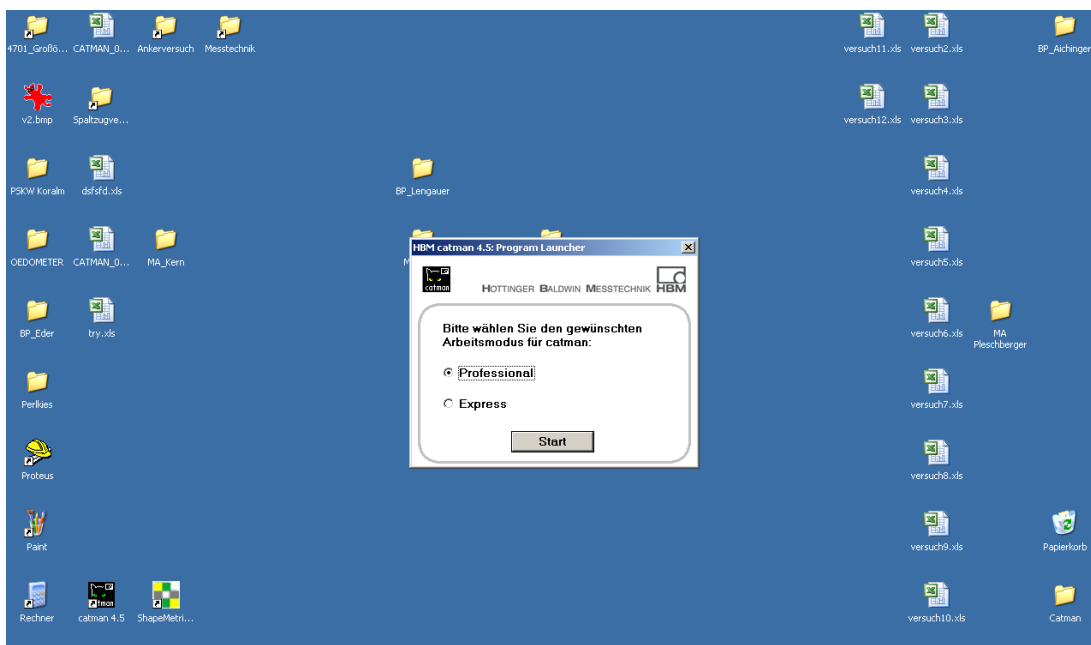


Abbildung 10: Wahl des Arbeitsmodus in Catman 4.5

### 4.1 I/O Definition

Beim nächsten Einstellungsschritt wird der Messaufnehmer zu den einzelnen Kanälen, wie in Abbildung 12 ersichtlich, zugewiesen. Der Zeitkanal war auf Kanal 1 platziert, der in der Spalte „Einstellungen“ auf „Master Clock“ umgestellt wurde (Abbildung 11).

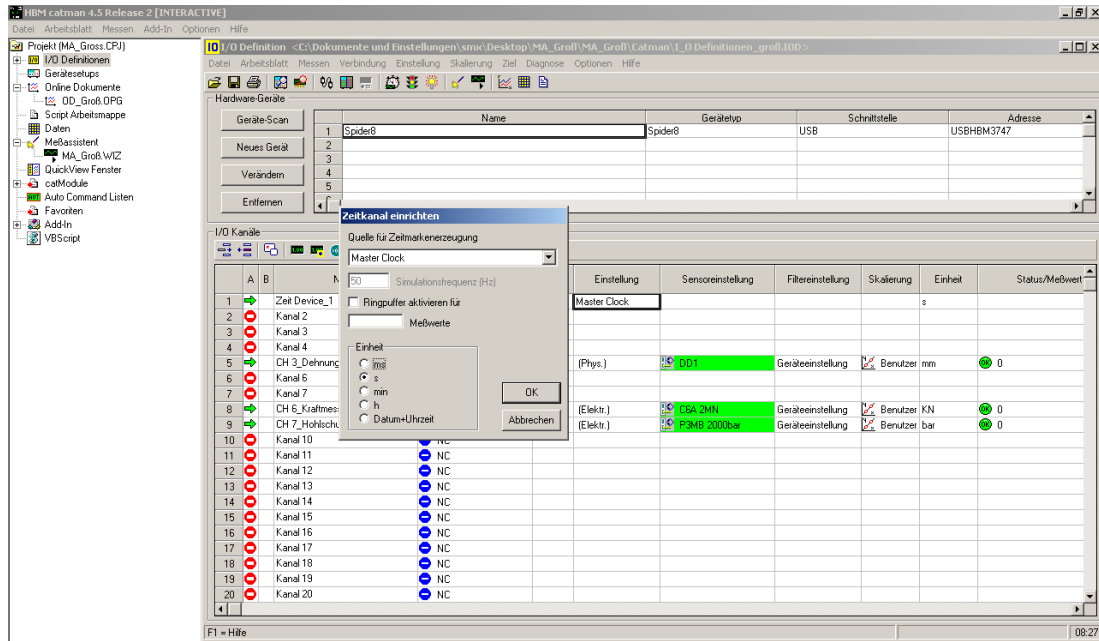


Abbildung 11: Einstellen des Zeitkanals

Bei den zuvor an den Spider8 angeschlossenen Sensoren, wurde der jeweilige Sensortyp zugewiesen. Der Sensortyp konnte aus der Sensordatenbank gewählt werden, dabei war lediglich zu beachten, dass der richtige Sensor gewählt werden musste (Lagger, 2014). Da der Dehnungsaufnehmer DD1, nicht in der Sensordatenbank vorhanden war, musste ein neuer Sensor erstellt werden, wofür lediglich die Datenblätter des Dehnungsaufnehmers notwendig waren. Weiters wurde in der Spalte „Skalierung“, für jeden aktiven Sensor auf „Benutzer“ umgestellt und die geprüften Skalierungswerte eingegeben.

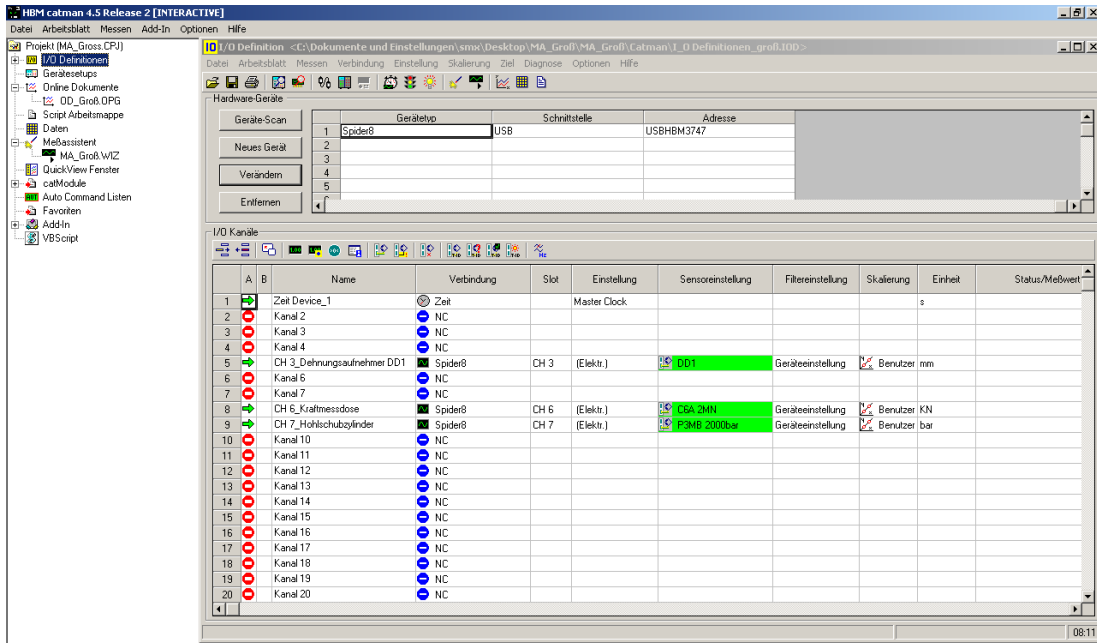


Abbildung 12: Übersicht der aktivierten Kanäle

Die Einstellungen für den Dehnungsaufnehmer DD1, der als neuer Sensor in der Sensordatenbank angelegt wurde, ist in der Abbildung 13 ersichtlich. Bei der Erstellung eines neuen Sensors, ist zu beachten, dass die richtige Aufnehmerschaltung, Speisung, elektrische und physikalische Kennlinie, sowie die Sensor-ID angegeben wird.

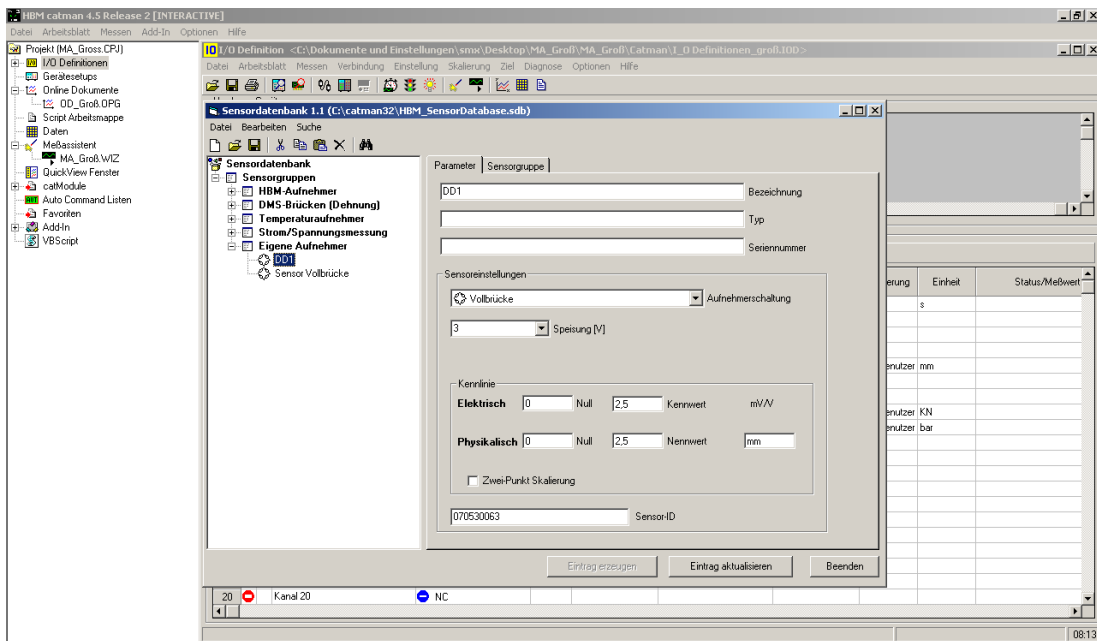


Abbildung 13: Einstellung des Dehnungsaufnehmers DD1

Die Auswahl der verwendeten Aufnehmer aus der Sensordatenbank und die eingegebenen Skalierungswerte werden im Anhang dargestellt.

Sobald die Sensoren ausgewählt und die dazugehörigen Skalierungswerte eingegeben wurden, mussten die aktiven Sensoren nullgestellt werden, damit keine Messfehler entstehen können. Dafür wurde in der Spalte „Status/Meßwert“ mit einem Rechtsklick in die gewünschte Zeile des Sensors geklickt und es öffnet sich ein Dropdown-Menü, wie in Abbildung 14 ersichtlich. Da der Fall eintrat, dass anstatt einer „Null“ ein anderer Messwert angezeigt wurde, musste der vorherige Schritt so oft wiederholt werden bis die „Null“ dargestellt wurde.

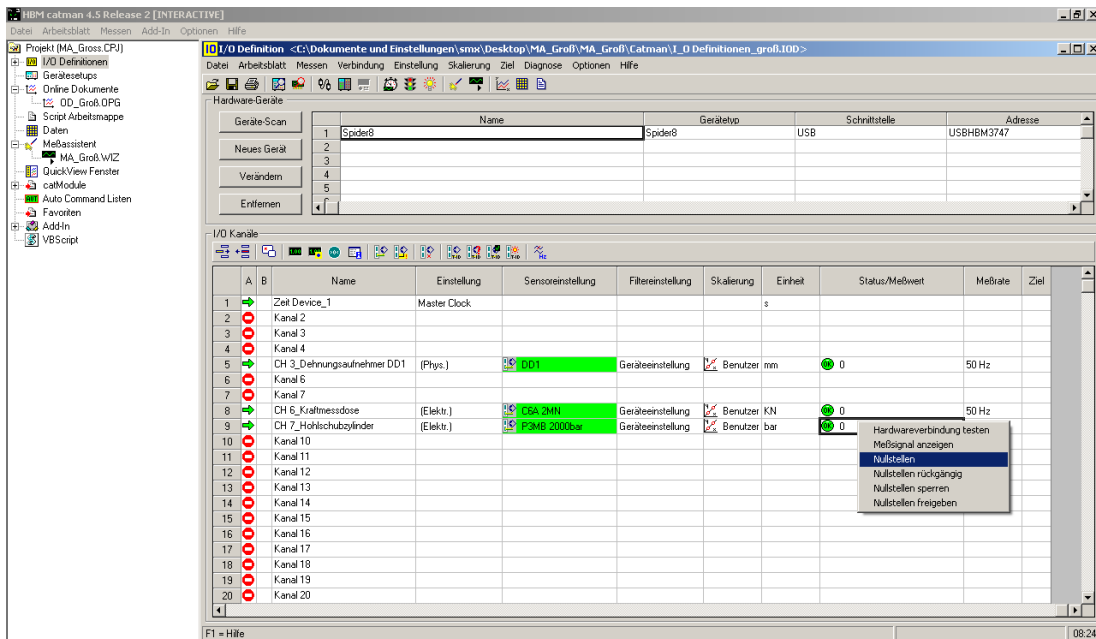


Abbildung 14: Nullstellen der aktiven Sensoren

## 4.2 Gerätesetup

Nachdem die aktiven Sensoren nullgestellt wurden, musste das Gerätesetup aufgerufen werden, wobei nochmals überprüft wurde, ob die gewählten Aufnehmertypen mit den jeweiligen Sensoren übereinstimmen (Lagger, 2014). Die Messwerte erscheinen grün, sobald die Einstellungen der Sensoren richtig durchgeführt wurden (Abbildung 15).



Meßeite	Variables Filter	Frequenz	Geräte ID	
N.V.			HBM_Spider8-55/01_F02700.P32	

Slot	Name	Typ	Messwert	Einheit	Aufnehmertyp	Meßbereich	Filtertyp	Tarawert	Tara zulassen	Shunt aktiv
0	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Unbenannt	SR95	-0.941	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Unbenannt	SR95	-0.003	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Unbenannt	SR95	0.024	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Unbenannt	DIG I/O	FFFF						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 15: Gerätesetup

Vor jedem Messbeginn wurde das Gerätesetup auf ihre Richtigkeit überprüft und mit dem Betätigen des „T“ wurden die Messwerte erneut nullgestellt (siehe Abbildung 16).

Meßeite	Variables Filter	Frequenz	Geräte ID	
N.V.			HBM_Spider8-55/01_F02700.P32	

Slot	Name	Typ	Messwert	Einheit	Aufnehmertyp	Meßbereich	Filtertyp	Tarawert	Tara zulassen	Shunt aktiv
0	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Unbenannt	SR95	0.000	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,045 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Unbenannt	SR95	-3.932	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,000 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Unbenannt	SR95	0.000	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	-0,003 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Unbenannt	SR95	0.000	mV/V	Vollbrücke	3 mV/V	Variabel	0,024 mV/V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Unbenannt	DIG I/O	FFFF						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 16: Gerätesetup – Nullstellen der aktiven Sensoren

## 4.3 Online Dokument

Bevor die Messung nun gestartet werden konnte, musste das Online Dokument der Versuchsdurchführung entsprechend eingerichtet werden (Lagger, 2014). In der Editor-Ansicht, wie in Abbildung 17 ersichtlich, wurden die gewünschten Diagramme und Zahlenwerte ausgewählt. Die Zeit, der Weg, die Kraft und der Druck werden als Zahlenwerte dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Kraft-Weg und Druck-Weg wird in zwei Diagrammen visualisiert.

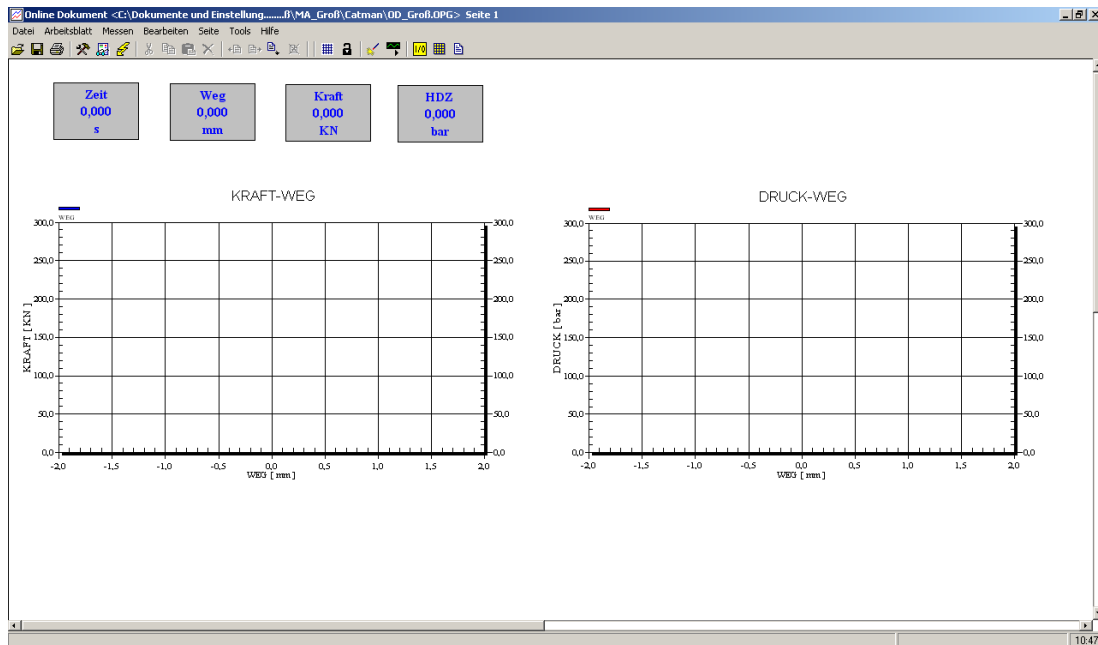


Abbildung 17: Editor-Ansicht (Online Dokument)

Das erstellte Online Dokument wird durch den Start des Messassistenten automatisch geladen.

## 4.4 Messassistent

Vor der ersten Messung musste der Messassistent eingestellt werden, nach der ersten Messung sollte der Messassistent auf die richtige Einstellung überprüft werden. Als ersten Einstellungsschritt (siehe Abbildung 18) wurde der Messassistent konfiguriert, dabei war darauf zu achten, dass bei der Art der Messung „Dauermessung“ gewählt wurde. Das Register „Dauermessung“ dient zur Einstellung der Datenspeicherung.

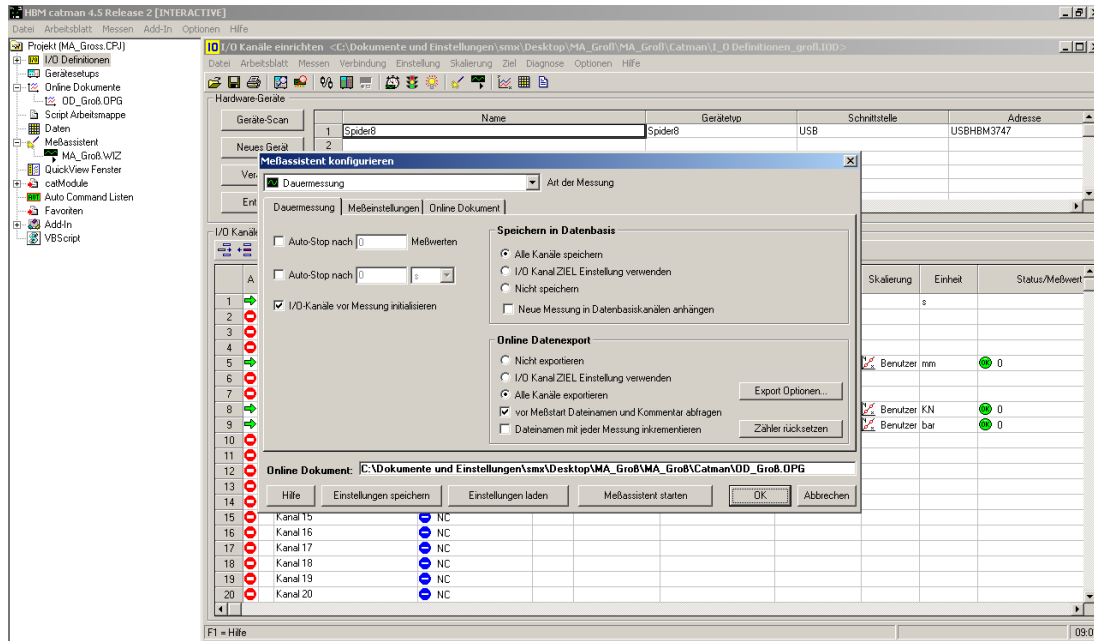


Abbildung 18: Messassistent – Dauermessung

Die Einstellungen für den Messverstärker, konnten im Register „Messeinstellungen“ getroffen werden (siehe Abbildung 19), wobei wichtig war, dass der Leseblock automatisch ermittelt wurde.

