



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



Diplomarbeit

Auswahl und Vergleich verschiedener Draht- und Fasermaterialien anhand elektrischer und mechanischer Eigenschaften

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder DI), eingereicht an der TU Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, von

Robin Wieland

Mat.Nr.: 11847839

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kartnig Georg
Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung

Wien, November 2022

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung dieser Arbeit nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Stadt und Datum

Unterschrift

I. Abstract

The use of fiber ropes in technical applications for cranes is becoming more and more common. Fiber ropes offer some advantageous mechanical properties over steel ropes, such as higher tensile load. For the usage of fiber ropes in practice, a measuring system for continuous condition monitoring is being developed. For data transmission and electrical supply of the measuring system, conductors are integrated in the fiber rope. This work is about the selection, testing and evaluation of different materials in wire and fiber form that can be used as conductors. Conductivity and stretchability in static and dynamic load cases are the relevant material properties of the potential conductor. On this basis, potential fibers and wires are pre-selected. For testing the materials, a test facility is set up, which can fix the test samples uniformly, and measure the electrical and mechanical properties accurately. The relevant measurement data is: Tensile strength, elongation at break, elastic elongation, resistance in both loaded and unloaded cases and resistance and mechanical behavior under continuous cyclic loading. The results are under discussion regarding their practical use. Including the collected data, a yarn/wire that is sufficiently elastic for the mechanics of the fiber rope, as well as sufficiently conductive for the measurement system, is selected. The selected thread is supposed to ensure the conductivity during the operation of the fiber rope. This ensures the functionality of the measuring system and enables constant monitoring of the fiber rope condition.

II. Kurzfassung

Die Verwendung von Faserseilen im technischen Einsatz bei Kränen findet immer mehr Anwendung. Faserseile bieten gegenüber Stahlseilen einige vorteilhafte mechanische Eigenschaften, wie zum Beispiel höhere Traglast. Für den sicheren Betrieb der Faserseile wird ein Messsystem zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung entwickelt. Zur Datenübertragung und elektrischen Versorgung des Messsystems und der Messknoten werden im Faserseil Leiterbahnen integriert. Die Arbeit widmet sich der Auswahl, Prüfung und Bewertung verschiedener Materialien in Draht- und Faserform, die als Leiter in Frage kommen. Leitfähigkeit und Dehnbarkeit im statischen und dynamischen Bereich sind die relevanten Materialeigenschaften des potenziellen Leiters. Auf dieser Grundlage werden potenzielle Fasern und Drähte in einer Vorauswahl gesucht. Für die Tests der Materialien wird eine Versuchseinrichtung aufgebaut, welche die Versuchsproben einheitlich fixiert und die elektrischen und mechanischen Eigenschaften eindeutig messen kann. Die Messergebnisse erfassen die relevanten Messdaten: Zugfestigkeit, Bruchdehnung, elastische Dehnung, Widerstand im belasteten wie unbelasteten Zustand bzw. Widerstand und Verhalten bei zyklischer Dauerbelastung. Die Messergebnisse werden hinsichtlich der praktischen Eignung analysiert und diskutiert. Aus den Daten wird ein gleichzeitig ausreichend elastischer Faden/Draht für die Mechanik des Faserseils, als auch ein für das Messsystem ausreichend leitfähiger Faden/Draht ausgewählt. Der ausgewählte Faden hat die Aufgabe die Leitfähigkeit mit ausreichend hoher Sicherheit im Betrieb des Faserseils sicherzustellen. Damit wird die Funktionsfähigkeit des Messsystems sichergestellt und die konstante Überwachung des Faserseilzustands erst ermöglicht.

III. Inhaltsverzeichnis

I.	Abstract	i
II.	Kurzfassung	ii
III.	Inhaltsverzeichnis	iii
1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik.....	2
2.1	Hochfeste Faserseile.....	2
2.1.1	Anwendungen von Faserseilen	2
2.1.2	Anforderungen an Faserseile.....	2
2.1.3	Eigenschaften von Faserseilen	3
2.1.4	Schädigung von Faserseilen	8
2.1.5	Bestimmung des Seilzustandes.....	8
2.2	Hauptgruppen der Werkstoffe und deren Eignung als Leiter	10
2.2.1	Metalle.....	10
2.2.2	Keramiken	10
2.2.3	Glas.....	11
2.2.4	Polymere	11
2.2.5	Leitfähige Kunststoffe als Verbundwerkstoff der zwei Hauptgruppen Metalle und Kunststoffe	11
2.3	Ablauf des Zugversuchs.....	11
3	Materialwahl.....	13
3.1	Definition relevanter physikalischer Kenngrößen.....	13
3.1.1	Dehnung und Bruchdehnung	13
3.1.2	Spezifischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit	14
3.2	Ausgewählte Materialien für die Messproben	17
3.2.1	Metalle.....	17
3.2.2	Silikone.....	17
3.2.3	Fäden Shieldex.....	18
3.2.4	Fäden Garne Steeltech/Silvertech	19
3.3	Kennwerte der Messproben aus dem Datenblatt	19
4	Konstruktion des Versuchsaufbaus und Versuchsvorbereitung	22
4.1	Konstruktionsvorgehen entsprechend der Norm VDI 2221	22
4.2	Konzipierung des Versuchsaufbaus mithilfe des morphologischen Kastens und der Nutzwertanalyse	24
4.2.1	Morphologischer Kasten.....	24
4.2.2	Nutzwertanalyse	25
4.3	Versuchsaufbau	27
4.4	Probenaufnahmen.....	28
4.5	Messgeräte	32

4.5.1	Materialprüfmaschine	32
4.5.2	Messverstärker HBM MGC plus.....	33
4.5.3	Digitalmikrometer opto CONTROL 1202-100	36
4.5.4	Hochpräzisions Laser-Mikrometer opto CONTROL 2500.....	37
4.6	Messtechnisch erfasste Daten.....	38
4.7	Versuchsplanung.....	39
4.7.1	Versuchsvorgehen	39
4.7.2	Grundbegriffe	39
4.7.3	Versuchsparameter.....	41
4.7.4	Versuchsreihen.....	43
4.8	Versuchsdurchführung.....	43
5	Ergebnisauswertung.....	46
5.1	Datenbehandlung.....	46
5.1.1	Glättung mit gleitendem Durchschnitt	46
5.1.2	Änderung der Messdaten mit Offset	47
5.2	Ergebnisse der metallischen Werkstoffe	48
5.2.1	Silber.....	48
5.2.2	Kupfer.....	50
5.2.3	Aluminium.....	50
5.2.4	Federstahl	52
5.2.5	Fazit metallische Werkstoffe	52
5.3	Ergebnisse der Fäden Steeltech / Silverttech von Amann®.....	53
5.3.1	Silverttech	53
5.3.2	Steeltech	57
5.4	Ergebnisse der Elastomere von MTC®	60
5.5	Ergebnisse der Fäden aus Polymer von Shieldex®.....	62
6	Interpretation der Ergebnisse.....	71
6.1	Vergleich der Ergebnisse mit den Kennwerten der Faserseile	72
6.2	Interpretation der Versuchsergebnisse.....	72
7	Résumé.....	75
8	Abkürzungsverzeichnis	76
9	Literaturverzeichnis	77
10	Abbildungsverzeichnis	79
11	Tabellenverzeichnis	81
12	Anhang.....	82

1 Einleitung

Bei der industriellen Nutzung und dem Einsatz von Faserseilen müssen viele Aspekte berücksichtigt werden. Ein Aspekt davon ist der nach der Lebensdauer eines Faserseils. Ein anderer nach dem Seilzustand während der Nutzung und wie dieser überwacht werden kann. Die Themen der Lebensdauer und der Zustandsüberwachung sind bei unterschiedlichen Einsatzgebieten relevant, bei welchen Seile statischer oder dynamischer Last ausgesetzt sind. Eine Anwendung aus der Industrie ist die Zustandsüberwachung von Kranseilen. Mit einem Messsystem soll die restliche Lebensdauer von Faserseilen abgeschätzt werden können. Faserseile bieten eine Alternative zu herkömmlichen Stahlseilen. Im Vergleich haben sie einige Vorteile, darunter geringeres Gewicht und eine höhere Zugfestigkeit. Die Vorteile können bei der Anwendung von Kränen von Nutzen sein. Für eine effektive Zustandsüberwachung der Seile gibt es jedoch noch keine automatisierten Methoden. Ein automatisiertes Messsystem zur Überwachung soll entwickelt werden. Für die Auslegung der Messleitungen in diesem Messsystem ist ein Material mit speziellen Eigenschaften erforderlich. Dafür sind Materialien mit bestimmten Eigenschaften nötig. In dieser Arbeit sollen potenzielle Leitermaterialien identifiziert und auf ihre Eignung für das Messsystem hin überprüft werden.

Abbildung 1 zeigt den grundsätzlich geplanten Aufbau eines Messsystems zur Zustandsüberwachung von Faserseilen. Das Messsystem besitzt ein außerhalb angeordnetes Analysegerät. Innerhalb des Seils sind Messpunkte angeordnet. Diese sind über leitfähige elektrische Leiter verbunden. Durch die Leiter werden Messsignale in digitaler sowie analoger Form gesendet. Außerdem wird die Stromversorgung über die Leiter sichergestellt.

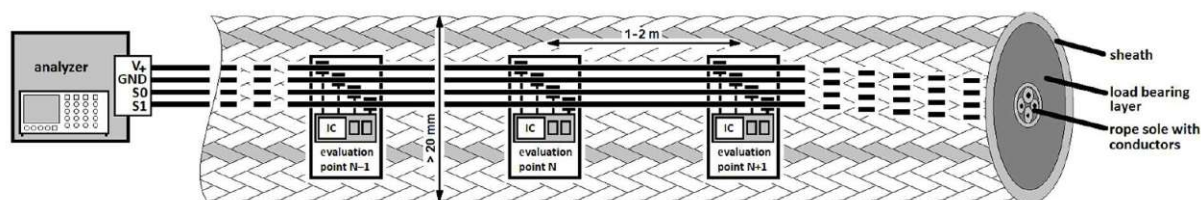


Abbildung 1 Prinzipskizze des Messsystems in Faserseilen [1] S.2

Die elektrischen Leiter durch das Seil sind die Verbindungsstücke zur Übertragung im Messsystem. Das Faserseil kann verschiedenen Belastungen ausgesetzt sein. Dazu zählen Zug, Druck, Torsion und Biegung. Kranseile zählen zu den Bauteilen, auf welche hauptsächlich Zugbelastungen wirken. Die Zugbelastung wird durch die vergleichbar geringe Dehnbarkeit des Faserseils komplett von diesem aufgenommen. Der Leiter nimmt also keine direkte Zugbelastung auf. Der Leiter wird aber über die Verbindung mit den Messpunkten und damit dem Inneren des Faserseils gedehnt. Eine der Ziele der Arbeit ist es, ein geeignetes Material für die in das Faserseil integrierten Leiter zu finden. Die Eignung für die Anwendung wird im Weiteren definiert. Für die Suche werden potenziell geeignete Materialien ausgesucht. Das sind Fäden aus Materialien mit einer Kombination bestimmter technischer Eigenschaften. Vor allem die elektrische Leitfähigkeit und die Dehnbarkeit sind relevant. Als erstes wird in der Literatur nach geeigneten Materialien gesucht. Die ausgesuchten Materialien müssen als Halbzeug in Fadenform verfügbar sein und von einem Hersteller in größerer Menge gefertigt werden. Jetzt werden konkrete

Hersteller von Fäden gesucht, die den Anforderungen der Messanwendung gerecht werden. Die Materialien werden dann anschließend ersten Tests unterzogen. Mit den Messergebnissen der Tests können dann weitere Schlüsse abgeleitet werden.

2 Stand der Technik

2.1 Hochfeste Faserseile

2.1.1 Anwendungen von Faserseilen

Für viele Anwendungen im Maschinenbau werden im Betrieb Zugmittel benötigt. Für die Anwendung bei Kränen werden standardmäßig Stahlseile verwendet. Stahlseile haben bestimmte Vorteile und Nachteile. Wichtige Nachteile von Stahlseilen sind hohes Gewicht, geringe Biegebelastung und hohe Korrosionsanfälligkeit. Um den steigenden Anforderungen an Seilen gerecht zu werden, werden Alternativen zu Stahlseilen gesucht. An dieser Stelle können Faserseile eine vielversprechende Alternative bieten. Besonders die höhere Zugfestigkeit, das Dämpfungsverhalten und die geringere Ermüdung sind höher im Vergleich mit Stahlseilen. Zudem haben Faserseile ein geringeres Gewicht als Stahlseile. Faserseile haben ein um 20 % bis 25 % reduziertes Gewicht im Vergleich mit Stahlseilen. Trotz der höheren Tragfähigkeit von Kunststofffilamenten verglichen mit Stahl, sind Faserseile bei Kränen nicht weit verbreitet. Ein möglicher Grund ist die mangelnde Erfahrung mit Faserseilen bei Kränen. Als Beispiel wird ein Faserseil aus dem industriellen Umfeld herangezogen. Das Seil wird als dehnungsfrei angegeben. In Zugversuchen mit Faserseilen ist vom Hersteller eine Bruchdehnung von etwas über 2% gemessen worden. Das Seil weist eine vielfach höhere Lebensdauer als Stahlseile auf. Faserseile haben im Vergleich mit Stahlseilen bei gleichem Durchmesser ähnliche Bruchkräfte. Durch die deutliche Gewichtseinsparung von bis zu 80 % ist eine höhere Spitzentraglast möglich. Im Vergleich mit dem Stahlseil, eine um bis zu 13,5 % höhere Traglast. [2]

2.1.2 Anforderungen an Faserseile

In „Hochfeste Faserseile für Krane“ werden mehrere Anforderungen an Faserseile beschrieben, die für die Anwendung bei Kränen relevant sind. Wird ein Faserseil mit einem Stahlseil verglichen dann sind die folgenden Anforderungen relevant. Das sind:

- Bei einer Umrüstung vom Stahlseil auf ein Faserseil, darf sich die Tragfähigkeit nicht verringern. Ausschlaggebend ist das Verhältnis von Bruchkraft zu Durchmesser.
- Vergleichbare Dauerbiegewechselfestigkeit oder Lebensdauer. Die Lebensdauer von Stahlseilen ist gut erforscht. Aus der Entwicklung ist bekannt, dass Faserseile im direkten Vergleich mit Stahlseilen immer eine höhere Lebensdauer aufweisen. Faserseile haben nach Angaben aus der Literatur eine ungefähr viermal höhere Lebensdauer im Vergleich mit Stahlseilen.
- Das Wickelverhalten hat Einfluss auf den Seilverschleiß bzw. die Lebensdauer. Um erhöhten Seilverschleiß zu vermeiden, muss die Durchmessertoleranz des Seils optimiert werden.
- Faserseile haben aufgrund ihres Materials naturgemäß eine geringe Drehsteifigkeit. Die Hubkonstruktion ist daher so auszulegen, dass hohe Drehung vermieden wird.

- Die Endverbindung der Faserseile hat die gleichen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen wie bei Stahlseilen.
- Resistenz gegen äußere Einflüsse. Fasern sind weniger UV- und witterungsbeständig als Stahl. Zum Schutz dieser Faserseile können Schutzmäntel verwendet werden. [3]

2.1.3 Eigenschaften von Faserseilen

Ein Seil ist im Weiteren wie folgt definiert: „Ropes are structures made of textile fibres. They are defined as approximately cylindrical textile bodies whose cross-sections are small compared to their lengths and they are used as tension members. The rope structure contains, and must control, large numbers of synthetic or natural fibres in coherent, compact, and flexible configurations, usually to produce a selected breaking strength and extensibility with a minimum amount of fibres.“ [4] S.75

Denkbar als Materialien sind aber auch Kunststofffasern, Metalldraht, Hanf, Leinen oder Flachs. Im Weiteren geht es um Seile aus Kunststofffasern. Eine der wichtigsten Eigenschaften von Faserseilen werden beschrieben:

Reißlänge

Faserseile können nach verschiedenen Eigenschaften bemessen und kategorisiert werden. Eine der wichtigsten Eigenschaft eines Faserseils, wie auch jedes anderen Seils, ist die Bruchbelastung/Bruchkraft. Im imperialen Einheitensystem ist sie in Poundforce angegeben. Im metrischen System wird sie in Kilonewton angegeben. Eine andere Definition, mit der die maximale ertragbare Last von Faserseilen angegeben wird, ist die Reißlänge. Sie ist definiert als jene Länge, bei der das Seil unter seinem Eigengewicht bricht. Die lineare Dichte, ist die Dichte pro Längeneinheit. [4] [5]

$$\text{Reißlänge [m]} = \text{Reißkraft [kN]} * \lambda \text{ lineare Dichte [kg/m]}$$

Bruchlast pro Gewicht

Neben der Bruchlast können die Faserseile auch nach der Bruchlast pro Gewicht eingeteilt werden. Diese Kategorisierung ist vor allem relevant, wenn der Gewichtsaspekt der gesamten Konstruktion eine wichtige Rolle spielt.

Dehnung

Betrachtet man ein gedehntes Seil, dann setzt sich die Dehnung von Faserseilen aus drei verschiedenen Anteilen dieser zusammen. Das ist der elastische, der wiederherstellbare und der dauerhafte Dehnungsanteil. Der elastische Dehnungsanteil hat die Eigenschaft direkt nach Entlastung wieder die ursprüngliche Länge anzunehmen. Das passiert unmittelbar nachdem die Belastung weggenommen wird. Der wiederherstellbare Anteil formt die Probe ebenfalls wieder in die Ausgangslänge zurück. Allerdings nicht sofort, sondern deutlich verzögert nach Wegnahme der Belastung.

Der dauerhafte Anteil der Dehnung bleibt nach Aufbringen der Last erhalten. Das Seil bleibt also gedehnt. Es wird auch von plastischer oder stetiger Dehnung gesprochen. Dieser Anteil ist bauteilverändernd und damit zerstörend.

Jedes Faserseil, das unter Zuglast beansprucht wird, dehnt sich aus. Die Dehnung ist von verschiedenen inneren und äußeren Faktoren abhängig.

- Die integralste Eigenschaft, welche die Dehnung beeinflusst, ist das Material des Faserseils. Ein Stahlseil hat eine Bruchdehnung von ungefähr 4 Prozent. Faserseile dehnen sich deutlich mehr aus. Manilaseil hat eine Bruchdehnung von 22 %. Nylon eine Bruchdehnung von 37%. Das Dehnungsverhalten kann als Kurvenverlauf in einem Kraft-Verlängerungsdiagramm dargestellt werden.

Dabei wird die prozentuale Dehnung als Verlauf auf der Abszisse dargestellt. Das Maximum auf der Abszisse ist die größte auftretende Dehnung beim Bruch. Auf der Ordinate wird die Last (Kraft) in prozentualer Abstufung von 0 bis 100 % der Bruchkraft aufgetragen. Bei 100 % tritt der Bruch ein. Der Verlauf der Dehnung in der Kurve ist nicht linear. Er entwickelt sich nichtlinear über den Verlauf der Belastung. Bei hoher Dehnung wie bei Nylon, tritt außerdem eine Einschnürung des Durchmessers auf. Die Abbildung 2 vergleicht die Dehnung von Fasermaterialien. Nylon dehnt sich bei gleicher prozentualer Belastung des Materials deutlich stärker aus wie das Seil aus Stahlfasern.

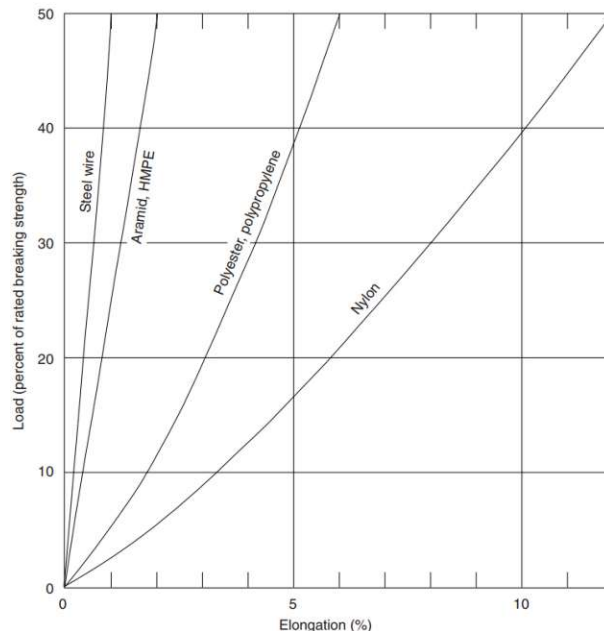


Abbildung 2 Kraft-Dehnungsdiagramm verschiedener Fasermaterialien [4] S. 118

Tabelle 1 vergleicht verschiedene Fasermaterialien und deren typische Bruchdehnung, abhängig vom Seilzustand und der Vorspannung, auf das Seil. Die Kennwerte der Dehnung werden bei 30% der Bruchbelastung sowie bei Erreichen der Bruchkraft angegeben. Nylon und Polyester weisen die höchsten Bruchdehnungen im Vergleich aller Fasermaterialien auf.

Material	Construction	Breaking elongation (%).	Breaking elongation (%).	Elongation (%) at	Elongation (%) at
		New	Broken in	30% break load. New	30% break load. Broken in
Aramid	Wire rope laid, parallel strand	4.5	2.0	1.7	0.7
HMPE	Wire rope laid, parallel strand	4.5	2.2	2.0	0.8
HMPE	12-strand braid and 8-strand plait	6	4	2	3
HMPE treated	12-strand braid	5	4	2	1.5
LCP	12-strand braid	5	4	2	1.2
Polyester	Wire rope type, 7 strand, jacketed	15	11	5	3.5
Nylon (dry)	Parallel strand, jacketed	30	25	14	12
Polyester	Parallel strand, jacketed	14	12	7	4.5

Tabelle 1 typische Bruchdehnung von verschiedenen Werkstoffen [4] S. 123

Auf HMPE, ein Material aus Tabelle 1, wird im Folgenden weiter eingegangen. HMPE, genannt High Modulus Polyethylene ist ein Fasermaterial aus Polyethylen-Fasern. Aufgrund seiner hohen Belastungsfähigkeit wird es für Hochleistungsanwendungen eingesetzt. Der Unterschied zwischen Polyethylen und HMPE ist die Orientierung der Molekülketten. Polyethylen als Thermoplast ist teilkristallin und unstrukturiert orientiert. Dadurch reißt die Faser schnell, also schon bei geringerer Kraftereinwirkung auf die Faser. Um eine höhere Belastungsfähigkeit erreichen zu können, werden die Moleküle in Faserrichtung angeordnet und gestrafft. In dieser Orientierung sollen die Moleküle kristallisieren und erstarren. Die HMPE-Moleküle haben die Eigenschaft, in höherem Grad gleich orientiert zu sein und haben eine höhere Kristallinität. In Abbildung 3 sind die Belastungsdehnungskurven verschiedener Fasern abgebildet. HMPE kann die höchsten Kräfte pro Längenänderung aufnehmen. Diese Fasern absorbieren also die größte Energiemenge. Äquivalent dazu ist die Bruchdehnung von HMPE-Fasern gering. Deswegen eignen sich HMPE-Fasern gut für Hochleistungsanwendungen.

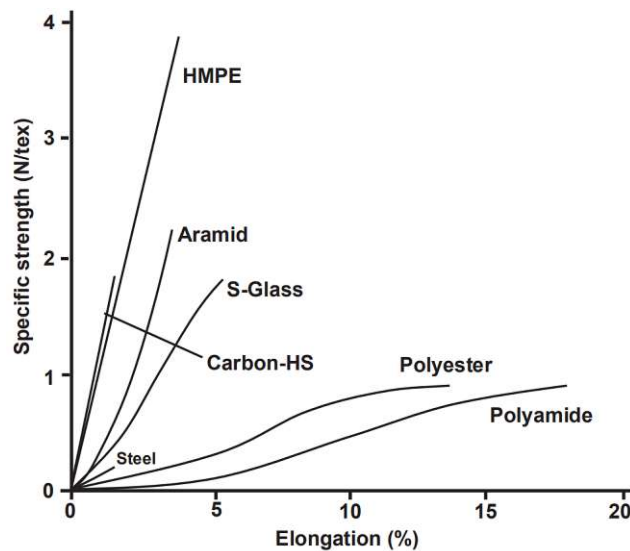


Abbildung 3 Kraft-Dehnungs-Diagramm verschiedener Materialien [4] S.55

- Eine weitere Einflussgröße auf die Dehnung ist die Konstruktion des Seils. Die Konstruktion und der Aufbau haben nach dem Material des Seils den größten Einfluss auf die Dehnung. Faserseile werden zusammengedreht, bzw. geschlagen. Der Grad der Verdrehung wird auch als Verdrillung oder Torsion angegeben. Sie ist ausschlaggebend für die Dehnbarkeit des Faserseils. Die Abbildung 4 vergleicht die Dehnkurve von verschiedenen Faserseilen. Dargestellt ist ein hart gedrehtes, mittelhart gedrehtes und weich gedrehtes Seil im Diagramm. Deutlich zu erkennen

ist, dass die Dehnung mit steigendem Härtegrad zunimmt. Das ist nicht verwunderlich, da ein hart gebundenes Seil stärker dazu neigt die Verdrillung bei Last zu lösen, vergleichbar mit der Anzahl an Wicklungen einer Schraubenfeder.

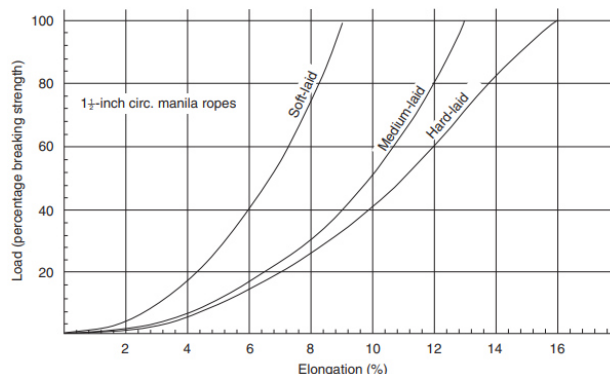


Abbildung 4 Kraft-Dehnungsdiagramm verschiedener Verdrillungen [4] S.110

- Zudem kann die Dehnung von Faserseilen leicht abhängig vom Durchmesser des Seils selbst sein. In der Literatur wurden gedrehte Manilaseile verschiedener Dicken unter Belastung verglichen, die sich lediglich im Durchmesser unterscheiden. Abhängig vom Seildurchmesser können sich leicht unterschiedliche Dehnbarkeiten ergeben.

„Comparing three-strand ropes A and B [...], extensibility increases slightly as the diameter increases.“ [4] S. 109

- Ein weiterer Einflussfaktor auf die Dehnung ist die Vorspannung des Seils. Unter Vorspannung eines Seils versteht man das einmalige Aufbringen einer Zuglast auf ein Seil um einen Teil der plastischen Dehnung vor der eigentlichen Belastung anzubringen. Eine hohe Vorspannung dehnt das Faserseil bereits vor. Wird danach eine Kraft an das Seil angelegt, ist die Dehnung bei Erreichen der Bruchkraft geringer. Je höher die Vorspannung, desto geringer die Dehnung während der anschließenden Belastung. Das Phänomen wird in Abbildung 5 am Beispiel von Manilaseil gezeigt. Es tritt aber genauso bei anderen Faserseilen auf.