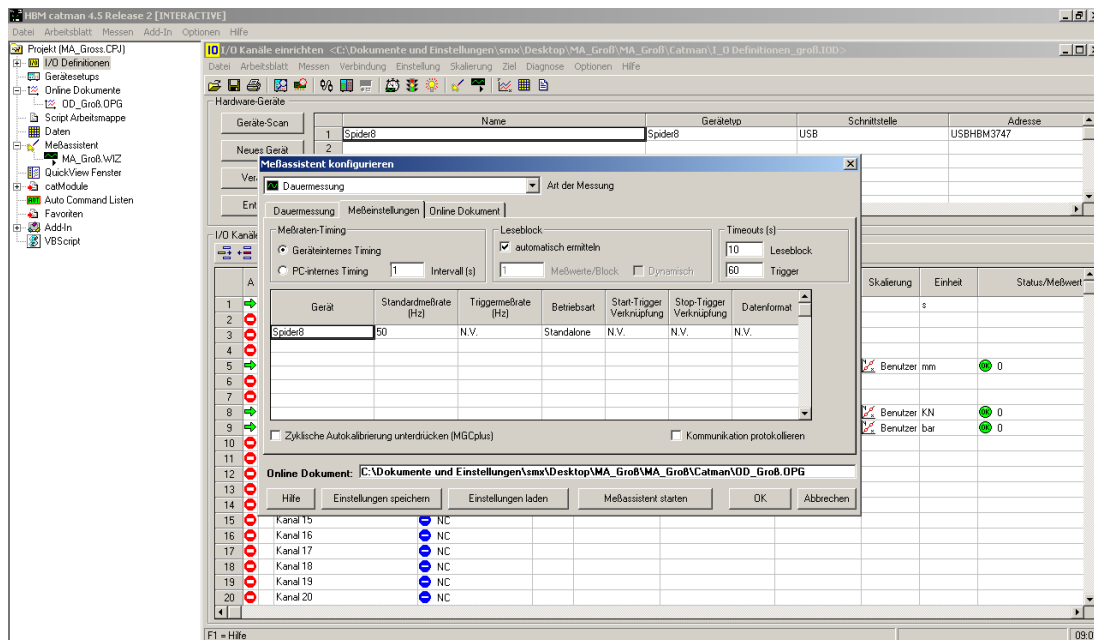


Abbildung 19: Messassistent – Messeinstellungen

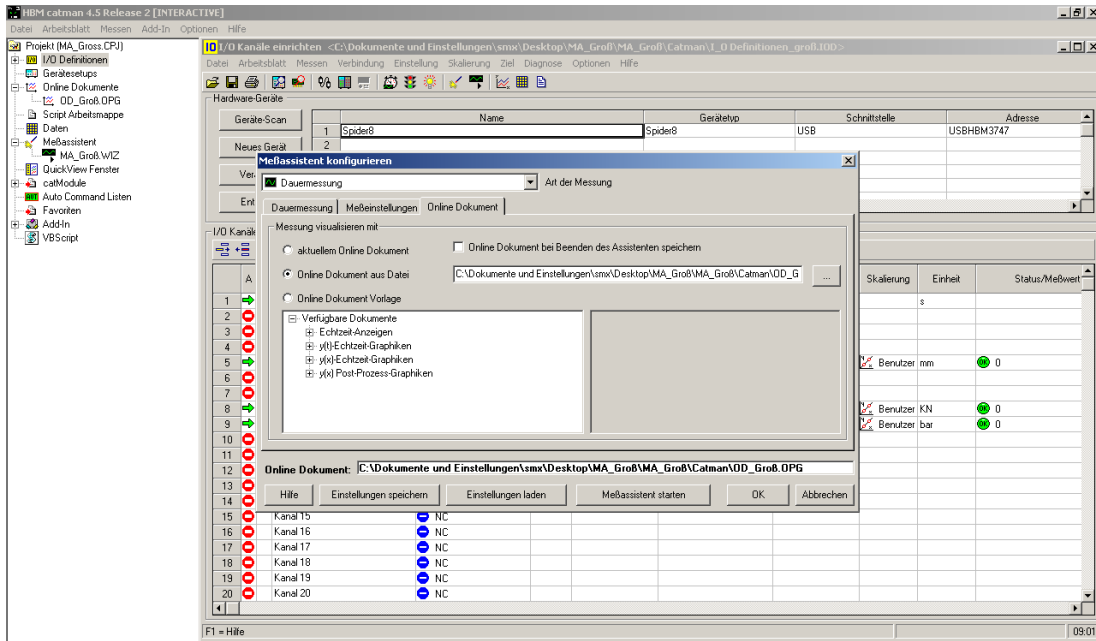


Abbildung 20: Messassistent – Online Dokument

Um die Messung im Register „Online Dokument“ zu visualisieren, wurde der Pfad des zuvor erstellten Online Dokuments angegeben (Abbildung 20).

## 4.5 Start der Messung

Sobald die zuvor beschriebenen Einstellungen abgeschlossen wurden, musste der Messassistent erneut gestartet werden und durch die Auswahl „Messassistent starten“ wurde ein neues Fenster geöffnet. Abbildung 21 zeigt das neu geöffnete Fenster, in welchem man sieht, dass die Datenaufzeichnung mit dem Betätigen des „grünen Pfeils“ in der Menüleiste beginnt. In rechten oberen Ecke öffnet sich gleichzeitig ein Fenster, welches den „Messstatus“ anzeigt. Nach Beendigung des Versuchs wurde die Datenerfassung durch die Auswahl des „roten Kreises“ in der Menüleiste gestoppt und die Messwerte wurden automatisch als .dat Datei im ASCII-Format gesichert. Weitere Möglichkeiten des Datenexports werden in folgendem Unterkapitel beschrieben.

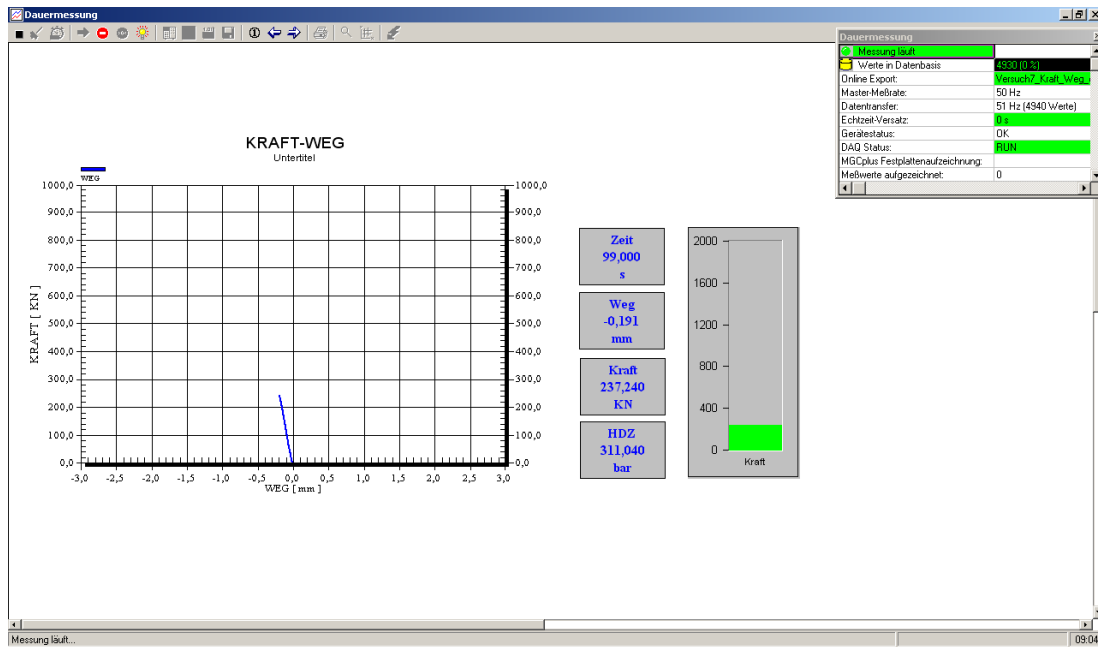


Abbildung 21: Start der Messung

## 4.6 Exportieren der Messdaten

Abschließend werden die Möglichkeiten des Datenexports beschrieben. Nachdem die Messung und die Datenaufzeichnung gestoppt wurden, öffnete sich, durch das Bestätigen des Symbols „Speichern“ in der Menüleiste, ein neues Fenster „Daten Export“. Wie in Abbildung 22 ersichtlich, können verschiedene Einstellungen für den Datenexport getroffen werden. Der Pfad, der zu exportierenden Kanäle und das Exportformat konnte neu definiert werden. Für den Fall, dass nach einer Messung auf den Datenexport vergessen wird, besteht jederzeit die Möglichkeit die passende .dat Datei zu laden und die Daten im gewünschten Exportformat zu exportieren.

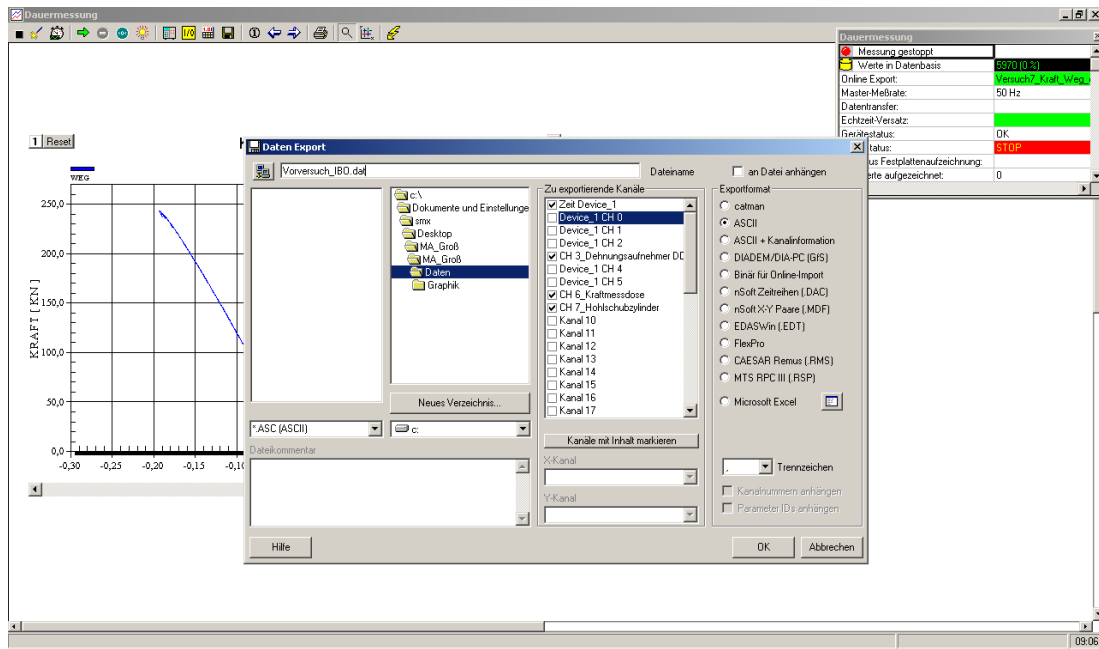


Abbildung 22: Daten Export

## 5. Versuchsaufbau

Für die Durchführung der Versuche wurden folgende zwei unterschiedliche Ankertypen gewählt, ein SN-Anker (SN25-250) und ein IBO-Anker (R32-250). Neben dem Ankertyp ist ebenso der Klebstoff von großer Bedeutung, mit welchem das faseroptische Sensorkabel auf den Anker appliziert wird.

Die Eigenschaften der verwendeten Kleber sowie die Auswahlkriterien für diese und die Installierung der Anker werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

### 5.1 Kleberauswahl

Die Kriterien nach welchen der Kleber gewählt wurde, sind eine hohe Bruchdehn-Eigenschaft, ein hohes E-Modul sowie eine Abbindezeit  $\leq 70$  °C. Diese Kriterien sind wichtig, da sonst die Schutzummantelung des Sensors schmelzen würde, was den Kern beschädigen könnte, und die Abbindezeit nicht zu gering sein sollte.

Anschließend wird auf die verwendeten Klebertypen und deren Eigenschaften näher eingegangen.

#### 5.1.1 INNOTEK Metal Weld

Der Metal Weld Kleber von der Firma INNOTEK ist ein zweikomponentiger benzinbeständiger Metallkleber. Mit seinen Eigenschaften eignet sich der Kleber zur strukturellen Verbindung von beinahe allen Metallen, Industriekunststoffen und zahlreichen Verbundwerkstoffen (INNOTEK, 2018).

Basis:	Zweikomponenten – Methylmethacrylat
Dichte:	ca. 970 kg/m <sup>3</sup>
Bruchfestigkeit (Zugfestigkeit):	ca. 34 N/mm <sup>2</sup>
Bruchdehnung:	5,5 %
Temperaturbeständigkeit:	-40 °C bis +120 °C
Aushärtezeit:	24 h



Abbildung 23: INNOTEK Metal Weld – 50 ml Doppelkartusche (INNOTEK, 2018).

Damit der Kleber verarbeitet werden kann, sind eine Zweikomponenten-Klebstoff-Pistole sowie eine Einweg-Zwangs-Mischdüse erforderlich, welche die zwei Komponenten des Klebers im Mischverhältnis 1:1 (INNOTEK, 2018) vermischt.

### 5.1.2 BASF MasterRoc MP 368

Beim MasterRoc MP 368 von der Firma BASF handelt es sich um ein nicht schäumendes zweikomponentiges Polyurea-Silikat-Injektionsharz, welches speziell für die schnelle Verfestigung von Gestein und Kohle im Berg- und Tunnelbau entwickelt wurde. Für die Mischung der zwei Komponenten wurde keine Zweikomponenten-Injektionspumpe (wie im Produktdatenblatt



angeben) verwendet, da der Arbeitsdruck für unsere Verwendung zu hoch gewesen wäre (BASF, 2018). Daher wurden die zwei Komponenten lediglich abgewogen und im Mischverhältnis 1:1 in einem Behälter vermischt. Durch die verkürzte flüssige Phase musste unverzüglich nach dem Mischen der zwei Komponenten das Harz weiterverarbeitet werden.

Basis:	Zweikomponenten Polyurea – Silikat - Injektionsharz
Dichte Komponente A:	1490 kg/m <sup>3</sup>
Dichte Komponente B:	1160 kg/m <sup>3</sup>
Druckfestigkeit (>24h)	ca. 37,3 N/mm <sup>2</sup>
flüssige Phase:	90 s ±30 s
Aushärtezeit:	2,30 min ±0,30 min
max. Reaktionstemperatur:	98 °C

### 5.1.3 RS PRO Epoxid Vergussmasse

Bei der RS PRO Epoxid Vergussmasse der Firma RS Components handelt es sich um ein Zweikomponenten Harz-System, welches in einer sogenannten Zwillingsspackung (Abbildung 24) geliefert wird. Die zwei Komponenten (Harz und Härter) werden durch eine Trennklemme voneinander getrennt. Diese musste entfernt werden, um mit dem Mischvorgang beginnen zu können. Nach der Entfernung der Trennklemme wurden die zwei Komponenten zur Gänze händisch vermischt. Anschließend wurde eine Ecke des Beutels abgeschnitten und mit dem Befüllen bzw. Bekleben konnte begonnen werden. Das Material musste innerhalb von 60 Minuten nach Beendigung des Mischvorgangs verarbeitet werden, danach begann das Harz mit dem Aushärtungsprozess. Ab diesem Zeitpunkt war das Harz für eine Weiterverarbeitung nicht mehr geeignet (RS, 2018).

Basis:	Zweikomponenten Harz – System
Zugfestigkeit:	ca. 82 N/mm <sup>2</sup>
Temperaturbeständigkeit:	-40 °C bis +125 °C
Aushärtezeit:	24 h



Abbildung 24: RS PRO Epoxid Vergussmasse (RS, 2018)

## 5.2 Sensorinstallation

### 5.2.1 SN-Anker

Beim SN-Anker handelt es sich um einen SN25-250 (siehe Anhang). Die erste Zahl der Ankerbezeichnung gibt den Nenndurchmesser in mm wieder und die zweite Zahl beschreibt die Höchstkraft des Ankersystems in kN.

Bevor die Installation des FiMT-Kabels am SN-Anker erfolgen konnte, war das Anfertigen eines zusätzlichen Gewindes am Ende des Ankers notwendig, um diesen im Spannungsfeld fixieren zu können. Der verwendete SN-Anker besaß ein M26 Gewinde, welches bereits vom Hersteller auf den Anker gedreht wurde. Der Anker wurde mit einer Länge von 4 m geliefert und auf eine Länge von 3,10 m gekürzt. Auf einer Länge von etwa 0,20 m, gemessen vom geschnittenen Ende des Ankers, wurde mit einer herkömmlichen Handflex die gewalzte Rippung abgenommen, um in weiterer Folge ein neues M24 Gewinde anzufertigen. Das M24 Gewinde wurde händisch mit einem Schneideisen angefertigt. Die Abbildung 25 stellt auf der linken Seite das neu gefertigte

Gewinde und auf der rechten Seite den bearbeiteten Stahl dar.



Abbildung 25: SN-Anker – M24 Gewinde

Nachdem das Gewinde gefertigt und der Anker für den nächsten Arbeitsschritt vorbereitet wurde, konnte längs, eine kleine Nut nahe dem Walzstoß hergestellt werden. Somit wurde sichergestellt, dass das Messkabel in der Nut eingeklebt wurde und nicht verrutschen konnte. Der Zweikomponenten-Kleber (INNOTEK Metal Weld) wurde mittels einer Zweikomponenten-Spritze in 0,20 – 0,30 m Abständen aufgetragen und das Messkabel unter Druck befestigt. Mit der Aushärtung des Klebers wurde das Sensorkabel fest eingebettet. Anschließend konnte der Arbeitsschritt wiederholt werden, bis die zu untersuchende Ankerlänge vollständig mit dem Messkabel beklebt war (Abbildung 26).



Abbildung 26: SN-Anker - Installation des Messkabels

### 5.2.2 IBO-Anker

Die zu untersuchenden IBO-Anker besitzen laut Datenblatt (siehe Anhang) die Bezeichnung R32-250. Hierbei beschreibt die erste Zahl den Nenn-Außendurchmesser in mm und die zweite Zahl gibt die Höchstkraft in kN des Ankers wieder.

Lediglich beim Befüllen des Ankerhohlraumes traten Schwierigkeiten bei der Installation des BRUsens Strain V9 Kabels im IBO-Anker auf. Aufgrund dessen, dass am gesamten Ankerquerschnitt das gleiche Profil gewalzt war, konnten die Ankermuttern ohne weitere Probleme auf den Anker geschraubt werden. Um beim Befüllen des Ankers, das Herausfließen des Klebers am anderen Ende zu verhindern, wurde dieses mit einem Korkstoppel verschlossen. Der Korkstoppel wurde zusätzlich durchbohrt, um das Messkabel durchführen zu können. Danach wurde der Korkstoppel mit dem zentral durchgeführten Messkabel mittels Silikonkleber verschlossen, um beim Befüllen die Dichtheit des Ankerendes zu gewährleisten. Nach mindestens 24 Stunden konnte mit dem Befüllen des Ankers begonnen werden. Die nachfolgende Grafik (Abbildung 27) stellt den installierten Korkstoppel und dem dazugehörigen Messkabel dar. Schlussendlich unterscheiden sich die zwei befüllten IBO-Anker ausschließlich darin, dass das zweite System einen zusätzlichen Korkstoppel am Ende des Ankers besitzt.



Abbildung 27: IBO-Anker – Korkstoppel und Messkabel installiert

### 5.3 Spannfeldversuch

Um die Funktionsfähigkeit des Spannfeldversuches sicherzustellen, wurde ein Vorversuch durchgeführt. Mithilfe des Vorversuchs, können etwaige Fehler und Verbesserungen an der Konstruktion des Spannfeldes oder am Messsystem durchgeführt werden. Der Spannfeldversuch, wie in Abbildung 28 ersichtlich, beträgt eine Gesamtlänge von 2,40 m und eine Breite von 0,80 m. Die für den Vor- und Hauptversuch verwendeten Anker, mit einer Länge von 3,00 m (IBO) und 3,10 m (SN), wurden mithilfe eines Hohlkolbenzylinders auf Zug beansprucht. Die Kraft, der Druck und der Weg am Prüfkörper, wurden mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen Sensoren gemessen. Der Anker wurde mittels Ankerplatten und den dazugehörigen Muttern an beiden Enden fixiert.

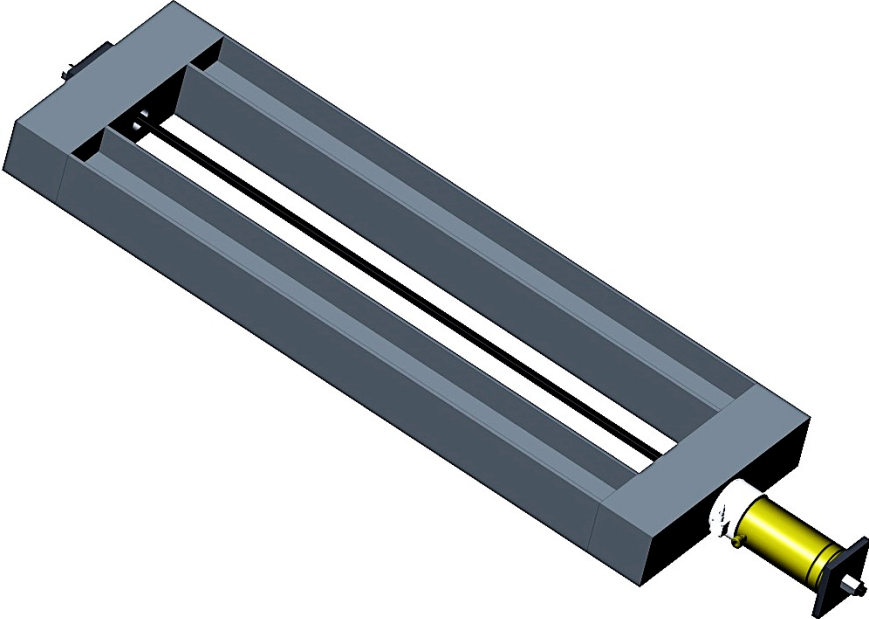


Abbildung 28: Versuchsaufbau - Spannungsfeldversuch

## 6. Laborversuch

In diesem Kapitel werden die Vorversuche, der Hauptversuch und die Kalibrierung der Sensoren näher beschrieben.

### 6.1 Kalibrierung der Aufnehmer

Die Kalibrierung der Aufnehmer war für den Vorversuch sowie für den Hauptversuch notwendig, um nochmals die Funktionsweise der verwendeten Sensoren sicherzustellen.

#### 6.1.1 Kalibrierung des Dehnungsaufnehmers

Die Kalibrierung des Dehnungsaufnehmers erfolgte mit einem sogenannten Calibrator von der Firma MTS. Dabei wurde der Dehnungsaufnehmer auf eine Führung fixiert (Abbildung 29). Der Weg konnte mittels Einstellrad (Abbildung 30) definiert und anhand des angeschlossenen Messsystems (3.1) überprüft werden. Das Einstellrad erzielte eine Genauigkeit von 1  $\mu\text{m}$ .

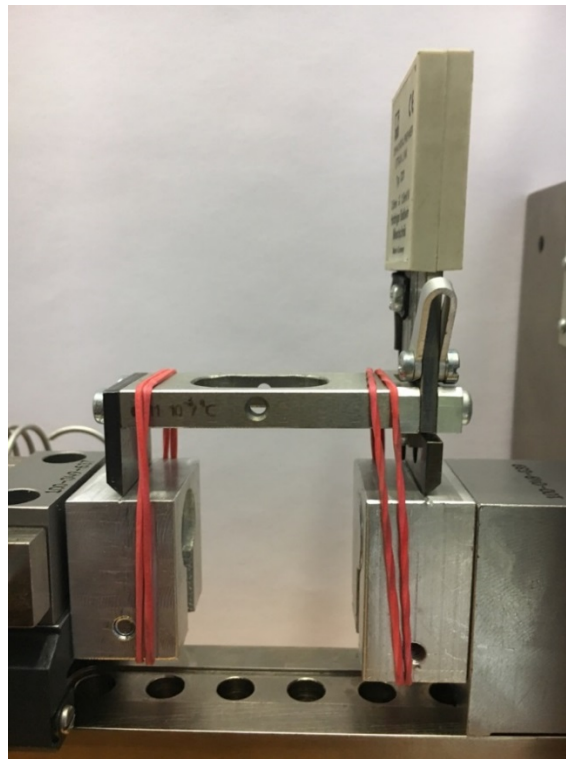


Abbildung 29: Fixierung des Dehnungsaufnehmers – MTS Calibrator



Abbildung 30: MTS Calibrator – Einstellrad

Aus der Tabelle 1 war ersichtlich, dass der Dehnungsaufnehmer DD1 geringe Messabweichungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich aufwies. Da es sich dabei um eine maximale Messabweichung von 8  $\mu\text{m}$  handelt, wurde diese für die Messung vernachlässigt.

Tabelle 1: Kalibrierung – Dehnungsaufnehmer DD1

MTS Calibrator [mm]	Dehnungsaufnehmer DD1 [mm]
0,000	0,000
0,500	0,501
1,000	1,002
2,000	2,008
2,500	2,501
1,000	1,004
0,500	0,502
0,000	0,000
-0,500	-0,502



---

-1,000	-1,003
-2,500	-2,504
-2,000	-2,004
-1,000	-1,005
0,000	-0,004

### 6.1.2 Kalibrierung der Kraftmessdose

Die Kraftmessdose wurde mithilfe der servohydraulischen Prüfanlage, der Firma MTS Systems GmbH kalibriert. Dabei wurden verschiedene Kraftstufen mit einem Drehrad, welches sich an der Maschine befand, eingestellt. Diese Kraftwerte wurden über die Kraftmessdose an den Messverstärker (3.1.5) und folglich an die Messsoftware (3.1.6) weitergeleitet. Die am Computer angezeigten Messwerte wurden nun mit den Laststufen der MTS Prüfmaschine verglichen. In der Tabelle 2 ist ersichtlich, dass die Kraftmessdose eine Abweichung von maximal  $\pm 370$  kN aufwies und daher vernachlässigbar war. Im Anschluss an die Überprüfung der Kraftmessdose konnte mit den Vorversuchen gestartet werden.

Tabelle 2: Kalibrierung – Kraftmessdose C6A

MTS [kN]	KMD [kN]
0,000	0,000
10,000	9,756
20,000	20,369
30,000	30,354
50,000	50,334
80,000	80,359
100,000	99,810
0,000	0,000

## 6.2 Vorversuch

Der Vorversuch diente dazu das konventionelle Messsystem auf Richtigkeit zu überprüfen. Nachdem die ersten Vorversuche abgeschlossen waren, wurde ersichtlich, dass die Anbringung des Dehnungsaufnehmers DD1 am Anker verbessert werden musste. Bei der ersten Auswertung des Kraft-Weg-Diagramms bzw. Spannungs-Dehnungs-Diagramms wurde folgendes Problem ersichtlich: während der ersten Belastung verrutschte der Wegaufnehmer. Der erste Lösungsansatz war, für eine bessere und stärkere Befestigung zwischen dem Dehnungsaufnehmer DD1 und dem Anker zu sorgen, indem ein weiteres Gummiband angebracht wurde.

Die erneute Durchführung des Vorversuchs ergab, dass der Fehler noch nicht zur Gänze behoben wurde. Daraufhin wurde festgestellt, dass die Oberfläche des jeweiligen Ankers, an welcher der DD1 platziert wird, etwas aufgeraut werden musste. Dies wurde anschließend mit einer Feile durchgeführt (Abbildung 31) und der DD1 erneut platziert.

Eine weitere Prüfung des Vorversuchs ergab zufriedenstellende Ergebnisse, welche im folgenden Abschnitt 7.1 ersichtlich sind.



Abbildung 31: IBO-Anker – aufgeraute Oberfläche

### 6.3 Hauptversuch

Im Hauptversuch wurden die Messergebnisse des konventionellen Messsystems (Kapitel 3.1) mit den Ergebnissen des faseroptischen Messsystems (3.2) verglichen, um Rückschließen zu können, ob das FOS-Messsystem den erwarteten Vorstellungen entsprach. Die Resultate der verschiedenen Messungen werden im nachfolgenden Abschnitt 7.2 für jeden einzelnen Ankertypen näher erläutert.

# 7. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Vorversuche und der Hauptversuche diskutiert. Weiters werden mögliche Ursachen erläutert, weshalb sich die Messwerte der unterschiedlichen Messsysteme voneinander unterscheiden.

## 7.1 Vorversuch

Für die Auswertung der Vorversuche ist die Umrechnung von einem Kraft-Weg-Diagramm in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm vorteilhaft, wobei die Werte der Dehnungen in % und die Werte der Spannungen in N/mm<sup>2</sup> angegeben werden. Der E-Modul wurde für jeden Versuch mit der folgenden Formel (1.1 und weitere) rechnerisch ermittelt und mit dem zugehörigen E-Modul lt. Datenblatt (siehe Anhang) verglichen. Damit konnte das konventionelle Messsystem ebenfalls auf die Richtigkeit überprüft werden.

Da beim IBO-Anker bei der Überprüfung des Laufmetergewichts und des rechnerisch ermittelten Nennquerschnittes Unstimmigkeiten in Bezug auf die angegebenen Werte der Datenblätter existierten, konnte der direkte Vergleich der E-Moduli nicht durchgeführt werden. Somit konnte keine Aussage über den Vergleich der E-Moduli für den IBO-Anker getroffen werden.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \left[ \frac{N}{mm^2} \right] * 10^{-3} = [GPa] \quad (1.1)$$

$$\Delta\sigma = \frac{(F_2 - F_1)}{s_o} \left[ \frac{kN}{mm^2} \right] * 10^3 = \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(l_{o2} - l_{o1})}{l} \left[ \frac{mm}{mm} \right] = [-]$$

### 7.1.1 SN-Anker

Der Nennquerschnitt  $s_o$ , ist für die Berechnung der Spannung und in weiterer Folge für die Berechnung des E-Moduls ausschlaggebend. Hierfür wurde ein Stück des SN-Ankers abgewogen ( $m = 3,236$  kg), abgemessen ( $l = 0,852$  m) und mithilfe der Dichte des Stahls ( $\rho = 7900$  kg/m<sup>3</sup>) und der folgenden Formel 1.2 berechnet.

$$s_o = \frac{m}{\rho * l} = [m^2] * 10^6 = [mm^2] \quad (1.2)$$

$$s_o = \frac{3,236}{7900 * 0,852} = 0,000481 [m^2] * 10^6 = 481 [mm^2]$$

Da der errechnete Nennquerschnitt des SN-Ankers (481 mm<sup>2</sup>) um -1,87 % vom angegebenen Nennquerschnitt lt. Datenblatt (490 mm<sup>2</sup>) abweicht, konnte der E-Modul verglichen werden. Mit den Werten aus der zweiten Belastungsschleife (siehe folgende Abbildung) und der Formel 1.1 wurde der E-Modul ermittelt.

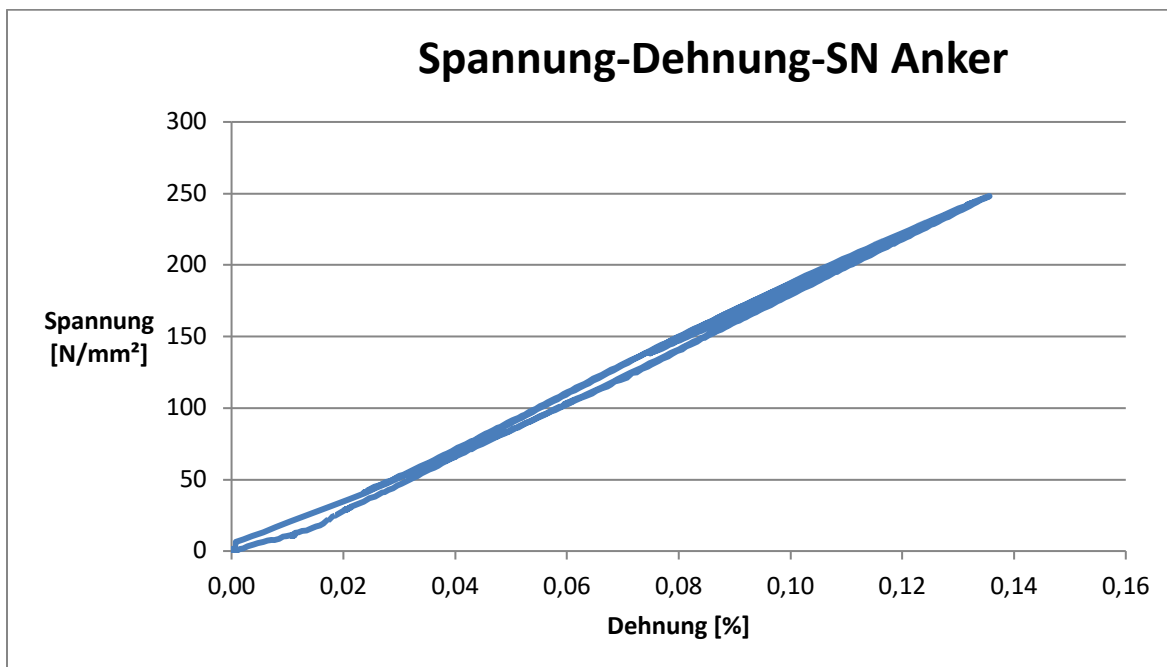


Abbildung 32: SN-Anker - Spannungs-Dehnungs-Diagramm

$$\Delta\sigma = \frac{(118,8617 - 50,5641)}{481} \left[ \frac{kN}{mm^2} \right] * 10^3 = 141,991 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(0,13513 - 0,06144)}{100} \left[ \frac{mm}{mm} \right] = 0,0007 [-]$$

$$E = \frac{141,991}{0,0007} = 202844 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \hat{=} 202,8 [GPa]$$

Der errechnete E-Modul (202,8 GPa) weicht mit -3,55 % vom E-Modul lt. Datenblatt (210 GPa) ab, der geringe unterschied der beiden E-Moduli kann vernachlässigt werden. Die Abbildung 32 beschreibt den Spannungs-Dehnungs-Zustand des SN-Ankers während des Vorversuchs. Daraus ist ersichtlich, dass bei einer Belastung der Spannungs-Dehnungs-Verlauf linear steigt und bei einer Entlastung der Verlauf linear sinkt. Die Unterschiede des Verlaufs der Be- und Entlastungskurve belief sich auf 0,003 % und konnten als gleichmäßig angesehen werden. Nach der Betrachtung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs und dem geringen Unterschied der E-Moduli kann von einem funktionierenden Messsystem gesprochen werden.

### 7.1.2 IBO-Anker

Die Werte des E-Moduls ( $E = 205.000 \text{ N/mm}^2$ ) und des Nennquerschnitts ( $s_o = 370 \text{ mm}^2$ ) wurden aus dem Datenblatt, welches dem Anhang beigelegt wurde, entnommen. Für die Ermittlung des rechnerischen Nettoquerschnitts so wurde der IBO-Anker abgewogen ( $m = 9,689 \text{ kg}$ ), abgemessen ( $l = 3,00 \text{ m}$ ) und mithilfe der Dichte des Stahls ( $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$ ) und der Formel 1.2 berechnet.

$$s_o = \frac{9,689}{7900 * 3,00} = 0,000408 \text{ [m}^2\text{]} * 10^6 = 408 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Mithilfe der Abbildung 33, wurde aus der zweiten Belastungsschleife der E-Modul rechnerisch ermittelt.

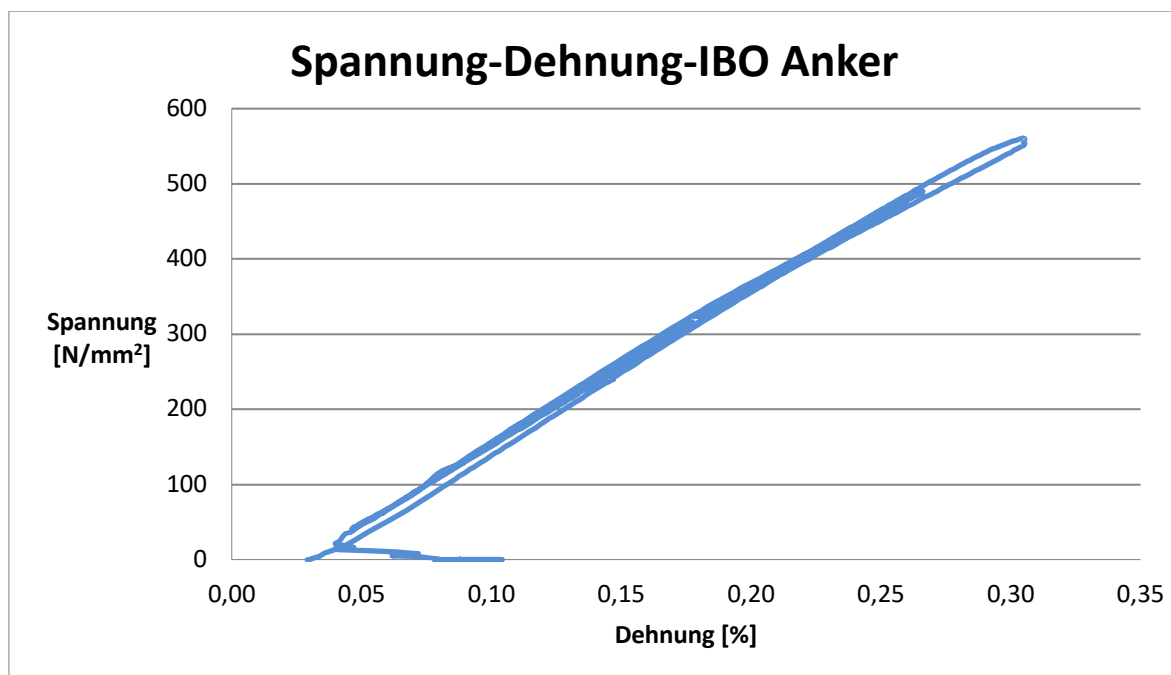


Abbildung 33: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – IBO-Anker

$$\Delta\sigma = \frac{(200,219 - 100,409)}{408} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right] * 10^3 = 244,632 \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(0,2899 - 0,1548)}{100} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right] = 0,00135 \text{ [-]}$$

$$E = \frac{244,632}{0,00135} = 181209 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] * 10^{-3} \hat{=} 181,2 [GPa]$$

Wie bereits beim Vorversuch des SN-Ankers wurde auch im Spannungs-Dehnungs-Diagramm des IBO-Ankers ersichtlich, dass die Be- und Entlastungskurven linear steigen und sinken. Die Verschiebung bei der letzten Entlastung ( $< 50 \text{ N/mm}^2$ ) konnte vernachlässigt werden. Ursache der Verschiebung war, dass der Dehnungsaufnehmer DD1 durch die vollkommene Entlastung des Systems einen Schlag bekam, wodurch der Dehnungsaufnehmer leicht verrutschte. Nach der Betrachtung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs wurde ein Unterschied zwischen der Be- und Entlastungskurve von 0,011 % ermittelt, der vernachlässigt werden kann und es kann von einem funktionierenden Messsystem gesprochen werden.

Da der errechnete Nennquerschnitt des SN-Ankers ( $408 \text{ mm}^2$ ) um +10,27 % vom angegebenen Nennquerschnitt lt. Datenblatt ( $370 \text{ mm}^2$ ) abweicht, konnten die E-Moduli, wie im vorherigen Sub-Kapitel, nicht miteinander verglichen werden.



## 7.2 Hauptversuch

Die jeweiligen Laststufen waren für jeden Ankertypen unterschiedlich, da der SN-Anker ein zusätzliches und selbst gefertigtes Gewinde besaß, konnte die jeweilige angegebene maximale Höchstkraft nicht überprüft werden. Der Anker erhielt durch das Zusatzgewinde einen Schwachpunkt. Aufgrund dessen lag die maximale Laststufe des SN-Ankers bei etwa 120 kN. Dabei lag bei den IBO-Ankern die maximale Laststufe bei etwa 200 kN. Laut Datenblattangabe beläuft sich die maximale Höchstkraft auf 250 kN. Wobei die Richtigkeit des Datenblattes nicht bestätigt wurde, da es Unstimmigkeiten in Bezug auf Laufmetergewicht und ermittelten Nennquerschnitt gibt.

Die Messergebnisse des faseroptischen Messsystems wurden mit MATLAB ausgewertet und dargestellt. MATLAB ist eine Software zur Lösung von mathematischen Problemen und zur grafischen Darstellung. Weiters können mithilfe von Matrizen numerische Berechnungen durchgeführt werden.

Die Messergebnisse des konventionellen Messsystems wurden mit Microsoft EXCEL bearbeitet und anhand eines Kraft-Dehnungs-Diagramms und eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms ausgewertet und dargestellt. Der E-Modul wurde für jeden Versuch erneut berechnet (siehe Formel 1.1 und weitere) und in weiterer Folge für keine Versuchsbeschreibung herangezogen. Da, wie im Kapitel 7.1 erwähnt, es Unstimmigkeiten in den Datenblättern gibt.

Der Dehnungsmittelwert wurde für jeden Versuch und für jeweiligen Lastfall mittels MATLAB ermittelt und in Blau dargestellt. Weiters wurde auch die maximale und minimale Dehnung sowie die Länge, auf denen sich die Dehnungswerte bezogen, dargestellt.

Die nachfolgenden Resultate stellen lediglich eine Auswahl der Versuche dar. Die vollständigen Ergebnisse der Versuche werden im Anhang angeführt.

### 7.2.1 Versuch 1: SN-Anker

Für die Berechnung der E-Moduli der jeweiligen Messsysteme wurde der ermittelte Nettoquerschnitt aus Abschnitt 7.1.1 verwendet. Der E-Modul lt. Datenblatt (siehe Anhang) beträgt 210 GPa.

Die folgende Abbildung beschreibt das Kraft-Dehnungs-Verhalten des gesamten Versuchs, wobei in Blau das konventionelle und in Rot das faseroptische Messsystem dargestellt wird.

Bei der Erstbelastung (konv. Messsystem – blau) verrutschte der Dehnungsaufnehmer DD1 leicht und pendelte sich bei einer Belastung von 11 kN wieder ein, dies ergibt einen Dehnungsfehler von 0,026 % der bei einem Vergleich berücksichtigt werden muss. Wird die Laststufe von 100 kN der beiden Messsysteme miteinander verglichen, ergibt sich ein Dehnungsunterschied (unter Berücksichtigung des Dehnungsfehlers) von 0,007 %. Der Verlauf der beiden Messsysteme, separat betrachtet, verhält sich bei der Be- und Entlastung linear.

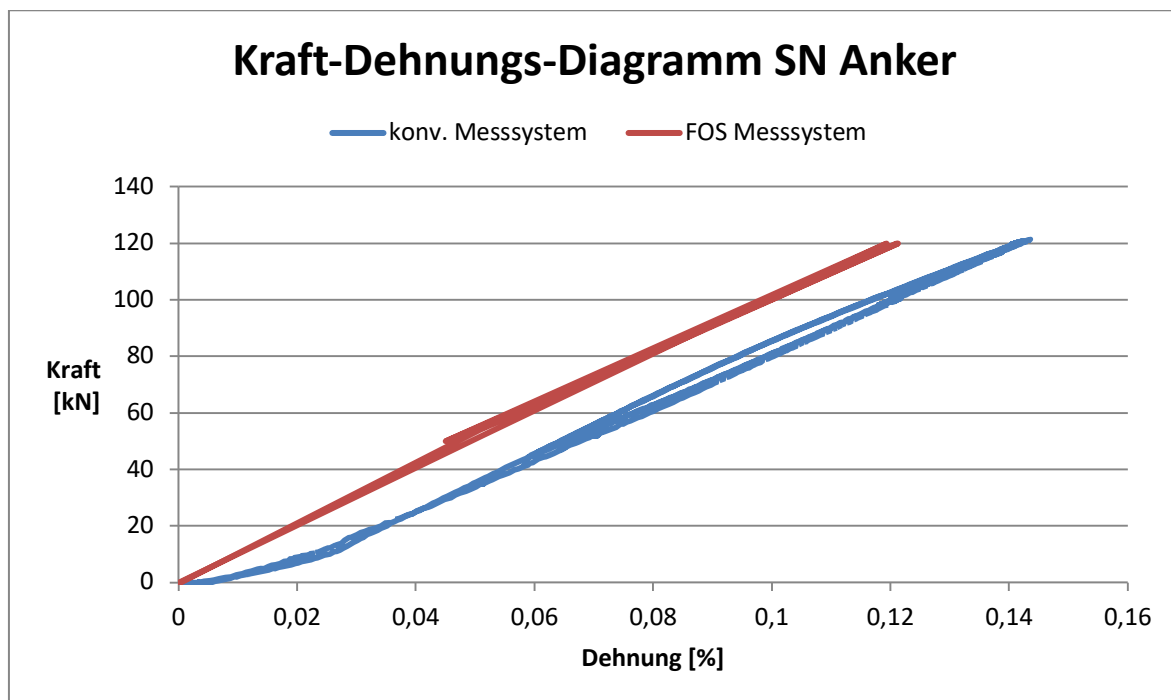


Abbildung 34: Kraft-Dehnungs-Diagramm – SN Anker

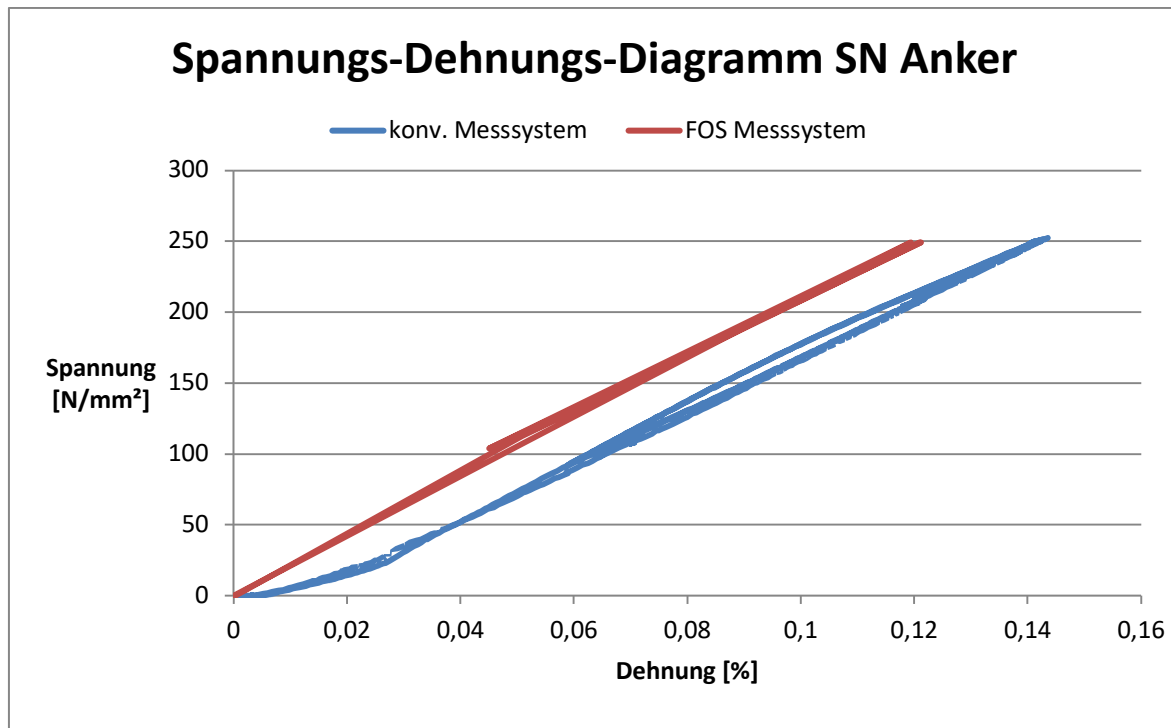


Abbildung 35: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – SN-Anker

$$\Delta\sigma = \frac{(119,28 - 52,83)}{481} \left[ \frac{kN}{mm^2} \right] * 10^3 = 138,15 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(0,1407 - 0,0688)}{100} \left[ \frac{mm}{mm} \right] = 0,000719 [-]$$

$$E = \frac{138,15}{0,000719} = 192141 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \hat{=} 192,1 [GPa]$$

Da sich der Spannungs-Dehnungs-Verlauf in der Abbildung 35 mit dem Spannungs-Dehnungsverlauf des konventionellen Messsystems aus dem Vorversuch des SN-Ankers ähnelt, kann von derselben Messeigenschaft (7.1.1) gesprochen werden.

Die folgende Tabelle (Tabelle 3) gibt Auskunft über die Laststufen, den Dehnungsmittelwert, der gemessenen Faserlänge sowie die ausgewertete Faserlänge, die für die Berechnung des Dehnungsmittelwertes von Bedeutung ist.