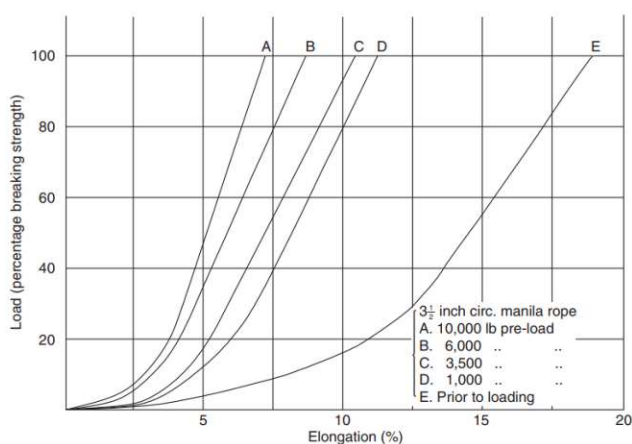


Abbildung 5 Kraft-Dehnungsdiagramm verschiedener Vordehnungen [4] S. 111

- Die Umgebungsbedingungen, denen das Seil ausgesetzt wird, darunter besonders die Feuchtigkeit, haben Einfluss auf die Dehnung des Seils.

Ermüdung / Fatigue

Ermüdung tritt auf, wenn ein Werkstoff über längere Zeit einer statischen oder dynamischen Belastung ausgesetzt ist. Physikalisch ist die Ermüdung bei Seilen ein Abfall der inneren Spannung, welche der äußeren Belastung entgegensteht. Ermüdung kommt in unterschiedlichen Varianten vor und wird durch unterschiedliche Belastungsformen ausgelöst. Dazu zählen Biegung, Torsion, Zug und Druck, die eine Werkstoffermüdung zur Folge haben können. Eine Art der Ermüdung ist der Kriechbruch. Eine der relevantesten Versagensarten unter Zugbelastung. Kriechen ist ein Phänomen, dass ab einer bestimmten Belastungsgrenze auftritt. Dabei erhöht sich die Abrasion zwischen Fasern und ein Bruch einiger Filamente tritt auf. Die Folge ist ein Abnehmen der inneren Spannung im Faserseil und eine Verringerung der Bruchkraft des Seils. Der Kriecheffekt tritt dabei bei zyklischer Belastung genauso stark auf, wie wenn die Spitzenlast konstant aufgebracht wird. Zusätzlich zur Abnahme der Spannung, sinkt die Dehnung der Werkstoffe bei Kriechen ab. Bei Polyester und Aramid ist die Kriechrate sehr gering. Sie tritt außerdem nur bei Belastungen mit über 50 % der Bruchkraft auf. Polypropylen hat ein stärkeres Kriechverhalten und sollte nicht mit mehr als 20 % seiner Bruchkraft belastet werden. Beim Einsatz von HMPE-Fasern in stark fordernden Anwendungen spielt das Kriechverhalten eine wichtige Rolle. Das sollte bei der Faserauswahl berücksichtigt werden. In Abbildung 6 wird die Lebensdauer von Polyesterfasern gezeigt. Die Zeit ist auf der Abszisse aufgetragen. Sie wird logarithmisch dargestellt. Es wird eine Kurve bei statischer und eine Kurve bei dynamischer Belastung aufgezeigt. Die Kurve zeigt einen logarithmisch linearen Zusammenhang zwischen der Belastung prozentual zur Bruchkraft und der Lebensdauer der Fasern. Mit steigender dauerhafter Belastung (statisch oder dynamisch) erhöht sich die Zeit, die das Material der Belastung standhält. Daraus lässt sich folgende Annahme treffen: Zum Erreichen einer geforderten Lebensdauer, ist es eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung, dass die Belastung einen Maximalwert (prozentual zur Bruchkraft) nicht überschreitet. Beispielsweise Polypropylen mit 20% der maximalen Bruchkraft.

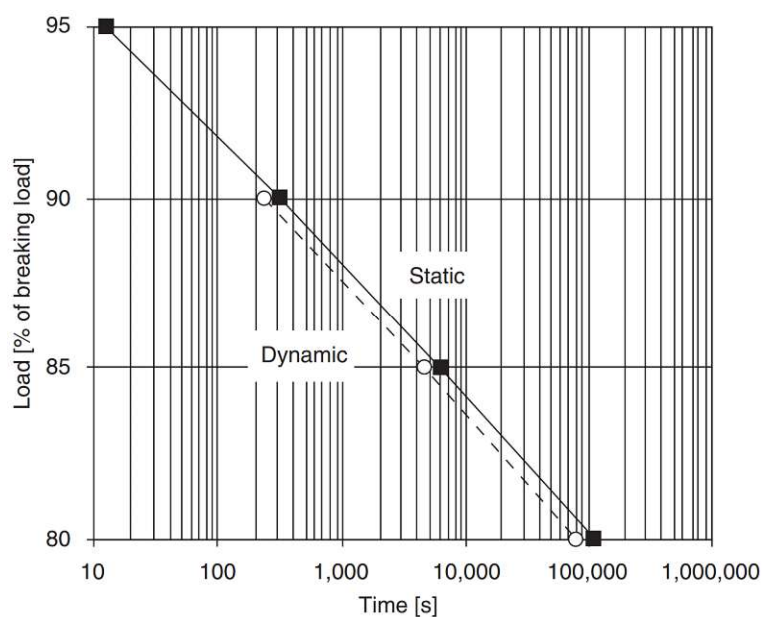


Abbildung 6 Kraft-Zeit Diagramm - Bruchkraft in Abhängigkeit der Lastdauer [4] S.132

2.1.4 Schädigung von Faserseilen

Faserseile sind im Einsatz unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Um die Lebensdauer eines Seils abschätzen zu können, müssen alle Belastungsformen berücksichtigt werden. Dazu zählen Abrasion, Kriechen, UV-Strahlung, Spannungsermüdung, Hitze, Kompressionsermüdung und Schockfestigkeit. Jede Ursache kann die Fasern reversibel oder irreversibel schädigen bzw. schwächen. Die Ursachen sind wirkungsverknüpft, d.h. die Effekte beeinflussen sich gegenseitig.

Abrasion ist der Materialabtrag bei Reibung zwischen Oberflächen. Es kann zwischen externer und interner Abrasion unterschieden werden. Externe Abrasion tritt zwischen dem Faserseil und anderen Gegenständen auf. Bei interner Abrasion reiben Fasern im Seil aneinander.

Kriechen ist die konstante Ausdehnung eines Materials bei statischer Dauerlast. Kriechen kann reversibel oder nicht reversibel auftreten, jeweils in Abhängigkeit der Belastungsform. Kriechen läuft zeitabhängig ab.

UV-Belastung schädigt die Fasern im Seil. Die UV-Wellen treffen auf die äußeren Schichten und führen zu langsamer Zersetzung von Polymerketten. Die Fasern nehmen Schaden und verlieren ihre ursprünglichen Eigenschaften.

Spannungsermüdung tritt auf, wenn Faserseile über eine lange Zeit mit Spannung beaufschlagt werden. Der Effekt tritt auch innerhalb der Belastungsgrenzen auf. Ursächlich dafür ist interne Abrasion zwischen den Fasern. Die Last über längere Zeit hat den Bruch von einzelnen Fasern zur Folge.

Hitze. Faserseile haben verschiedene kritische Temperaturpunkte. Die Faserseile sollten im Betrieb nicht über diesen Temperaturpunkten verwendet werden.

Kompressionsermüdung entsteht, wenn Fasern im Betrieb bei geringen Spannungen verwendet werden. Dabei können Knicke in den Fasern entstehen. Knicke sind Schwachstellen an denen Versagen auftritt.

Schockfestigkeit ist die Eigenschaft eines Faserseils mit Überlasten umzugehen. Werden Fasermaterialien überlastet, nimmt die Kraft bzw. die Lebensdauer des Seils ab. Der Verlust der Festigkeit durch Schock kann aber nicht optisch ermittelt werden. Daher sollte eine Belastungshistorie geführt werden.

2.1.5 Bestimmung des Seilzustandes

Um den Seilzustand bestimmen zu können und damit eine Abschätzung der Lebensdauer des Seils vorzunehmen, gibt es zwei grundsätzliche Herangehensweisen. Zum einen kann ein Sensor in das Faserseil implementiert werden. Zum anderen können physikalische Kennwerte ermittelt werden. Aus diesen können wiederum Rückschlüsse auf den Seilzustand geschlossen werden.

1. Direkte **Messung über Strahlung** ist aufgrund der Materialbeschaffenheit bei Faserseilen nicht möglich. Es gibt in der Forschung aber trotzdem mehrere Messansätze mit magnetischen Messungen. Ein Ansatz ist es, die Festigkeit mittels EPR-Spektroskopie zu messen. Mittels UV- und Röntgenstrahlung werden Polymerketten im Faserseil bestrahlt.

Die Fehler und Brüche in den Polymerketten können dann mittels Spektroskopie detektiert werden.

2. Messung der **elektrischen Leitfähigkeit**. Hier ist die Idee, dass in den Seilkörper mehrere elektrische Leiter implementiert werden. Über ein Messsystem kann die Leitfähigkeit, respektive der Widerstand bestimmt werden. Das interessante Phänomen ist, dass mit steigender Anzahl an Lastzyklen der Widerstand des Sensorleiters zunimmt. Es ergibt sich eine logarithmische Kurve in Abbildung 7.

Wird die Leitfähigkeit messtechnisch erfasst, kann mithilfe des ermittelten Zusammenhangs auf die bereits angewendeten Lastzyklen geschlossen werden. Damit wird abgeschätzt, in welcher Phase des Lebenszyklus sich das Seil befindet.

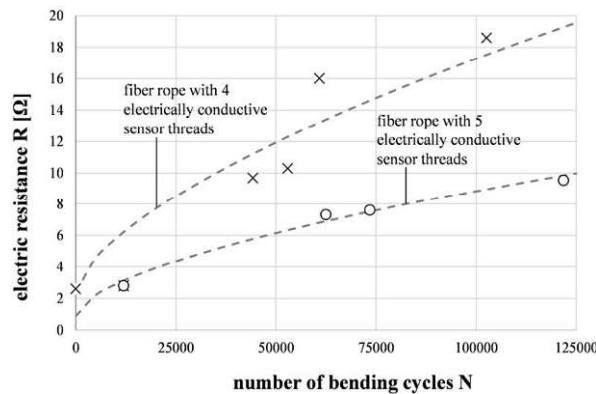


Abbildung 7 elektrischer Widerstand in Abhängigkeit der Anzahl an Lastzyklen [6] S.5

Weitere Messungen zur Überprüfung des Seilzustands sind folgende [6] S.4ff

- Kapazitätsmessung
- Computervisuelle Inspektion
- Thermographie
- Computer-Tomographie
- Erfassung von Parametern wie Spannung oder Temperatur mit der Messung über optische Fasern
- Vibrations- und akustische Messung
- Messung des Durchmessers

2.2 Hauptgruppen der Werkstoffe und deren Eignung als Leiter

Um der Aufgabenstellung gerecht zu werden, wird ein dehnbares und leitfähiges Material als Leiterbahn für ein Messsystem gesucht. Dafür werden grundsätzlich verschiedene Klassen der Werkstoffe betrachtet. In der Werkstoffkunde werden Werkstoffe in vier Hauptgruppen eingeteilt. [7] S. 11

2.2.1 Metalle

Metalle sind im festen Zustand kristallin, ihre Atome also in einer regelmäßigen räumlichen Ordnung angeordnet. Um die angestrebte Edelgaskonfiguration zu erreichen, geben Metallatome Elektronen ab. Da es keine Atome gibt, die Elektronen aufnehmen, bleiben ungebundene Valenzelektronen übrig. Diese bilden das Elektronengas. Die freie Beweglichkeit der Valenzelektronen ist der Grund für die hohe Leitfähigkeit von metallischen Werkstoffen. Das höchste vollständig besetzte Energieniveau wird Valenzband genannt. Das darüberliegende Band ist das Leitungsband. Kennzeichnend für Metalle ist außerdem ihre Duktilität. Das ist die Eigenschaft sich bei Belastung plastisch zu verformen, bevor der Bruch eintritt. Das Messsystem zur Zustandsüberwachung der Faserseile erfordert von den Leiterbahnen elastische, nicht plastische Dehnung. Kommt es bei der Belastung der Messleitung zur Überschreitung der Elastizitätsgrenze, verformt sie sich plastisch. Das ist ein Vorteil gegenüber spröden Materialien wie Keramik, bei denen der Bruch sofort eintritt. Die Messleitung verlängert sich, bricht aber nicht direkt. Die Abbildung 8 zeigt die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit vom Verformungsgrad eines Metalls. Bei Verformung entstehen Störungen im Metallgitter. Die resultieren in einer geringen Leitfähigkeit. Mit steigender Dehnung, vor allem im plastischen Bereich, nimmt der elektrische Widerstand daher zu. Metalle vereinen dabei die geforderten Eigenschaften der Leitfähigkeit mit der Dehnbarkeit, wobei ein großer Anteil an der Dehnung plastisch ist. Für die Messanwendung und deren Tests, werden ausgewählte Reinmetallproben in Betracht gezogen. Ausgewählt werden, in Rangfolge ihrer Leitfähigkeit: Silber, Kupfer, Gold, Aluminium. Gold scheidet bereits aus Kostengründen aus. [8]

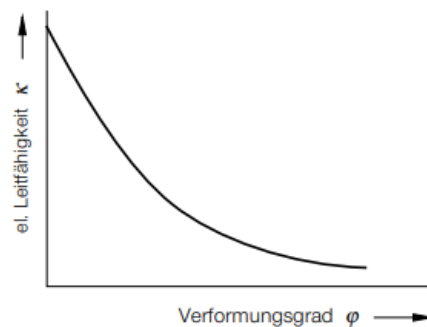


Abbildung 8 qualitatives Diagramm: elektrische Leitfähigkeit-Verformungsgrad der Kaltverformung [8] S.11

2.2.2 Keramiken

Keramiken sind spröde Materialien. Hergestellt werden sie aus Pulvern, welche in Formteilen gesintert werden. Mechanisch werden Keramiken durch ihre hohe Sprödigkeit charakterisiert. In der Kombination mit ihrer geringen Leitfähigkeit sind Keramiken schlecht für den betrachteten Anwendungsfall geeignet.

2.2.3 Glas

Glas hat einige charakteristische und interessante Eigenschaften, welche aus der ungeordneten Atomstruktur dieser resultieren. Besonders die hohe chemische Beständigkeit, hohe Erweichungstemperatur und die Härte der Silicatgläser machen diese Werkstoffgruppe für einige Anwendungen interessant. Glas weist eine sehr niedrige Bruchdehnung auf und fällt damit nicht in die potenziell relevanten Versuchsmaterialien. Eine andere Untergruppe der Gläser sind die metallischen Gläser, die hohe Leitfähigkeit aufweisen. Die geringe Verformbarkeit lässt diese aber ebenfalls ausscheiden.

2.2.4 Polymere

Polymere sind aneinander verkettete Makromoleküle. Die Makromoleküle können identisch oder nicht identisch sein. Polymere sind die Grundkomponente bei der Herstellung von Kunststoffen. Viele Varianten von Polymeren ermöglichen es verschiedene Stoffeigenschaften zu generieren. Die Gruppe der Polymere hat durch die vielfältigen Varianten großes Potential für die gesuchte Anwendung. Die Gruppe der Elastomere und der thermoplastischen Elastomere sind im Speziellen durch ihre Elastizität gekennzeichnet. Die fast gummiartigen Stoffe weisen eine hohe elastische Verformbarkeit auf. Ein bekannter Vertreter der Elastomerstoffgruppe ist Kautschuk. Die Abbildung 9 zeigt die Eigenschaften der Kunststoffgruppen.

Thermoplaste	Thermoplastische Elastomere	Elastomere	Duroplaste
unvernetzt	schwach vernetzt		stark vernetzt
linear bis verzweigt	physikalisch vernetzt	chemisch vernetzt	
schmelzbar löslich	schmelzbar löslich	nicht schmelzbar nicht löslich quellbar	nicht schmelzbar nicht löslich nicht quellbar
plastisch formbar i. Allg. großer <i>E</i> -Modul recyclierbar	gummielastisch kleiner <i>E</i> -Modul recyclierbar	gummielastisch kleiner <i>E</i> -Modul	nicht plastisch formbar großer <i>E</i> -Modul

Abbildung 9 Eigenschaften der Kunststoffgruppen [8] S. 348

Polymere bzw. Kunststoffe sind typischerweise nicht leitfähig. Sie werden industriell als Isolatoren eingesetzt. Prinzipiell sind sie daher ungeeignet für die Anwendung. Jedoch gibt es Möglichkeiten leitende Kunststoffe zu fertigen. Die Verfahren unterscheiden sich in ihrer Art, haben jedoch gemeinsam, dass die Kunststoffe mit leitenden Materialien wie Metallen kombiniert werden.

2.2.5 Leitfähige Kunststoffe als Verbundwerkstoff der zwei Hauptgruppen Metalle und Kunststoffe

Aus Kunststoffen werden in weiteren Fertigungsschritten auch Garne, Seile und Faserseile gefertigt. Thermoplastische Kunststoffe wie Polyethylen oder Polyamid können daher in der Weiterverarbeitung auch für die Anwendung interessant sein. Zwischen den Hauptgruppen lassen sich Kombinationen aus zwei bzw. mehreren Werkstoffen bilden. Diese werden auch Verbundwerkstoffe (Composite) genannt. [7]

2.3 Ablauf des Zugversuchs

Im Zugversuch wird eine Materialprobe unter Zugbeanspruchung gedehnt. Genormt wird der Zugversuch bei Raumtemperatur in der Norm DIN EN ISO 6892-1.

Im Normalfall wird die Probe bis zum Bruch gedehnt. Durch die Dehnung der Probe können mechanische Kennwerte ermittelt werden. Die Maschine misst die auf die Probe einwirkende Kraft, sowie die Längenänderung der Probe. Beide Messwerte werden als zeitliche Funktion erfasst. Ein typischer Zeitverlauf, der aus dem Zugversuch gewonnen wird, ist die Spannungs-Dehnungskurve. Die Versuche sollen bei einer Raumtemperatur von $23^{\circ}\pm 5^{\circ}$ stattfinden. In der Norm wird angemerkt, dass die Sicherheit des Kennwertes Bruchdehnung gewährleistet wird, eine Probenlänge von mindestens 20 mm zu verwenden ist. Grundsätzlich wird zur Probenlänge angemerkt, dass er nach dieser Gleichung bestimmt werden kann:

$$L_0 = k\sqrt{S_0}$$

L_0 = Probenlänge

S_0 = Probenquerschnitt

k = Proportionalitätsfaktor

Der Probenquerschnitt kann kreisförmig, quadratisch, rechteckig oder ringförmig sein. Faktor k wird mit 5,65 bzw. 11,3 als größeren Faktor angegeben. Diese Proben werden als proportionale Proben bezeichnet. Es ist aber auch möglich eine nichtproportionale Probe anzuwenden, die von den angegebenen Werten abweicht. Das ist beispielsweise bei Drähten und Fäden der Fall. Um die Probe auszurichten und zu spannen, kann eine Vorkraft an die Probe aufgebracht werden. Die Vorkraft soll 5% der angenommenen Streckgrenze nicht überschreiten. Damit die Vorkraft die Messung nicht beeinträchtigt, muss diese bei der Dehnung berücksichtigt werden. Die Prüfgeschwindigkeit der Messung unterliegt dem Hersteller.

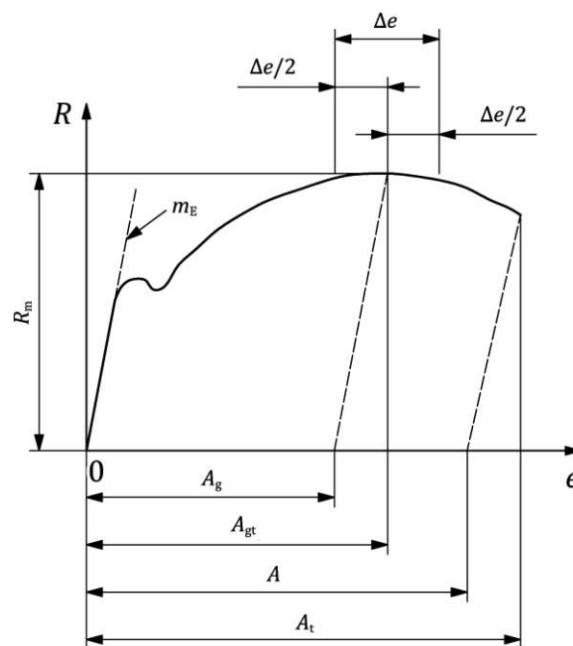


Abbildung 10 qualitatives Spannungs-Dehnung Diagramm [9] S. 29

A = Bruchdehnung (ϵ)

A_g = plastische Dehnung

A_{gt} = Dehnung bei Höchstkraft

A_t = Dehnung beim Bruch

In Abbildung 10 wird ein typisches Spannungs-Dehnung Diagramm gezeigt. Es ist qualitativ ähnlich zum Kraft-Verlängerungsdiagramm und wird mittels Querschnitts aus diesem berechnet. Auf der Abszisse ist die Dehnung aufgetragen. Auf der Ordinate wird die

resultierende Spannung aufgetragen. Von Beginn der Kraftaufbringung bis zum Bruch treten mehrere markante Dehnungen auf. Die Bruchdehnung, die plastische Dehnung, die Dehnung bei Höchstkraft und die Dehnung während des Bruchs. Die Bruchdehnung wird ohne die elastische Dehnung bewertet.

Durchführung des Zugversuches:

„Der Versuch besteht darin, eine Probe durch eine Zugbeanspruchung im Allgemeinen bis zum Bruch zu dehnen, um eine oder mehrere [...] definierten mechanischen Kennwerte zu bestimmen.“ [9] S.15

Im Zugversuch wird daher eine gleichmäßige Belastung auf die Zugprobe aufgebracht, bis diese bricht. Aus dem Materialverhalten während der gleichmäßigen Belastung beim Versuch werden unterschiedliche Kennwerte abgeleitet. Die sind:

- E-Modul
- Elastische Dehnung
- Bruchdehnung
- Dehnungsverhältnis
- prozentuale Widerstandserhöhung pro Prozent Dehnung
- Maximaler Widerstand
- Anfangswiderstand [10]

3 Materialwahl

3.1 Definition relevanter physikalischer Kenngrößen

3.1.1 Dehnung und Bruchdehnung

Die Dehnung ist im Allgemeinen definiert als das Verhältnis von Längenänderung zur Ausgangslänge. Die Längenänderung ΔL im Bezug zur ungedehnten Länge L_0 ergibt die Dehnung ε .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

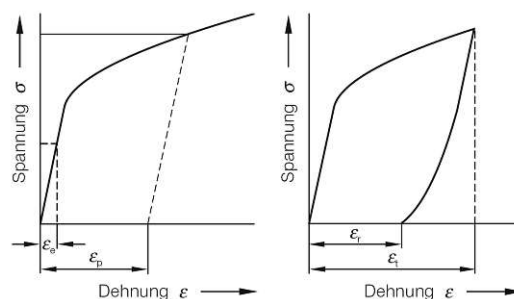


Abbildung 11 qualitatives Spannungs-Dehnungs Diagramm [8] S.98

ε_e = elastische Dehnung

ε_p = nichtproportionale Dehnung

ε_r = bleibende Dehnung

ε_t = Gesamtdehnung/Bruchdehnung

$$\varepsilon_{\text{plast.}} = \varepsilon_p + \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_{\text{plast.}}$$

Die gesamte Dehnung setzt sich aus einem elastischen und plastischen Anteil zusammen. Nichtproportionale Dehnung und bleibende Dehnung sind üblicherweise innerhalb normaler Messgenauigkeiten gleich groß. Sie werden daher auch als plastische Dehnung zusammengefasst. Der lineare Bereich ergibt die elastische und reversible Dehnung. Die Dehnung, um welche die Kurve von der Verlängerung der elastischen Geraden abweicht, wird als nichtproportionale Dehnung bezeichnet. (Abbildung 8)

Tritt die erste Verformung der Probe auf, kann im Diagramm die Spannung abgelesen werden und damit die Gesamtdehnung ermittelt werden. Wird das Werkstück anschließend wieder bis zur Spannung null entlastet, so kann die bleibende Dehnung abgelesen werden. Weiters kann ein zusätzlicher Dehnungswert definiert werden, die sogenannte Gleichmaßdehnung. Sie ist diejenige Dehnung, bei der im Zugversuch die Probeneinschnürung beginnt. Die Bezeichnung Gleichmaßdehnung hat ihren Namen, da sich der Probendurchmesser bis zu diesem Punkt nicht verändert.

Die Bruchdehnung ist die relative Verlängerung einer Zugprobe bezogen auf die Anfangslänge. Bei der Bruchdehnung handelt es sich um eine plastische und damit irreversible Verformung des Werkstoffs. Um die Messlänge nach dem Bruch zu ermitteln, sind die Bruchstücke der Probe so zusammenzulegen, dass ihre Achsen eine Gerade bilden. Außerdem sollen die Bruchflächen der beiden Proben, für die Messung der Messlänge, nach dem Bruch möglichst gut ineinanderpassen. [9] Die Bruchdehnung von beispielsweise Metallen kann sehr stark variieren. Die Bruchdehnung von Grauguss liegt bei unter 1% und die von Kupfer bei bis zu 50 %. [8]

$$\varepsilon_t = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100$$

L_u die Messlänge nach dem Bruch

L_0 die Anfangsmesslänge

Die Bruchdehnung stellt die gesamte Dehnung aus elastischer und plastischer Dehnung dar. Die Bruchdehnung ist damit immer größer als die rein elastische Dehnung. Wenn als Vergleichswert der FMPE-Fasern die Bruchdehnung herangezogen wird, dann kann dieser Wert problemlos mit der elastischen Dehnung der Leiterkabel verglichen werden, da die elastische Dehnung stets kleiner als die Bruchdehnung ist.

3.1.2 Spezifischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit

Der elektrische und der spezifische Widerstand sind strikt voneinander zu unterscheiden. Der spezifische Widerstand ist materialbezogen, während der elektrische Widerstand sich auf einen bestimmten Leiter bezieht. Die elektrische Leitfähigkeit und der elektrische Widerstand sind zwei Kehrwerte.