Tabelle 3: Versuch 1: SN-Anker - Auswertung

Laststufe	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Kraft [kN]	Ankerlänge [m]	Faserlänge (gemessen) [m]	Faserlänge (lt. Auswertung) [m]	Dehnungsmittelwert [μm/m]
1	0	0	3,10	2,748	2,3911	0
2	108	52	3,10	2,748	1,7762	502
3	208	100	3,10	2,748	1,7661	955
4	249	119	3,10	2,748	1,7722	1205
5	104	50	3,10	2,748	1,7641	432
6	210	101	3,10	2,748	1,7641	1004
7	249	119	3,10	2,748	1,7681	1213
8	104	50	3,10	2,748	1,7742	442
9	208	100	3,10	2,748	1,7702	1000
10	249	119	3,10	2,748	1,7843	1213
11	104	50	3,10	2,748	1,7702	489
12	0	0	3,10	2,748	2,3810	4

Mithilfe der gemessenen Werte des faseroptischen Messsystems aus der obigen Tabelle und der Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Verhalten des faseroptischen Messsystems (Abbildung 35), wurde in weiterer Folge der E-Modul berechnet.

$$\Delta\sigma = 249 - 104 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] = 145 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(0,1213 - 0,0432)}{100} \left[ \frac{\%}{\%} \right] = 0,00078 [-]$$

$$E = \frac{145}{0,00078} = 185897 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \cong 185,8 [GPa]$$

Der berechnete E-Modul des faseroptischen Messsystems (185,8 GPa) weicht um 3,28 % vom berechneten E-Modul des konventionellen Messsystems (191,2 GPa) ab.

Die Abbildungen des faseroptischen Messsystems wurden separat auf Gemeinsamkeiten untersucht und anhand der Messergebnisse ausgewertet. Der Dehnungsmittelwert wird jeweils in Blau angezeigt. Nachfolgende Abbildungen visualisieren die Messergebnisse des faseroptischen Messsystems. Die erste Laststufe (Abbildung 36) zeigt das Rauschen des Messsystems vor Laustaufbringung. Anhand der ausgegebenen Werte ist gut ersichtlich, dass sich das Rauschen des faseroptischen Messsystems auf  $\pm 1 \mu\text{m/m}$  beläuft.

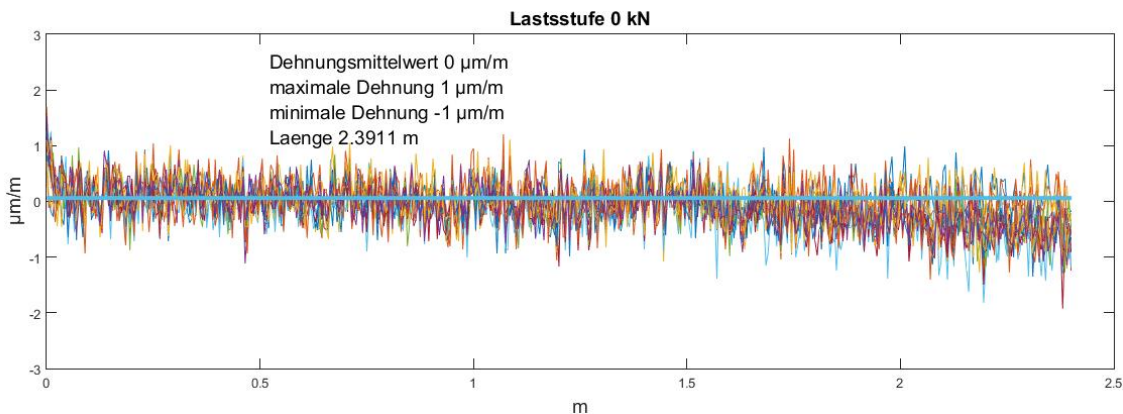


Abbildung 36: Erste Laststufe – Rauschen des Messsystems vor Laustaufbringung

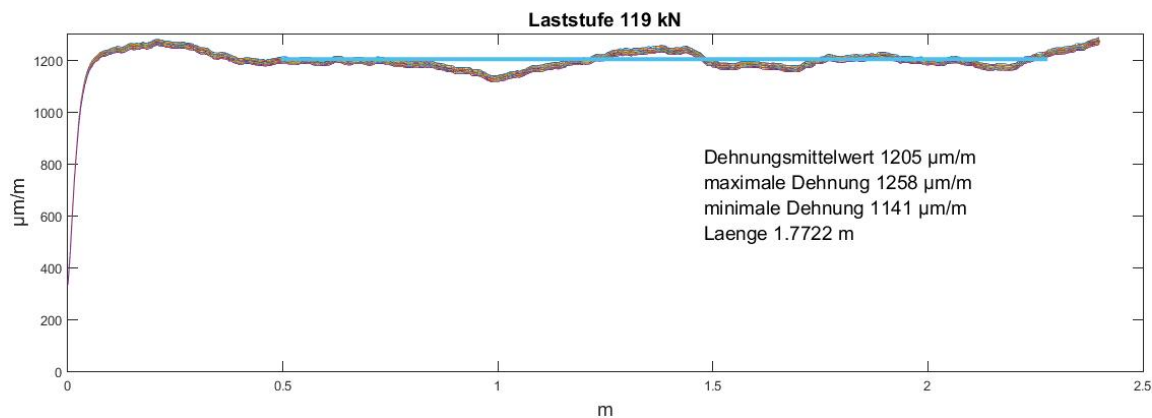


Abbildung 37: Vierte Laststufe

In Abbildung 37 wird die vierte Laststufe mit einer Last von 119 kN dargestellt. Der Anfangs- und Endbereich der Messung wurde für Ermittlung des Dehnungsmittelwertes vernachlässigt, da diese Bereiche die Kräfteinleitung bzw. die Kräfteausleitung des Systems wiedergeben und für die Ermittlung des Dehnungsmittelwertes nicht repräsentativ sind. Der Dehnungsmittelwert mit  $1205 \mu\text{m/m}$  besitzt eine Streuung von  $\pm 5 \%$ . Eine Möglichkeit für diese Abweichung ist, dass die Applizierung der Messfaser fehlerhaft erfolgte. Eine weitere Möglichkeit ist, dass die Stärke des Klebers zwischen Messfaser und SN-Anker nicht kontinuierlich dieselbe war.

In nachfolgender Abbildung, mit derselben Laststufe (119 kN), ist keine Änderung der Streuung ersichtlich.

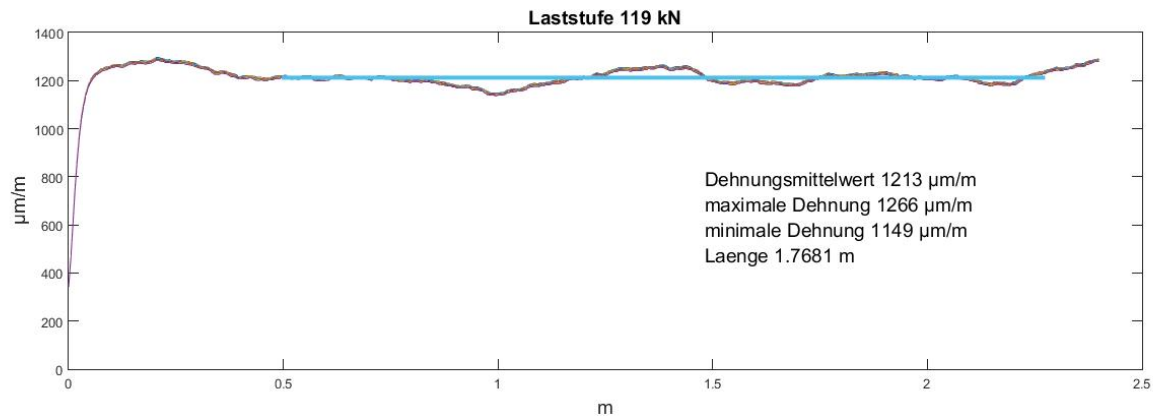


Abbildung 38: 7. Laststufe

Abschließend wird die letzte (zwölfte) Laststufe (Abbildung 39) dargestellt. Aus der Grafik geht deutlich hervor, dass sich das Dehnungsverhalten des instrumentierten Ankers im Vergleich zur ersten Laststufe (Rauschen des Messsystems vor Lastaufbringung) nicht mehr in den Ausgangszustand zurückkehrt und bleibende Verformungen entlang des faseroptischen Messprofils auftreten. Es wird vermutet, dass diese auf eine Interaktion zwischen Sensorkabel, Klebstoff und Messobjekt zurückzuführen sind.

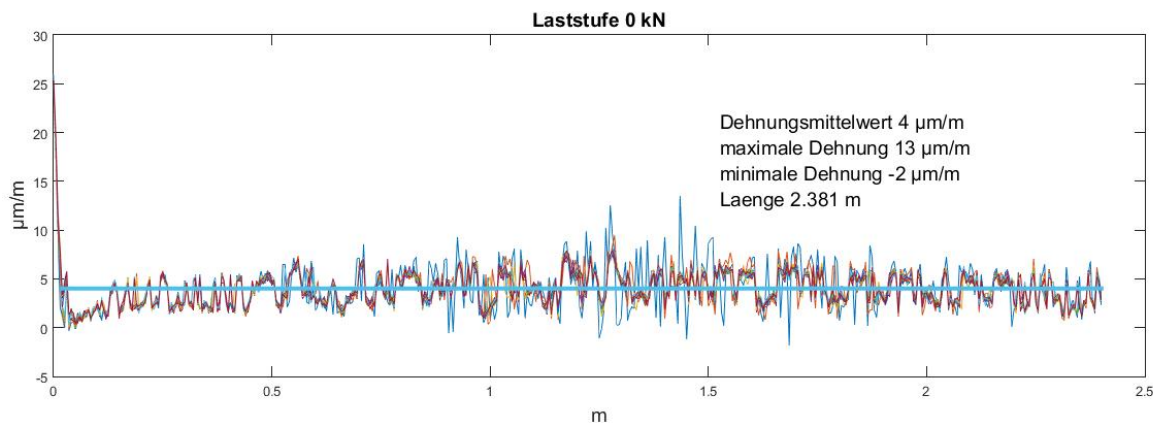


Abbildung 39: 12. Laststufe

## 7.2.2 Versuch 2: IBO-Anker

Im folgenden Diagramm ist deutlich erkennbar, dass sich bei beiden Messsystemen bei der ersten Belastungskurve eine Plastifizierung am Anker einstellte. Die fortlaufenden Be- und Entlastungskurven steigen und sinken linear. Bei der ersten Belastungskurve, mit einer Last von 198 kN, weicht die gemessene Dehnung des faseroptischen Messsystems um +0,024 % vom konventionellen Messsystem ab. Des Weiteren stellten sich bei kompletter Entlastung des Systems eine Restdehnung von 0,099 % beim konventionellen Messsystem (Blau) und eine Restdehnung von 0,1078 % beim faseroptischen Messsystem (Rot) ein. Der Dehnungsunterschied beider Messsysteme beträgt 0,0088 %.

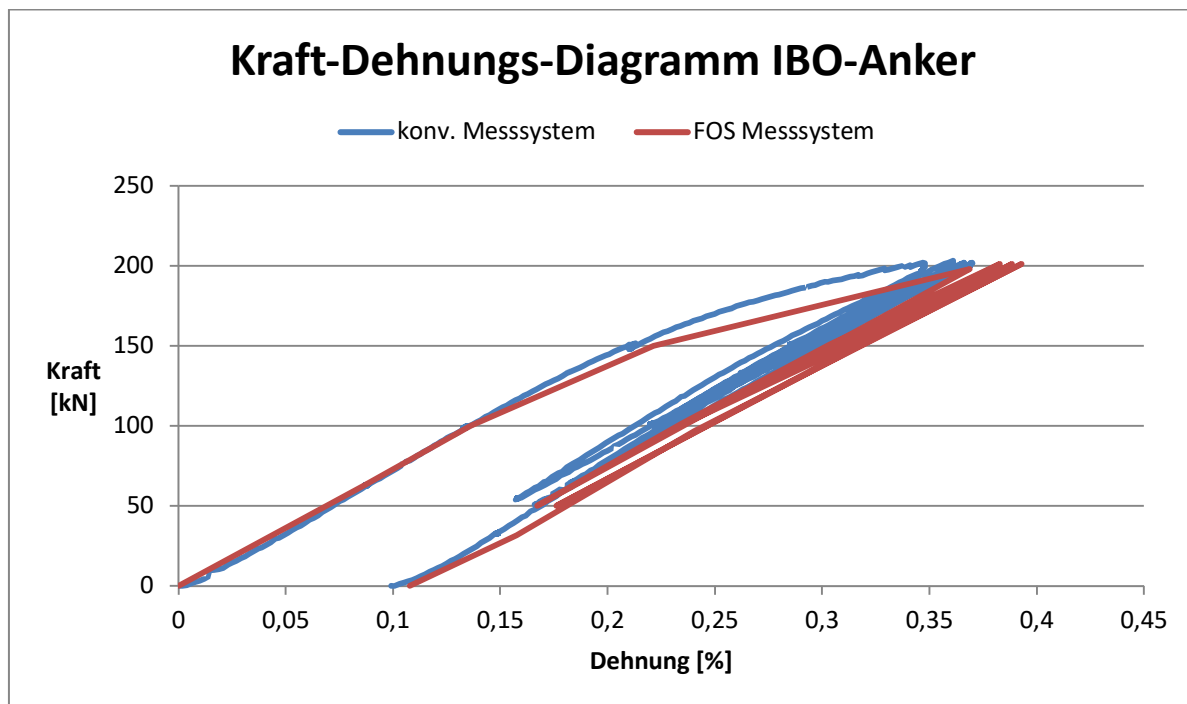


Abbildung 40: Kraft Dehnungs-Diagramm – IBO-Anker

Die folgende Abbildung 41 gibt den Spannungs-Dehnungs-Verlauf des IBO-Ankers wieder wobei für die Spannung der ermittelte Nennquerschnitt (siehe 7.1.2) berücksichtigt wurde. In weiterer Folge wurde der E-Modul für das konventionelle Messsystem ermittelt.

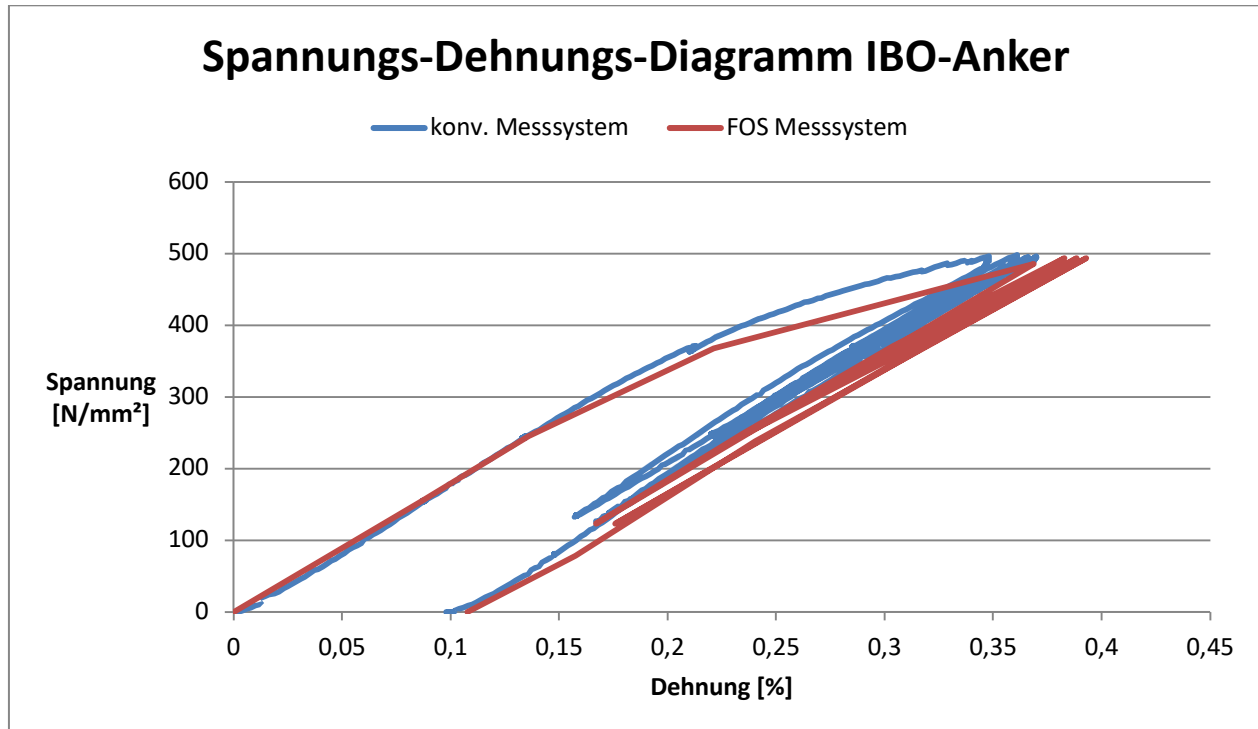


Abbildung 41: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – IBO-Anker

$$\Delta\sigma = \frac{(199,980 - 101,727)}{408} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] * 10^3 = 240,816 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(0,360 - 0,221)}{100} \left[ \frac{mm}{mm} \right] = 0,00139 [-]$$

$$E = \frac{240,816}{0,00139} = 173249 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \hat{=} 173,2 [GPa]$$



Tabelle 4: Versuch 2: IBO-Anker - Auswertung

Laststufe	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Kraft [kN]	Ankerlänge [m]	Faserlänge (gemessen) [m]	Faserlänge (lt. Auswertung) [m]	Dehnungsmittelwert [μm/m]
1	0	0	3,00	3,079	3,0403	0
2	154	62	3,00	3,079	2,6398	865
3	245	100	3,00	3,079	2,5887	1360
4	368	150	3,00	3,079	2,5833	2213
5	485	198	3,00	3,079	2,4194	3687
6	123	50	3,00	3,079	2,422	1671
7	248	101	3,00	3,079	2,4059	2343
8	370	151	3,00	3,079	2,422	3036
9	493	201	3,00	3,079	2,4032	3828
10	248	101	3,00	3,079	2,4059	2357
11	370	151	3,00	3,079	2,3952	3140
12	493	201	3,00	3,079	2,3898	3886
13	123	50	3,00	3,079	2,328	1760
14	248	101	3,00	3,079	2,3978	2482
15	370	151	3,00	3,079	2,3898	3188
16	493	201	3,00	3,079	2,3683	3929
17	238	97	3,00	3,079	2,3575	2405
18	78	31	3,00	3,079	2,3656	1575
19	0	0	3,00	3,079	2,3548	1078

Anhand der Messergebnisse der obigen Tabelle 4 und der dargestellten Messung (Abbildung 41) wurde ebenso der E-Modul berechnet.

$$\Delta\sigma = 493 - 248 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] = 245 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(0,3886 - 0,2357)}{100} \left[ \frac{\%}{\%} \right] = 0,00152 [-]$$

$$E = \frac{245}{0,00152} = 161184 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \triangleq 161,1 [GPa]$$

Wie im vorherigen Sub-Kapitel (7.1.2) erwähnt, wurde auf den ermittelten E-Moduli nicht weiter eingegangen. Die Messergebnisse des faseroptischen Messsystems wurden separat auf Gemeinsamkeiten untersucht. Der Dehnungsmittelwert ist für jede Laststufe wiederum in Blau

dargestellt. Nachfolgende Abbildungen visualisieren die Messergebnisse des faseroptischen Messsystems, wobei Erstere (Abbildung 42) das Rauschen des Messsystems vor Lastaufbringung definiert. Anhand der ausgegebenen Werte ist gut ersichtlich, dass sich das Rauschen des faseroptischen Messsystems auf +1 bis -2,5  $\mu\text{m}/\text{m}$  belaufen.

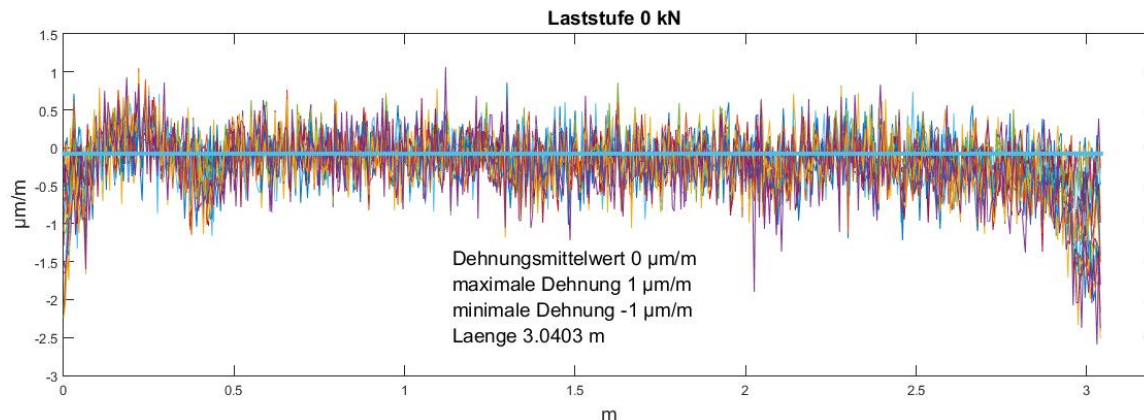


Abbildung 42: Erste Laststufe – Rauschen vor Lastaufbringung

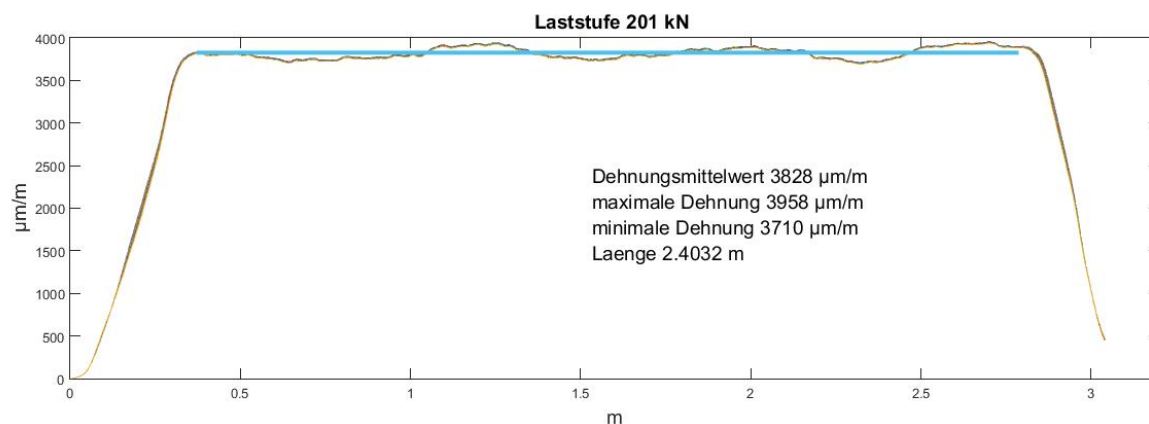


Abbildung 43: 9. Laststufe

Aus der Abbildung 43 geht hervor, dass der Dehnungsmittelwert mit 3828  $\mu\text{m}/\text{m}$  eine Spannweite von  $\pm 4\%$  aufweist. Der Anfangs- und der Endbereich der Messung wurden ebenso vernachlässigt, da diese die Krafteinleitung in den Anker zeigen. Eine Möglichkeit für die ermittelte Abweichung ist, dass die Eigenschaften des Klebers die Messung beeinflussten.

Ganz im Gegenteil zur vorhergehenden Beschreibung, ist in der folgenden Abbildung der Dehnungsmittelwert mit der Restdehnung aus dem Kraft-Dehnungs-Diagramm vergleichbar. Aus beiden Abbildungen geht hervor, dass sich dieselbe plastische Verformung einstellte. Dadurch

sich während der Belastungsstufen im Kleber Risse bildeten, löste sich dieser teilweise auf den ersten und letzten 0,40 m. Aus diesem Grund wird im Bereich der Krafteinleitung eine Stauchung der Messfaser wahrgenommen, die als Sprung dargestellt werden.

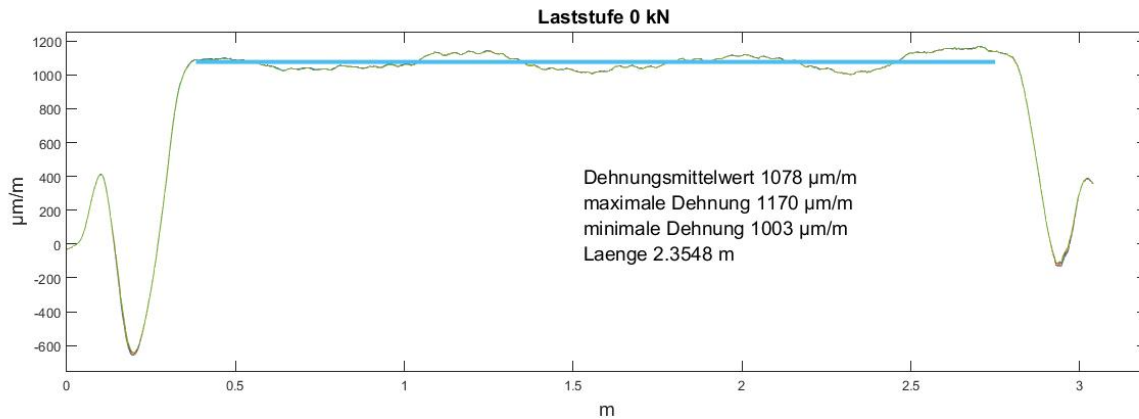


Abbildung 44: Laststufe – Restdehnung (plastische Dehnung)

### 7.2.3 Versuch 3: IBO-Anker

Abbildung 45 zeigt den Kraft-Dehnungs-Verlauf des dritten Hauptversuchs, der dem Kraftverlauf des zweiten Hauptversuchs (7.2.2) ähnelt. Auffällig ist, dass sich bei beiden Messsystemen nach der ersten Belastungskurve eine Plastifizierung am Anker einstellte. Die fortlaufenden Be- und Entlastungskurven verhalten sich linear. Bei einer Last von 192 kN werden eine Dehnung von 0,309 % beim konventionellen Messsystem und eine Dehnung von 0,325 % beim faseroptischen Messsystem gemessen. Somit ergibt sich ein Dehnungsunterschied von 0,016 % bei der Erstbelastung. Wobei sich bei kompletter Entlastung des Systems eine plastische Dehnung von 0,076 % (konventionelles Messsystem – Blau) und ebenso eine plastische Restdehnung von 0,0845 % (faseroptisches Messsystem – Rot) einstellte. Hiermit verringert sich der Dehnungsunterschied beider Messsysteme auf 0,0085 %.

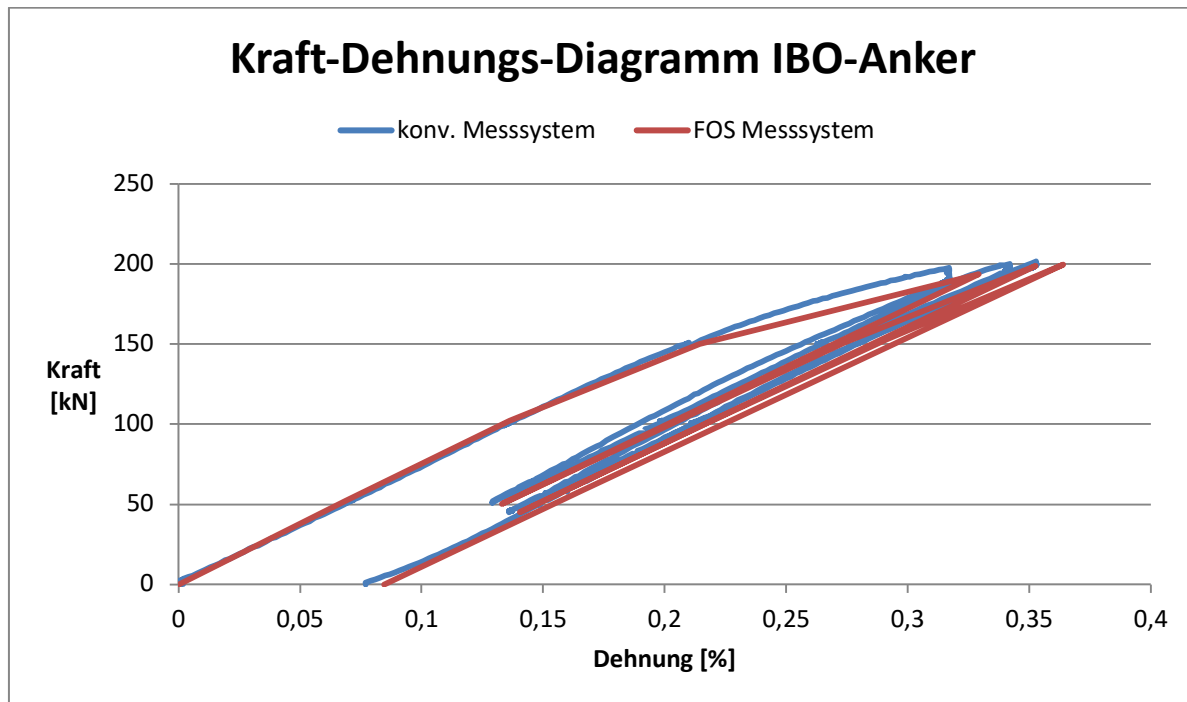


Abbildung 45: Kraft-Dehnungs-Diagramm – IBO-Anker

Abbildung 46 zeigt den Spannungs-Dehnungs-Verlauf des dritten Hauptversuchs, für die Spannung wurde wie im vorherigen Abschnitt (7.2.2) der ermittelte Nennquerschnitt berücksichtigt. In weiterer Folge wurde der E-Modul für das konventionelle Messsystem ermittelt.

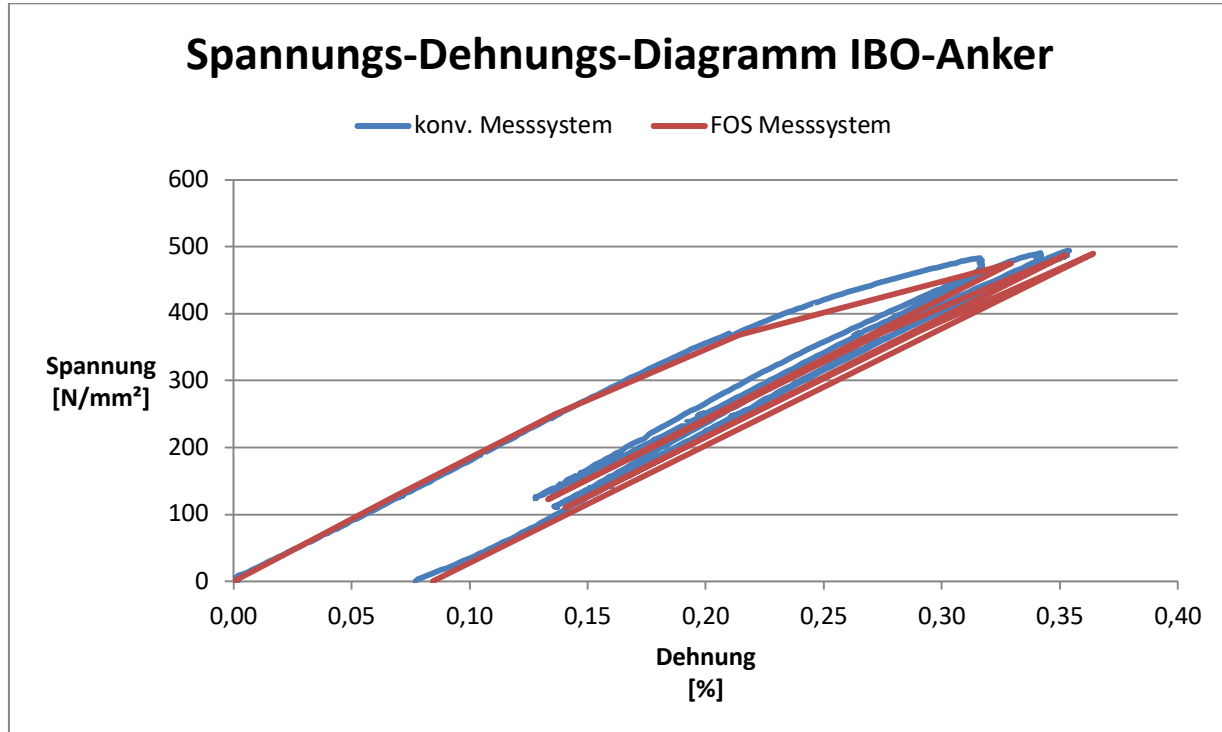


Abbildung 46: IBO-Anker - Spannungs-Dehnungs-Diagramm

$$\Delta\sigma = \frac{(151,093 - 51,163)}{408} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] * 10^3 = 244,926 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(0,265 - 0,129)}{100} \left[ \frac{mm}{mm} \right] = 0,00136 [-]$$

$$E = \frac{244,926}{0,00136} = 180093 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \hat{=} 180,0 [GPa]$$

Tabelle 5: Versuch 3: IBO-Anker - Auswertung

Laststufe	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Kraft [kN]	Ankerlänge [m]	Faserlänge (gemessen) [m]	Faserlänge (lt. Auswertung) [m]	Dehnungsmittelwert [μm/m]
1	0	0	3,00	3,058	2,9543	0
2	127	52	3,00	3,058	2,1757	683
3	250	102	3,00	3,058	2,331	1361
4	368	150	3,00	3,058	2,411	2143
5	475	194	3,00	3,058	2,338	3293
6	123	50	3,00	3,058	2,3357	1331
7	250	102	3,00	3,058	2,3498	2055
8	370	151	3,00	3,058	2,3522	2740
9	488	199	3,00	3,058	2,3733	3526
10	110	45	3,00	3,058	2,2863	1404
11	248	101	3,00	3,058	2,3263	2183
12	375	153	3,00	3,058	2,3427	2912
13	490	200	3,00	3,058	2,3616	3640
14	142	58	3,00	3,058	2,3098	1648
15	0	0	3,00	3,058	2,3239	845

Ebenfalls wird mithilfe der Messergebnisse der obigen Tabelle 5 der E-Modul berechnet.

$$\Delta\sigma = 538 - 276 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] = 262 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(0,3526 - 0,2055)}{100} \left[ \frac{\%}{\%} \right] = 0,00147 [-]$$

$$E = \frac{262}{0,0014} = 187142 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \hat{=} 187,1 [GPa]$$

Der E-Modul wurde für das konventionelle als auch für das faseroptische Messsystem ermittelt, aber aufgrund Differenzen im Datenblatt nicht weiter berücksichtigt (siehe Sub-Kapitel 7.1.2). Die Messergebnisse des faseroptischen Messsystems wurden separat auf Gemeinsamkeiten untersucht. Der Dehnungsmittelwert ist für jede Laststufe wiederum in Blau dargestellt. Nachfolgende Abbildungen visualisieren die Messergebnisse des faseroptischen Messsystems, wobei Erstere (Abbildung 47) die wiederholbare Genauigkeit (Rauschen) des Messsystems vor Lastaufbringung definiert.

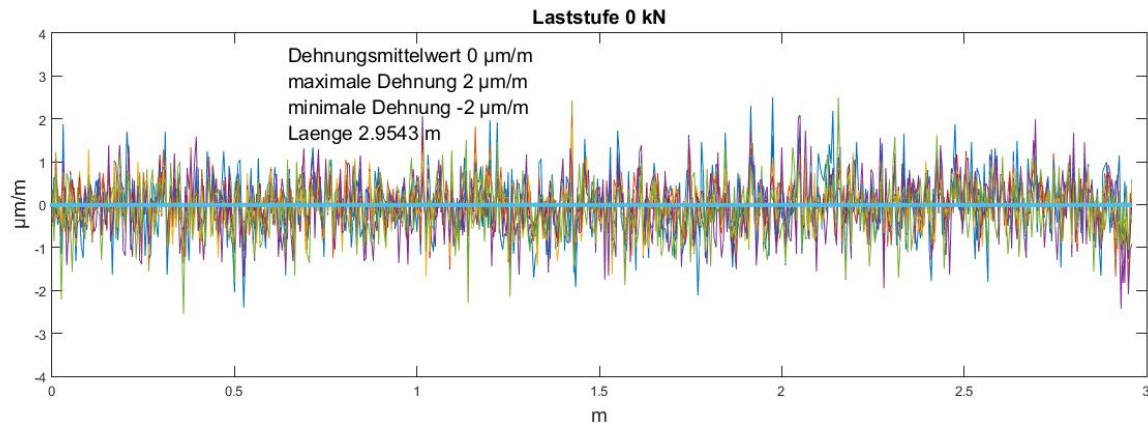


Abbildung 47: Erste Laststufe – Eigenrauschen des FOS-Messsystems

In der folgenden Abbildung wird der Dehnungsverlauf bei einer Laststufe von 52 kN visualisiert, wobei der Dehnungsmittelwert mit  $683 \mu\text{m/m}$  eine Abweichung von  $+9,07\%$ , in Bezug auf die maximale Dehnung, aufweist. Auf den ersten  $0,50 \text{ m}$  wird eine erhöhte Dehnung gemessen, diese könnte durch eine zusätzliche Biegezugbeanspruchung im Anker entstanden sein, welche eventuell durch eine nicht sachgemäße Kräfteinleitung in den Anker verursacht wurde. Die erhöhte Dehnung wird in jeder Laststufe gemessen. Eine Möglichkeit für die erhöhte Spannweite ist, dass die Zugsteifigkeit ( $82 \text{ N/mm}^2$ ) des Klebers zu gering ist und folglich mehrere Risse erhielt, was sich auf die gemessenen Dehnungen negativ auswirkt.

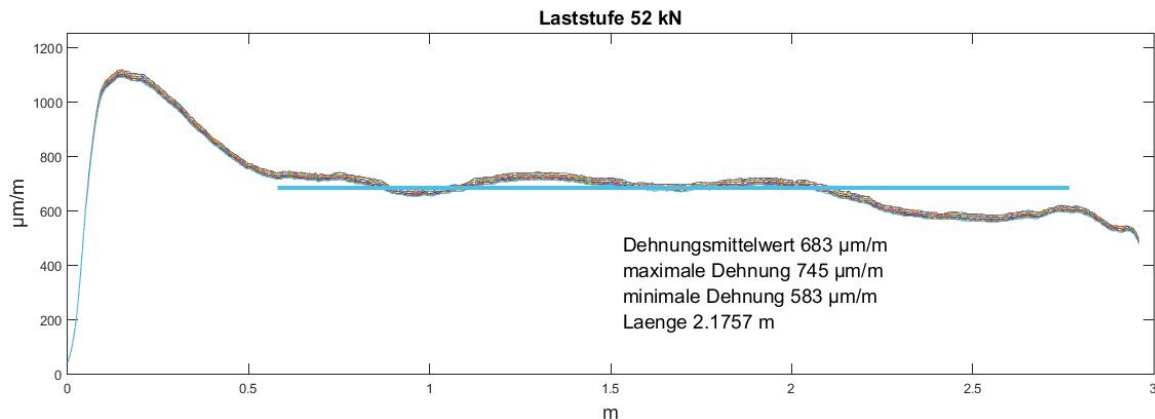


Abbildung 48: Zweite Laststufe

Im Vergleich zur vorherigen Messabweichung verringert sich, wie in Abbildung 49 ersichtlich, die Spannweite des Dehnungsmittelwertes auf  $\pm 6\%$ . Das Abfallen der Messkurve am Ende der Messung beschreibt die Kräfteinleitung in den Anker. Eine Möglichkeit der Verringerung der Spannweite ist, dass der Kleber durch die Erstbelastungsschleife die vollständige Dehnbarkeit erreichte und nun keine weitere Rissbildung stattfinden kann.

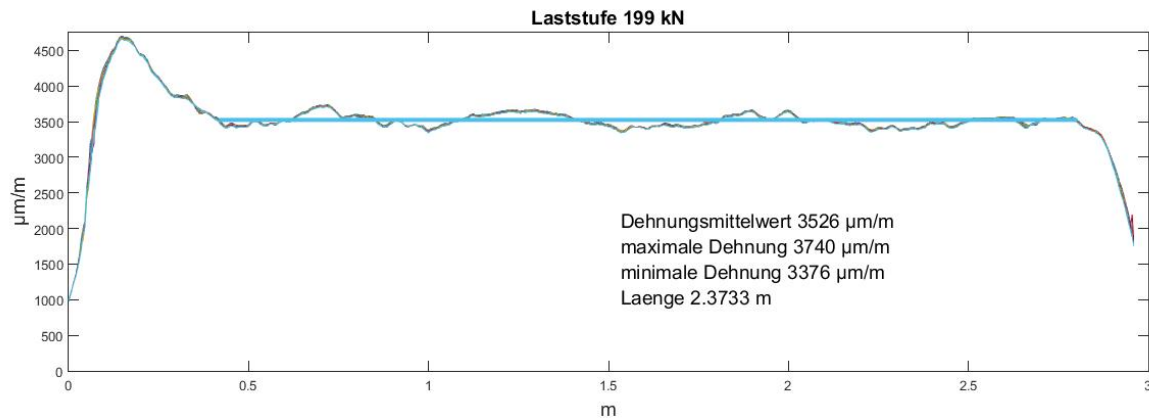


Abbildung 49: 9. Laststufe

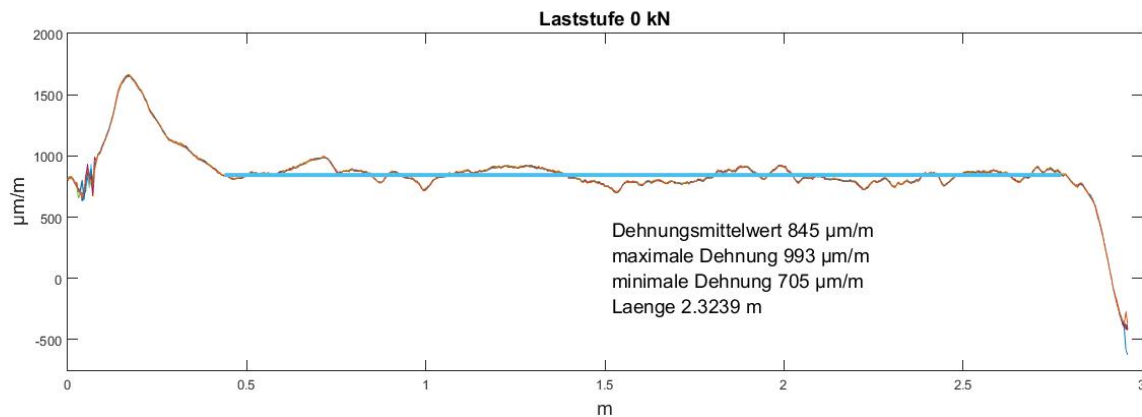


Abbildung 50: 15. Laststufe – Restdehnung (plastische Dehnung)

Der vorhandene Dehnungsmittelwert bei komplett entlastetem System ist mit der plastischen Restdehnung aus dem Kraft-Dehnungs-Diagramm vergleichbar. Im Vergleich mit der Restdehnung aus dem vorherigen Sub-Kapitel kam es bei diesem Versuch zu keiner Stauchung der Messfaser.



## 8. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Installation der Messfaser und die Auswertung der Messdaten, des faseroptischen Messsystems dem konventionellen Messsystem gegenübergestellt. Das konventionelle Messsystem diente als Referenzmessung für das faseroptische Messsystem. Damit konnte dies auf Richtigkeit überprüft werden. Zu Beginn wurden Vorversuche an den zu untersuchenden Ankern mittels konventionellem Messsystem durchgeführt, um mögliche Verbesserungen bezüglich der Platzierung des Dehnungsaufnehmers anzuwenden. Anhand dreier Hauptversuche wurden verschiedene Kleber und Applizierungsmethoden des Messkabels untersucht und ausgewertet.

Im ersten Hauptversuch konnte gezeigt werden, wie sich die verwendeten Messsysteme im Kraft-Dehnungs-Diagramm verhalten und wie sich die Applizierung des Messkabels an der Außenseite des SN-Ankers in Bezug auf die faseroptische Messung verhält. Im Kraft-Dehnungs-Diagramm konnte man bei der Erstbelastung deutlich erkennen, dass der Dehnungsaufnehmer DD1 (konv. Messsystem) zu Beginn der Messung verrutschte und sich bei einer Belastung von 11 kN wieder einpendelte, dies ergab einen Dehnungsfehler von 0,026 %. Bei einer Laststufe von 100 kN wurden beide Messsysteme miteinander verglichen, dabei ergab sich ein Dehnungsunterschied (unter Berücksichtigung des Dehnungsfehlers) von 0,007 %. Dies zeigt eine gute Übereinstimmung des konventionellen Messsystems mit der faseroptischen Messung.

Die Abweichung des Dehnungsmittelwertes bei einer Laststufe von 119 kN belief sich auf  $\pm 5$  %. Eine Möglichkeit für diese Abweichung ist, dass die Applizierung der Messfaser fehlerhaft erfolgte. Eine weitere Möglichkeit ist, dass die Stärke des Klebers zwischen Messfaser und SN-Anker nicht kontinuierlich dieselbe war. Aus der letzten Laststufe geht deutlich hervor, dass sich das Dehnungsverhalten des instrumentierten Ankers im nicht mehr in den Ausgangszustand zurückkehrt und bleibende Verformungen entlang des faseroptischen Messprofils auftreten. Es wird vermutet, dass diese auf eine Interaktion zwischen Sensorkabel, Klebstoff und Messobjekt zurückzuführen sind.

Bei dem zweiten Hauptversuch wurde die Applizierung des Messkabels in die Innenseite des IBO-Ankers verlegt und untersucht. Im Kraft-Dehnungs-Diagramm konnte deutlich gezeigt werden, dass sich bei beiden Messsystemen bei der ersten Belastungskurve eine Plastifizierung am Anker einstellte. Bei der ersten Belastungskurve, mit einer Last von 198 kN, wich die gemessene Dehnung des faseroptischen Messsystems um +0,024 % vom konventionellen Messsystem ab.

Des Weiteren stellten sich bei kompletter Entlastung des Systems eine Restdehnung von 0,099 % beim konventionellen Messsystem und eine Restdehnung von 0,1078 % beim faseroptischen Messsystem ein. Der Dehnungsunterschied beider Messsysteme beträgt 0,0088 %. Bei Betrachtung des faseroptischen Messsystems mit einer Laststufe von 201 kN beträgt die relative Abweichung  $\pm 4$  % vom Dehnungsmittelwert (3828  $\mu\text{m}/\text{m}$ ). Der Anfangs- und der Endbereich der Messung wurden vernachlässigt, da diese die Krafteinleitung am Anker darstellen. Eine Möglichkeit für die ermittelte Abweichung ist, konnte die Klebeeigenschaft sein. Bei der Darstellung der Restdehnung war ersichtlich, dass sich eine plastische Verformung einstellte. Dadurch sich während der Belastungsstufen im Kleber Risse bildeten, löste sich dieser teilweise auf den ersten und letzten 0,40 m. Aus diesem Grund wird im Bereich der Krafteinleitung eine Stauchung der Messfaser wahrgenommen, die als Sprung dargestellt werden.