Verursacht wird der elektrische Widerstand dadurch, dass die Ladungsträger im Leiter durch Stöße mit den, auf festen Plätzen sitzenden, Ionen in ihrer Bewegung gehemmt werden. Der Widerstand eines Drahtes wird wie folgt definiert:

$$R = \frac{\varrho l}{A}$$

R = elektrischer Widerstand

l = Länge des Leiters

ϱ = spezifischer Widerstand

A = Querschnitt des Leiters

mit dem spezifischen Widerstand $[\varrho] = 1 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \text{m}$

und der Leitfähigkeit χ [Sm] mit $\frac{1}{\Omega \text{m}}$ [11] [12]

Elektronische Bandstruktur

Mit dem Modell der elektronischen Bandstruktur lässt sich die elektrische Leitfähigkeit verschiedener Materialien beschreiben. Der Ausgangspunkt des Modells ist die Schrödinger Gleichung. Löst man diese Gleichung, erhält man Energiebereiche, die von Elektronen besetzt werden können und so welche, die nicht von Elektronen besetzt werden können. Die besetzbaren Bereiche werden als Bänder bezeichnet. Die nicht besetzbaren Bereiche bezeichnet man dagegen als Bandlücken. Die Elektronen werden unterschieden zwischen Valenzelektronen im Valenzband und Leitungselektronen im Leitungsband. Die Leitungselektronen tragen dabei zur elektrischen Leitfähigkeit des Materials bei. Die Leitfähigkeit eines Materials und damit die Einordnung, ob es sich als Isolator, Halbleiter oder Metall charakterisieren lässt, ist von mehreren Faktoren abhängig. Einerseits ist es die Anordnung der Bänder zueinander, die charakterisiert, wie schnell Leitungselektronen transportiert werden können. Andererseits bestimmt die Fermi-Energie des Materials die Leitfähigkeit. Die Fermi-Energie ist wie folgt definiert:

Nach dem Pauli Prinzip kann ein Energieniveau nur mit maximal zwei Elektronen besetzt werden (unterschiedlicher Spin). Daher können sich nicht alle Elektronen im niedrigsten Energieniveau aufhalten. Die Fermi-Energie ist jene Energie, bei welcher auch bei der Temperatur von 0 K noch das letzte Elektron untergebracht werden kann. [7]

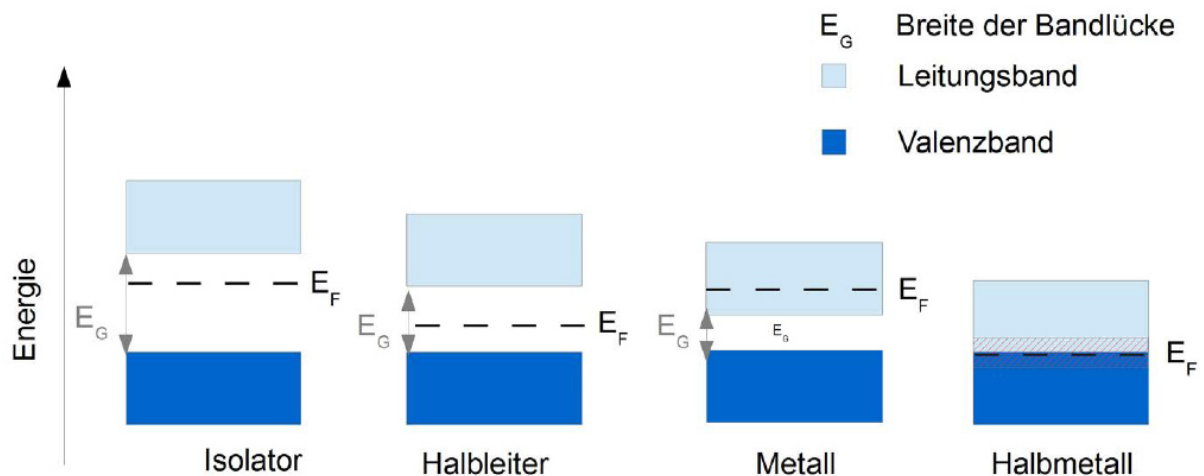


Abbildung 12 Bandlücke und Fermi-Energie [12] S.8

Um die Leitfähigkeit im physikalischen Kontext beschreiben zu können, wird ein Modell herangezogen. Das Drude Modell ist ein klassisches Modell zur Beschreibung der Leitfähigkeit in Festkörpern. Im Modell wird ein Festkörper durch ein Kristallgitter von festen positiven Ionen modelliert, in welchem sich schwach gebundene Elektronen frei bewegen können. Wird im Modell ein elektrisches Feld an den Festkörper gelegt, dann kann für die Elektronen folgende Bewegungsgleichung aufgestellt werden.

$$\frac{d\vec{v}_D}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v}_D = -\frac{e}{m} \vec{E}$$

\vec{E} = elektrisches Feld

e = elektrische Ladung

\vec{v}_D = mittlere Driftgeschwindigkeit des Elektrons

τ = mittlere Stoßzeit

n = Elektronendichte

Dabei stellt $-\frac{m}{\tau} \vec{v}_D$ die Reibungskraft dar. Wird das elektrische Feld \vec{E} als zeitlich unabhängig angenommen, dann gilt für die Driftgeschwindigkeit des Elektrons folgender Zusammenhang:

$$\vec{v}_D = \frac{-e\tau}{m} \vec{E} + \vec{A} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Der zweite Term $\vec{A} e^{-\frac{t}{\tau}}$ strebt nach null

Die elektrische Stromdichte kann wie folgt angegeben werden:

$$\vec{j}_e = -en\vec{v}_D = -en \left(\frac{-e\tau}{m} \vec{E} \right) = \frac{ne^2\tau}{m} \vec{E}$$

Daraus kann die Formel für die elektrische Leitfähigkeit abgeleitet werden: [12]

$$\sigma_{el} = \frac{ne^2\tau}{m}$$

Die Matthiessensche Regel besagt, dass der elektrische Widerstand eines Metalls aus zwei Teilen besteht. Den temperaturabhängigen Idealwiderstand $\rho_i(T)$, welcher durch Wechselwirkung der Elektronen mit thermischen Gitterschwingungen zustande kommt. Zum anderen den temperaturunabhängigen Restwiderstand ρ_R , welcher durch die Streuung von Elektronen an Fremdstoffen und Gitterbaufehlern zustande kommt. [13]

$$\rho(T) = \rho_i(T) + \rho_R$$

Der temperaturabhängige Idealwiderstand $\rho_i(T)$ lässt sich ebenfalls in folgende unterschiedliche Anteile unterteilen:

$\rho_{\text{el-ph}}(T)$ wird als der Widerstand bezeichnet, der durch Elektron-Phonon-Streuung hervorgerufen wird. Dieser ist temperaturabhängig. Bei der Kollision wird hier ein Phonon emittiert oder absorbiert, was zur Änderung der Elektronenenergie führt.

$\rho_{\text{el-el}}(T)$ wird als der Widerstand bezeichnet, der bei tiefen Temperaturen durch Elektron-Elektron Streuung hervorgerufen wird.

$\rho_{\text{mag}}(T)$ ist der Widerstand, der durch die Streuung an magnetischen Momenten auftritt. Er tritt nur bei Materialien auf, bei denen das magnetische Moment vorhanden ist. [12]

Für die Thematik der vorliegenden Arbeit wird hauptsächlich der Anteil des Elektron-Phonon Widerstands relevant sein. Der Elektron-Elektron Widerstand tritt nur bei tiefen Temperaturen auf. Diese Temperaturen werden im Realbetrieb der Seile nicht erreicht werden. Der magnetische Widerstand tritt nur in magnetischen Feldern auf. Da die Leiterkabeln mit geringer Stromstärke betrieben werden, wird der magnetische Widerstand ebenfalls nur einen geringen Teil der Gesamtwiderstands ausmachen.

3.2 Ausgewählte Materialien für die Messproben

3.2.1 Metalle

Metalle besitzen ein bis drei Außenelektronen. Der Atomkern übt nur sehr geringe Anziehungskräfte auf die Valenzelektronen aus. Dadurch ergeben sich positiv geladene Metallionen und frei bewegliche Elektronen. Diese werden auch als Elektronengas bezeichnet. Dadurch ergibt sich die signifikant gute Leitfähigkeit von Metallen. Dieser Parameter macht Metalle potenziell interessant für die geforderte Anwendung. Metalle, als sehr weiches und verformbares Material haben außerdem eine hohe Elastizität. Hier wird unterschieden zwischen dem linear elastischen Verhalten und dem linear anelastischen Verhalten. Das linear elastische Verhalten wird durch die Hooke'sche Gerade charakterisiert. Jeder Spannung σ ist eine eindeutige Dehnung ε zugeordnet. Metalle werden eher durch anelastisches Verhalten charakterisiert. Verformungen sind größtenteils irreversibler Art. In den geplanten Versuchen soll die elastische Verformbarkeit der Metalle ermittelt werden. Ziel ist es, abschätzen zu können, ob die äußere Belastung innerhalb der elastischen Grenzen bleiben kann. Wird die Probe belastet bzw. entlastet, kann der Grad zwischen elastischer und anelastischer Belastung abgeschätzt werden. [7]

Die Metalle, die experimentell geprüft werden sind:

- Silber
- Kupfer
- Aluminium
- Federstahldraht

3.2.2 Silikone

Die Silikone werden als Rundprofile geliefert. Sie sind sehr dehnbar und gummiartig beweglich. Die Rundprofile mit 1mm \varnothing aus Silikon haben eine hohe Dehnbarkeit. Abhängig vom Füllstoff ist die Bruchdehnung zwischen 60 % und 150 % angegeben. Das ist weit über dem geforderten Maß an Dehnbarkeit. Die leitfähigen Silikone von MTC©

werden mit verschiedenen leitfähigen Füllstoffen bestückt. Damit werden die Silikonprofile, die naturgemäß elektrisch isolierend wirken, leitfähiger gemacht. Die Füllstoffmaterialien, die eingesetzt werden sind:

- Aluminium
- Kupfer
- Silber plattiertes Glass
- Nickel

Für die Anwendung sind die Silikone aufgrund der hohen Dehnbarkeit und vergleichsweise guten Leitfähigkeit interessant. Ob die Leitfähigkeit ausreichend ist, bzw. wie sich diese nach einer Dauerbelastung verhält, wird in Versuchen ausgetestet. Die Leitfähigkeit wird allein durch den Füllstoff erreicht. Die elektrische Leitung in Form von Elektronen wird von Partikel zu Partikel weitergegeben. Es wird davon ausgegangen, dass der Abstand zwischen den Partikeln maßgeblich für die Leitfähigkeit verantwortlich ist. Je mehr Dehnung an den Proben anliegt, desto größer der Abstand der Füllstoffpartikel und damit auch der elektrische Widerstand der Probe. In den Messversuchen soll getestet werden, ob die Erhöhung des Widerstands bei Dehnung der Probe reversibel oder irreversibel ist. Also ob sich das ursprüngliche Niveau des Widerstands wieder einstellt. Bei der Firma MTC© wurden vier verschiedene leitfähige Silikone zur Versuchsdurchführung geliefert.

3.2.3 Fäden Shieldex

Auch Fäden werden für die Anwendung in Betracht gezogen. Die Fäden bestehen aus Polyamid/Nylon6.6. Typisches Fadenmaterial ist im Normalfall nicht leitfähig. Daher wird ein Hersteller gesucht, der leitfähige bzw. metallisierte Fäden herstellt. Da auch Polyamid nicht leitfähig ist, werden vom Hersteller bei den Fäden Shieldex© zusätzliche Silberpartikel hinzugegeben, um sie leitfähiger zu machen. Es werden verschiedene Fäden in unterschiedlichen Dicken und Wicklungen bestellt und experimentell geprüft. Die Fäden haben unterschiedliche Durchmesser, welche bei Fäden in dtex angegeben werden. Eine materialabhängige Einheit zur Angabe von Durchmessern. Durch den unterschiedlichen Aufbau der Fäden ergeben sich unterschiedliche Leitfähigkeiten. Der Hersteller von den metallisierten Drähten Shieldex© hat für die Forschungszwecke dieser Arbeit auf Anfrage sieben verschiedene Fäden bereitgestellt. Der metallisierte Faden 117/17 x2 HCB TPU wird mit einer Isolierung geliefert. Da dieser nicht anwendungsg geeignet ist, wird er nicht in die Versuchsreihe mit aufgenommen. Die Fäden sind:

- 117/17-HCB
- 117/17 x2 HCB
- 117/17 x2 HCB TPU
- 235/36 x2 HCB
- 235/36 x4 HCB
- 235/36 x6 HCB
- Monofil 400µm

3.2.4 Fäden Garne Steeltech/Silvertech

Die Amann Group© stellt unterschiedliche leitfähige Textilien für verschiedene Anwendungen her. Für die geplanten Versuche wurden zwei unterschiedliche Garnproben zugesandt. Aufgrund der Kombination aus Polyamid, was flexible und elastisch dehbare Eigenschaften bietet und den gleichzeitig elektrisch leitfähigen metallischen Werkstoffen Stahl und Silber, ergibt sich eine potenziell interessante Kombination aus Parametern. Die erste Probe wird als Silvertech bezeichnet. Es ist ein Hybridzwirn aus Polyamid mit einer aufgetragenen Silberbeschichtung. Die Leitfähigkeit wird nur durch die aufgetragene Beschichtung generiert. Das bedeutet auch eine Vulnerabilität gegenüber äußeren Belastungen und Einflüssen. Bei Bruch der Silberschicht wird die Leitfähigkeit voraussichtlich beeinflusst. Die andere Probe hat die Bezeichnung Steeltech. Es ist ebenfalls ein Hybridzwirn aus Polyamid und einer Stahlfaser. Im Gegensatz zu Silvertech ist die Leitfähigkeit hier über eine Faser und nicht über eine Beschichtung gegeben. Elektrizität wird also in der inneren und nicht in der äußeren Schicht des Faserquerschnitts geleitet. Es wird davon ausgegangen, dass die Probe robuster gegenüber Belastung ist, aber im Vergleich mit Silvertech weniger dehnbar sein wird. Das spiegelt sich auch in der Dehnbarkeit der Datenblätter wider. 35% Dehnbarkeit laut Datenblatt bei Silvertech im Vergleich zu 11% Dehnbarkeit bei Steeltech.

3.3 Kennwerte der Messproben aus dem Datenblatt

Um die herstellerseitig angegebenen Eigenschaften und Parameter zuordnen zu können, sind diese in der Tabelle 2 für alle Materialien und damit die Proben für die Versuche aufgelistet. Die Messprobe mit Bezeichnung 117/17 x2 HC + B TPU wird von Anfang an ausgeschlossen, da sie einem Faden 117/17 x2 mit Kunststoffummantelung aus TPU entspricht. Da die Ummantelung keinen Mehrwert bietet, wird dieser Faden versuchstechnisch nicht weiterverfolgt.

Der Durchmesser in dtex gibt an, wie hoch das Gewicht in [g] eines 10000m langen Fadens ist. Damit kann das Gewicht von Garnen und Fäden charakterisiert werden. Unter Einbezug der Dichte des Fadenmaterials kann auf den Durchmesser gerechnet werden.

Die Vorspannkraft ergibt sich nicht aus dem Datenblatt der Materialien. Hier wird eine Empfehlung aus der Norm zur groben Abschätzung verwendet. Siehe dazu auch Kapitel 4.7.3

3 Materialwahl

Fasern	Her- steller	Ø [dtex]	Ø [mm]	Art	Material Körper	Leit- material	Widerstand [Ohm/m]	angen. Bruchdehn ung [%]	Länge der Muster	Vorspa nnkraft
Fasern 400µ Monofil	Shieldex	1550	0.42	Techn. Garne	Polyamid /Nylon	Silber	6000	30±5	100m	0,4N
Fasern 117/17 HC +B	Shieldex	142	0.125	Techn. Garne	Polyamid /Nylon	Silber	500	23±6	100m	0,04N
Fasern 117/17 2 HC +B	Shieldex	295	0.18	Techn. Garne	Polyamid /Nylon	Silber	300	21±5	100m	0,09N
Fasern 117/17 2 HC + B TPU	Shieldex	3000	0.58	Techn. Garne	Polyamid /Nylon	Silber	300	21±5	100m	0,9 N
Fasern 235/36 2 HC + B	Shieldex	605	0.26	Techn. Garne	Polyamid /Nylon	Silber	80±30	25±6	100m	0,18N
Fasern 235/36 4 HC +B	Shieldex	1220	0.37	Techn. Garne	Polyamid /Nylon	Silber	40±10	26±6	100m	0,37N
Fasern 235/36 6 HC +B	Shieldex	1905	0.47	Techn. Garne	Polyamid /Nylon	Silber	30±10	27±6	100m	0,54N
Elastomere	Firma	Ø [dtex]	Ø [mm]	Art	Material Körper	Leitmate rial	Widerstand [Ohm*cm]	Bruchdehn ung [%]	Länge der Muster	
SRV-1,00-AGCU	MTC	-	1	Gummi	Silikon	Kupfer	0.004 [Ohm*cm]	100	5m	0,01 N
SRV-1,00-NIC	MTC	-	1	Gummi	Silikon	Nickel	0.05 [Ohm*cm]	150	5m	0,01 N
SRV-1,00-AGAL	MTC	-	1	Gummi	Silikon	Alumini um	0.008 [Ohm*cm]	100	5m	0,01 N
SRV-1,00-AGGL	MTC	-	1	Gummi	Silikon	Silberpl. Glas	0.01 [Ohm *cm]	75	5m	0,01 N

3 Materialwahl

Fasern	Hersteller	Ø [dtex]	Ø [mm]	Art	Material Körper	Leitmaterial	Widerstand [Ohm/m]	Bruchdehnung [%]	Länge der Muster	Vorspannkraft
Steel-Tech 100 Tex 93	AMANN	930	0,3	Techn. Garn	Polyester	Edelstahl Faser	90 Ohm/m	11.	2000m	0,28 N
Silver-Tech 100 Tex 33	AMANN	40 Garnstärke	0,15	Techn. Garn	Polyamid /Polyester	Silberbeschichtung	530 Ohm/m	35	2500m	0,14 N
Metalle	Firma	Ø [dtex]	Ø [mm]	Art	Material Körper	Leitmaterial	Widerstand [Ohm/m]	Bruchdehnung [%]	Länge der Muster	
Silberdraht	Drahtshop	-	0,25 0,4	Metallischer Draht	Silber	Silber	0,016	29	50m 40m	3 N
Kupferdraht	Drahtshop	-	0,25 0,4	Metallischer Draht	Kupfer	Kupfer	0,018	22	40m 100m	3 N
Aluminiumdraht	Drahtshop	-	1	Metallischer Draht	Aluminium	Aluminium	0,027	40	10m	3 N
Federstahldraht	Conrad GmbH	-	0,5	Metallischer Draht	Edelstahl	Edelstahl	0,7	30	7m	3 N

Tabelle 2 Technische Eigenschaften der geprüften Proben

4 Konstruktion des Versuchsaufbaus und Versuchsvorbereitung

4.1 Konstruktionsvorgehen entsprechend der Norm VDI 2221

Grundsätzlich ist es bei konstruktiven Prozessen von Vorteil, sich an einem Plan zu orientieren. So ein Plan kann ein Vorgehenskonzept sein, welches die VDI 2221 „Entwicklung technischer Produkte und Systeme“ bietet. Zur Beschreibung des Systems werden drei Grundkonzepte benannt:

Einerseits das *funktionale Grundkonzept*. In diesem wird das System als Black Box betrachtet. Das heißt, es wird nur die Einwirkung der Außenwelt auf das System (Input) betrachtet, sowie die Wirkung des Systems auf seine Umwelt (Output).

Zudem gibt es das *strukturelle Konzept*, welches das System als Whitebox betrachtet. Damit werden speziell die inneren Elemente und deren Beziehungen zueinander genauer beschrieben. Die Wechselwirkung nach Außen mit der Umwelt ist für die Betrachtung weniger relevant.

Als drittes Konzept ist es ebenfalls möglich, die Elemente des *Systems in Hierarchieebenen* aufteilen zu können. Beliebig viele Super- und Subsysteme können dabei eingesetzt werden.

Die drei Konzepte sind schematisch in Abbildung 13 dargestellt.

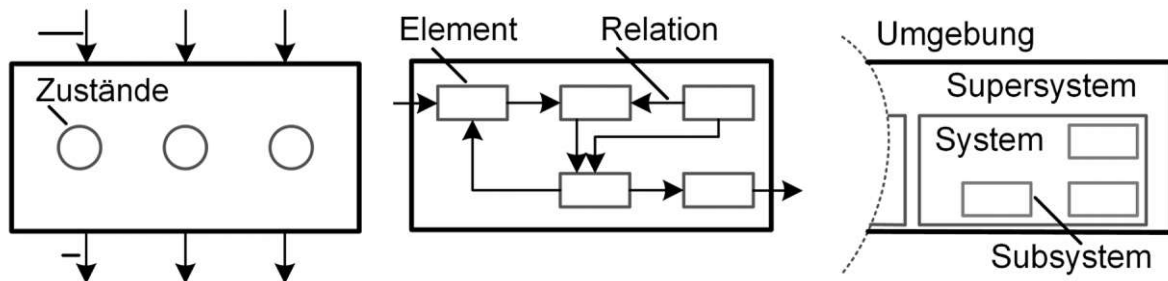


Abbildung 13 Die Ablaufschemata der VDI 2221 [14] S.13

Die VDI 2221 gibt mehrere Aktivitäten an, welche im Laufe des Produktentwicklungsprozesses durchzuführen sind.

Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe

Um die Problemstellung vollumfänglich erfassen zu können, müssen zuerst alle verfügbaren Informationen zusammengetragen werden. Dazu gehört auch das Erkennen von eigenen Informationslücken. Außerdem sollte das Problem bewusst aus Sicht des Entwicklers formuliert werden. Zur Problembeschreibung kann eine Anforderungsliste behilflich sein. Diese ist während des Konstruktionsprozesses auf aktuellem Stand zu halten. [14]

Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen

Funktionen definieren was ein Produkt oder ein Bestandteil tut. Die Funktionen definiert man in Haupt und Nebenfunktionen, oder Zweck- und Störfunktionen des Systems. [14]

Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

Zunächst werden Lösungsprinzipien für die wesentlichen Teilfunktionen gesucht. Dafür werden natürliche oder andere Effekte ausgewählt. Diese Effekte werden durch Wirkprinzipien realisiert. Das können bei mechanischen Bauteilen die Wirkgeometrie, die Wirkbewegung, oder die Werkstoffart sein. Diese Wirkprinzipien können anschließend zu Wirkstrukturen verknüpft werden. Eine Möglichkeit zur Kombination von Wirk- und Lösungsprinzipien bietet die Methode des „morphologischen Kastens“. [14]

Bewerten und Auswählen des Lösungskonzeptes

Dafür werden zunächst geeignete Bewertungskriterien definiert. Dafür können die bereits vorhandenen Anforderungen gewichtet werden. Die Bewertungsmethoden beruhen dabei auf einer mathematischen Gegenüberstellung der Lösungskonzepte in Tabellen. Beispiele dafür sind folgende: ABC-Analyse, SWOT-Analyse, Nutzwertanalyse). Letztendlich kann keine menschlich erstellte Bewertung komplett frei von subjektiven Einflüssen sein und muss daher hinterfragt werden. [14]

Gliedern in Module – Schnittstellendefinitionen

Das Ergebnis der Gliederung ist eine Systemarchitektur, welche modular aufgebaut ist. Hier beginnt der Gestaltungsprozess sich in parallele Stränge zu verzweigen, welche nebeneinander entwickelt werden können. Durch die Aufgliederung in Module lassen sich Fachkompetenzen deutlich präziser anwenden. [14]

Gestalten der Module

Die Module werden in ihrem Detaillierungsgrad nur so weit vorangetrieben, dass das Erkennen eines Gestaltungsoptimums möglich wird. Dieser Prozess wird auch als Grobgestalten bezeichnet. Typischerweise werden hier grob maßstäbliche Zeichnungen verwendet. [14]

Integrieren des gesamten Produkts

In diesem Abschnitt werden die Module feingestaltet und anschließend zu einem Produkt integriert. Das Hinzufügen von Normteilen erfolgt ebenfalls in diesem Abschnitt. Die typischen Darstellungsformen sind CAD-Daten, Zeichnungen und Stücklisten. [14]

Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben

Ziel dieses Schrittes ist die Produktdokumentation mit Herstellungs-, Nutzungs- und Zertifizierungsangaben. Beispiele dafür können die folgenden sein: Technische Zeichnungen, CAD-Modelle, Programmcode-Dokumentationen, Stücklisten, Fertigungs-, Montageanleitungen. [14]

Absichern der Anforderungserfüllung

Die Absicherung stellt den Vergleich zwischen Ergebnis und Ziel einer Aufgabe dar. Zu dem Zweck der Absicherung des Systems, werden Berechnungs-, Simulations-, Versuchs-

und Testaktivitäten gezählt. Damit erfolgt die Prüfung, ob das Ergebnis den geforderten Anforderungen gerecht wird. [14]

4.2 Konzipierung des Versuchsaufbaus mithilfe des morphologischen Kastens und der Nutzwertanalyse

4.2.1 Morphologischer Kasten

Der morphologische Kasten soll die folgenden Fragen beantworten:

- Welche Eigenschaften soll das neue Produkt haben?
- Welche Teilprobleme wollen wir lösen?
- Welche Teilfunktionen könnte das Produkt haben?
- Welche Module oder Baugruppen kann das Produkt haben?

Der morphologische Kasten ist eine Technik, mit der in der Produktentwicklung neue Ideen gefunden werden können. Sie ist keine Technik, um integral Neues zu entwickeln. Sinn ist es, neue Kombinationen von Eigenschaften und Ausprägungen zu finden und diese miteinander zu vereinen. Dafür werden Parameter des Produkts definiert und Ausprägungen dieser Parameter gesammelt. Diese zwei Dimensionen werden in einer Matrix verknüpft. In den Spalten stehen die Parameter.

Die Ziele des Versuchsaufbaus sind aufgelistet. Aus den Zielen und Anforderungen an den Versuchsaufbau lassen sich folgende Parameter für die Konstruktion ableiten:

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| • Gestell | • Messlänge der Proben |
| • Probenbefestigung | • Befestigung an d. Zugprüfmaschine |
| • Dehnungsmessung | • Widerstandsmessung |
| • Messsicherheit | • Montierbarkeit |
| • Markierung der Dehnungsmessung | |

Mit den ausgewählten Parametern wird begonnen eine Matrix zu erstellen. Zu jedem Parameter werden in einem Brainstorming Ausprägungen des Parameters ermittelt. Dadurch kann der morphologische Kasten erstellt werden. Weiter wird im Text erwähnt, dass der morphologische Kasten auch die Frage nach der Funktion bzw. mögliche Teilfunktionen der Konstruktion ermitteln soll. Die relevanten Funktionen der Konstruktion sind die folgenden:

- | | |
|---|--|
| • Befestigung an der Zugprüfmaschine | • Einspannung der Proben |
| • Lasermessgerät eins kann angeschraubt werden | • Lasermessgerät zwei kann angeschraubt werden |
| • Messgerät für die Widerstandsmessung kann angeschraubt werden | • montierbar/demontierbar |
| • Messung ist möglich | |

Der morphologische Kasten in Abbildung 14 wurde anhand des vorher beschriebenen Vorgehens erstellt. Zunächst können beliebige Ausprägungen zu Pfaden kombiniert werden. In diesem Abschnitt ist ein „Brainstorming“ erforderlich. Grundsätzlich können

alle Parameter kombiniert werden. Nicht alle Kombinationen sind technisch möglich. Nur einige sind sinnvoll oder zielführend. Daher ist der Pfad mit der höchsten Zielerfüllung aller Funktionen und Vorgaben zu finden. Dies ist kein linearer Prozess, sondern eine iterative Lösung.