Im dritten Hauptversuch wurde ebenso ein IBO-Anker mit einer innenliegenden Messfaser untersucht. Der Unterschied zum zweiten Versuch ist die Verwendung eines anderen Klebers. Im Kraft-Dehnungs-Verlauf des dritten Hauptversuchs, ist ersichtlich, dass sich bei beiden Messsystemen nach der ersten Belastungskurve eine Plastifizierung am Anker einstellte. Die fortlaufenden Be- und Entlastungskurven verhalten sich linear. Bei einer Last von 192 kN wird eine Dehnung von 0,309 % mit dem konventionellen Messsystem und eine Dehnung von 0,325 % mit dem faseroptischen Messsystem gemessen. Somit ergibt sich ein Dehnungsunterschied von 0,016 % bei der Erstbelastung. Wobei sich bei kompletter Entlastung des Systems eine plastische Dehnung von 0,076 % (konventionelles Messsystem) und ebenso eine plastische Restdehnung von 0,0845 % (faseroptisches Messsystem) einstellten. Hiermit verringert sich der Dehnungsunterschied beider Messsysteme auf 0,0085 %. Bei der Betrachtung der Messergebnisse des faseroptischen Messsystems konnte ersichtlich werden, dass auf den ersten 0,50 m eine erhöhte Dehnung gemessen wird, diese könnte durch eine zusätzliche Biegezugbeanspruchung im Anker entstanden sein, welche eventuell durch eine nicht sachgemäße Krafteinleitung in den Anker verursacht wurde. Die erhöhte Dehnung wird in jeder Laststufe gemessen. Bei einer Laststufe von 199 kN wird eine Streuung von  $\pm 6$  % in Bezug auf den gemessenen Dehnungsmittelwertes ermittelt. Eine Möglichkeit der Verringerung der Spannweite ist, dass der Kleber durch die Erstbelastungsschleife die vollständige Dehnbarkeit erreichte und nun keine weitere Rissbildung stattfinden kann. Im Vergleich mit der Restdehnung aus dem vorherigen Versuch kam es bei diesem Versuch zu keiner Stauchung der Messfaser. Es wird vermutet, dass sich bei diesem System zwar Risse im Kleber auf der gesamten Ankerlänge gebildet haben, aber der sich nicht vom Ankermantel löste.

---

Für weitere Arbeiten wäre es sinnvoll, eine weitere Versuchsreihe durchzuführen, damit der Einfluss des Klebers auf die Messergebnisse überprüft werden kann. Die Versuchsreihe sollte aus mindestens drei Ankern pro verwendetem Kleber bestehen, um Applizierungsfehler zu erkennen. Als Ankertyp würde sich erneut ein SN-Anker gut anbieten, wobei für jeden Versuch ein weiteres Gewinde pro Anker hergestellt werden müsste. Grundsätzlich könnte man für den Laborversuch auch einen GEWI-Anker verwenden. Damit würde das Anfertigen der zusätzlichen Gewinde wegfallen. Die Applizierung der Faser, für jede Versuchsreihe, sollte sich nicht voneinander unterscheiden. So sollte die Faser beispielsweise an beiden Enden gespannt und mittels Druck in den Kleber eingedrückt werden. Als Kleber könnte der Innotec Metal Weld, wie in den bisher durchgeführten Versuch, am SN-Anker verwendet werden. Weiters würde sich ein DMS-Kleber, der unter Druck oder unter UV aushärtet, gut eignen. Dabei sollte beachtet werden, dass eine geringe Klebeschicht verwendet werden sollte. Grundsätzlich sollten für die Versuchsreihen zwei mechanisch hergestellte Nuten am Anker verwendet werden. Um eventuelle Biegungen im Ankerstab erkennen zu können, sollte die FOS-Messung an zwei gegenüberliegenden Seiten erfolgen.

# Literatur

**BASF. 2018.** Homepage der Firma BASF Performance Products GmbH. [Online] 2018. [Zitat vom: 24. Februar 2018.] <https://www.master-builders-solutions.basf.at/de-at>.

**Brugg Kabel, AG. 2012.** *Fibre Optic Sensing Cables*. [Datenblatt] s.l. : Brugg Kabel AG, 2012.

**ENERPAC. 2018.** Homepage der Firma ENERPAC. [Online] 2018. <https://www.enerpac.com/de/industrielle-werkzeuge/hydraulikzylinder-heber-hebeprodukte-und-systeme/allzweck-hydraulikzylinder/rch-serie-hohlkolbenzylinder>.

**HBM. 2018.** Homepage der Firma HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. *Aufnehmer & Sensoren*. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. Februar 2018.] <https://www.hbm.com/de/5501/aufnehmer-sensoren/>.

**INNOTECH. 2018.** Homepage der Firma INNOTECH - Technikbedarf Huber Obermayr e.U. [Online] 2018. [Zitat vom: 26. Februar 2018.] <https://www.innotec.at/>.

**Lagger, M. 2014.** *Wiederinbetriebnahme und Optimierung der Biaxialmaschine*. [Bachelorprojekt] Technische Universität Graz : Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, 2014.

**Luna, Innovations Incorporated. 2018.** Homepage der Firma Luna Innovations Incorporated, 2018. [Online] 2018. [Zitat vom: 01. März 2018.] <http://lunainc.com/>.

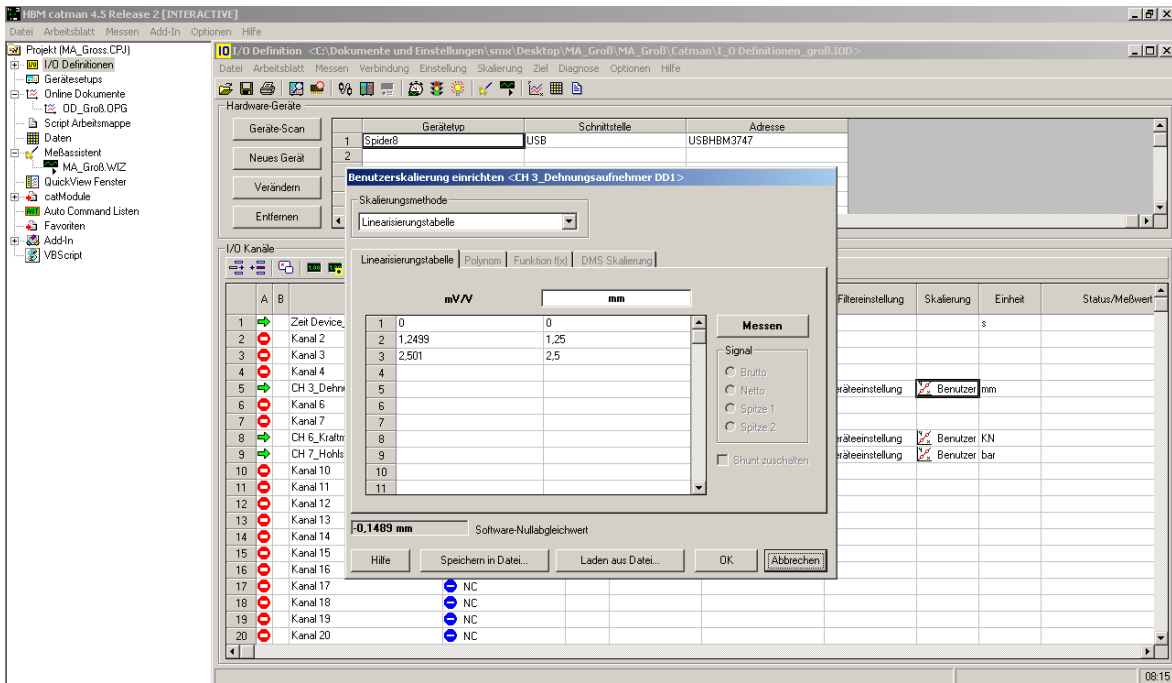
**Monsberger, C. 2015.** *Verteilte faseroptische Dehnungsmessung mit dem hochauflösenden LUNA OBR 4600*. [Diplomarbeit] Technische Universität Graz : Insitut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, 2015.

**Monsberger, Ch., Woschitz, H., Lienhart, W. et. al. 2017.** *Performance assesment of geotechnical structural elements using distributed fiber optic sensing*. [Paper] University of Technology Graz : Institute of Engineering Geodesy and Measurment Systems, 2017.

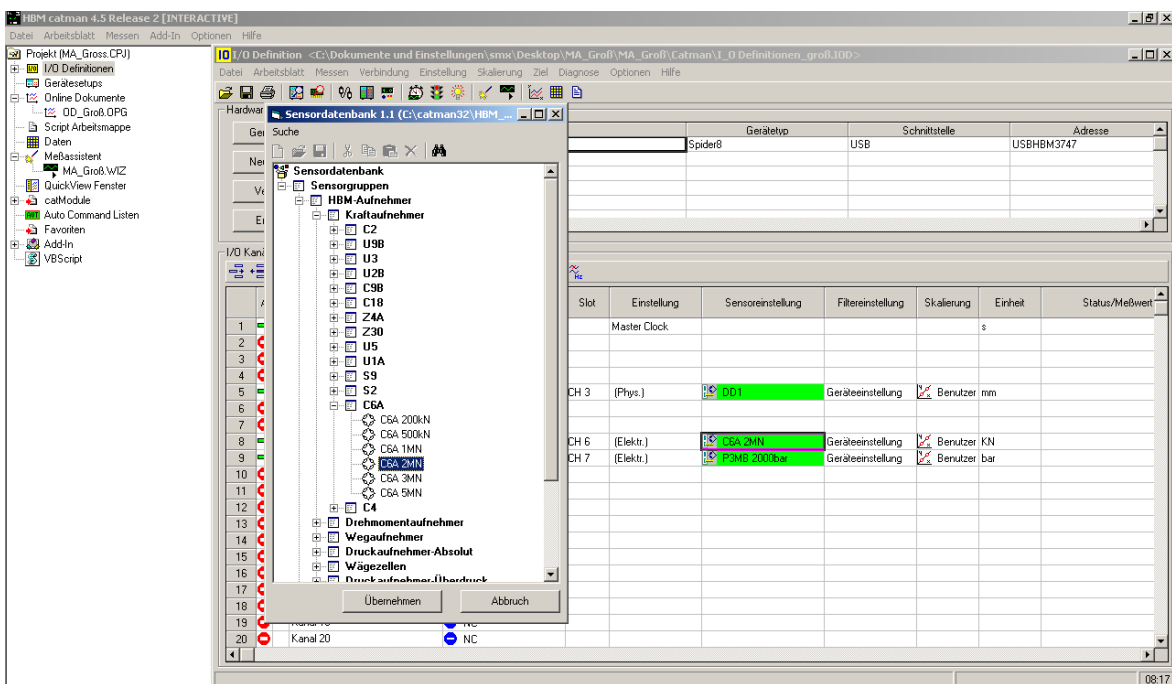
**RS, Components. 2018.** Homepage der Firma RS Components Handelsges.m.b.H. [Online] 2018. [Zitat vom: 25. Februar 2018.] <https://at.rs-online.com/web/>.

# Anhang

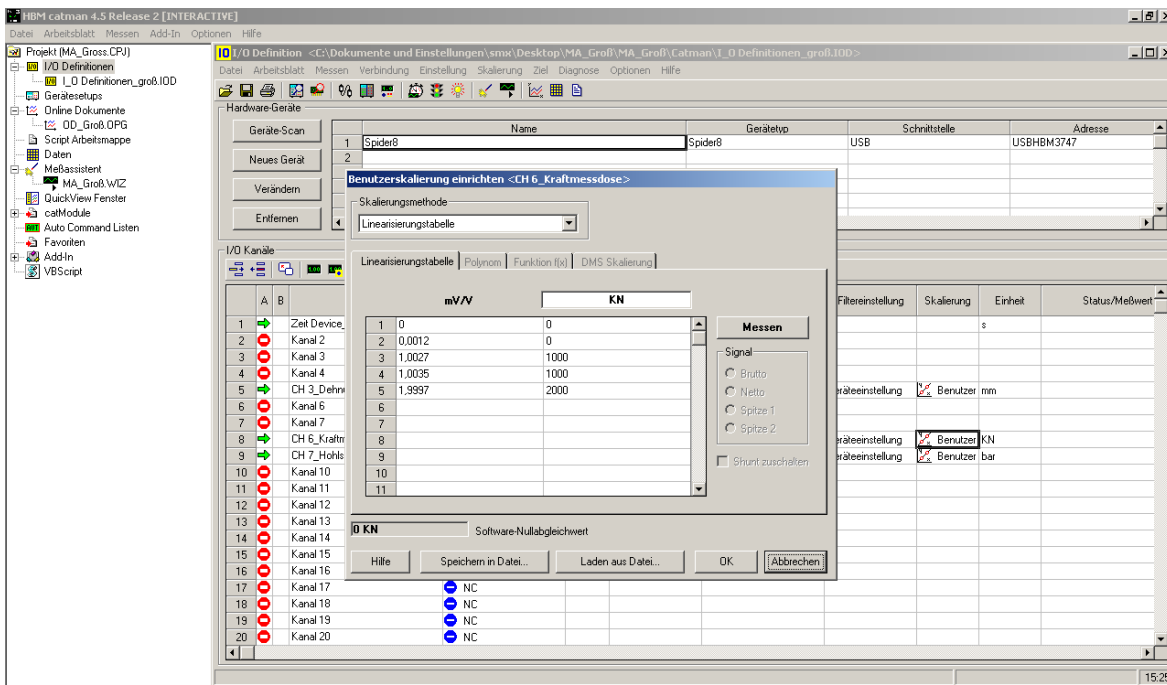
## Bedienung von Catman 4.5



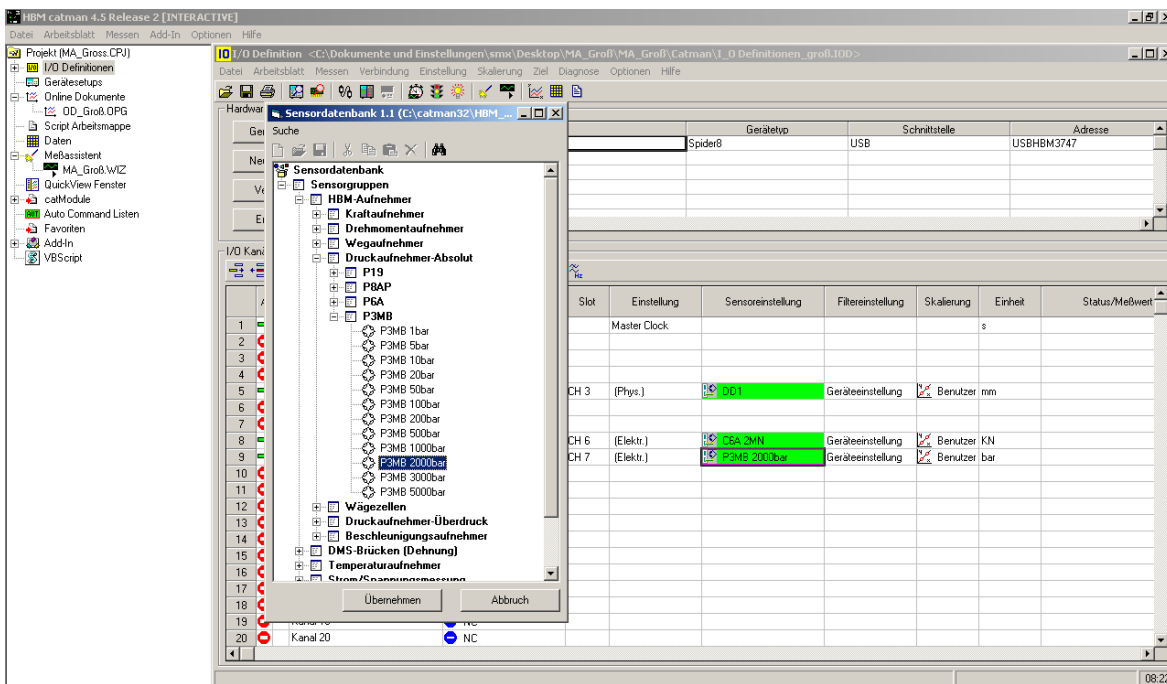
### Skalierungswerte – Dehnungsaufnehmer DD1



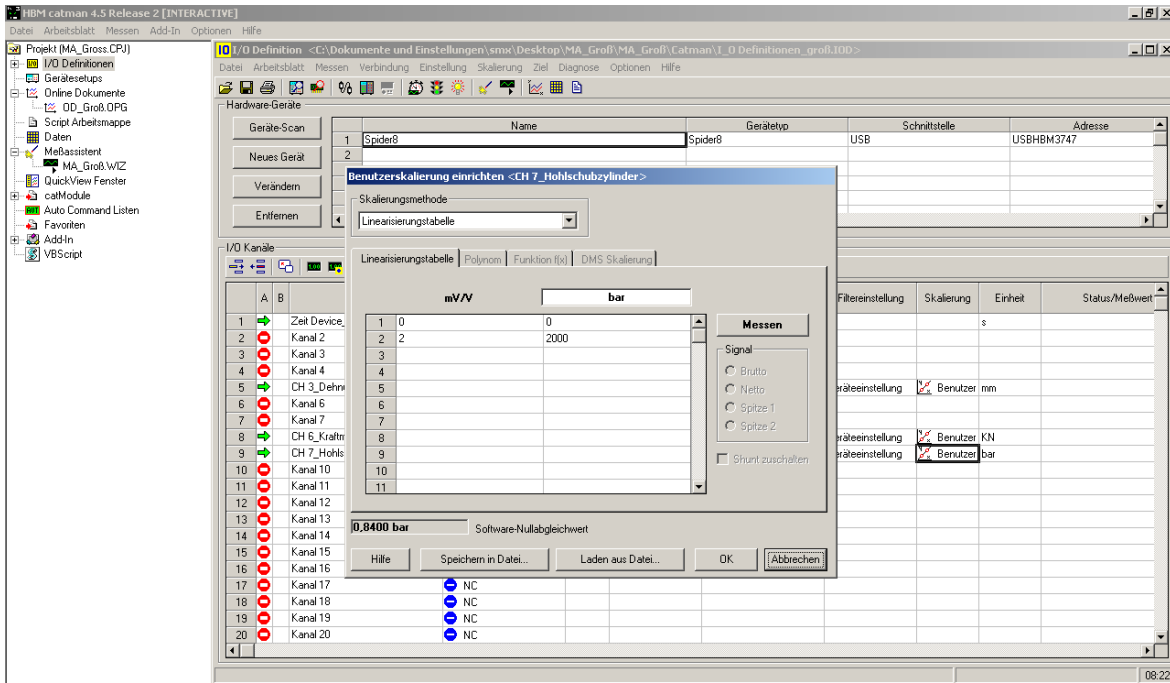
### Auswahl des Kraftaufnehmers C6A 2MN aus der Sensordatenbank



### Skalierungswerte – Kraftaufnehmer C6A 2MN



### Auswahl des Druckaufnehmers P3MB 2000 bar aus der Sensordatenbank



Skalierungswerte – Druckaufnehmer P3MB 2000 bar

## Datenblatt SN-Anker

## SN-Anker

## Technische Daten

Nr.	Kennwert / Typ <sup>1)</sup>	Zeichen	Einheit	SN20-180	SN25-250	SN25-330	SN28-330
1	Nenn Durchmesser	$D_{\text{Nenn}}$	[mm]	20	25	25	28
2	Gewinde	-	[mm]	M21	M26	M26	M30
3	Nennquerschnitt Ankerstab <sup>2)</sup>	$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	315	400	400	615
4	Nennmasse Ankerstab <sup>3)</sup>	m	[kg/m]	2,47	3,85	3,85	4,83
5	Streckgrenze Ankerstab <sup>4)</sup>	$F_{\text{t,Streck}}$	[kN]	173	246	319	308
6	Höchstkraft Ankerstab <sup>4)</sup>	$F_{\text{t,max}}$	[kN]	190	280	340	330
7	Streckgrenze Ankerstab <sup>4)</sup>	$R_{\text{t,Streck}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	550	500	650	500
8	Zugfestigkeit Ankerstab <sup>4)</sup>	$R_{\text{t,max}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	594	540	820	540
9	Dehnung Ankerstab <sup>4)</sup>	$A_{\text{el}}$	[%]	5,0	5,0	5,0	5,0
10	Höchstkraft Ankersystem <sup>5)</sup>	$F_{\text{t,max,Anker}}$	[kN]	180	250	300	330
11	Schulzweilwe Mutter	SW	[mm]	36	41	41	46
12	Lochlängen <sup>6)</sup>	L	[mm]	1.000 - 12.000	1.000 - 12.000	1.000 - 12.000	1.000 - 12.000

1) Stand: 2012-06. Hinweis: Werte unterliegen laufenden Änderungen; andere Dimensionen bzw. Stabilitäten sind auf Anfrage erhältlich; systemkonforme Ankerplatten laut Herstellerangaben erhältlich

2) Erchnet aus der Nennmasse:  $S_0 = 10^6 \times m / 7.850$  [kg/m<sup>3</sup>]

3) Charakteristischer Faktwert

4) Erchnet aus dem charakteristischen Wert der Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit und der Nennmasse, gerundet

5) B 550 B nach ÖNORM B 4707, B 500 B nach DIN 488 bzw. Felexkaristahl FA 650/820; E-Modul: 210.000 [N/mm<sup>2</sup>]

6) Erchnet aus dem Streckgrenzenverhältnis  $R_{\text{t,Streck}}/R_{\text{t,max}} = 1,08$  bzw. entsprechend Herstellerangaben

7) Nennwert der Höchstkraft des Ankersystems: Ankerkopf SN-Anker mit kalt aufgerolltem Gewinde, Ankerplatte, Ballagscheibe und Mutter

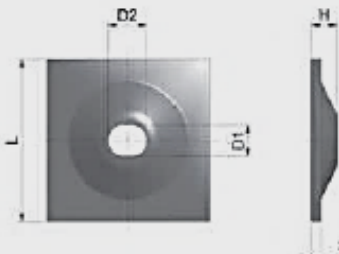
8) Sonderlängen auf Anfrage erhältlich

## Systemgeprüfte Kalottenplatten

Kennwert / Typ	Zeichen	Einheit	SN20-180	SN25-250	SN25-330	SN28-330
Länge	L	[mm]	150	200	200	200
Wandstärke	s	[mm]	8	10	12	12
Höhe	H	[mm]	32,5	32,5	32,5	32,5
Lochbreite	D1	[mm]	23	26	26	32
Lochlänge	D2	[mm]	26	38	38	42


## Einbauanleitung

- Herstellung des Ankerbohrlochs
- Verfüllung der Ankerbohrlöcher mit Mörtel
- Manuelles Einführen der SN-Anker in die verfüllten Bohrlöcher, Fixierung im Bohrloch mit einem Keil
- Aushärtzeit entsprechend dem verwendeten Ankermörtel und gültiger Einbauvorschriften
- Verspannen des Ankerkopfs durch Festziehen der Mutter

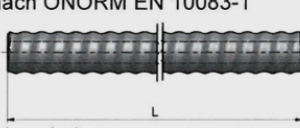




Datenblatt IBO-Anker

 DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL	DYWIDAG-Systems International GmbH Alfred-Wagner-Straße 1 A-4061 Pasching/Linz Tel.: +43-7229-61049-0 / Fax: DW 81	<b>Bodenvernagelung System DYWI® Drill</b> Hohlstab-Tragglied Werkstoff, Geometrie, Materialeigenschaften	<b>Anlage: 2</b>  <b>Blatt 1/1</b>
---	---	--	--

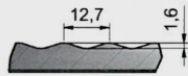
**Hohlstab-Tragglied**  
 Längsgeschweißtes, wärmebehandeltes und warm gerolltes Stahlrohr  
 Werkstoff: 28Mn6 nach ÖNORM EN 10083-1



**Länge [mm]**

1000
2000
3000
4000
6000

**Geometrie**  
 Linksgängiges Rundgewinde  
 Typ R in Anlehnung an ISO 1720 und ISO 10208  
 Abmessung in mm



**Materialeigenschaften**

Größe	Typ					
	① R32-210	② R32-250	R32-280	R32-320	③ R32-360	R32-400
Nenn-Außendurchmesser	32					
Ist-Außendurchmesser	31,1					
Mittlerer Innendurchmesser <sup>1)</sup>	21,0	20,0	18,5	16,5	15,0	12,5
Nennquerschnitt <sup>2)</sup>	340	370	410	470	510	560
Nennmasse <sup>3)</sup>	2,65	2,90	3,20	3,70	4,00	4,40
Bezogene Rippenfläche	0,13					
Kraft an der 0,2% Dehngrenze <sup>4)</sup>	160	190	220	250	280	330
Höchstkraft <sup>4)</sup>	210	250	280	320	360	400
Dehngrenze <sup>5)</sup>	470	510	540	530	550	590
Zugfestigkeit <sup>5)</sup>	620	680	680	680	710	710
R <sub>m</sub> /R <sub>p0,2</sub> <sup>6)</sup>	≥ 1,15					
Dehnung bei der Höchstkraft <sup>6)</sup>	≥ 5,0					
Dauerfestigkeit 2sa <sup>7)</sup>	190					
Verbundspannung <sup>8)</sup>	5,1					