Messlänge der Proben	Gestell	Probenbefestigung	Befestigung an Zugprüfmaschine	Dehnungsmessung	Widerstandsmessung	Markierung Dehnungsmessung	Montierbarkeit	Messsicherheit
200 mm	Profile 4	Klemmen 2	Verschrauben 5	Messung über Zugprüfmaschine 2	Digitales Multimeter 3	Fähnchen an Probe 4	Verschrauben 4	Sensorabstand konstant
300 mm	Gefertigtes Gestell 3	Aufwickeln 4	Kleben 1	Messung mit Laserschranke 4	Analoges Multimeter 2	Draht an Probe 3	Zusammenstecken 5	Sensorhöhe konstant
400 mm	Kasten/Box 2	Klemmen 5	Einklemmen 3	Händisches Messen mit Skala 2	Spannung & Stromstärkemessung 3	Styroporkörper 3	Kleben 3	Sensorwinkel konstant
500 mm	Ohne Gestell 2	Binden 3	Schweißen 1	Filmen 3	Messung über Spannungsteiler 3	Klebender Körper 4	Nieten 3	konstante Position der Messprobe

Abbildung 14 Morphologischer Kasten

Pfad1: [Gestell: Profile] [Probenbefestigung: Aufwickeln] [Befestigung: Verschraubung] [Dehnungsmessung: Messung mit Laserschranke] [Widerstandsmessung: Messung über Spannungsteiler] [Messsicherheit: alle] [Markierung: Klebender Körper] [Montierbarkeit: Verschrauben]

Pfad2: [Gestell: Profile] [Probenbefestigung: Festbinden] [Befestigung: Verschraubung] [Dehnungsmessung: Messung mit Laserschranke] [Widerstandsmessung: Digitales Multimeter] [Messsicherheit: alle] [Markierung: Draht an Probe anbringen] [Montierbarkeit: Verschrauben]

Pfad3: [Gestell: Gefertigtes Gestell] [Probenbefestigung: Einklemmen] [Befestigung: Verschraubung] [Dehnungsmessung: Filmen] [Widerstandsmessung: Digitales Multimeter] [Messsicherheit: alle] [Markierung: Fähnchen an Probe anbringen] [Montierbarkeit: Verschrauben]

4.2.2 Nutzwertanalyse

Um ein Lösungskonzept auswählen und bewerten zu können, wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Damit sollen die vorher ausgewählten Pfade verglichen werden. Bei der Nutzwertanalyse ist zu beachten, dass diese nie frei von subjektiven Einflüssen erstellt werden kann. Die Kriterien werden dabei nach ihrer Relevanz für die gesamte Konstruktion prozentual gewichtet. Die einzelnen Pfade werden dann hinsichtlich ihrer Eignung für die Konstruktion bewertet.

Kriterium	Messlänge der Proben	Gestell	Proben befestigung	Befestigung an Zugprüfmaschine	Dehnungsmessung	Widerstandsmessung	Markierung Dehnungsmessung	Montierbarkeit	Messsicherheit	Summe
Gewichtung	5 %	5 %	20 %	5 %	25 %	15 %	10 %	5 %	10 %	100 %
Pfad1 Bewertung ungewichtet	5	4	4	5	4	3	4	4	5	
Pfad1 Bewertung gewichtet	0,25	0,2	0,8	0,25	1	0,45	0,4	0,2	0,5	4,05
Pfad2 Bewertung ungewichtet	5	4	3	5	4	3	3	4	5	
Pfad2 Bewertung gewichtet	0,25	0,2	0,6	0,25	1	0,45	0,3	0,2	0,5	3,75
Pfad3 Bewertung ungewichtet	5	3	2	5	3	3	4	4	5	
Pfad3 Bewertung gewichtet	0,25	0,15	0,4	0,25	0,75	0,45	0,4	0,2	0,5	3,35

Abbildung 15 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ergibt Pfad 1 als die geeignetste Variante der Konstruktionslösung. Die Ausführung der Konstruktion lässt sich modular gliedern: Folgende Module werden definiert:

- Probenaufnahme oben
- Probenaufnahme unten
- Gestell
- Platte Messsensor 1
- Platte Messsensor 2

Eine Darstellung des Konzepts im dreidimensionalen ist in Abbildung 16 aufgezeigt. Damit die Zugkräfte der Zugprüfmaschine optimal auf die Proben übertragen werden, wird eine Aufwicklung der Proben auf eine zylindrische Fläche gewählt. Die Probenaufnahmen unten sowie oben sollen eine automatisch mittige Zentrierung der Proben gewährleisten. Außerdem soll die Probe nach mehrmaligem Aufwickeln auf den Zylinder befestigt werden. Die Anzahl der Wicklungen kann mit dem Reibwert, der Zugkraft und einer angenommenen Restkraft über die Eytelwein'sche Formel abgeschätzt werden. Die zwei Aufnahmen unten und oben sind in der Abbildung zu sehen. Das Gestell wird aus zwei T-Formen gefertigt. An diesen werden später die Platten der Sensoren befestigt. Die T-Formen werden als Zusammenbauten von Profilen realisiert, welche über Winkel zusammengeschaubt werden. Die genauen Maße ergeben sich aus den Längen der Proben. Die Platten dienen dazu, die Sensoren anschrauben zu können. Da mit zwei Sensorpaaren gemessen wird, werden zwei Sensorplatten benötigt. Entsprechende Bohrungen mit den Anschlussmaßen der Sensoren werden vorgesehen. In der Sensorplatte wird eine Fräsung vorgesehen, welche Platz für die Probe lässt.

4.3 Versuchsaufbau

Die Messung und damit die Erfassung relevanter Messdaten wird in einer Zugprüfmaschine durchgeführt. Die ausgewählten Messproben werden anhand mechanischer und elektrischer Eigenschaften auf ihre Eignung für die Anwendung bewertet.

Ziel des Versuchsaufbaus ist es, eine präzise, sichere und zuverlässige Messung zu gewährleisten. Der Versuchsaufbau muss dabei folgenden Anforderungskatalog erfüllen:

- Eine verlässliche Einspannung der Messproben in der Zugprüfmaschine wird gewährleistet
- Die Einspannung schließt eine Schwächung, Beschädigung oder Beeinträchtigung des Probenmaterials aus
- Die Messproben werden durch die Aufnahme zentriert
- Einbau einer Mess-Sensorik zur Wegmessung
- Platzieren und Befestigen der Lichtmess-Sensorik am Messaufbau
- Einbau eines Messsystems zur Messung des Durchgangswiderstands der Proben
- Gewährleistung einer wiederholbaren und reproduzierbaren Messung
- Resultierende Kräfte aus der Zugprüfmaschine müssen aufgenommen werden
- Schneller Auf- und Abbau des Messaufbaus soll möglich sein
- Ein Probenwechsel soll unproblematisch, schnell und unkompliziert möglich sein
- Die Kabellegung wird so gestaltet, dass die Kabel beim Messen nicht im Weg liegen

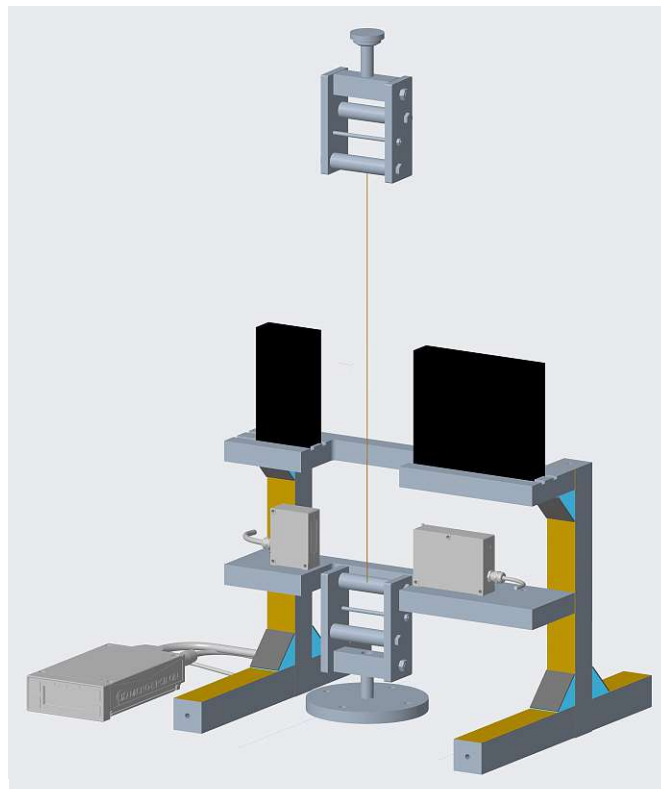


Abbildung 16 Qualitatives 3D-Modell des Versuchsaufbaus in CAD

Abbildung 16 zeigt das digitale Modell des Testaufbaus des Versuchs. Für das Skelett des Gestells werden Standardprofile von ITEM© verwendet. Der Grundaufbau sind zwei umgedrehte T-Profile. Diese werden durch Verschrauben mittels Winkelverbinder verbunden. Zwischen den zwei T-Profilen werden horizontal zwei Platten aus Aluminium angebracht.

Die zwei Sensorpaare sind übereinander angebracht. Später wird innerhalb des Messbereichs der zwei Sensorpaare jeweils ein Störvolumen an der Messprobe angefügt. Der Sensor unten erfasst die Position von Störvolumen 1 und der Sensor oben erfasst die Position von Störvolumen 2. Die Differenz der zwei Positionen ergibt die Messlänge. Die Änderung der Messlänge ist die Dehnung der Messprobe in diesem Bereich. Möglicherweise rutscht die Probe bei Dehnung auf den Zylindern oben und unten. Wird die Längenänderung bzw. Dehnung über den Traversenweg erfasst, gehen die Rutschungen in die Messung mit ein. Mit dem Messschema über die zwei Sensorpaare wird das Rutschen der Probe auf den Zylindern der Aufnahmen nicht in der Messung erfasst, bzw. kompensiert. Auf diesen Platten wird später jeweils ein Sensorpaar angebracht. Ein Sensorpaar besteht aus einer Lichtquelle und einem Empfänger. Ein Störvolumen innerhalb des Lichtstrahls unterbricht diesen und registriert die Position. Da die Messprobe nur vertikal verschoben wird, kann der Sensor keine Positionsänderung registrieren. Daher wird an der Probe das Störvolumen angebracht, welches vom Sensor registriert werden kann. Aus der Positionsdifferenz vor und nach der Belastung kann die Verschiebung des Volumens errechnet werden. Mit dem Messprogramm „Kantenerfassung“ kann die Position des Volumens (z.B. ein Papierfähnchen oder Klebevolumen) registriert werden. Auf den Aluminiumplatten wird eine Ausfräsung zwischen den zwei Sensoren vorgesehen. Damit kann die Probe vertikal zwischen Lichtquelle und Empfänger positioniert werden. Die Sensoren Empfänger/Lichtquelle werden direkt auf der Platte angebracht. Dafür werden in der Platte Bohrungen und Fräsungen mit den passenden Anschlussmaßen vorgesehen.

4.4 Probenaufnahmen

Auf der Abbildung 17 ist eine verkleinerte Zusammenstellungszeichnung der Probenaufnahme abgebildet. Die gleiche Aufnahme wird oben und unten in der Konstruktion verwendet. Hauptbestandteile sind zwei Zylinder mit \varnothing 20mm Durchmesser. Am unteren der zwei Zylinder werden die Proben befestigt. Der obere Zylinder stellt einen Massenausgleich zum unteren Zylinder dar. Der Zylinder der Aufwicklung wird so positioniert, dass die Zugkraft auf die Probe genau mittig auf die Aufnahme eingeleitet wird. Der Zylinder ist also um die Länge von 10mm außermittig versetzt. Damit die Aufnahme bei Lastfreiheit nicht kippt, wird ein zweiter Zylinder vorgesehen. Der zweite Zylinder wird 10mm außermittig in die andere Richtung angebracht. Die zwei Zylinder haben die gleiche Masse. Bildet man die Summe aller Momente um den Mittelpunkt, resultiert kein Kippmoment. Die Konstruktion verharrt damit vertikal ohne Kippneigung. Der Aluminiumblock auf der Oberseite dient zur Befestigung an der Zugprüfmaschine selbst mit einem M16 Gewinde. Zudem wird eine Durchgangsstange mit \varnothing 5mm Durchmesser vorgesehen. Auf die Stange wird das Ende der Proben aufgewickelt. Die zwei seitlichen Platten dienen zur Befestigung der Teile. Im Versuch werden die Proben später auf Widerstand, bzw. Leitfähigkeit geprüft. Für eine aussagekräftige Messung muss die Aufnahme daher elektrisch von der Zugprüfmaschine

abgetrennt werden. Zwischen Aluminiumblock und Aluminiumplatten werden beidseitig Kunststoffhülsen vorgesehen, um die Teile elektrisch abschirmen zu können. Die Einzelzeichnungen sind im Anhang angefügt.

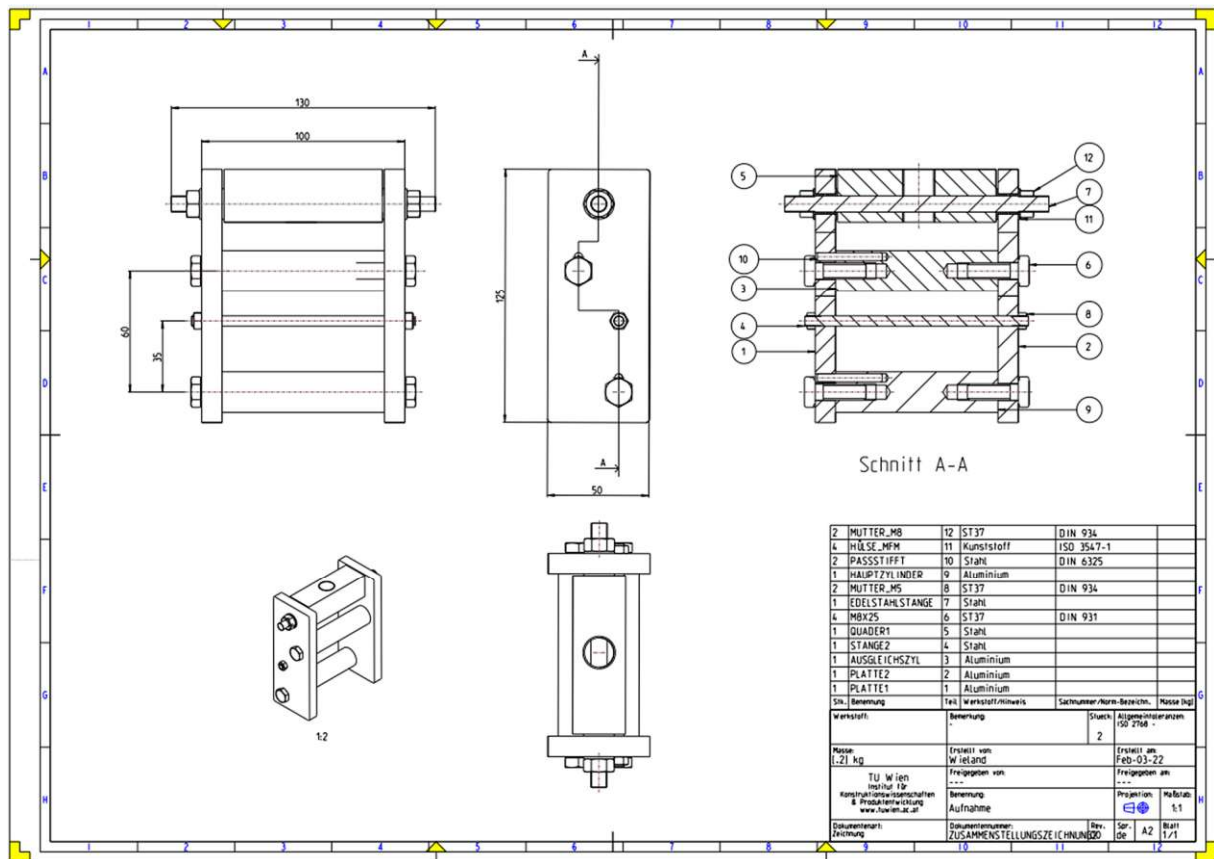


Abbildung 17 Technische Zeichnung der Probenaufnahme

Die Probe selbst wird auf die Zylinder von zwei Aufnahmen aufgewickelt. Dadurch wird die Kraftübertragung und die Vermeidung von Schwachstellen gewährleistet. Die Last wird nach der Euler-Eytelwein'schen Gleichung über die Seilreibungskraft auf die zylindrische Fläche übertragen.

Herleitung der Eytelwein'schen Gleichung:

Um die Seilkräfte eines Seils, welches auf einer zylindrischen Fläche aufgewickelt ist, beschreiben zu können, braucht es einen physikalischen Zusammenhang zwischen diesen. Dieser ist durch die Euler-Eytelwein'sche Gleichung beschrieben. Diese soll im Folgenden hergeleitet werden.

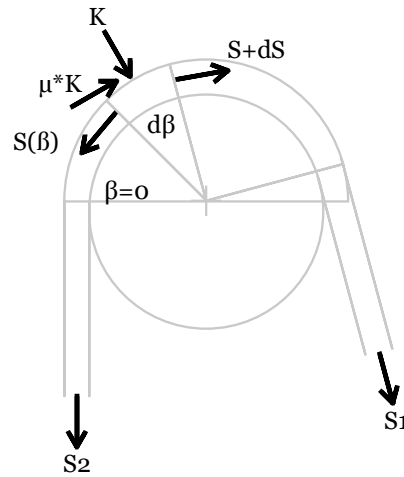


Abbildung 18 Schematische Abbildung der Seilkräfte

An den beiden Seilenden ziehen jeweils die Kräfte S_1 und S_2 und erzeugen damit eine Normalkraft K auf den Zylinder. Aus der Normalkraft K entsteht die Reibkraft μ^*K , welche abhängig vom Reibwertkoeffizienten ist. Der Reibwertkoeffizient μ ist für jede Materialpaarung unterschiedlich und eigens zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf Werte aus der Literatur zurückgegriffen. Die Reibkraft μ^*K , die tangential auf die Zylinderfläche wirkt, entspricht quantitativ der Größe dS , also der Differenz zwischen S_1 und S_2 :

$$dS = \mu K = \mu S d\beta$$

$$\frac{dS}{S} = \mu d\beta$$

In dieser Anwendung geht es um eine fixierte, nicht bewegliche Konstruktion. Ein konstanter Reibwert wird angenommen. Daher kann die Gleichung einfach integriert werden:

$$\ln(S) = \mu\beta + \text{konst.}$$

Setzt man die Gleichung zur natürlichen Basis e , dann erhält man:

$$S(\beta) = e^{\mu\beta} * \text{konst.}$$

Damit ergibt sich, bei Einsetzen für $\beta=0$ die Form der Eytelweinschen Gleichung:

$$S_1 = S_2 * e^{\mu\alpha}$$

Schlussendlich soll mithilfe der Eytelweinschen Gleichung die Anzahl der erforderlichen Umwicklungen abgeschätzt werden, die für eine minimale Restbelastung nötig ist. Dafür ist ein Reibwertkoeffizient aus der Literatur zu recherchieren. Außerdem ist die ziehende Kraft S_1 zu ermitteln, die von der Probe auf den Zylinder eingeleitet wird. Diese ziehende Kraft kann durch den E-Modul und den relevanten Querschnitt der Zugprobe ermittelt werden. Jetzt ist eine zu tolerierende Restkraft nach der Aufwicklung festzulegen. Damit kann der erforderliche Umschlingungswinkel α berechnet werden. Aus diesem kann man die Anzahl der Umwicklungen abschätzen. [15]

Nach dem Entwurf des Versuchsaufbaus, insbesondere der Probenaufnahmen, wird der Versuchsaufbau gefertigt und montiert. In Abbildung 14 ist der fertige Aufbau direkt in der Zugprüfmaschine zu sehen. Die Verkabelung ist noch nicht vollständig. Die Kabel für die Widerstandsmessung werden an den Aufnahmen oben und unten angebracht. Das rote Kabel an der oberen Aufnahme. Das schwarze Massekabel an der unteren Aufnahme. Damit wird der Widerstand der eingespannten Messprobe erfasst. Das schwarze Sensorpaar misst die obere Position des Volumens. Das blaue Sensorpaar misst die untere Position. Die untere Aufnahme ist über eine Massivplatte mit der Zugprüfmaschine verbunden. Die obere Aufnahme ist fest mit der Traverse der Maschine verbunden. Die ITEM© Profile werden unten an der Maschine verschraubt. Wichtig bei der Einspannung ist, dass der Faden nicht exakt mittig durch das Sensorfeld läuft. Nicht der Faden, sondern das Störvolumen soll messtechnisch erfasst werden. Die Sensorpaare werden auf den Platten angeschraubt. So wird sichergestellt, dass diese sich in Ausrichtung und Winkel genau gegenüberstehen.

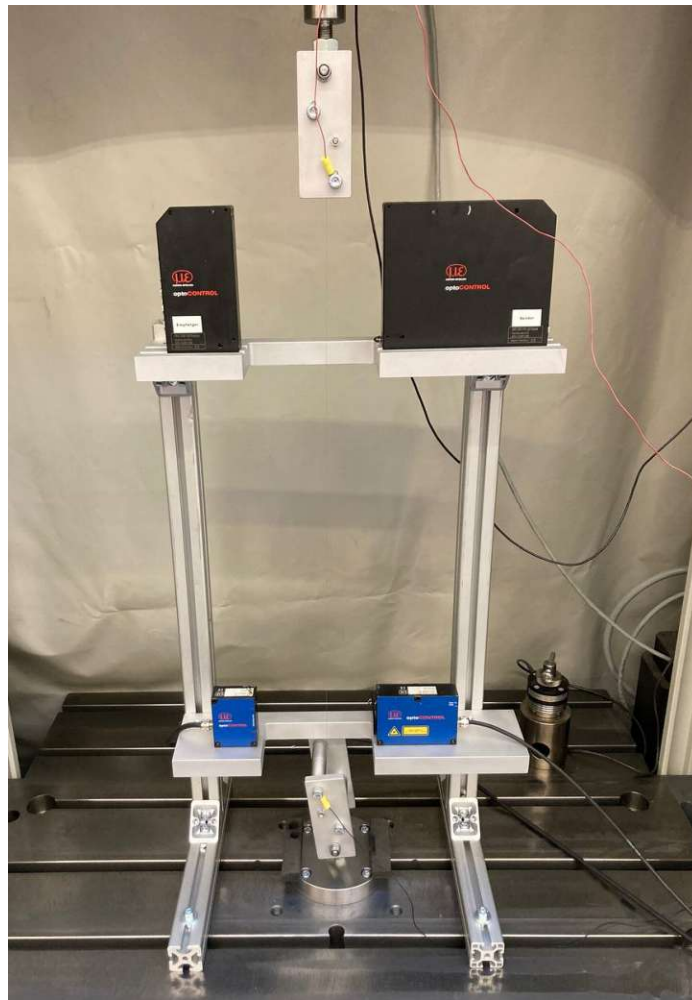


Abbildung 19 Versuchsaufbau aufgebaut in der Zugprüfmaschine

4.5 Messgeräte

Abbildung 20 zeigt schematisch die Erfassung der Längung der Proben

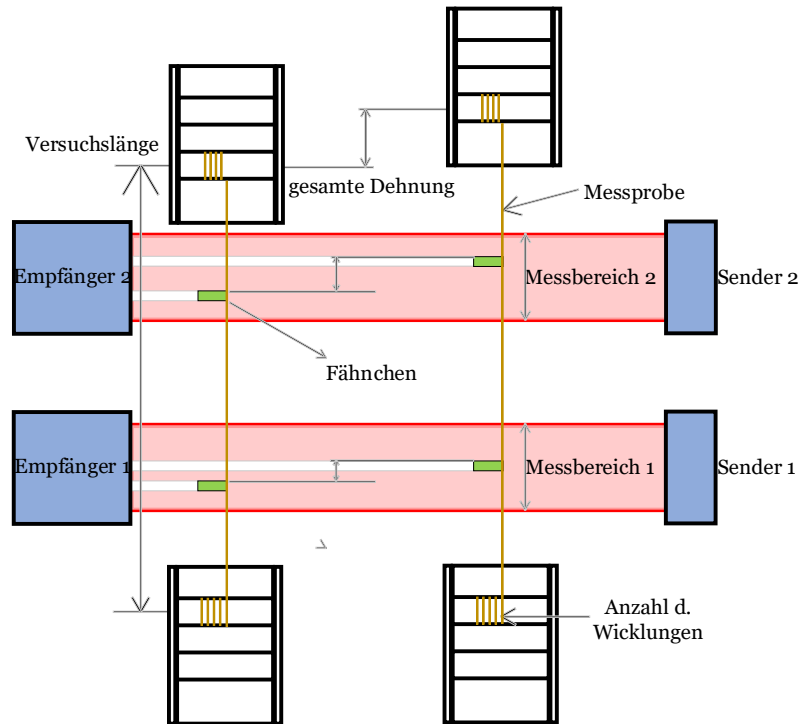


Abbildung 20 Messschema der Erfassung der Probenlänge

4.5.1 Materialprüfmaschine

Maschine:

Die Messungen werden mit einer Standprüfmaschine mit der Bezeichnung: AllroundLine Zwick Roell Z250 SN/SW/SE Material durchgeführt. Mit der Prüfmaschine ist der Zugversuch, der Druckversuch und der Biegeversuch durchführbar. Die Prüfmaschine eignet sich für Prüfanwendungen, sowie für Qualitätskontrollen und Forschungsprojekte [16].

- Die Prüfmaschine kann eine maximale Prüfkraft von 250kN aufbringen
- Die Traversengeschwindigkeit geht bis 600 mm/min bzw. 1000mm/min bei reduzierter Traversenrücklaufgeschwindigkeit mit reduzierter Kraft

Kraftaufnehmer: Xforce P Kraftaufnehmer:

- Nennkraft: 1 kN
- Xforce Typ P (Precision)
- Anschlussbolzen-Durchmesser: 20mm
- Genauigkeitsklasse nach ISO 7500: Klasse 1 ab 4 N und Klasse 0,5 ab 20 N
- Kalibrierschein in Anlehnung an ISO 7500-1 [16]



Abbildung 21 Materialprüfmaschine Zwick Z250

4.5.2 Messverstärker HBM MGC plus

Das Messverstärkersystem hat die Bezeichnung: HBM MGCplus Messverstärkersystem. Es ist modular aufgebaut. Die Analog-Digitalumwandlung wird vom Hersteller als Informationsverlustfrei angegeben. Die Datenaufbereitung wie z.B. die Tarierung, Filterung und Messbereichseinstellung erfolgt in digitaler Form. Die Summerabtastrate wird mit 300000 Messwerten pro Sekunde angegeben. Die Datenweitergabe an einen PC wird mittels Ethernet Schnittstelle realisiert. Es wird die Schnittstelle des Messverstärkers für die DMS verwendet. [17]

Da der Messverstärker selbst den Widerstand nicht direkt messen kann, wird die Messung der Spannung mittels einer Vollmessbrücke realisiert und auf den Widerstand umgerechnet. Das Messschema ist in Abbildung 22 dargestellt.

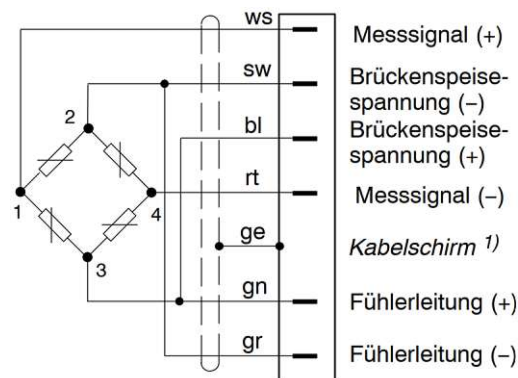


Abbildung 22 Messbrückenschema zum Anschluss am Messverstärker [17]

Die Leitfähigkeit eines Materials wird mittels der elektrischen Leitfähigkeit beschrieben. Sie ist eine temperaturabhängige Materialkonstante. Definiert ist die elektrische Leitfähigkeit mit dem Formelzeichen σ . Das ist der mathematische Kehrwert des spezifischen Widerstands. Mit der Einheit Siemens [S] des spezifischen Widerstands ergibt sich Siemens [S]^{-1} als Einheit der elektrischen Leitfähigkeit.

$$\sigma \left[\frac{\text{S}}{\text{m}} \right] = \frac{1}{\rho}$$

Die andere, für die Messung instructive physikalische Größe, ist der elektrische Leitwert. Im Gegensatz zur elektrischen Leitfähigkeit, ist dieser keine Materialkonstante, sondern eine messprobenabhängige Größe eines spezifischen Leiters oder Isolators. Definiert wird der elektrische Leitwert G über den Kehrwert des ohmschen Widerstands R in $[\Omega]$.

$$G [\text{S}] = \frac{1}{R}$$

Zur Bewertung und Kategorisierung der Materialien bietet sich der spezifische Widerstand an. Um die konkreten Messproben direkt bewerten zu können, stellt der elektrische Leitwert einen passenderen Parameter dar. Für die Aufgabenstellung sind beide Kenngrößen relevant.

Die Messvollbrücke ist eine Parallelschaltung von zwei Spannungsteilern. Der Spannungsteiler wird im Weiteren kurz erklärt:

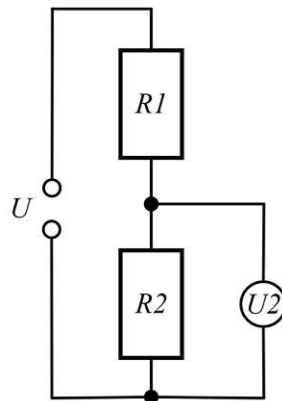


Abbildung 23 - Spannungsteiler

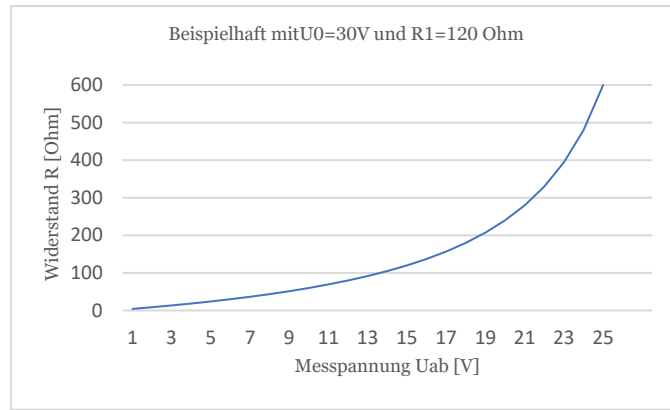
Der Spannungsteiler ist eine Reihenschaltung von zwei Widerständen und einer Spannungsquelle, siehe Abbildung 23. Über die Widerstände fließt ein Strom I . Die Spannung U_2 über dem Widerstand R_2 wird vom Messverstärker gemessen und aufgezeichnet. Über die Gleichung kann der unbekannte Widerstand bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen Messspannung und Messwiderstand beim Spannungsteiler ist nichtlinear, siehe dazu Abbildung 24

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 * [R_1 + R_2] = R_2 * U$$

$$U_2 * R_1 = U * R_2 - U_2 * R_2$$

$$R_2 = R_1 \frac{U_2}{U - U_2}$$

Abbildung 24 Nichtlineare Abhängigkeit R_2 von U_2 am Spannungsteiler

Für die Bestimmung des Widerstands der Messproben wird eine Messvollbrücke, auch Wheatstone'sche Brücke genannt, verwendet. Das Messverfahren wird auch als „Vierleitermessung“ bezeichnet, abgebildet in Abbildung 25. Eine Vierleitermessung ist dasselbe, wie die Parallelschaltung zweier Spannungsteiler. Das Messverfahren wird typischerweise zur Bestimmung von Widerständen genutzt.

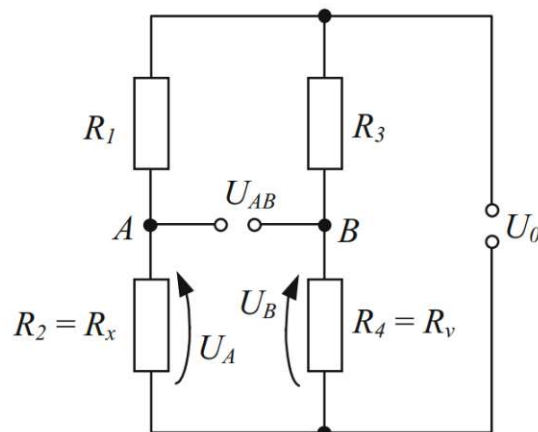


Abbildung 25 elektrische Schaltung der Wheatstone'schen Brücke

Um die Brücke abzugleichen, also bei $U_{AB}=0$, gilt folgende Gleichung:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Bei einer abgeglichenen Brücke ist die gemessene Spannung 0, da keine Potentialdifferenz zwischen den Brückenarmen vorhanden ist. Ein Widerstand wird jetzt mit R_V und ein zweiter mit R_X bezeichnet. R_X ist der gesuchte unbekannte Widerstand. Seine Bestimmung ist die Aufgabe der Messbrücke. Mit R_V wird ein bekannter Vergleichswiderstand gewählt. Hier kann zum Abgleich der Brückenschaltung ein Potentiometer gewählt werden, der zu Beginn an der Stelle des unbekanntes Widerstands eingebaut wird. Damit ist bekannt, welcher Widerstand anliegt, wenn die gemessene Spannung null ist.

$$R_X = R_V * \frac{R_1}{R_3}$$

Für den Vergleichswiderstand R_V wird ein 120 Ohm Widerstand verwendet. Mit einem Schleifpotentiometer wird die Brücke abgeglichen.

Um jetzt variable Widerstände zu messen, wird das Messverfahren im Ausschlagverfahren angewendet. Das Verfahren wird zum Beispiel bei der Bestimmung des Widerstands von Dehnmessstreifen verwendet. Aus den Gleichungen des Stromkreises ergibt sich für die gemessene Spannung U_{AB} :

$$U_{AB} = \frac{U_0}{4} * \frac{\Delta R}{R}$$

$$\Delta R = \frac{4 * U_{AB}}{U_0} * R$$

$$\Delta R + R = \left[\frac{4 * U_{AB}}{U_0} + 1 \right] * R$$

[18] S. 132

4.5.3 Digitalmikrometer opto CONTROL 1202-100

Bei dem Laser Mikrometer handelt es sich um einen hochauflösenden CCD-Zeilendetektor mit integriertem Controller. Das Messsystem besteht aus einem Empfänger- und einem Sendergerät. Die Elektronik ist im Empfängergerät eingebaut. Ein Lichtstrahl in Laserform wird von der Lichtquelle zum Empfänger gesendet. Der Messabstand zwischen Sender und Empfängergerät kann zwischen 20 mm und 2000 mm gewählt werden. Der vertikale Messbereich ist 98mm groß. Die Messrate beträgt 400 Hz und die Auflösung <math> < 8 \mu\text{m}</math>.

Das Messgerät bietet mehrere Messmodi, die je nach Anwendungsbereich ausgewählt werden können. Bei der Anwendung hier handelt es sich um eine Positionsmessung, daher ist der Messmodus Kante der richtige für die Messung. Die hohe Messauflösung von $1 \mu\text{m}$ wirkt sich in der Messanwendung positiv auf die gesamte Messgenauigkeit aus, da die Messung Elastizität bzw. Dehnbarkeit messen soll. Die Linearität ist mit $\pm 10 \mu\text{m}$ angegeben. Linearität wird in der Messtechnik definiert als die Abweichung zwischen einer idealen und realen Kennlinie. Die Messdaten können digital sowie auch über einen analogen Ausgang ausgelesen werden. [19]

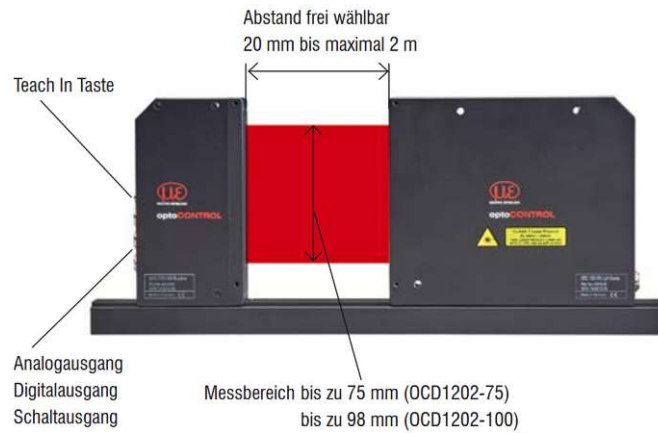


Abbildung 26 Digitalmikrometer [19] S.6

4.5.4 Hochpräzisions Laser-Mikrometer opto CONTROL 2500

Das Laser-Mikrometer ist ein laserbasiertes Mess-System mit integrierter hochauflösender CCD-Kamera. Das Mikrometer misst mittels des Schattenwurfprinzips die Lage von Körperkanten. Der Anwendungsbereich sind vorwiegend präzise Messungen bewegter Objekte. Beide Mikrometer sind durch die hohe Auflösung und präzise Messung speziell für die Erfassung bewegter Objekte geeignet.

Die Auflösung ist mit $1 \mu\text{m}$ sehr hoch. Sie ist höher als die des Digitalmikrometer 1202. Beide Messauflösungen sind für die Anwendung völlig genügend.

Der Messbereich des Laser-Mikrometers beträgt 34 mm . Die 34 mm sind gering bemessen. Das heißt es kann maximal eine Längenänderung von 34 mm messtechnisch erfasst werden. In Abhängigkeit der zu erwartenden Materialdehnung kann nur eine maximale Messlänge geprüft werden. Die Messrate ist $2,3 \text{ kHz}$ und die Linearität $\pm 10 \mu\text{m}$. [19]

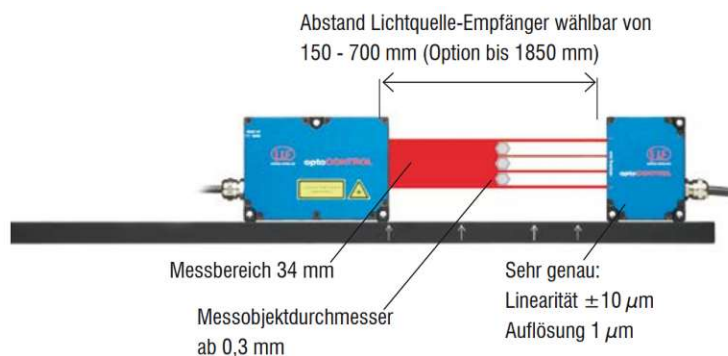


Abbildung 27 Laser-Mikrometer [19] S.10

4.6 Messtechnisch erfasste Daten

Es werden versuchstechnisch die folgenden Daten und Parameter erfasst:

- Elektrischer Widerstand über ein Messgerät
- Probenlänge über Laservorhänge
- Traversenweg über die Zugprüfmaschine
- Kraft über eine Kraftmessdose

Der elektrische Widerstand wird über den Hauptzylinder der Aufwicklung erfasst. Die Widerstände der zwei Zylinder aus Aluminium addieren sich dabei zum Widerstand des Probenmaterials hinzu. Das Material des Zylinders Aluminium mit geringem spezifischem Widerstand, bei gleichzeitig hohem Durchmesser des Zylinders ergibt nur einen geringen elektrischen Widerstand. Dieser addiert sich als systematischer Fehler zum Messergebnis hinzu.

Der fertige Messaufbau mit eingespannter Probe ist in Abbildung 28 zu sehen. Alle Versuchsparameter, die erfasst werden, sind hier zu sehen. Hinter der Versuchsprobe sind Markierungen aufgezeichnet. Die Markierungen oben und unten dienen jeweils als Anhaltspunkte, um die Störvolumen anzubringen, mit denen die Positionen erfasst werden. Die zwei Sensorpaare erfassen die Längenänderung bzw. die Dehnung der Probe. Die obere Aufnahme hängt direkt an der Kraftmessdose, welche die ausgeübte Kraft misst. Die Kraftmessdose hängt wiederum an der beweglichen Traverse. Über die Bewegung der Traverse, wird zusätzlich auch der Verfahrweg und damit die Längenänderung der Probe erfasst. Allerdings ohne Ausgleich von Rutschen am Zylinder.



Abbildung 28 Versuchsaufbau mit eingespannter Probe

4.7 Versuchsplanung

4.7.1 Versuchsvorgehen

- Messung der Längenänderung und damit der Dehnung
- Messung des ohmschen Widerstands der Probe, abhängig von der Längenänderung
- Aufzeichnen der Spannungs-Dehnungs-Kurve über die Kraft- und Längenmessung
- mehrere Messungen verschiedener Proben für statistisch signifikante Messergebnisse
- Festlegen einer einheitlichen Messlänge
- Maße der Sensoren sind festgelegt
- Kombinieren der erfassten Daten zu einem Messergebnis

Beschreibung des Versuchsvorgehens

Der montierte Versuchsaufbau (Profilgestell, Sensorplatten und Sensoren sowie die Probenaufnahme unten und oben sind in der Zugprüfmaschine zu befestigen. Das Gestell und die Probenaufnahme unten werden am Boden an der Maschine festgeschraubt. Die Sensorplatten werden horizontal an die vertikalen Profile montiert. Auf den Sensorplatten werden die Sensoren angeschraubt. Der Lichtstrahl der Sensoren verläuft daher auch vertikal und registriert eine horizontale Verschiebung der Probe. Beim Aufbau ist auf die Kabelführung und Kabellegung zu achten. Die Sensorkabel werden an den Profilen entlang nach unten gelegt. Die Probenaufnahme oben wird direkt an die Prüfmaschine geschraubt. Die Messgeräte selbst werden neben der Maschine platziert. Sie werden angeschlossen und mit den Sensoren verkabelt. Auch hier ist auf den richtigen Anschluss und die Kabellegung zu achten.

4.7.2 Grundbegriffe

Systemgrenzen Das System ist das zu untersuchende Gefüge. Die Grenzen dieses werden als Systemgrenzen definiert. Eingangsgrößen werden unterschieden, ob diese innerhalb des Systems oder außerhalb des Systems liegen. Eingangsgrößen im System können eingestellt bzw. optimiert werden. Eingangsgrößen außerhalb des Systems können nicht eingestellt bzw. optimiert werden.

Bei der Versuchsreihe zur Dehnungsmessung an der Zugprüfmaschine, stellt die Zugprüfmaschine die Systemgrenze dar. Alle Parameter außerhalb des Systems werden hier nicht weiter berücksichtigt.

Qualitätsmerkmal Ein Qualitätsmerkmal wird beschrieben als Grad der Funktionserfüllung eines Systems. Die Funktionserfüllung lässt sich qualitativ messen. Ist die Erfüllung positiv, lässt sie sich als Qualitätsmerkmal definieren. Qualitätsmerkmale müssen kontinuierliche Größen sein.

Die Qualitätsmerkmale der Proben sind gleichzeitig die Funktionen, welche die zu testenden Proben zu erfüllen haben. Hier wird die Probe auf die zwei physikalischen Größen elastische Dehnung und ohmscher Widerstand getestet. Die zwei Größen sind die geforderten Funktionen und damit auch Qualitätsmerkmale der Proben.

Parameter und Faktoren Die Menge aller Eingangsgrößen wird als Parameter bezeichnet. Nicht jeder Parameter wird im Versuchsplan variiert und systematisch getestet werden. Ein Parameter, der im Versuchsplan enthalten ist, wird als Faktor bezeichnet. Daher ist jeder Faktor ein Parameter, aber nicht jeder Parameter ein Faktor. Faktoren können im Versuchsverlauf variiert werden. Die übrigen Parameter sollen weitestgehend konstant gehalten werden.

Die Parameter, also die zu variierenden Faktoren, sind das Probenmaterial, sowie der Durchmesser der Proben. Diese zwei Faktoren werden vor der Versuchsdurchführung aktiv ausgewählt. Andere Faktoren sind die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Aufwicklung, der Bedieneinfluss und das Prüfprogramm der Maschine. Die Liste der Faktoren ist nicht vollständig und muss im Versuchsverlauf evaluiert werden.

Stufen sind die verschiedenen Einstellungen von Faktoren. Sie sind festgelegte Zustände für die Faktoreneinstellungen. Im frühen Versuchsstadium ist ein großer Stufenabstand auszuwählen. [20]

In den geplanten Versuchsreihen wird mit Proben bzw. Materialien von Lieferanten gearbeitet. Da die Proben in vorbestimmten Durchmessern gefertigt werden, werden die Parameter nicht unabhängig voneinander getestet.

Um die Proben unterschiedlicher Durchmesser miteinander vergleichbar zu machen, wird der gemessene ohmsche Widerstand mithilfe des Durchmessers auf den spezifischen Widerstand umgerechnet. Hierbei muss beachtet werden, dass sich der Durchmesser der Materialdehnung erhöht und der Widerstand dadurch größer wird.

Ein Messsystem unterliegt immer einer gewissen Fehlertoleranz. Die Fehlerursachen werden in zwei Fehlerklassen unterschieden. In systematische und zufällige Fehler.

Systematischer Fehler

Systematische Fehler sind insoweit definiert, dass die Ursachen bekannt sind. Dadurch kann dieser theoretisch kompensiert bzw. behoben werden.

Stochastischer Fehler

Stochastische oder auch zufällige Messfehler beschreiben die Streuung von Messergebnissen. Der stochastische Fehler tritt auf, wenn unter scheinbar gleichen Messbedingungen unterschiedliche Messwerte erfasst werden. Die Ursachen für die Streuung sind oft unbekannt oder von zu geringem Einfluss, um statistisch erfasst werden zu können. Als Konsequenz daraus wird die Anzahl an Messungen hoch genug gewählt, um die stochastischen Messunsicherheiten ausgleichen zu können. Ein Signal wird im technischen Umfeld als Zeitverlauf einer physikalischen Größe definiert. In der Messtechnik wird es als Messsignal bezeichnet. [21]

Störgrößen auf die Messergebnisse können zudem in innere und äußere Störgrößen unterschieden werden

Innere Störgrößen

Innere Störgrößen sind Störungen, die aus dem Messgerät selbst resultieren. Beispiele dafür sind Hysterese, Alterungseffekte oder falsche Justierung.

Äußere Störgrößen

Die äußeren Störgrößen sind Einflüsse, welche von außen auf das System einwirken. Typisch ist, dass die Störgrößen nicht direkt beeinflusst werden können. Beispiele sind Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Vibrationen der Umgebung, magnetische oder elektrische Felder der Umgebung. [22]

Als **Systemgrenze** wird hier die Zugprüfmaschine mit Messprobe sowie die Komponenten der Messeinrichtung definiert. Als Probenlänge wird die Länge 500 mm definiert. Die Probenlänge muss deutlich länger sein wie die Messlänge, da die Fäden auf die Aufnahme gewickelt werden. Die Messlänge, also die erfasste Länge durch die Laserschranken, wird mit 300 mm festgelegt.

Die **Versuchsanzahl** ist zwei. Jeder Versuch wird doppelt durchgeführt, um die Ergebnisse statistisch abzusichern. Eine höhere Versuchsanzahl ist aufgrund von begrenzten Ressourcen nicht vorgesehen.

Qualitätsmerkmale sind gleichzeitig auch die Messergebnisse des Versuchs. Darunter hauptsächlich der Widerstand, bzw. die Dehnbarkeit der Materialien.

Die **Parameter** der Messung sind die Eingangsgrößen. Einige können variiert werden, andere nicht. Einige sind relevant, andere wiederum nicht. Wichtige Parameter der Messung sind: Messlänge, Probenlänge, Durchmesser, Messprogramm, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Aufwicklung, Vorspannkraft sowie die Verfahrensgeschwindigkeit. Temperatur und Luftfeuchtigkeit haben vermutlich einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messergebnisse. Die Geschwindigkeit wird in den Bruchversuchen mit 100 mm/min definiert. Die Geschwindigkeit der Zyklusversuche wird mit 500mm/min definiert.

4.7.3 Versuchsparameter

Versuchslänge

Zur Berechnung der gesamten Probenlänge und der Versuchslänge (Abbildung 20) wird folgende Berechnung vorgenommen. Der Wicklungszylinder hat den Durchmesser 20mm → Umfang: 62,8mm. Fünf Aufwicklungen benötigen daher eine Probenlänge von 314mm plus zusätzlich 30mm für die Anbindung → 344mm. Wicklungslänge oben und unten ergibt: 688mm → aufgerundet circa 700mm. Die geringste verfügbare Probenlänge beträgt 5m → Die Messlänge wird mit 300mm angesetzt, Wicklungslänge + Probenlänge = 1000 mm.

Versuchsanzahl

Damit können Messungen mit der verfügbaren Probenlänge durchgeführt werden. Die Messsensorik hat einen Messbereich von 34mm(blau) und 98mm(schwarz). Da der maximale Messbereich bei 34 mm liegt, kann auch die maximale Dehnung, die messtechnisch erfasst werden kann nicht über 34mm liegen. Bei einer Versuchslänge von 300mm und einer Messlänge von 34mm können damit bei dieser Versuchslänge bis zu 10 % Dehnung getestet werden. Das Faserseil besteht aus UHMWPE Fasern. Diese sind mit einer Dehnung von 3,5% angegeben. Die Proben werden auf bis zu 10% Dehnung geprüft. Das entspricht dem dreifachen der auftretenden Dehnung in den UHMWPE-Fasern.

Damit ist die maximale Bruchdehnung der Faserseile mit einer Sicherheit von 3 bei den Proben abgedeckt.

Leitfähigkeit

Siehe dazu Kapitel 3.1.2

Elastische Dehnung

Siehe dazu Kapitel 3.1.1

Verformungsgeschwindigkeit

Die Norm definiert folgendes: „Eine Messprobe wird mithilfe einer geeigneten mechanischen Vorrichtung bis zum Bruch gedehnt, dabei werden die Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung aufgezeichnet. Es wird eine konstante Verformungsgeschwindigkeit von 100 % je Minute (bezogen auf die Ausgangslänge des Prüflings) verwendet, höhere oder niedrigere Geschwindigkeiten sind nach Vereinbarung zulässig. Es sind zwei Einspannlängen gestattet: üblicherweise 500 mm (mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 500 mm/min) und in Ausnahmefällen 250 mm (mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 250 mm/min).“ [23] S.7

Vorspannkraft

Um die Messproben zu spannen, wird an die Messprobe eine Vorspannung angelegt. Die Vorspannung ist für Polyester- und Polyamid Garne in Abhängigkeit der Feinheit so definiert: $(2,0 \pm 0,2)$ cN/tex

Proben	Vorspannkraft
Fasern 400 μ Monofil	0,4N
Fasern 117/17 HC +B	0,04 N
Fasern 117/17 2 HC +B	0,09 N
Fasern 117/17 2 HC + B TPU	0,9 N
Fasern 235/36 x2 HC + B	0,18 N
Fasern 235/36 x4 HC + B	0,37 N
Fasern 235/36 x6 HC + B	0,54 N
Steel-Tech 100 Tex 93	0,28 N
Silver-Tech 100 Tex 33	0,14 N
Silberdraht	3 N
Kupferdraht	3 N
Aluminiumdraht	3 N
Federstahldraht	3 N

Tabelle 3 Vorspannkraft der verschiedenen Probenmaterialien

4.7.4 Versuchsreihen

Das Vorgehen orientiert sich an unterschiedlichen Normen

1. Versuchsreihe „Dehnung bis Probenbruch“ orientiert an der Norm DIN 2062

Im Zugversuch werden unterschiedliche Sensoren verwendet und deren Daten ausgewertet. Um die Genauigkeit der Positionsmessung und der Widerstandsmessung sicherzustellen und somit eine höhere Datenqualität erreichen zu können, wird eine geringere Verformungsgeschwindigkeit von 100mm/min gewählt.

Anzahl der Versuche pro Probe: 2

Die erste Versuchsreihe orientiert sich an der Norm DIN 2062. Dabei wird die Probe nach Aufbringen einer Vorspannkraft (Tabelle 3) unter konstanter Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch gedehnt.

Versuchsziele: Mit dieser Messung sollen folgende Messergebnisse ermittelt werden: Bruchdehnung, Widerstand ungedehnt, Widerstand bei Bruchdehnung, Spannungs-Dehnungsdiagramm. [23]

2. Versuchsreihe „Zyklusversuche zwischen zwei definierten Dehngrenzen“ orientiert an der Norm DIN 53835 Teil 3

Anzahl der Zyklen: 250. Bei einer höheren Anzahl an Zyklen hat sich gezeigt, dass das Programm Probleme hinsichtlich der Datenspeicherung hat. Es wird vermutet, dass der maximale Speicherplatz des Prüfprogramms erreicht ist. Daher wird mit 250 Prüfzyklen getestet.

Obere Dehngrenze: 10% Dehnung bezogen auf die Ausgangslänge der Probe

Untere Dehngrenze: Wird bei 0,5% festgesetzt.

Versuchsziele: elastische Dehnung, Veränderung des Widerstands bei zyklischer Belastung, Relaxation im Zeitverlauf. [24]

3. Versuchsreihe „Dauerversuche über längere Zeit“

Bei der Prüfung im Dauerversuch wird auf eine vordefinierte Versuchslänge gedehnt und anschließend längere Zeit gewartet. Anzunehmen ist, dass die Dehnung und die Kraft über die Zeit geringer werden. Kriechen des Materials setzt ein. Versuchsziele: Kriechverhalten, Dehnungsabnahme, Kraftabnahme

4.8 Versuchsdurchführung

Zuerst wird die Versuchsreihe „Dehnung bis Probenbruch“ mit allen Proben jeweils zweimal durchgeführt. Danach soll bereits ein Zwischenfazit bezüglich der Eignung gezogen werden. Die vielversprechenderen Proben werden dann Zyklusversuchen zwischen zwei Dehngrenzen unterzogen. Diese Versuchsreihen sind zeitlich aufwändiger, daher werden nur die vielversprechenderen Messproben weiter getestet. Als obere Dehngrenze wird hier 10% gewählt. Um zu vermeiden, dass die Probe durchhängt, wird das Erreichen der Vorspannkraft als die untere Dehngrenze definiert. Im zweiten Teil der Versuchsreihe werden die Fäden auf 20% gedehnt. Die untere Grenze ist wieder die Vorspannkraft. Für die Durchführung des zweiten Teils der Versuchsreihe werden wieder

Proben ausgewählt. Der dritte Teil der Versuchsreihe untersucht Kriechen und das Materialverhalten bei längerer Zeit unter Zugbelastung.