Größe	Typ					
	R38-420	R38-500	R38-550	R51-550	R51-660	R51-800
Nenn-Außendurchmesser	38			51		
Ist-Außendurchmesser	37,8					
Mittlerer Innendurchmesser <sup>1)</sup>	21,5	19,0	17,0	34,5	33,0	29,0
Nennquerschnitt <sup>2)</sup>	660	750	800	890	970	1150
Nennmasse <sup>3)</sup>	5,15	5,85	6,25	6,95	7,65	9,00
Bezogene Rippenfläche	0,13					
Kraft an der 0,2% Dehngrenze <sup>4)</sup>	350	400	450	450	540	640
Höchstkraft <sup>4)</sup>	420	500	550	550	660	800
Dehngrenze <sup>5)</sup>	530	530	560	510	560	560
Zugfestigkeit <sup>5)</sup>	640	670	690	620	680	700
R <sub>m</sub> /R <sub>p0,2</sub> <sup>6)</sup>	≥ 1,15					
Dehnung bei der Höchstkraft <sup>6)</sup>	≥ 5,0					
Ermüdungsfestigkeit 2 sa <sup>7)</sup>	190					
Verbundfestigkeit <sup>8)</sup>	5,1					

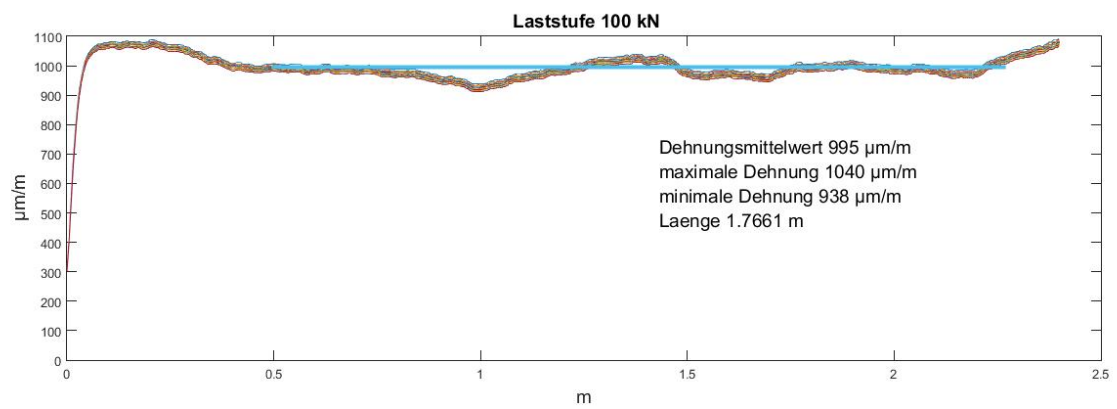
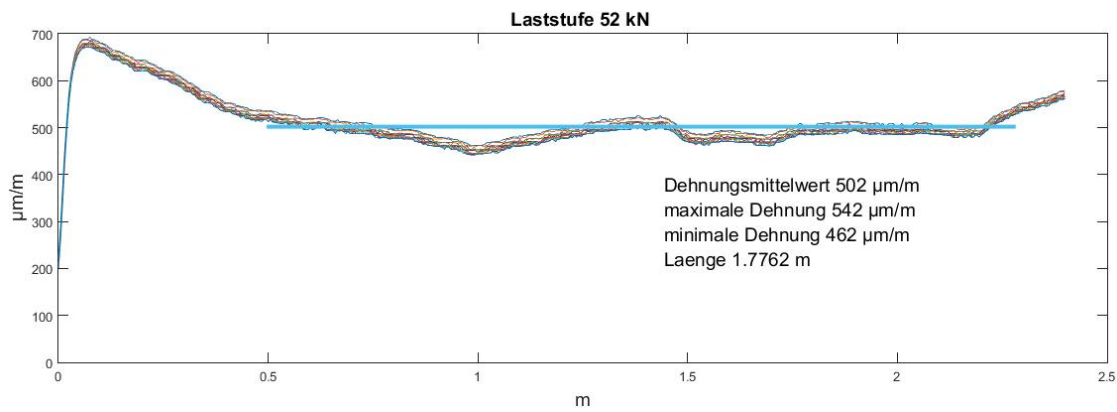
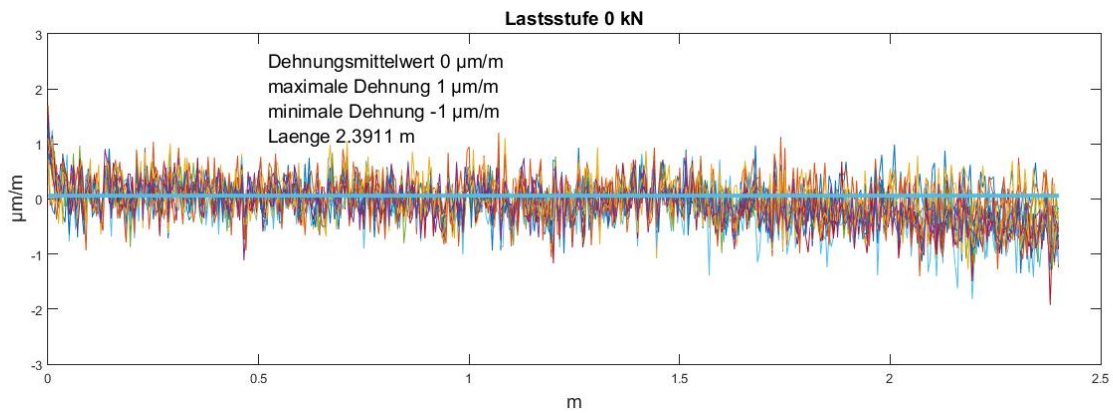
1) Errechnet aus dem Ist-Außendurchmesser, der mittleren Gewindehöhe und dem Nennquerschnitt, gerundet  
 2) Errechnet aus der Nennmasse mit  $S_0 = 10^3 \times m / 7,85$   
 3) Zulässige Abweichung: -3 bis +9 %  
 4) Charakteristischer Wert (5%-Fraktile)  
 5) Errechnet aus dem charakteristischen Wert der Kraft und dem Nennquerschnitt, gerundet  
 6) Charakteristischer Wert (10%-Fraktile)  
 7) Versuchsmäßig ermittelt bei einer oberen Kraft  $F_{up} = 0,7 \times F_{p0,2,nom}$  und 2 Mill. Lastwechsel  
 8) Charakteristischer Wert, ermittelt mit Ausziehversuchen mit einem Ankermörtel der Prismendruckfestigkeit von  $\geq 55 \text{ N/mm}^2$   
 Elastizitätsmodul  $E = 205.000 \text{ N/mm}^2$  BMVIT-327.120/0012-IV/ST/2015

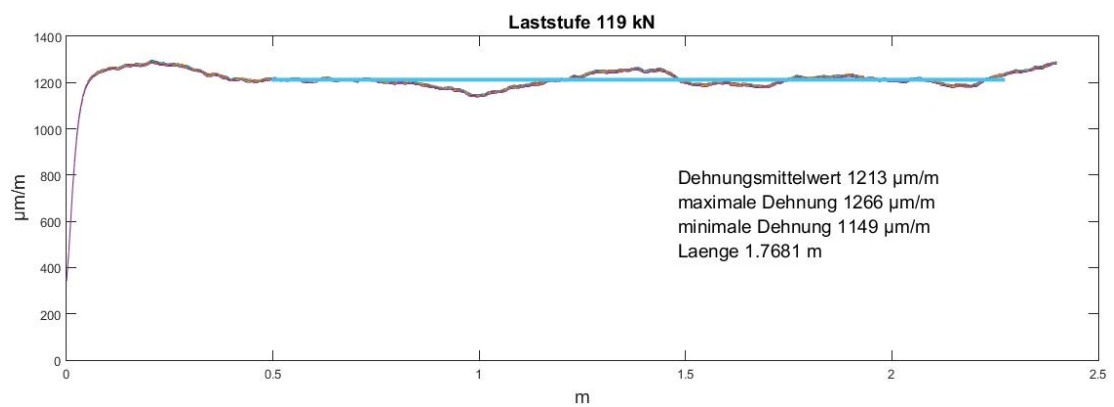
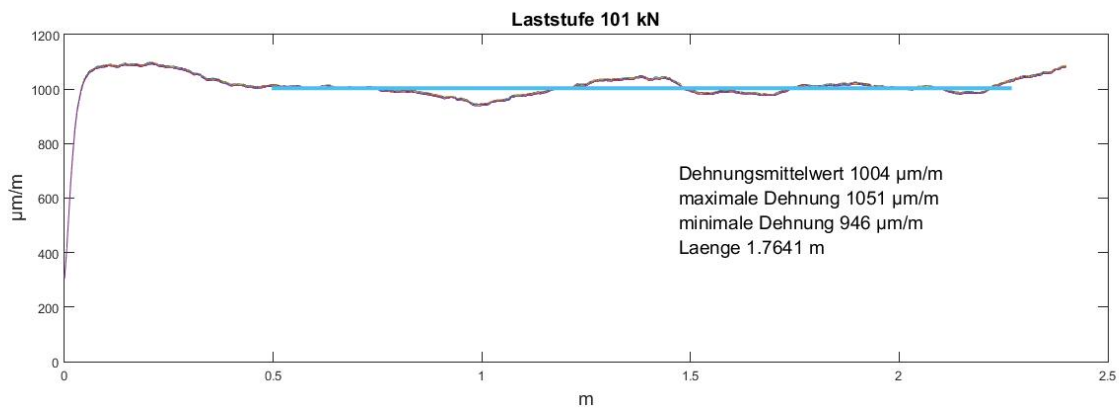
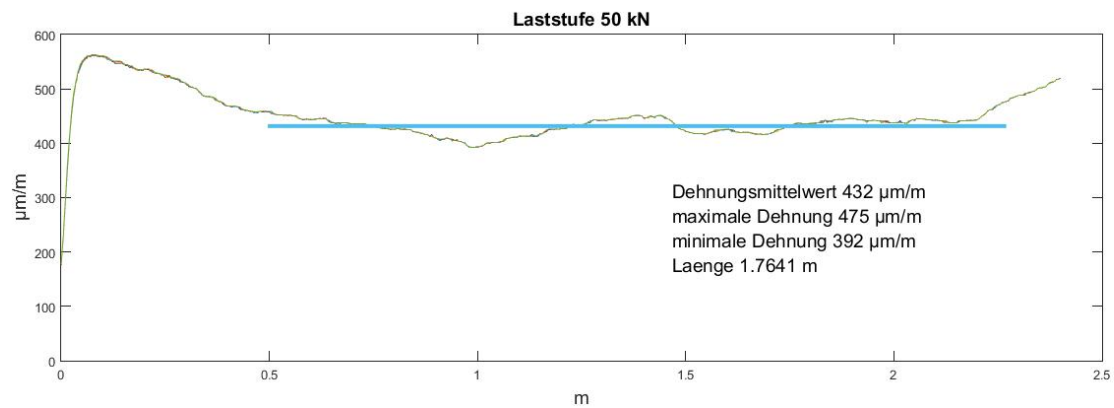
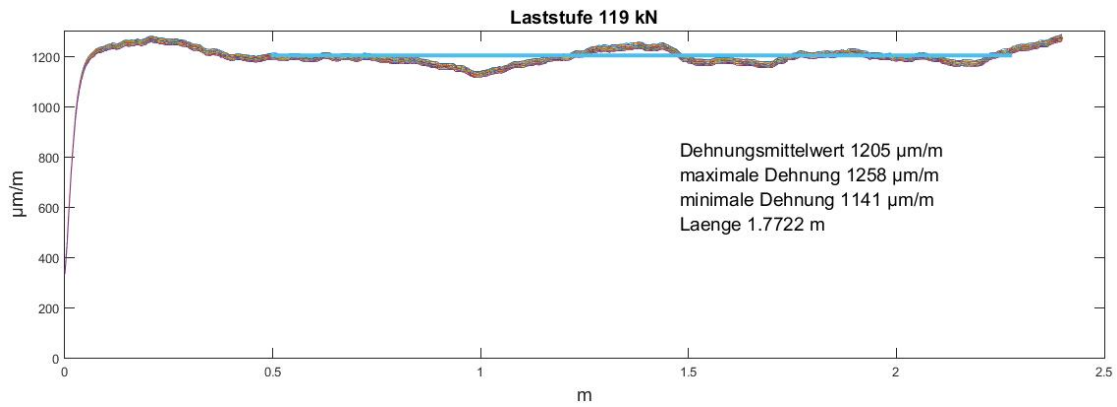
① Selbstbohrspieß min 32mm

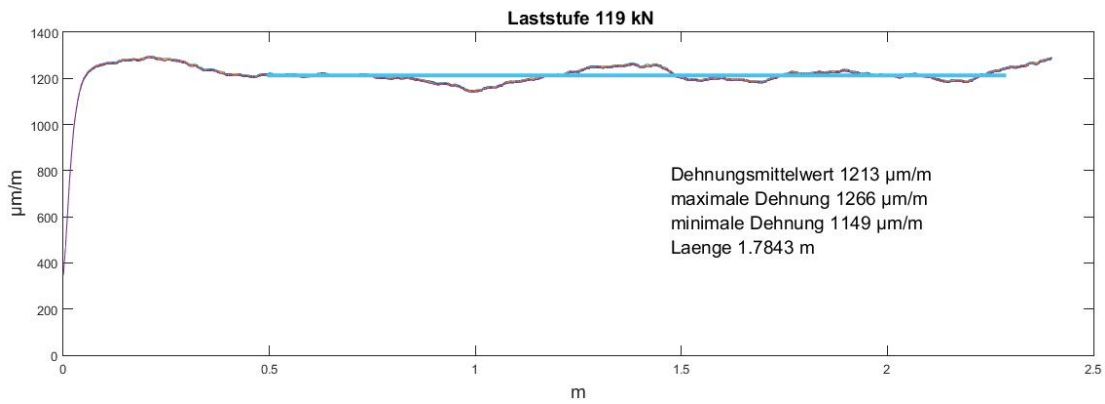
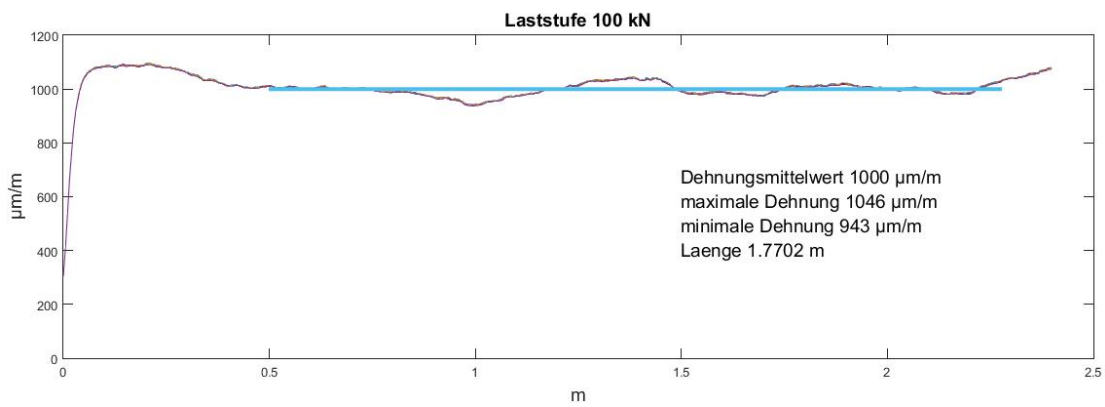
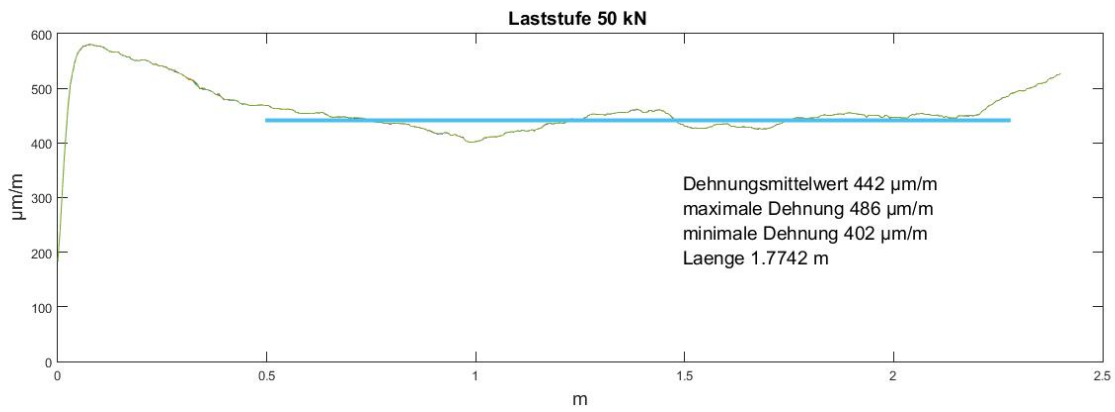
② Selbstbohranker 250 kN

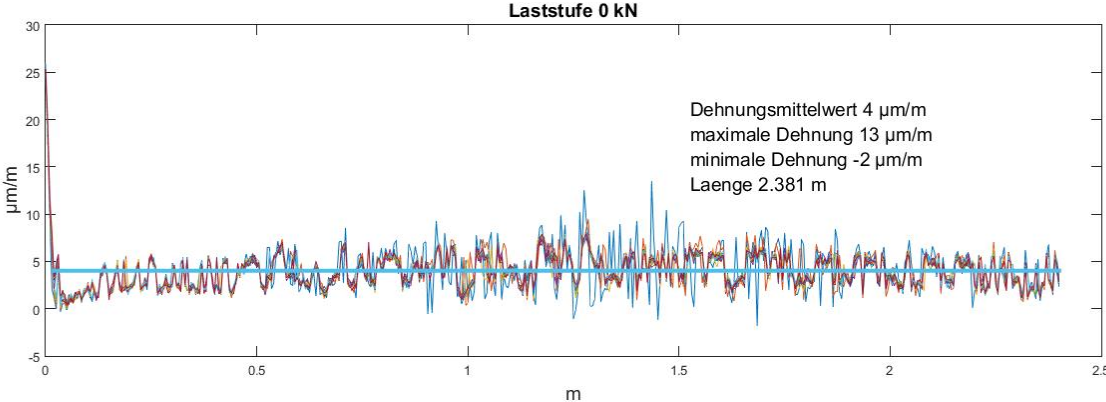
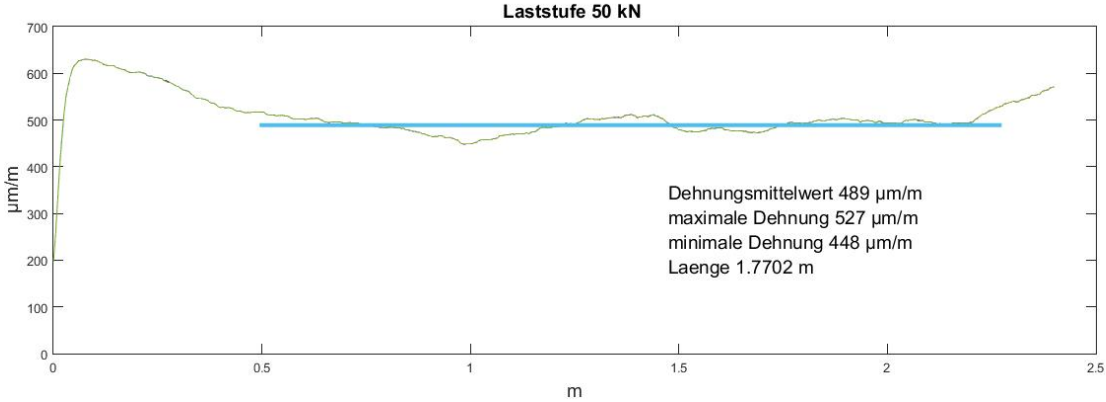
③ Selbstbohranker 350 kN

## Versuch 1: SN-Anker

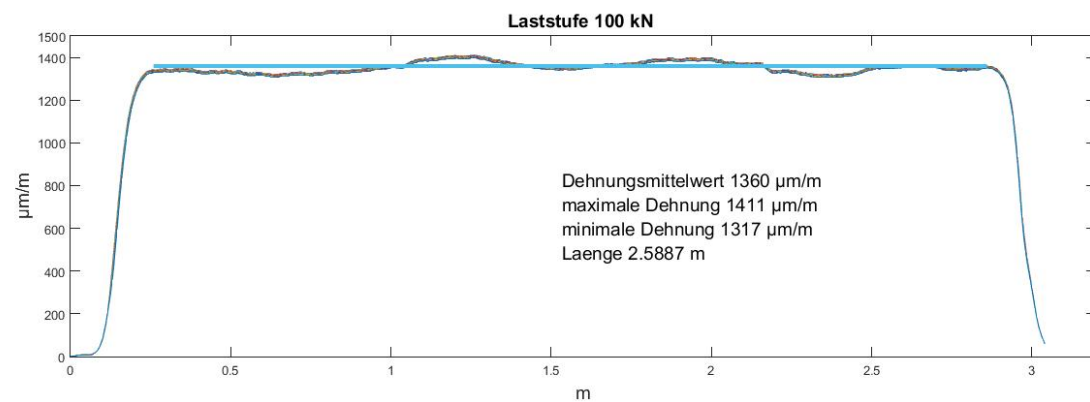
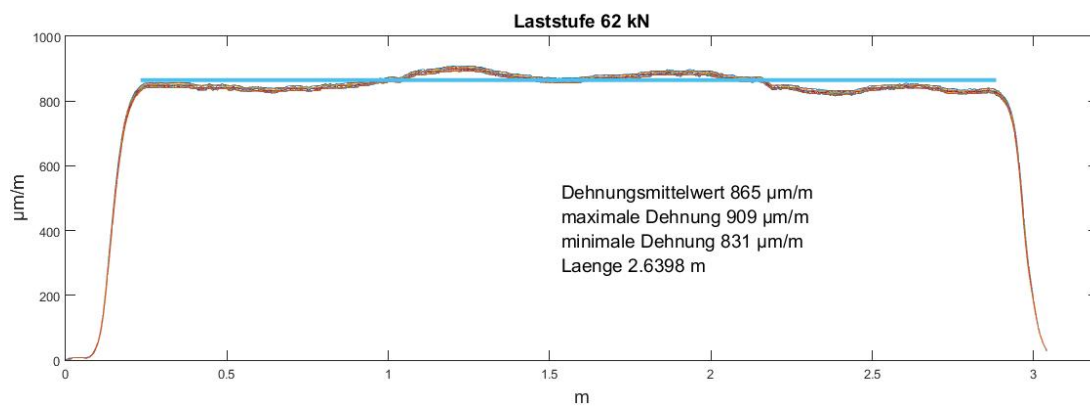
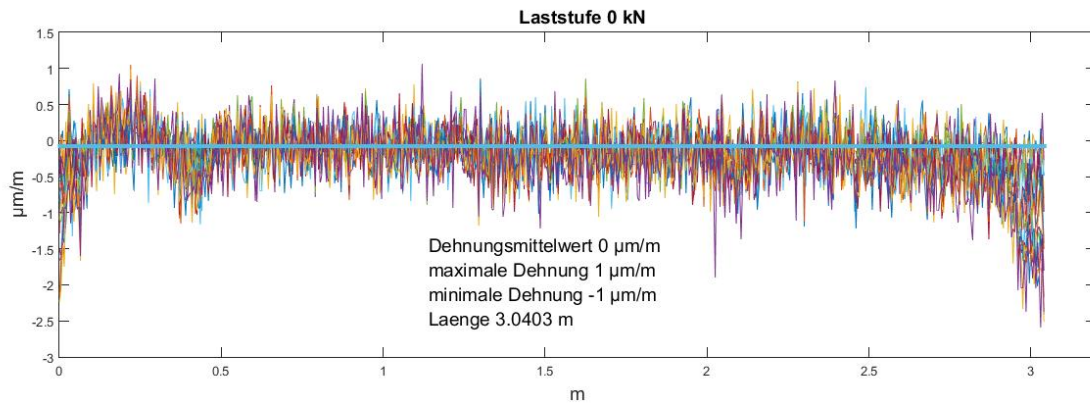