Num.		Art	Messfehler	Anmerkung
V1.01	Fasern 117/17 x2 HC +B	Bruch		
V1.02	Fasern 117/17 x2 HC +B	Bruch		
V1.03	Silver-Tech 100 Tex 33	Bruch		
V1.04	Silver-Tech 100 Tex 33	Bruch		
V1.05	Steel-Tech 100 Tex 93	Bruch		
V1.06	Steel-Tech 100 Tex 93	Bruch		
V1.07	Silberdraht	Bruch		
V1.08	Silberdraht	Bruch		
V1.09	Kupferdraht	Bruch		
V1.10	Kupferdraht	Bruch		
V1.11	Aluminiumdraht	Bruch	1	
V1.12	Aluminiumdraht	Bruch	1	
V1.13	Federstahldraht	Bruch	1	
V1.14	Federstahldraht	Bruch	1	
V1.15	Fasern 117/17 HC +B	Bruch	2	
V1.16	Fasern 117/17 HC +B	Bruch		
V1.17	Fasern 400µm Monofil	Bruch	2	
V1.18	Fasern 400µm Monofil	Bruch	2	
V1.19	Faser 235/17 HC + B x2	Bruch	3	
V1.20	Faser 235/17 HC + B x2	Bruch	2	
V1.21	Faser 235/17 HC + B x4	Bruch	3	
V1.22	Faser 235/17 HC + B x4	Bruch	3	
V1.23	Faser 235/17 HC + B x6	Bruch		
V1.24	Faser 235/17 HC + B x6	Bruch		
V2.01	Steel-Tech 100 Tex 93	Zyklus bis 10%	1	
V2.02	Steel-Tech 100 Tex 93	Zyklus bis 10%	1	
V2.03	Silberdraht	Zyklus bis 10%		
V2.04	Faser 235/17 HC + B x6	Zyklus bis 10%		A
V2.05	Faser 235/17 HC + B x6	Zyklus bis 10%	4	A
V2.06	Steeltech	Zyklus bis 10%		
V2.07	Silvertch	Zyklus bis 10%	5	
V2.08	Silvertch	Zyklus bis 10%	5	
V2.09	Fasern 117/17 2 HC +B	Zyklus bis 10%	5	
V2.10	Fasern 117/17 2 HC +B	Zyklus bis 10%	5	B
V2.11	Fasern 117/17 2 HC +B	Zyklus bis 10%	5	B
V2.12	Faser 235/17 HC + B x2	Zyklus bis 10%	5	
V2.13	Faser 235/17 HC +B x6	Zyklus bis 10%	5	
V2.14	Faser 235/17 HC +B x2	Zyklus bis 10%	5	
V2.15	Federstahldraht	Zyklus bis 10%	5	
V2.16	Silvertch	Zyklus bis 10%		
V2.17	Elastomer AGGL	Zyklus bis 10%	6	
V2.18	Elastomer AGAL	Zyklus bis 10%	6	
V2.19	Elastomer AGAL	Zyklus bis 10%	6	
V2.20	Elastomer AGNIC	Zyklus bis 10%		
V2.21	Elastomer AGCU	Zyklus bis 10%	6	
V2.22	Elastomer AGNIC	Zyklus bis 20%		
V2.23	Silvertch	Zyklus bis 20%		
V2.24	Faser 117/17 HC + B x6	Zyklus bis 20%		
V2.25	Faser 235/17 HC + B x6	Zyklus bis 20%		
V3.01	Faser 235/17 HC + B x6	Zeit		
V3.02	Faser 235/17 HC + B x6	Zeit		

Tabelle 4 Gesamter Versuchsplan

Hier werden Fehler und Anmerkungen aus Tabelle 4 erklärt:

Messfehler, bzw. Unregelmäßigkeiten bei der Messung:

Fehler 1: Die Messprobe ist direkt an der Aufwicklung, entweder ganz unten oder oben gebrochen. Siehe Bild in Abbildung 35.

Fehler 2: Das Messvolumen ist verrutscht oder die Position wird durch Außeneinwirkung verändert.

Fehler 3: Das Messvolumen hat sich aus dem Messbereich des Lichtsensors herausbewegt.

Fehler 4: Bei längerer Messung steigt die erfasste Datenmenge enorm. Das Prüfprogramm von Zwick® scheint Probleme zu haben. Nach circa 250 Zyklen wird die Messfrequenz vom Programm verringert. Die Datenqualität leidet. In Abbildung 51 sind die Messlücken in den späten Zyklen deutlich in den zwei rechten Diagrammen zu sehen.

Fehler 5: Der untere Sensor der zwei Optocontrol Lichtschranken hat bei diesen Messungen nicht funktioniert. Er hat den Wert null angezeigt. Die untere Verschiebung des Messvolumens wurde also nicht erfasst. Allerdings werden die Daten trotzdem verwendet. Die Länge des Fadens von der unteren Aufwicklung bis zum ersten Messpunkt ist 50 mm. Bei der Dehnung von 10 % berechnet ergibt sich eine zusätzliche Messunsicherheit von ± 5 mm. Die Messung wird dadurch ungenauer. Die absoluten Messergebnisse werden trotzdem verwendet.

Fehler 6: Die Widerstandsmessung liefert keine plausiblen Messwerte bei diesen Proben. Mehrere Ankontaktierungen wurden durchgeführt. Die Messung mit dem Multimeter bestätigt das Problem. Daher wird die Schlussfolgerung gezogen, dass das Problem an den Materialien der Elastomere liegt. Nur das dehnbare Elastomer mit dem Füllstoff Nickel liefert brauchbare Messergebnisse. Das ist ein weiteres Indiz, dass das Problem nicht am Messsystem liegt.

Anmerkungen zur Messung:

Anmerkung A: Die Probe wurde nach dem Versuch eingespannt gelassen. Die Entwicklung des Widerstands mit der Zeit wurde beobachtet.

Anmerkung B: Verwendung der gleichen Probe für zwei Messungen.

5 Ergebnisauswertung

5.1 Datenbehandlung

Für die Auswertung der Daten sind die Rohdaten nicht immer direkt geeignet. Einige Daten enthalten Messfehler. Die Messfehler sind unterschiedlicher Natur bzw. Ursprungs.

Die Messung der Messlänge und des Widerstands werden über externe Sensoren, also nicht über die Zugprüfmaschine selbst realisiert. Diese Messwerte sind fehleranfälliger, verglichen mit den Messwerten, welche die Zugprüfmaschine ausgibt. Einerseits, weil es mehrere Schnittstellen zwischen Sensor, Messverstärker und Messprogramm gibt, zum anderen, weil bei vorgefertigten und ausgereiften Messsystemen wie bei der Zugprüfmaschine von höherer Verlässlichkeit ausgegangen werden kann, im Vergleich mit selbst konfigurierten Messsystemen. Messfehler können verschiedene Gründe haben:

- Kontaktierung zwischen Probe und Zylinder
- Kontaktierung zwischen Zylinder und Messkabel
- Messgerät intern
- Kabel
- Aufzeichnung im Programm

5.1.1 Glättung mit gleitendem Durchschnitt

Besonders häufig sind Ausreiser aufgetreten. Die häufigste Ursache für die Ausreiser war ein Herausschwingen des Messobjekts aus dem Messbereich. Das resultiert in auftretenden Messfehlern.

Um die Messfehler zu bereinigen und damit die Darstellung der realen Messwerte zu verbessern, wird der gleitende Durchschnitt zur Glättung verwendet. Hierbei wird der gleitende Durchschnittswert aus einem Fenster (n-Werte) von Messwerten um den zu glättenden Messwert gebildet. Das Verfahren ähnelt dem FIR-Passfilter in der Signaltechnik. Um größere Abweichungen herauszufiltern, werden stark vom Mittelwert abweichende Messwerte herausgefiltert. Ob ein Messwert stark abweicht, wird mit einem Kriterium geklärt. Das Kriterium berechnet sich folgendermaßen:

$$\text{abs}[x - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t)] > \sigma^* w$$

Mit n =Messwerte im Fenster, i =Laufvariable, σ =Standardabweichung und w =Gewicht.

Ein gefilterter Messwert wird in diesem Fall nicht durch einen Durchschnittswert ersetzt, sondern bleibt leer. Abhängig von der Höhe der Abweichung. In der Abbildung 29 ist ein Diagramm dargestellt, in dem der gleitende Durchschnitt angewendet wurde:

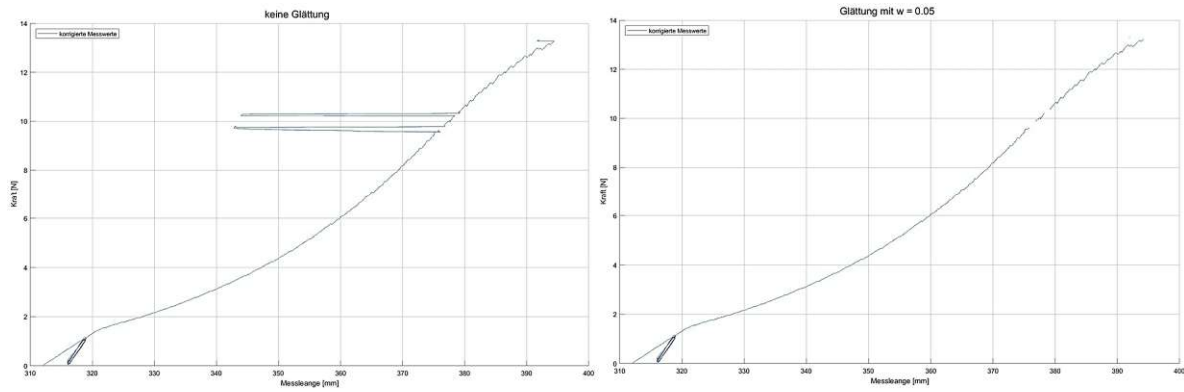


Abbildung 29 Glättung der Messwerte mit gleitendem Durchschnitt

Die Abbildung 29 zeigt links die Rohdaten einer Messreihe und rechts die Messdaten nach dem Filter mit gleitender Durchschnittsglättung. Hier wurde mit einem Gewicht von $w=0,05$ geglättet. Der Bandpassfilter wird nicht auf alle Messreihen angewendet. Wenn sich ein Messfehler deutlich zeigt, wird die Glättung mittels Bandpassfilter angewendet. Das Gewicht wird variabel auf den Bedarf der aktuellen Messdaten angepasst.

5.1.2 Änderung der Messdaten mit Offset

Ein Offset ist ein konstanter Wert zur Berichtigung von Daten. Bei zwei Messzyklen wurde der Messkörper manuell während der Messung verschoben, um ein Austreten aus dem Messbereich zu verhindern. Dadurch ergibt sich eine Verschiebung der Messwerte um einen absoluten Wert. Die Verschiebung ist als annähernd horizontale Gerade zu erkennen. Mit einem Offset wurden die Daten korrigiert. Dadurch wird die Darstellung verständlicher. [Achsenskalierung ist unterschiedlich in beiden Abbildungen]

Beispielsweise links unbereinigt und rechts bereinigt.

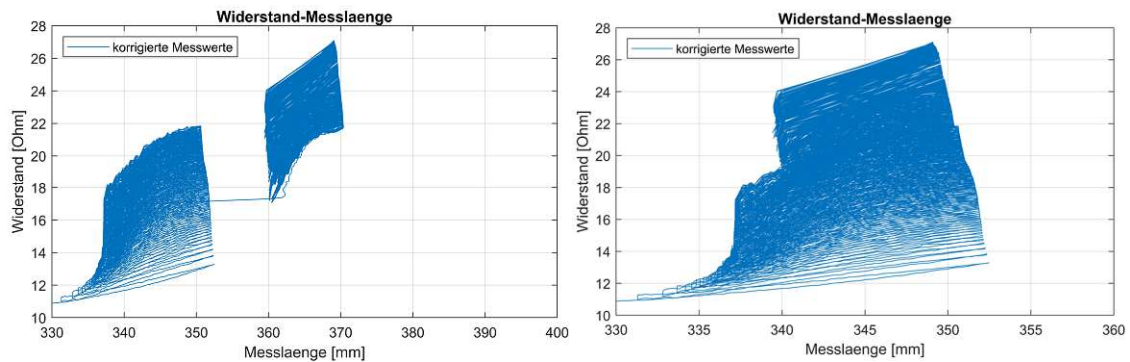


Abbildung 30 Datenbereinigung mit Offset

5.2 Ergebnisse der metallischen Werkstoffe

Metallische Werkstoffe sind durch das innere Elektronengas naturgemäß sehr leitfähig. Die Messung des Widerstands hat hier nachrangigen Charakter, da die spezifischen Widerstände von Metallen aus der Literatur bekannt sind. Die Widerstände der ausgewählten Metalle werden als ausreichend bewertet. Geprüft werden die Werkstoffe: Silber, Kupfer, Aluminium und Stahl. Die gesamte Bruchdehnung eines Werkstoffs besteht aus der elastischen und plastischen Dehnung. In diesem Versuch soll außerdem das Verhältnis der zwei Dehnungen zueinander bestimmt werden. Relevant ist vor allem die elastische Dehnung. Plastische Verformung ist bei der Anwendung im Inneren von Faserseilen nicht erwünscht. Die relevanten Parameter bei den Messungen der Metalle sind die Bruchkraft und die elastische Dehnung der Metalle. Dafür werden die Metalle in den Versuchen von der Ausgangslage bis zum Bruch gedehnt. Vorher wird eine Vorspannphase mit kleinen Spannungs- und Entspannungszyklen angelegt. Um die Metalle vergleichbar zu machen, wird die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung verglichen:

Silber: 23N bei 0,4mm Ø: $143,75 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Kupfer: 56 N bei 0,4mm Ø: $350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Aluminium: 66 N bei 1mm Ø: $66 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Federstahldraht: 495 N bei 0,5mm Ø: $1980 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Die Zugfestigkeiten der Metalle weichen stark voneinander ab. Die größte Zugfestigkeit hat Stahl, gefolgt von Kupfer, Silber und Aluminium. Kupfer, Silber und Aluminium sind typische weiche Materialien. Der Bruch wird deswegen schon bei geringeren Kräften einsetzen.

5.2.1 Silber

In der Abbildung 31 ist das Kraft/Verlängerungsdiagramm von Silberdraht zu sehen. Aus diesem kann ein Spannungs-/Dehnungsdiagramm abgeleitet werden. Da während des Versuchs große Ausreißer bei der erfassten Messlänge aufgetreten sind, werden die Daten mit gleitender Mittelwerts-Glättung behandelt. Dargestellt werden die Ergebnisse von zwei Versuchen, bei denen die Drähte belastet werden. Die Belastung wird von der Vorspannung bis zum Bruch angebracht. Zu Beginn steigt die Kurve stark an. D.h. die aufgebrachte Kraft nimmt stark zu, bei gleichzeitig wenig ansteigender Verlängerung. Die Gerade ist die Hooke'sche Gerade. In diesem Bereich wird die Probe elastisch reversibel gedehnt. Nach dem elastischen Bereich flacht die Kurve stark ab und nähert sich einer Horizontalen an. Bei nur geringer Kraftsteigerung dehnt sich die Probe danach stark. Das ist der plastische Bereich. Hier beginnen atomare Gleitbewegungen im metallischen Kristallgitter. Bereits hier zeigt sich, dass die plastische Dehnung die elastische Dehnung stark überwiegt. Das Dehnungsverhältnis ist gering.

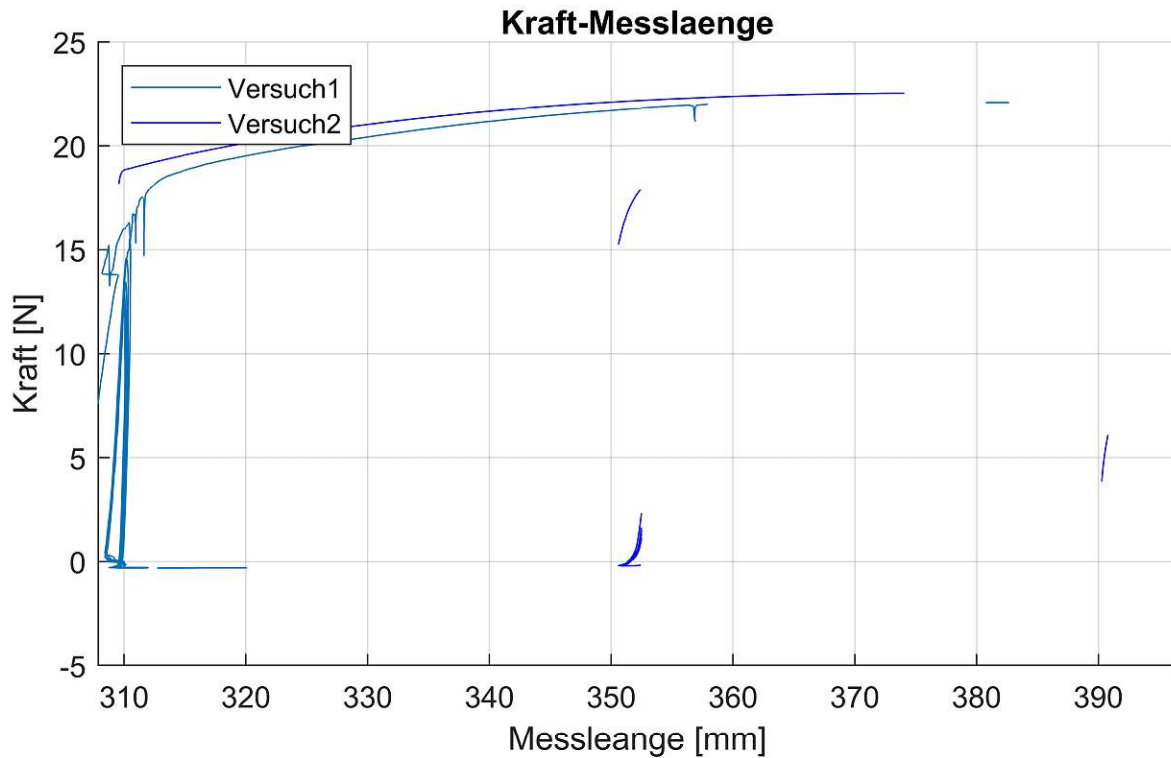


Abbildung 31 Kraft-Längen-Diagramm von Silberdraht

In einem zweiten Versuch wurde die Silberdrahtprobe zyklisch belastet und entlastet. Die obere Belastung wird mit 10% angesetzt. Für die untere Grenze der Belastung ist die Vorspannkraft definiert. Die Probe wird also nahezu komplett entlastet. Das Versuchsschema dient dazu, die elastische Dehnung zu ermitteln. Nach der Entlastung zieht sich die Probe wieder zusammen. Abbildung 32 zeigt die Belastungszyklen. Die Probe zieht sich um circa 8 mm zurück. Die elastische Dehnung ist 2,6 % der Gesamtlänge.

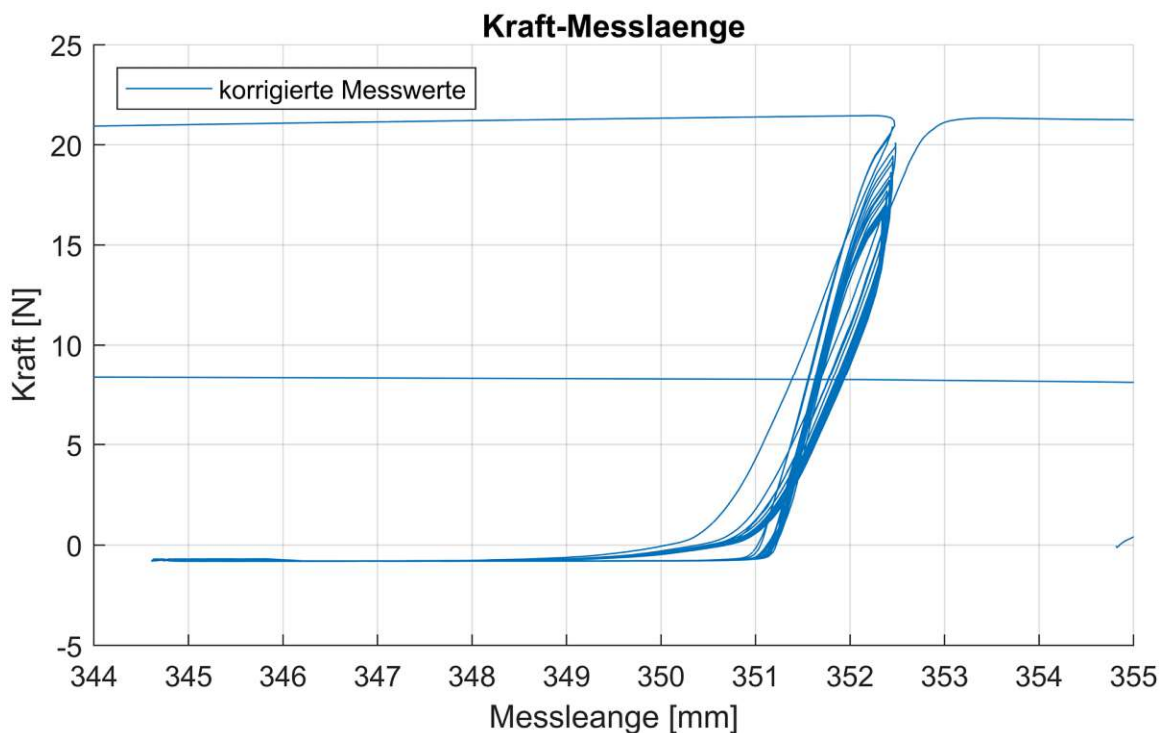


Abbildung 32 Kraft-Längen-Diagramm: Elastische Dehnbarkeit von Silberdraht

5.2.2 Kupfer

Die Kupferdrähte in der Abbildung 33, wurden mit dem gleichen Versuchsschema wie die Silberdrähte geprüft. Die Darstellung ist ebenfalls ein Kraft-Verlängerungsdiagramm. Ähnlich wie bei den Prüfversuchen von Silberdraht steigt die Messkurve zu Beginn stark an. Der steile Anstieg ist die elastische Dehnung. Der weitere flache Anstieg ist die plastische Dehnung. Die Proben brechen bei 342 mm, also einer Bruchdehnung von 14 %. Die Bruchdehnung hier weicht sehr von Werten aus der Literatur ab. Eine Begründung kann Kaltverfestigung des Metalls sein. Mit steigender Kaltverfestigung sinkt die Bruchdehnung des Metalls. Die Zugfestigkeit von Kupfer ist mit $350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ doppelt so hoch wie die von Silber.

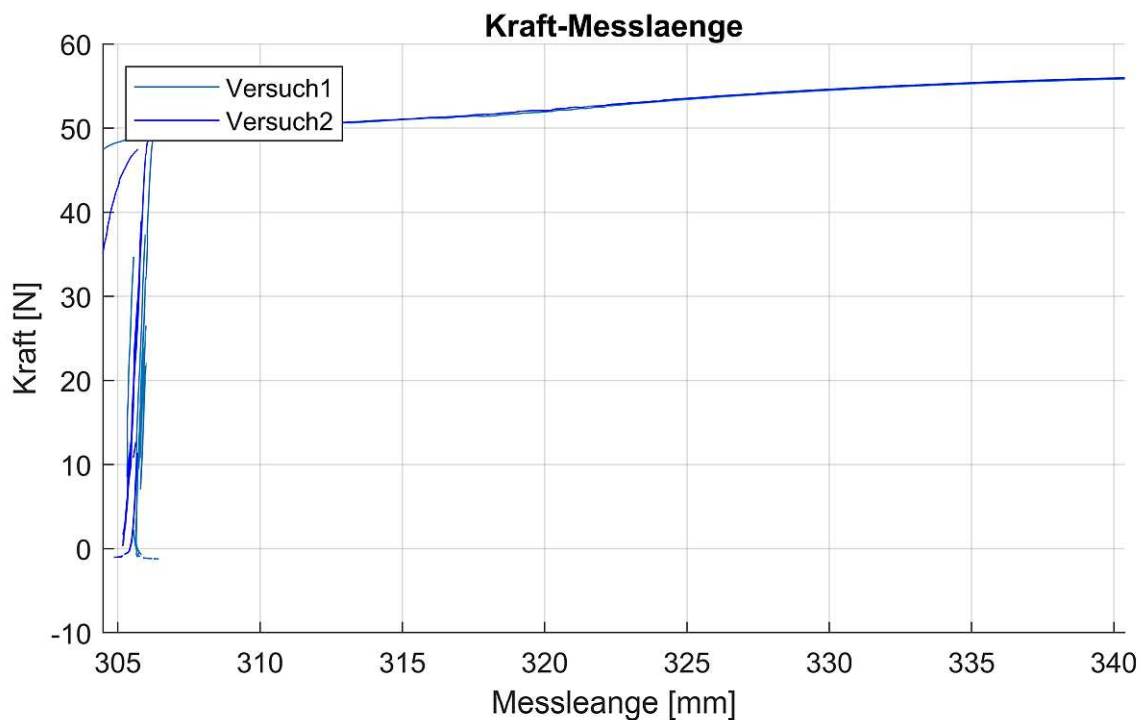


Abbildung 33 Kraft-Längen-Diagramm von Kupferdraht

5.2.3 Aluminium

Die Versuche von Aluminium zeigen, dass Aluminium als sehr weiches Metall, die geringste Zugfestigkeit der geprüften Metalle mit $66 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ aufweist. Der qualitative Verlauf der Messkurve ähnelt dem von Kupfer und Silber sehr stark. Die Bruchdehnung von Aluminium beträgt 22,3 %.

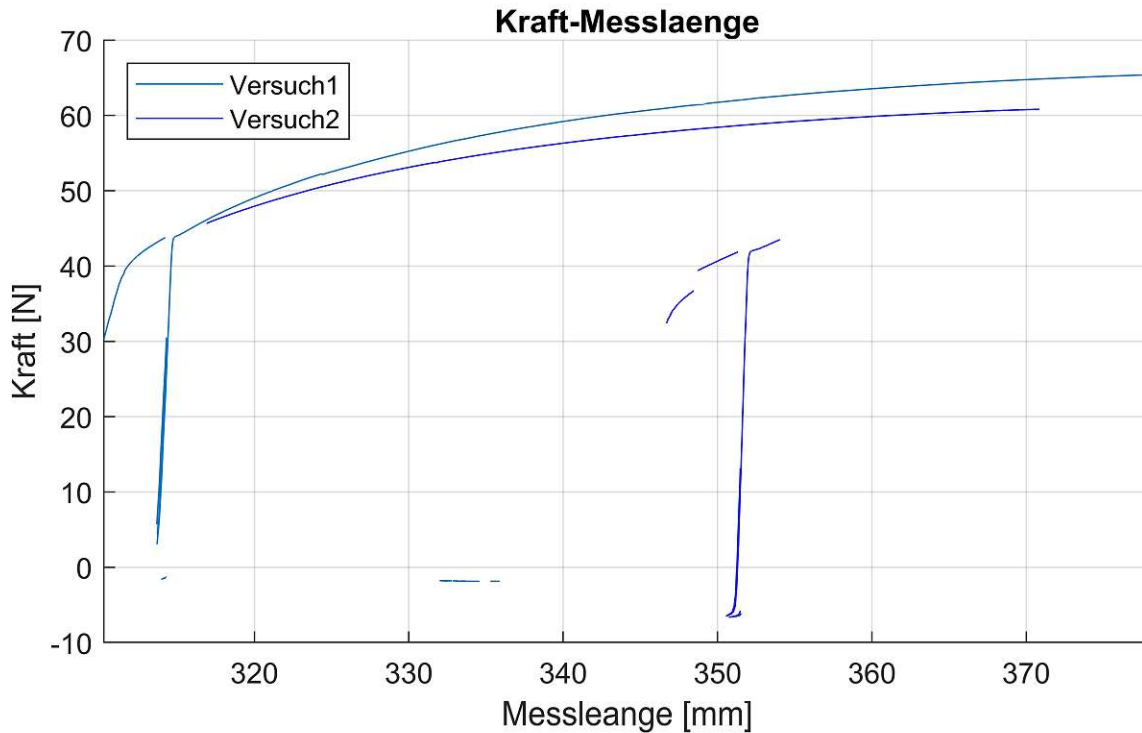


Abbildung 34 Kraft-Längen-Diagramm von Aluminiumdraht

In der ersten Versuchsreihe werden die Materialien bis zum Bruch belastet. Ein interessanter Punkt ist daher der, an dem der Bruch der Probe auftritt. Bricht die Probe mittig zwischen den zwei Einspannungen, dann hat die Kraftübertragung zwischen den Proben gut funktioniert. Abbildung 35 zeigt eine aufgewickelte Messprobe nach dem Bruchversuch. Die Probe ist bei der dritten Wicklung gebrochen. Hier ist die Probe direkt am Zylinder gebrochen. Wenn der Bruch direkt an der Rille des Zylinders auftritt, dann war die meistbelastete Stelle hier. Es wird davon ausgegangen, dass der Zylinder die Probe geschwächt hat. Der Bruch an einer Zylinderstelle ist eine Indikation auf eine Schwachstelle. Versuchstechnisch und statistisch ist das zu vermeiden. Eine Probenschwächung kann die Messergebnisse verändern und macht sie schlechter vergleichbar.



Abbildung 35 Bruch einer Aluminiumprobe direkt am oberen Wicklungszyylinder

5.2.4 Federstahl

Der Verlauf der Kurve im Kraft-Verlängerungsdiagramm von Federstahldraht unterscheidet sich von denen der anderen Messungen. Die Messkurve steigt geradlinig an, und flacht kurz vor Bruch ab. Auffallend ist, dass die Bruchdehnung deutlich geringer ausfällt, verglichen mit den anderen getesteten Metallen. Der Bruch von Federstahl tritt deutlich früher ein, genauer bei 3,6 % Bruchdehnung. Auch hier wird die Kaltverfestigung als Ursache für die vergleichbar geringe Bruchdehnung angenommen.

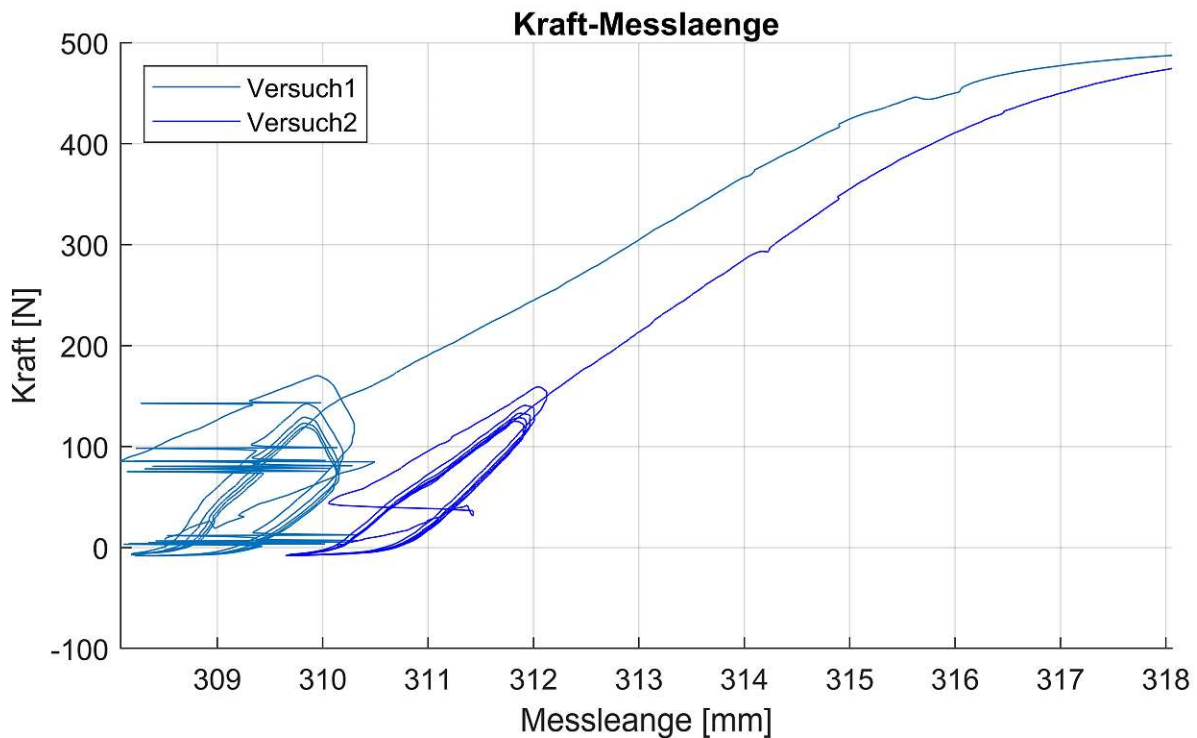


Abbildung 36 Kraft-Längen-Diagramm von Federstahldraht

5.2.5 Fazit metallische Werkstoffe

Nach der Auswertung der Versuche mit den metallischen Werkstoffen kann eine Schlussfolgerung gezogen werden. Alle Metalle haben in der Messung eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit von maximale 2 Ohm pro Meter. Nur Aluminium erreicht bei der Vordehnung Werte von über 20 Ohm, pendelt sich aber dann auch konstant unter 2 Ohm/m ein. Die Bruchdehnung von Silber und Aluminium ist bei beiden Metallen über 20% ausreichend. Auch die Bruchdehnung von Kupfer ist mit 12 % ausreichend. Der geprüfte Federstahldraht bricht zu schnell. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Leitfähigkeit aller Metalle und die Bruchdehnung der Metalle Silber, Kupfer und Aluminium für die technische Nutzung in einem Faserseil geeignet ist. Die elastische Dehnung ist allerdings deutlich geringer als die Bruchdehnung. Für Silber ist der Wert 2,6 % ermittelt worden. Für Aluminium und Kupfer werden ähnliche Werte angenommen. Da der große Teil der Bruchdehnung aus plastischer Dehnung besteht, tritt eine irreversible Dehnung und damit Beschädigung der Drähte ein.

Für die geplante Anwendung in einem Kranseil ist folgendes zu beachten. Wenn sich das Kranseil im Betrieb dehnt und die elastische Dehngrenze der innen verlegten Leiter (Proben) mit dehnt, dann kommt es zu irreversibler Verformung der Leiter. Hier tritt das Problem auf, dass bei Entspannung des Faserseils eine Aufwölbung der Leitung entsteht,

da sich die Probe nicht mehr in die Ausgangsposition zurück entspannt. Durch die Aufwölbung wird das Verhalten der Probe bei weiteren Lastzyklen schwer kalkulierbar. Die Aufrechterhaltung der Leitfähigkeit bis zum Bruch wurde messtechnisch nachgewiesen. Hinsichtlich dieses Aspekts ist die plastische Verformung unkritisch. Will man die Metalle als Leiter innerhalb der Kranseile verwenden, bleibt durch die potenzielle plastische Verformung ein Unsicherheitsrisiko bestehen. Allerdings sind das weitere Werkstoffverhalten sowie das Verformungsverhalten nach einer plastischen Verformung schwer kalkulierbar.

	Maximaler Widerstand [Ohm]	Minimaler Widerstand [Ohm]	Bruchdehnung [%]	Elastische Dehnung [%]	Zugfestigkeit [$\frac{N}{mm^2}$]
Silber	1,3	0,8	29,3	2,61	143,75
Kupfer	1,95	1,5	12,1	-	350
Aluminium	20,5	0,6	21,3	-	66
Federstahl draht	2,1	1,7	3,6	-	1980

Tabelle 5 Messwerte der metallischen Werkstoffe

5.3 Ergebnisse der Fäden Steeltech / Silverttech von Amann®

5.3.1 Silverttech

Die Garne mit dem Namen Silverttech sind Handelsprodukte der Firma Amann. Das leitfähige Garn Silverttech ist ein Hybridzwirn aus Polyamid und Polyester, mit einer Silberbeschichtung auf der Außenseite. Durch die Silberbeschichtung erhält das Garn seine Leitfähigkeit. Der Durchmesser von Silverttech ist 0,15 mm. Die Leitfähigkeit des Fadens wird ausschließlich durch die äußere Beschichtung erzeugt. Interessant ist die Frage, wie stark sich der Widerstand pro Dehnungszyklus erhöht. Zudem interessant ist die zeitliche Entwicklung des Widerstands bei zyklischer Belastung der Proben. Ein denkbares Problem kann eine sukzessiv brüchig werdende Silberschicht sein. Damit ginge ein steigender Widerstand mit einher. Zur Überprüfung wird ein Zyklusversuch durchgeführt. Zum anderen wird die elastische Dehnung sowie die Bruchdehnung der Proben bestimmt.

Davor wird zu Beginn ein Bruchversuch durchgeführt. Die Probe wird vorgedehnt. Die Vordehnung ist als Sägezahnmuster rechts unten als dreidimensionaler Plot in Abbildung 37 ersichtlich. Der Anfangswiderstand der Messproben ist circa 100 Ohm pro Messprobe. Das ergibt 200 Ohm/m. Für den Bruchversuch werden zwei Proben bis zum Bruch getestet. Während diesem Versuch ist das obere Messobjekt aus dem Messbereich ausgetreten. Der Austritt ist bei einer Längung von 22,3 % aufgetreten. Um trotzdem eine Abschätzung abzugeben, wurde die Anzahl der Messwerte vor und nach dem Austritt analysiert. Bei konstanter Verfahrensgeschwindigkeit der Traverse und der Annahme von konstanter Messfrequenz, kann eine Bruchdehnung von circa 36 % angenommen werden. Dieser Wert ist nicht über die Lichtschrankenmessung erfasst und dient als Anhaltswert. Im Diagramm ist zu sehen, dass der Anfangswiderstand mit steigender Dehnung ansteigt. Der Widerstand pro Zeit bzw. pro Messlänge steigt exponentiell an. Der maximal gemessene Widerstand im Faden ist 1200 Ohm. Der Grenzwert bei Dehnungen über 20 % wird in der Realität nicht auftreten, da das Faserseil vorher schon reißt. Eine wichtige

Erkenntnis ist, dass trotz der steigenden Dehnung bis zum Bruch immer eine elektrische Verbindung durch den Faden bestanden hat. Die Silberplattierung reißt also nie komplett ab. Stromfluss besteht bis zum Bruch des Fadens.

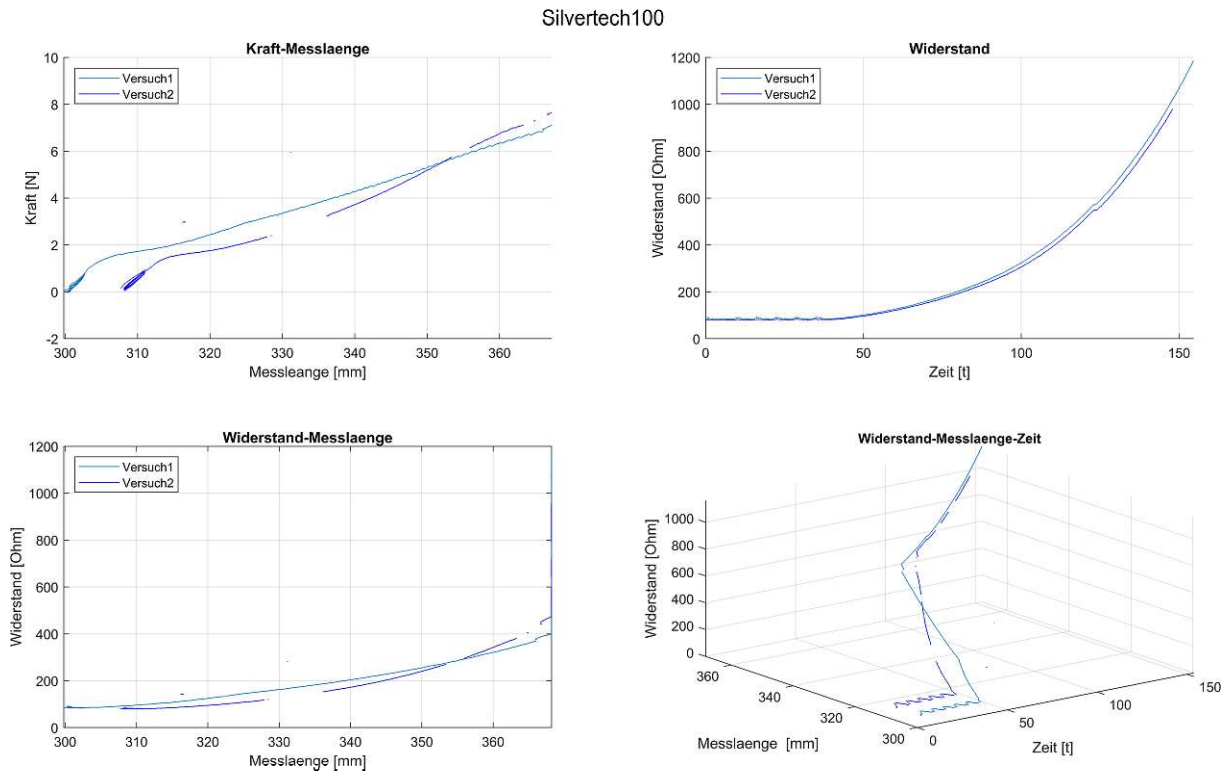


Abbildung 37 Bruchversuch von Silvertech

Um das genaue Verhalten des Widerstands über mehrere Lastzyklen hinweg analysieren zu können, werden die Fäden in Lastzyklen (circa 200) belastet und das Langzeitverhalten des Widerstands wird beobachtet. Die Versuche werden zuerst mit 10 % Dehnung und zum zweiten Mal mit 20 % Dehnung durchgeführt.

Der Test der Zyklusversuche soll extreme Ausnahmebedingungen simulieren, die in der Realität der Krantechnik vermutlich mit diesen Dehnungswerten nicht vorkommen werden. Die Ausnahmebedingungen sind Lastwechselzyklen im Bereich von 10% im Sekundenbereich, über 200 Zyklen hinweg. Damit sollen die Eventualitäten und Unwägbarkeiten in der Realität abgedeckt werden. Realistisch ist eine langsame Dehnung weniger Prozent über Stunden bzw. Tage hinweg und die anschließende Entlastung über ebenso längere Zeiträume.

Die gemessenen Werte mit diesen vier Diagrammen dargestellt:

- Kraft-Messlaenge
- Widerstand-Zeit
- Widerstand-Messlaenge
- Widerstand-Messlaenge-Zeit im 3D-Plot.

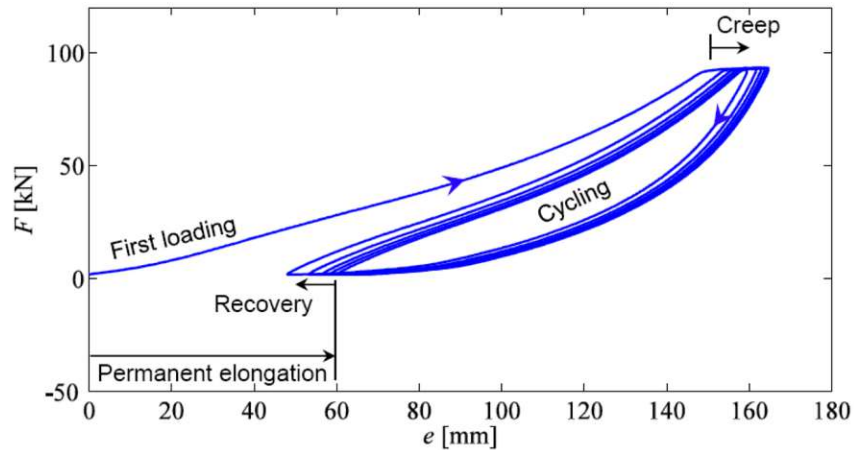


Abbildung 38 Zyklische Belastung eines Faserseils [6] S. 3

In der Abbildung 38 ist das Kraft-Verlängerung Diagramm bei zyklischer Zugbelastung eines Faserseils abgebildet. Die Messergebnisse bei zyklischer Beanspruchung der Messproben soll idealerweise qualitativ dem Diagramm in Abbildung 39 & Abbildung 40 entsprechen. Interessant ist, an welchen Stellen Kriechen und an welchen Stellen Erholung einsetzt. Kriechen setzt ein, wenn die maximale Last voll aufgebracht wurde. Die Probe dehnt sich noch weiter ohne weitere Erhöhung der Zugkraft. Wird die Last anschließend weggenommen, verringert sich die Dehnung wieder. Wenn die Kraft wieder 0 N erreicht, sinkt die Dehnung noch weiter, ohne dass die Kraft weiter sinkt. Der Vorgang wird als Erholung bezeichnet. In der Abbildung zeigt sich der Prozess als horizontale Gerade.

Wenn die Zuglast wieder beginnt, endet der erste Lastzyklus. In den Abbildungen unten, ist im linken oberen Plot jeweils ein Kraft-Verlängerungsdiagramm zu sehen. Die Probe wird auf 10 % (Abbildung 39) bzw. 20 % (Abbildung 40) gedehnt und zurück bis zur Vorkraft entlastet. Aus diesem Plot geht die elastische Dehnung bzw. das Dehnungsverhältnis hervor. Das Dehnungsverhältnis, also das Verhältnis zwischen elastischer und plastischer Dehnung ist 40%. Geht man von einer projizierten Dehnung von 32 % aus, dann wäre das ein elastischer Dehnungsanteil von 14,4 %. Im Plot rechts oben ist der zeitliche Verlauf des Widerstands optimal abgebildet. Die Kurve deutet ein beschränktes Wachstum an. Sie steigt zunächst stark an, das Wachstum steigt dann aber immer langsamer an. Ob sich die Kurve einem Grenzwert annähert, kann nach den 200 getesteten Zyklen noch nicht gesagt werden. Der Plot links unten zeigt das Verhalten des Widerstands pro Dehnung auf. Innerhalb eines Zyklus, also einer Dehnung von 10% steigt der Widerstand um circa 20 Ohm bis 30 Ohm an und fällt bei der Entlastung wieder ab. Die Entlastung führt aber nicht ganz zum Widerstand des Ausgangszustands. Mit jedem Zyklus erhöht sich der Widerstand leicht.

Nach den 200 Zyklen ist der Widerstand angestiegen. Von Beginn mit 170 Ohm nach dem ersten Zyklus, bis auf 240 Ohm am Ende des letzten Zyklus. Im Dauertest mit 20 % Dehnung steigt der Widerstand von 250 Ohm zu Beginn auf 380 Ohm am Ende an. Der Dauertest mit Belastung und Entlastung zeigt, dass der Widerstand sukzessive mit den Belastungszyklen zunimmt. Die Zeit eines Zyklus beträgt circa 6 Sekunden. Die Zeit wurde bewusst kurz gewählt, um die gesamte Versuchsdauer nicht zu sehr zu verlängern. In der Realität wird sich bei längerer Liegezeit zusätzlich eine zeitliche Entspannung des

Widerstands einstellen. Siehe dazu den Zeitversuch in weiteren Versuchen in Abbildung 52. [6]

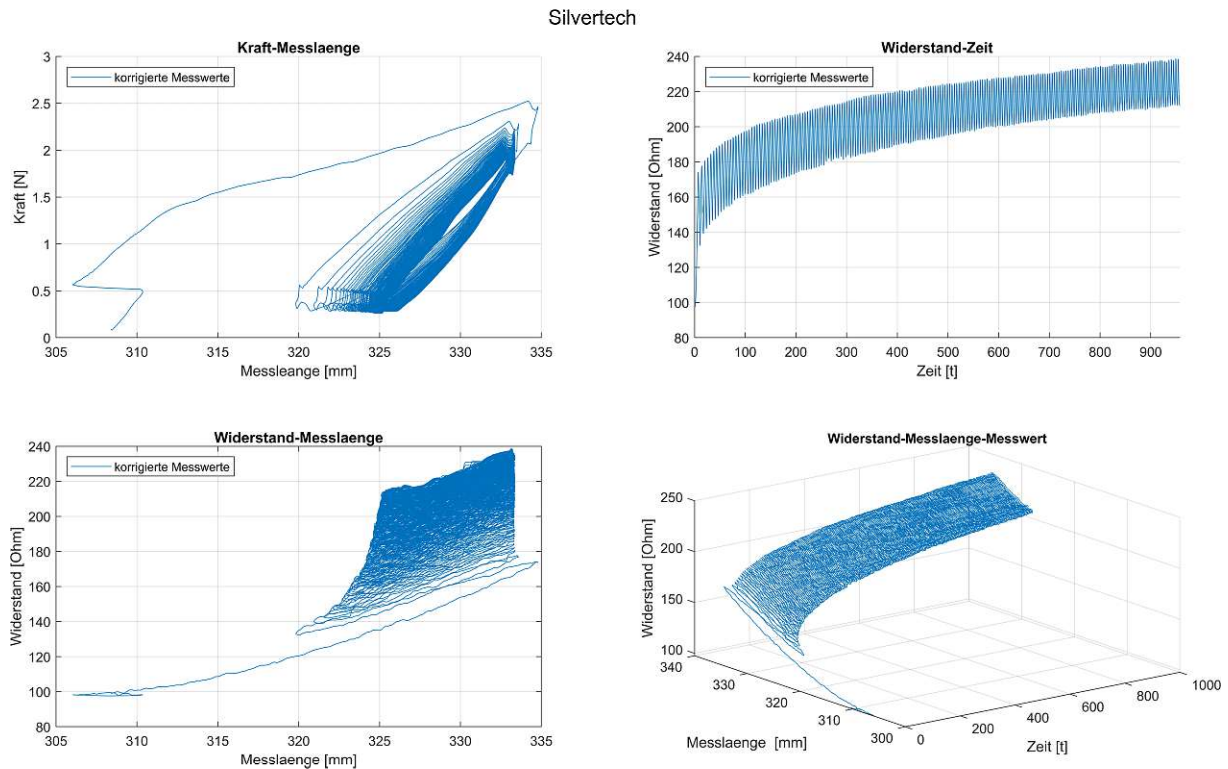


Abbildung 39 Zyklusversuch mit 10% Dehnung von Silvertech

Bei dem Zyklustest mit 20%iger Belastung in Abbildung 40 zeigt sich im Widerstand-Zeit Plot eine Schwankung der Widerstandsamplitude ab der Hälfte der Messzeit. Es wird davon ausgegangen, dass im Messprogramm ab hier keine freien Speicherkapazitäten mehr verfügbar sind und die Messfrequenz damit reduziert wurde. Wegen der reduzierten Messfrequenz ab der Hälfte der Messung wurde der Versuch nach circa 150 Zyklen abgebrochen. Zusammenfassend liegt der Grundwiderstand von Silvertech ohne Dehnung bei circa 180 Ohm/m. Der Widerstand steigt innerhalb eines Dehnzyklus um circa 5 Ohm pro Millimeter an.

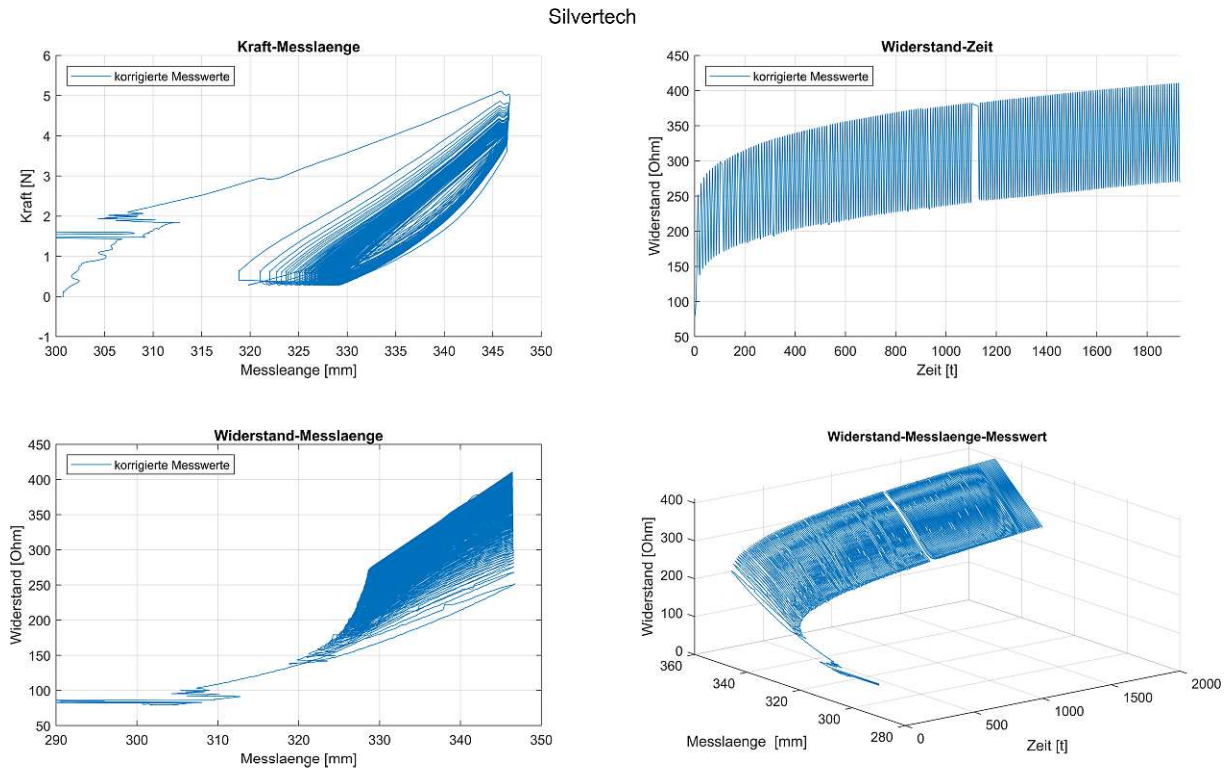


Abbildung 40 Zyklusversuch mit 20% Dehnung von Silvertech

5.3.2 Steeltech

Der zweite Faden mit Handelsnamen Steeltech der Firma Amann® ist auch ein leitfähiges Garn. Das Grundmaterial ist Polyester mit Edelstahlfasern im Garn. Durch den Edelstahl erhält das Garn seine Leitfähigkeit. Der Durchmesser von Steeltech ist 0,3 mm. Die Bruchkraft liegt mit Faktor vier über der von Silvertech. Unter Berücksichtigung des doppelten Durchmessers, bzw. des vierfachen Querschnitts, ergibt sich die Zugfestigkeit von circa 220 N/mm^2 . Circa die Hälfte der von Silvertech (413 N/mm^2). Die Bruchdehnung ist 14,2 %. Sie ist damit deutlich geringer, wie die Bruchdehnung von Silvertech mit 32%. Die geringere Bruchdehnung resultiert aus dem Anteil an Edelstahlfasern im Garn.

5 Ergebnisauswertung

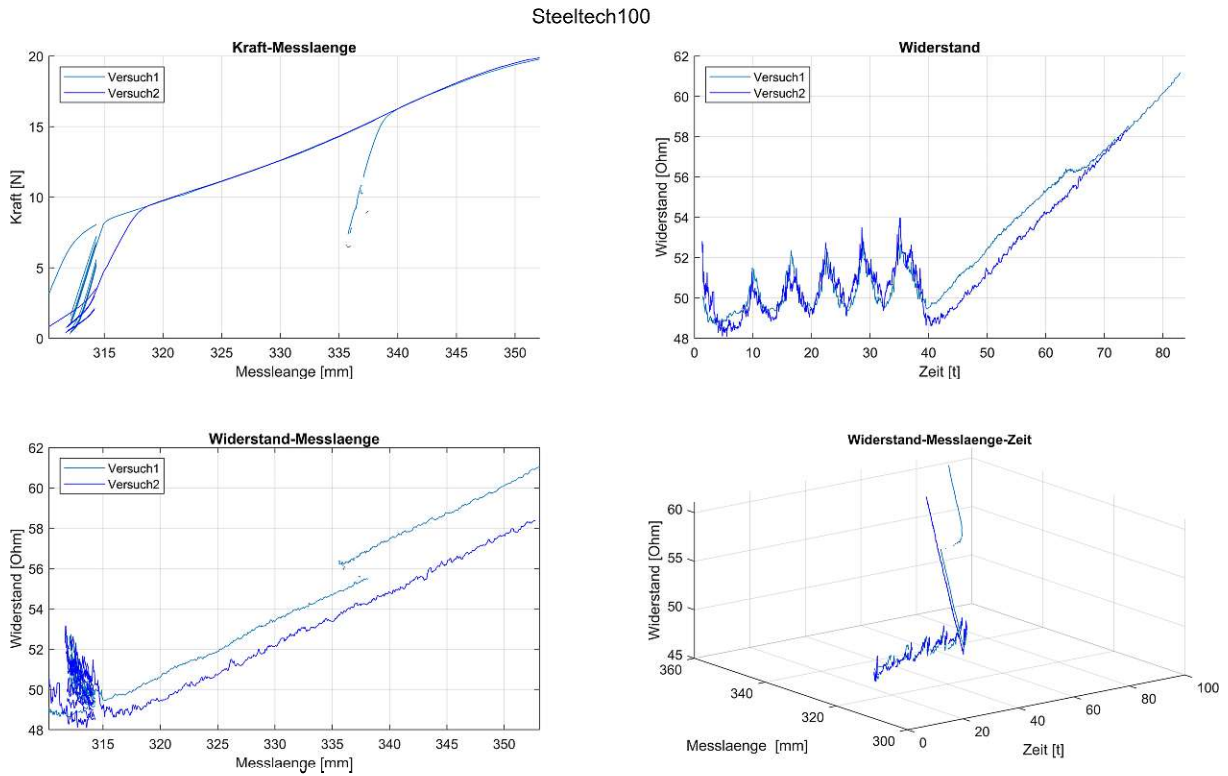


Abbildung 41 Bruchversuch von Steeltech

Im Zyklustest der Steeltech-Fasern, wurden die Fasern wieder mit einer 10%igen Last im Dauertest ausgesetzt. Das heißt, dass die Fasern mit 10% Dehnung beaufschlagt werden. Anschließend werden sie wieder entlastet bis zu dem Punkt, an dem die Vorkraft wirkt. Die Entlastung wird bewusst nicht beim Kraftpunkt 0 gewählt, da die Probe hier schon ungespannt ist. Geringe Dehnung soll im Versuch aufrechterhalten werden.