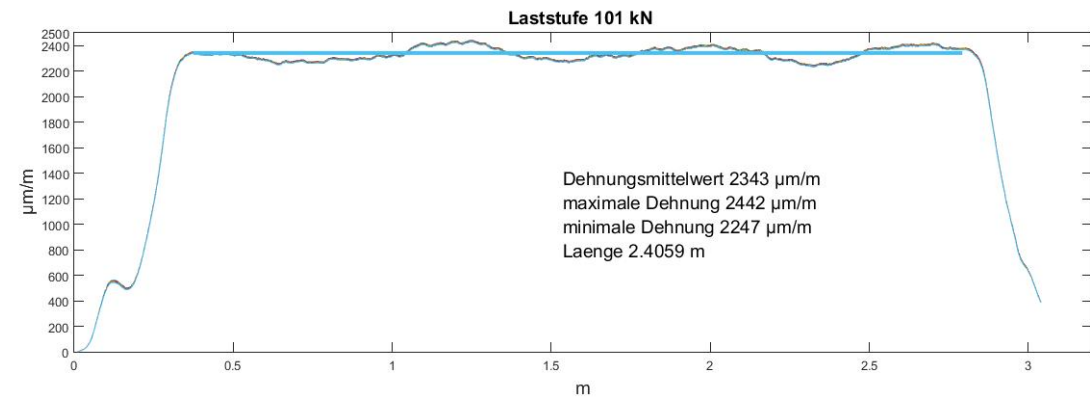
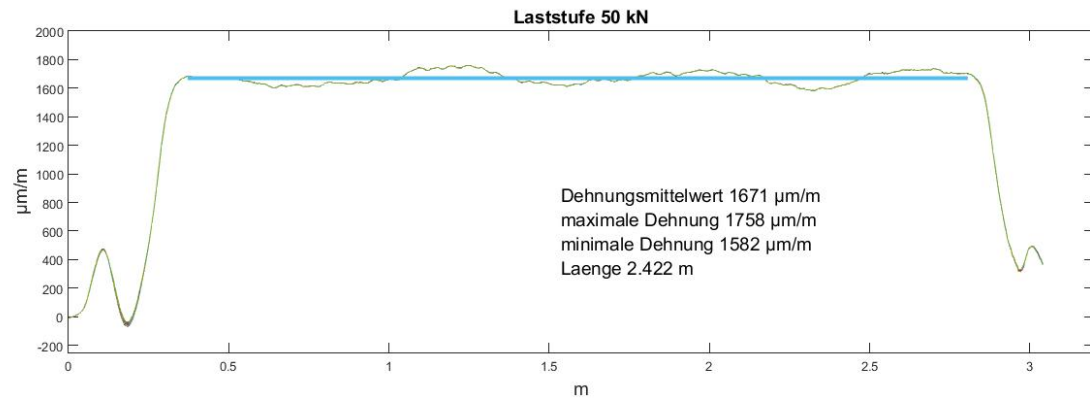
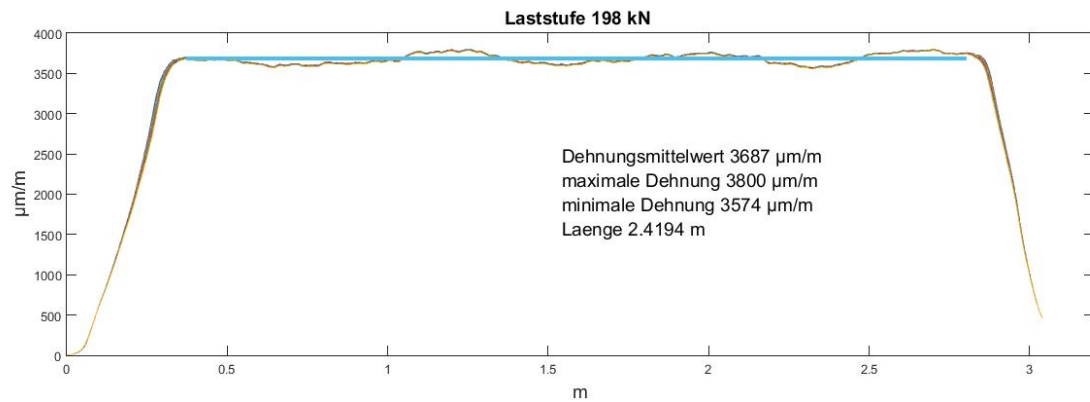
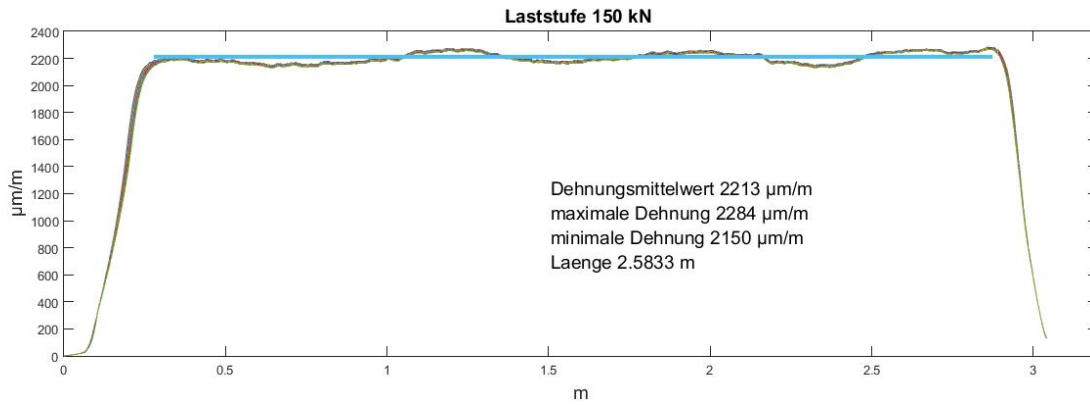


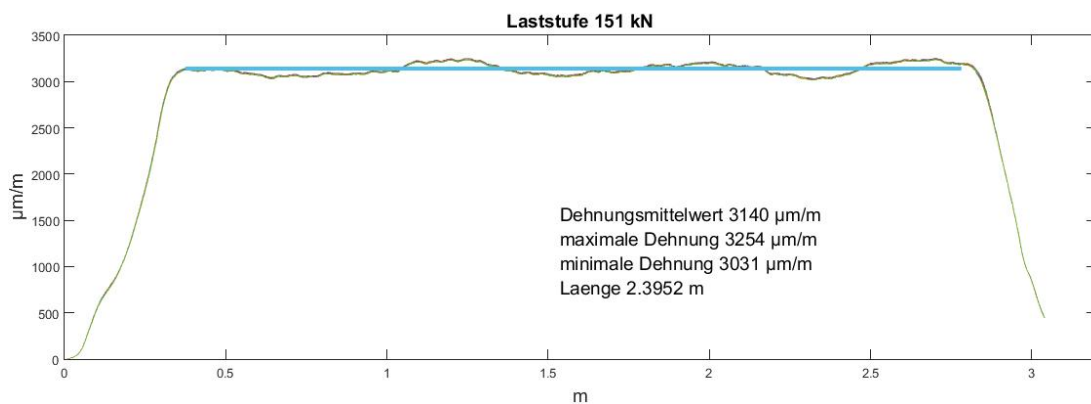
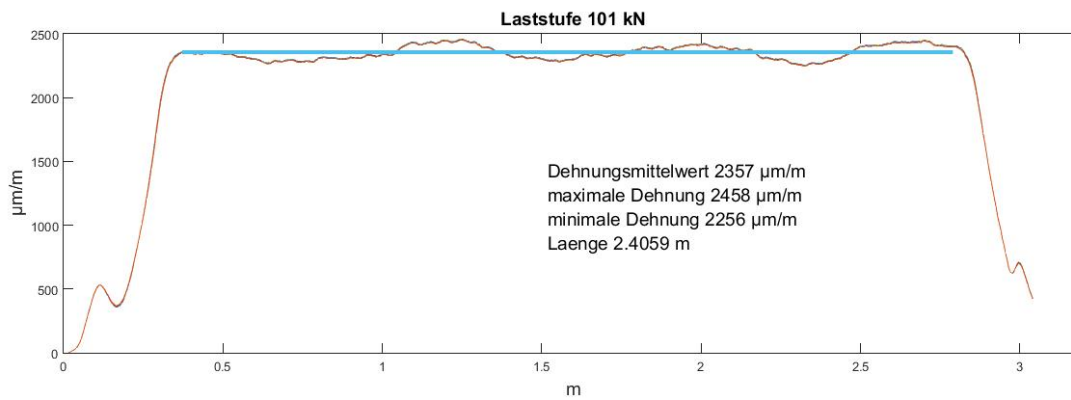
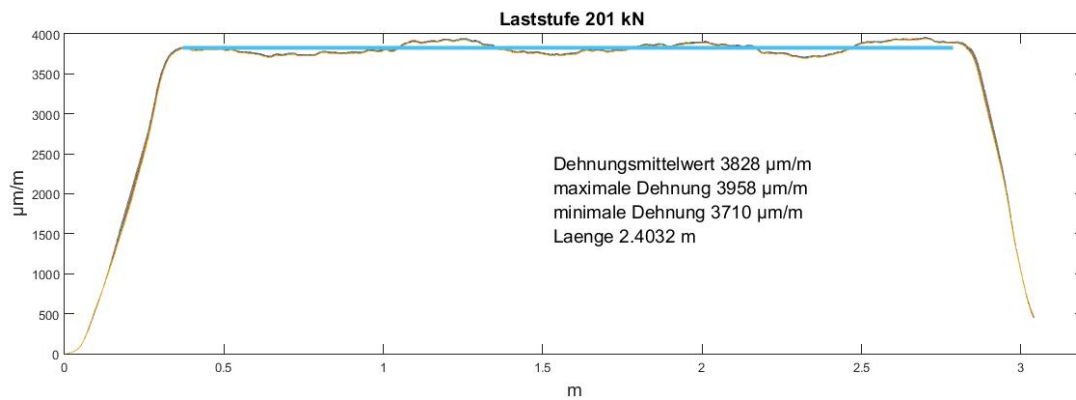
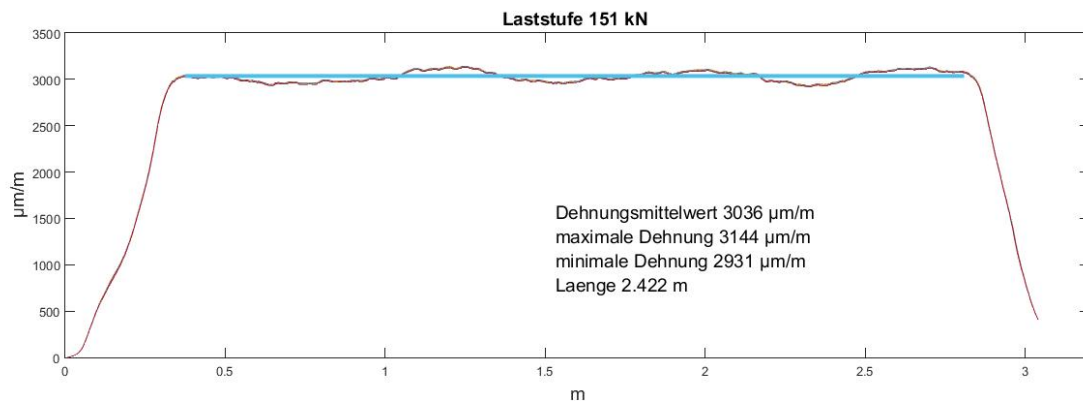




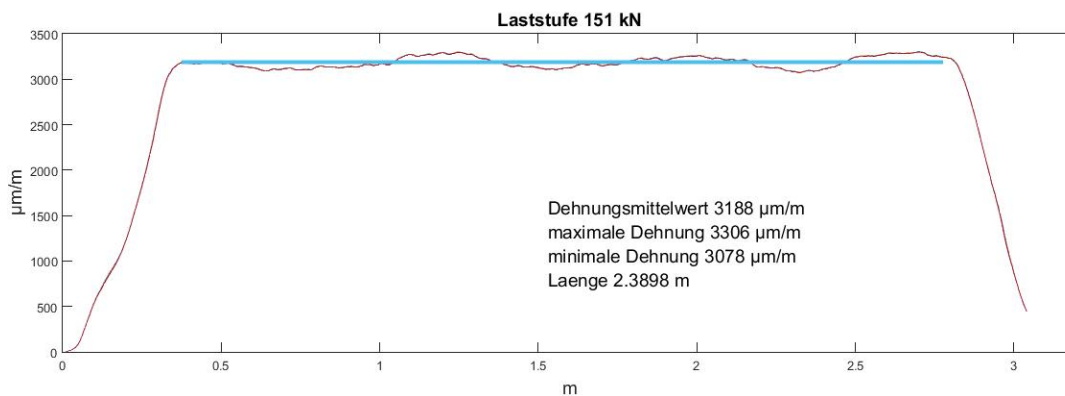
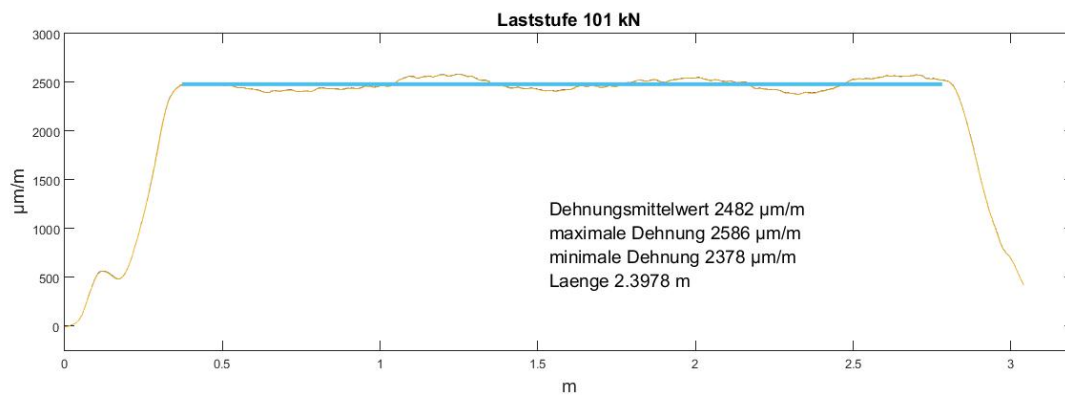
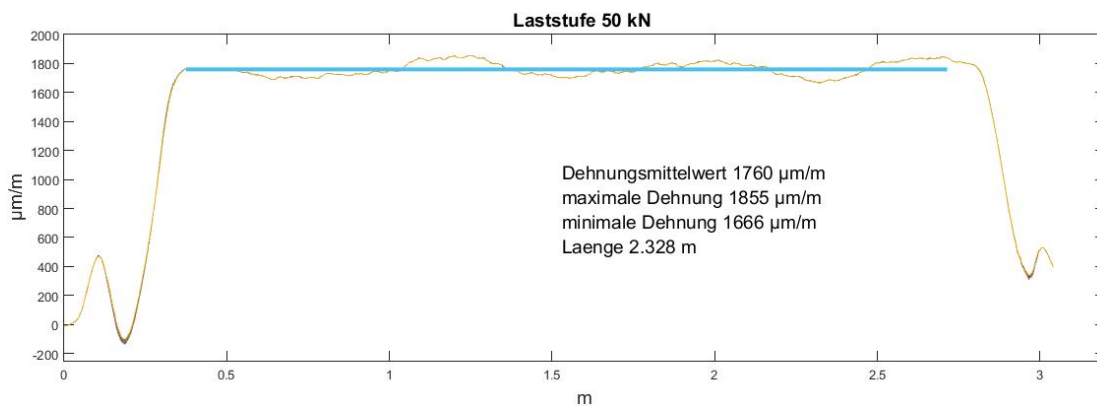
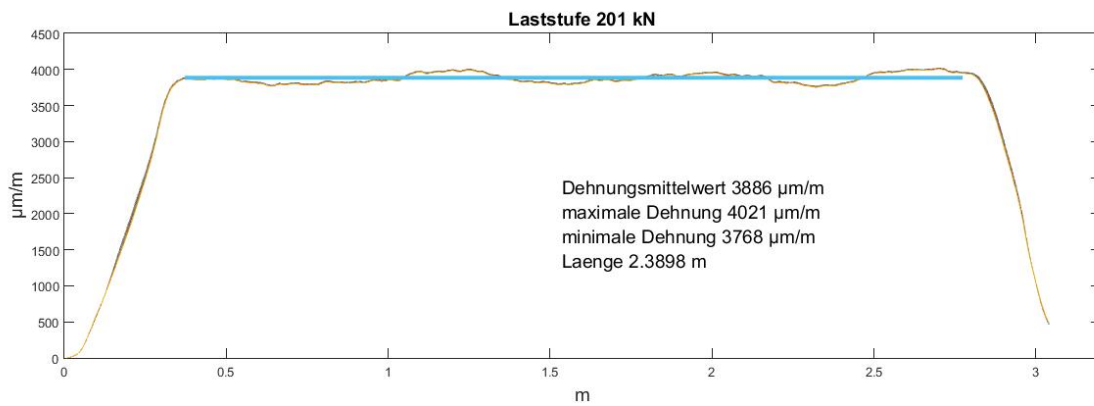
## Versuch 2: IBO-Anker

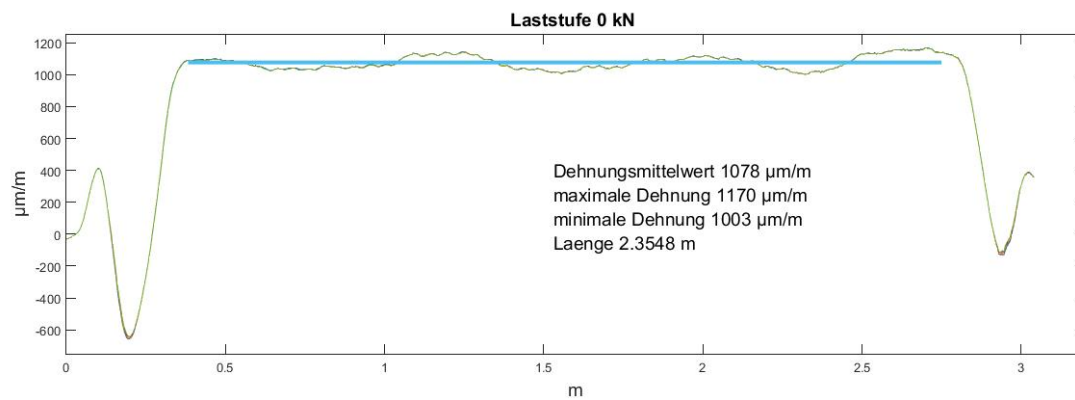
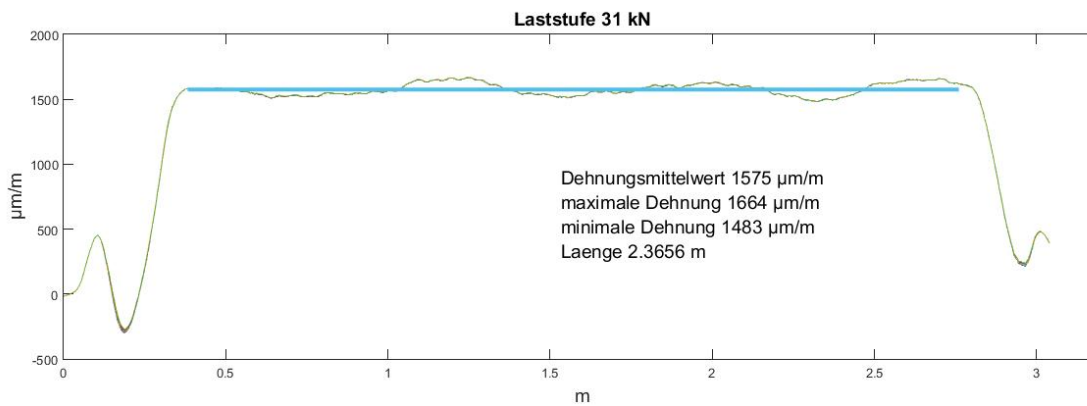
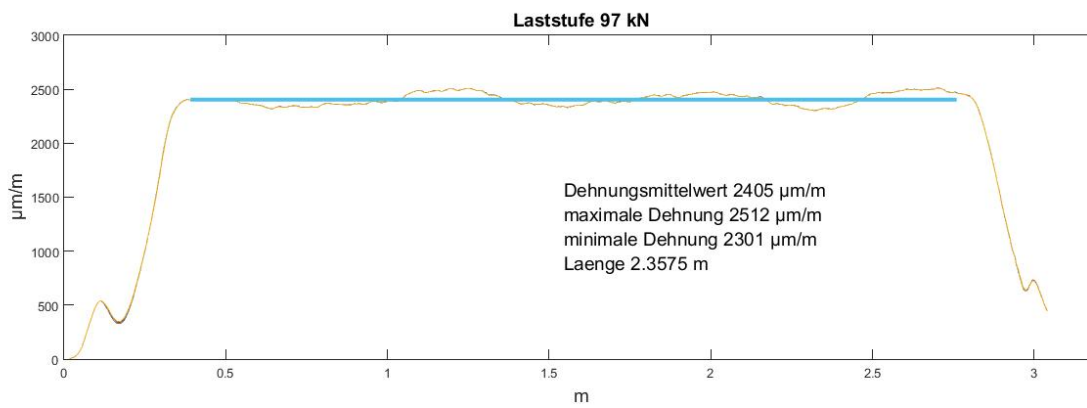
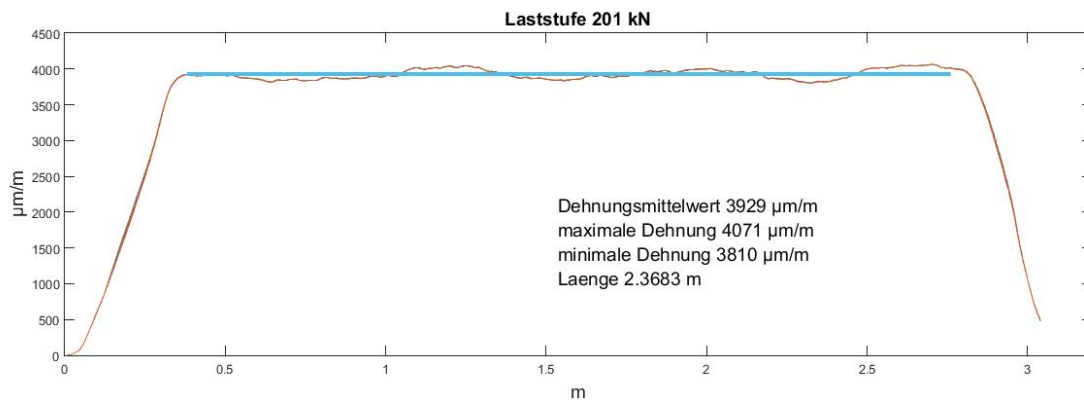












## Versuch 3: IBO-Anker