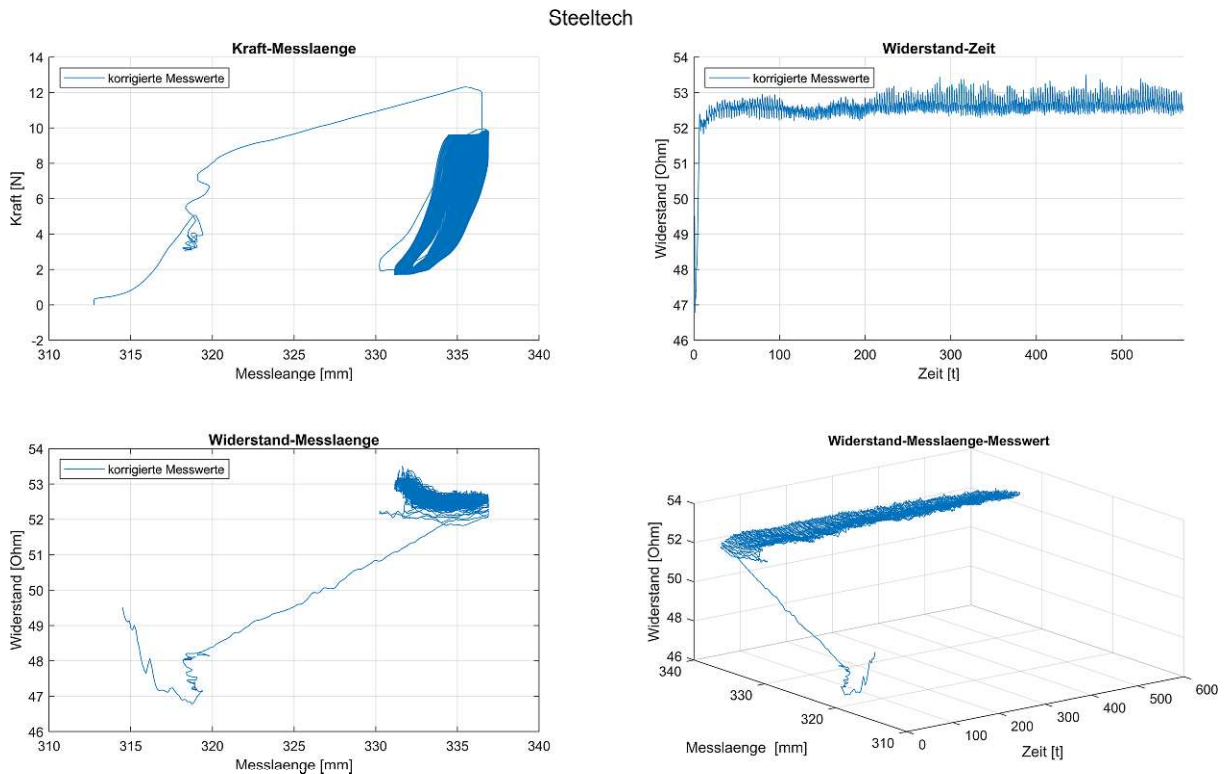


Abbildung 42 Zyklusversuch von Steeltech

Eine Erkenntnis ist, dass der Widerstand innerhalb eines Zyklus um circa 1 Ohm schwankt. Über die Messzyklen bzw. die Zeit hinweg, verhält sich der Widerstand konstant. Siehe im Plot Widerstand-Zeit in der Abbildung 42 oben. Die Kurve bewegt sich horizontal. Über die Versuchsdauer hinweg erhöht sich der Widerstand nicht. Die Entwicklung des Widerstands ist zeitkonstant. Das auffälligste Merkmal von Steeltech ist der geringe Anstieg des Widerstands über die gesamte Dehnung hinweg. Der Anfangswiderstand von 48 Ohm erhöht sich während des Bruchs auf circa 61 Ohm. Steeltech leitet den elektrischen Strom sehr konstant unter Zugbelastung. Der spezifische Widerstand, also der Widerstand pro Fläche von Steeltech ist im unbelasteten Zustand um den Faktor 2.2 höher im Vergleich mit Silverttech. Unbelastet leitet Silverttech also besser. Werden die beiden Fäden belastet, dann zeichnet sich ein anderes Bild ab. Der Widerstand von Steeltech steigt um 27 % bis zum Bruch bei 14,2 % Dehnung. Silverttech dagegen steigt um den Faktor 14 bis zum Fadenbruch bei 32 % Dehnung. In Abbildung 43 im rechten oberen Diagramm ist das deutlich zu sehen. Die Leitfähigkeit von Silverttech unter Zugbelastung ist deutlich schlechter als die Leitfähigkeit von Steeltech.

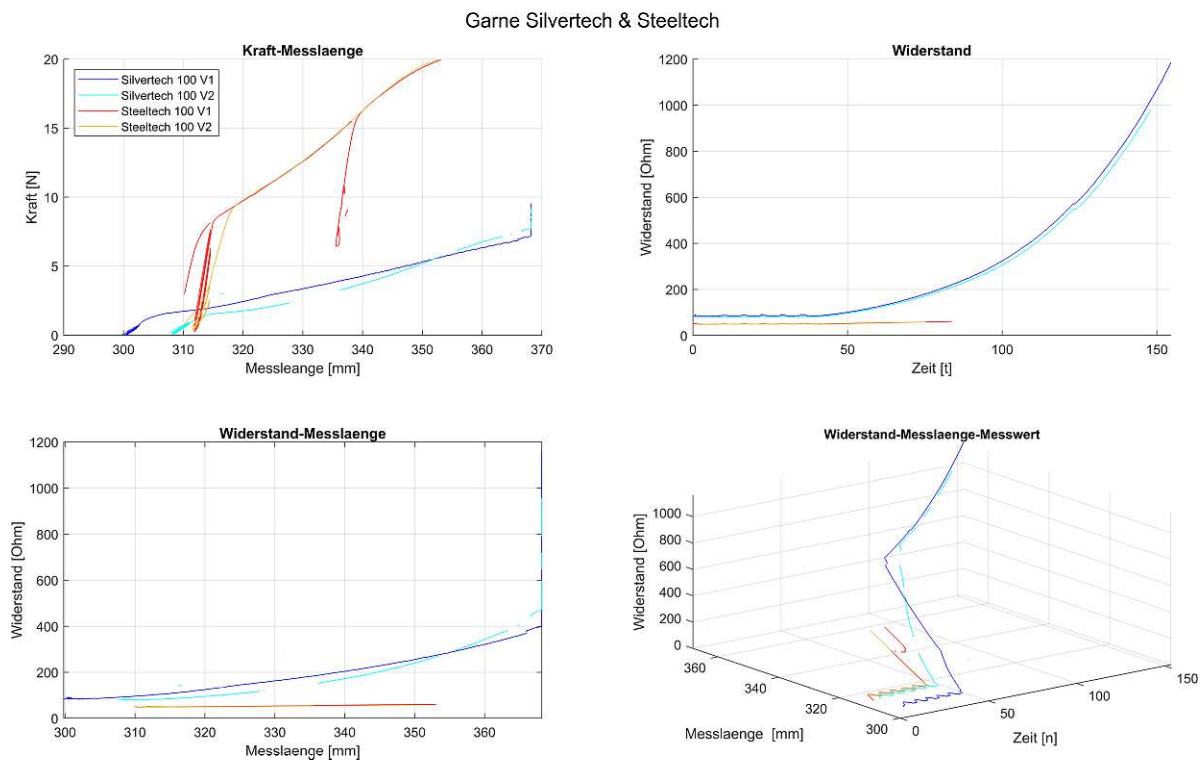


Abbildung 43 Vergleich von Silvertech und Steeltech

Die Erwartungen vor dem Versuch haben sich damit Großteils bestätigt. Steeltech hat Edelstahlfasern integriert. Damit ändert sich die Leitfähigkeit der Fasern unter Last kaum. Diese steigt im Vergleich nur gering an. Der Faserbruch tritt durch die Edelstahlfasern früher ein. Silvertech erreicht die Leitfähigkeit durch Beschichtung mit Silberpartikeln. Die Beschichtung ist, so wie vermutet anfälliger gegen Zugbelastung wie ein Garn mit leitenden Fasern. Die Bruchdehnung ist allerdings doppelt so hoch. Dass sich der Widerstand in diesem Ausmaß erhöht, wurde vor den Versuchen nicht erwartet.

Der Steeltech Faden hat sich strukturell nach dem Bruch verändert. Vor der Belastung ist der Faden in einem Stück zusammenhängend und die Fasern klar zusammengeflochten. Nach einmaligem Aufbringen und Wegnehmen der Last, zwirbeln sich die einzelnen Fasern stark auseinander. Das Phänomen tritt bereits bei den ersten Dehnungen auf, wenn der Faden sich nach der Dehnung wieder bis auf die Vorkraft zurückdehnt. Nach dem Bruch ist die Strukturveränderung durch Aufteilung der Fasern besonders ersichtlich. Die Strukturveränderung könnte Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Fadens haben. Das kann jedoch nicht definitiv bestimmt werden. Bei der geplanten Auslegung des Messsystems innerhalb eines Faserseils müssen die Leiterbahnen verlässlich Messsignale und elektrischen Strom liefern. Eine strukturelle oder mechanische Veränderung einer Leiterbahn bringt Unsicherheit in das System hinein. Die Auswirkungen auf die langfristige Leitfähigkeit und Dehnbarkeit ist schwer abzuschätzen.



Abbildung 44 Steeltech Faden nach dem Bruch

Zur besseren Vergleichbarkeit mit den anderen Messproben wird der spezifische Widerstand von Steeltech und Silverttech angegeben. Steeltech hat einen spezifischen Widerstand von circa $7,1 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. Silverttech hat einen spezifischen Widerstand von $3,0 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$, und damit einen höheren Widerstand.

5.4 Ergebnisse der Elastomere von MTC®

Eine andere Werkstoffgruppe, die für die Anwendung relevant ist, sind die leitfähigen Elastomere. Neben Thermoplasten und Duroplasten bilden sie die dritte Gruppe der Kunststoffe. Elastomere sind formfeste, aber reversibel dehbare Kunststoffe. Sie haben einen gummielastischen Zustand. Für die Versuche werden Silikone mit verschiedenen Füllstoffen verwendet. Durch die Füllstoffe erhalten die sonst nicht leitfähigen Silikone ihre elektrische Leitfähigkeit. Vom Hersteller werden Elastomere mit 4 unterschiedlichen Füllstoffen geliefert:

- Aluminium
- Nickel
- Kupfer
- Mit Silber plattiertes Glas

Alle vier Proben wurden für geplante Versuche in den Versuchsaufbau eingespannt. Schnell konnte festgestellt werden, dass das Messgerät keinen Widerstand anzeigt. Ein Messgerätefehler wird mit der Verwendung einer leitfähigen Vergleichsprobe und mehrmaligem Anbringen in der Messvorrichtung ausgeschlossen. Das lässt den Schluss zu, dass die Proben mit den Füllstoffen Aluminium, Kupfer und silberplattiertem Glas keinen für das Messgerät erfassbaren Strom leiten. Weiter in den Versuchen gemessen wird dann nur mit den Proben mit Nickelanteil als Füllstoff. Die Leitfähigkeit der Silikone entsteht durch den Füllstoffpartikel Nickel im Silikon. Bei Dehnung erhöht sich der Partikelabstand im Material. Es kann daher von einer Widerstandserhöhung ausgegangen werden. Das bestätigt sich im Versuch. Der Plot rechts oben zeigt die Erhöhung des Widerstands im zeitlichen Verlauf. Der Versuch besteht wieder aus 10%iger Dehnung und anschließender Entlastung in zyklischer Abfolge. Von anfänglich 200 Ohm steigt der Widerstand annähernd linear an. Nach circa 200 Zyklen erreicht die Probe einen Widerstand von 1500 Ohm. Der Anstieg wird durch eine Fourier Approximation angenähert. Dargestellt als rote Linie im Plot. Eine lineare Abschätzung könnte aber in guter Näherung ebenfalls schon ausreichen. Durch die hohe Elastizität der Silikone ergeben sich im Zugversuch nur geringe Kräfte auf die Zugprobe, gezeigt im Kraft-Verlängerungsdiagramm im Plot links oben. Interessant ist der Verlauf des Widerstands innerhalb einer Belastung bzw. Entlastung. Diese ist im Plot Widerstand-Verlängerung links unten zu sehen. Bisher hatten alle vorher getesteten Proben den geringsten Widerstand im ungedehnten Zustand. Der Probenwiderstand bei den Nickelelastomeren ist bei mittlerer Dehnung am geringsten. Anzunehmen ist, dass hier ein Optimum zwischen Anpresskraft und leitender Füllstoffdichte herrscht, weshalb durch Anpressung an den leitenden Zylinder ein geringerer Widerstand gemessen wird. Durch die hohe Dehnbarkeit des Materials ergibt sich nur wenig Kraft auf die Probe und die Aufwicklung. Deshalb ergibt sich die schalenförmige Kurvenform des Widerstands im Plot links unten. Die Symmetrie der zwei Widerstandsmaxima am unteren sowie oberen Dehnungsende ist allerdings ein Zufall.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bereits der Grundwiderstand von 200 Ohm einer Messprobe zu hoch für die Anforderungen als Leitermaterial ist. Die im weiteren gemessene Widerstandserhöhung um Faktor 6 macht das Elastomer nicht zu einem zuverlässigen Material für weitere Versuche. Der gleiche Zyklusversuch wurde für Nickelelastomere ebenfalls mit 20-prozentiger Dehnung durchgeführt. Hier hat der Widerstand bei zyklischer Belastung 2000 Ohm pro Messprobe überschritten.

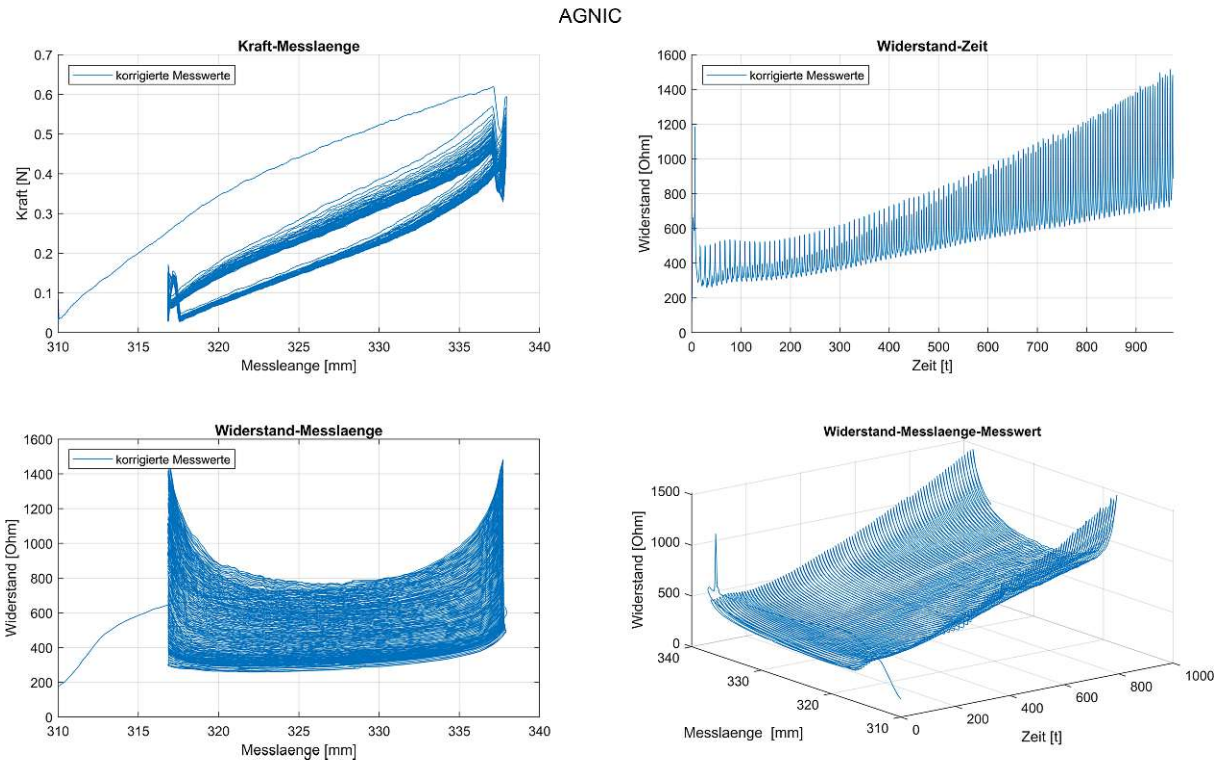


Abbildung 45 10%ige Dehnung von Elastomeren mit Nickelfüllstoff

Der spezifische Widerstand der Elastomere mit Nickel als Füllstoff (AGNIC) beträgt $324,4 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. Im Vergleich mit Silvertex ist das ein mehr als Faktor 100 höherer Widerstand. Hier zeigt sich bereits, dass die Leitfähigkeit der Elastomere vermutlich nicht konkurrenzfähig mit anderen Fäden sein wird.

5.5 Ergebnisse der Fäden aus Polymer von Shieldex®

Die Shieldex Fäden sind Fäden aus Nylon 6.6 bzw. Polyamid mit Silberpartikeln im Garn implementiert. Außen ist eine Nitrilkautschukschicht zum Schutz angebracht. Ähnlich wie bei Silvertex, wird die Leitfähigkeit des Garns durch die Silberpartikel generiert. Der Hersteller hat verschiedene Garnstärken geliefert. Die Bezeichnungen der Fäden sind:

- 117/17 mit 142 dtex bzw. 0,125 mm Ø
- 117/17 x2 mit 295 dtex bzw. 0,18 mm Ø
- 235/34 x2 mit 476 dtex bzw. 0,23 mm Ø
- 235/34 x4 mit 1220 dtex bzw. 0,37 mm Ø
- 235/34 x6 mit 1905 dtex bzw. 0,46 mm Ø
- Monofil 400 μ mit 1550 dtex bzw. 0,42 mm Ø

Ein Faden in der Messeinrichtung ist in Abbildung 46 zu sehen. Der Faden ist nach einem Bruchversuch gebrochen.

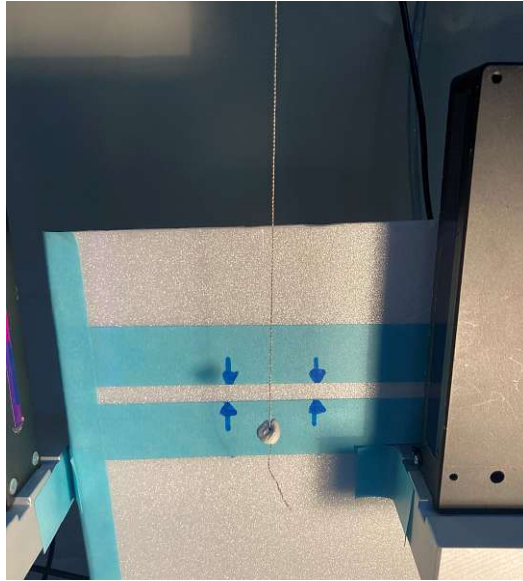


Abbildung 46 Shieldex-Faden nach dem Bruch mit Messvolumen am Faden

Die erste Zahl der Bezeichnung gibt die Feinheit des einzelnen Fadens an. Die Zahl mit x gibt die Anzahl der zusammengewickelten Litzen an. Mit der Dichte von Polyamid 6.6, wird der Durchmesser der Fasern errechnet. Die Fasern mit gleichem Grundmaterial werden in verschiedenen Formen dem Zugversuch unterzogen. Damit wird auch geprüft, ob sich die Leitfähigkeit mit einer Nebeneinanderreihung von Fasern linear nach oben skalieren lässt, bzw. wie sich die Anzahl der Litzen auf die Dehnbarkeit auswirkt. Aus dem Datenblatt ist zu entnehmen, dass für die Faser 235/34 diese Widerstände angegeben sind:

x2 → 25 ± 6 % Bruchdehnung

x4 → 26 ± 6 % Bruchdehnung

x6 → 27 ± 6 % Bruchdehnung

Da der Durchmesser allein keinen Einfluss auf die Bruchdehnung hat, stellt sich Frage, warum für doppelt, vierfach und sechsfach gewickelte Fäden, unterschiedliche Bruchdehnungen in den Datenblättern angegeben sind. Eine Vermutung ist, dass mit höherer Anzahl von Litzen einer Faser die Dehnbarkeit des Seils steigt. Zusätzlich zur Komponente der Materialdehnung, kommt hier noch das Zusammenziehen der Litzen hinzu.

Gesamtdehnung der Zugprobe = Materialdehnung + Zusammenzug der Litzen

Durch das Zusammenziehen der Litzen ergibt sich deshalb ein zusätzlicher Anteil an elastischer Dehnung. Mit steigender Anzahl an Litzen erhöht sich die elastische Dehnung. Zur Überprüfung der Herstellerangabe wurden die durchschnittlichen Bruchdehnungen von 235 /34 mit x2, x4 und x6 verglichen. Der vierfach gewickelte Faden (x4) hat in der Messung eine 1,8% höhere Dehnung verglichen mit dem doppelt gewickelten (x2). Der sechsfach gewickelte (x6) unterscheidet sich hinsichtlich der Dehnung nicht mehr im Vergleich mit dem vierfach gewickelten (x4) Faden. Bei dem Faden 117 ist die Dehnung unterschiedlich. Hier ist die Bruchdehnung von 117 und dem doppelten 117 x2 genau gleich groß. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl von Litzen und höherer Bruchdehnung kann also nicht zweifellos behauptet werden.

Ob also mehr Litzen bei den Shieldex Fäden, bei gleichem Durchmesser, wie der Hersteller das angibt, zu einer höheren elastischen Dehnung führen, kann nicht definitiv im Versuch bestätigt werden.

Bezeichnung Faden	235 x2	235 x4	235 x6	117	117 x2	Monofil 400 μ
Bruchdehnung [%]	31,5 %	33,3 %	33,3 %	25,6 %	25,6 %	33 %
Spez. Widerstand [Ohm*mm ² /m]	4,0	3,45	4,03	3,82	5,11	68
Faktor Widerstandserhöhung	3,3	3,2	3,1	6,1	3,8	23,8

Tabelle 6 Bruchdehnungen und spezifische Widerstände der Shieldex Fäden

Mit allen Fäden werden Bruchversuche durchgeführt. Dabei werden wieder, wie zuvor, die Kraft, Längung und der Widerstand über die Probenlänge gemessen und aufgezeichnet. Die Messergebnisse sind in Abbildung 47 und Abbildung 48 zu sehen. In beiden Diagrammen sind dieselben Messdaten abgebildet. Die Skalierung der Achse Widerstand unterscheidet sich in den zwei Diagrammen. Interessant ist außerdem der Anstieg des Widerstands vom unbelasteten Zustand bis zum Bruch der Messproben. Um die Erhöhung zu quantifizieren, wird der Faktor zwischen dem Widerstand bei Bruch und dem Widerstand im unbelasteten Zustand berechnet. Er wird als Widerstandserhöhung bezeichnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 angegeben. Interessant ist, dass die einfach gewickelten Fäden hohe Faktoren haben. Der Widerstand des einfach gewickelten 117 /17 hat eine Widerstandserhöhung von Faktor 6. Der Faden Monofil sogar um Faktor 24. Auch hier zeigt sich wieder, dass der Faden Monofil 400 μ neben einem hohen Grundwiderstand auch eine starke Erhöhung des Widerstands bei Belastung aufweist. Damit scheidet der Faden Monofil 400 μ für weitere Versuche aufgrund des hohen Grundwiderstands und der starken Erhöhung unter Zuglast aus. Die mehrfach gewickelten Fäden haben alle einen Faktor der Widerstandserhöhung zwischen 3 und 4. Bis zum Bruch erhöht sich der Grundwiderstand um den Faktor 3 bis 4.

Daraus könnte die These abgeleitet werden, dass die Mehrfachwicklung der Fäden sich abmildernd auf die Zunahme des Widerstands bei Zugbelastung auswirkt. Die These wird dadurch gestützt, dass der Erhöhungsfaktor zusätzlich mit der Anzahl der Zwirnungen abnimmt, siehe Tabelle 6. Die Erklärung dafür ist, dass die mehrfachen Zwirnungen sich bei Zuglast zuerst aneinanderpressen, bevor die Dehnung des Zwirns selbst eintritt. Deswegen steigt der Widerstand unter Zuglast geringer an, je größer die Anzahl der Zwirnungen ist.

Beschreibung der Diagramme:

Die Messergebnisse aller Shieldex-Fäden werden in 4 Diagrammen dargestellt. Jede Farbe repräsentiert einen Fadentyp. Pro Fadentyp wurden 2 Versuche durchgeführt. Links oben ist das Kraft-Länge Diagramm, rechts oben das Widerstand-Zeit, links unten das Widerstand-Länge und rechts unten der 3D-Plot mit Widerstand-Länge-Zeit. Auf den zwei Diagrammen sind die gleichen Messergebnisse mit zwei unterschiedlichen Achsenskalierungen zu sehen. In der oberen Abbildung sind die Messergebnisse mit einer, mit kleineren Werten skalierten, Widerstandsachse abgebildet. Hier sind die Anfangswiderstände ohne Belastung, also nur mit Vorspannkraft deutlicher zu sehen. In

der zweiten Abbildung lässt sich die Veränderung des Widerstands nach Anbringen der Zuglast besser erkennen. Interessant ist besonders das Widerstand-Zeit Diagramm rechts oben. Hier ist zu Beginn, also von 0 bis 40 Sekunden Zeit noch keine Last auf die Fäden aufgebracht. Bei Monofil(gelb) ist eine Vordehnung mit fünf Zyklen aufgebracht. Das ist die Kurve mit dem rechteckigen Kurvenprofil. Die anderen Shieldex Fäden haben ohne Zuglast konstante Widerstände. Geringe Schwankungen werden durch Messunsicherheiten und geringen Schwankungen in der Messumgebung erklärt. Nach circa 40 Sekunden Messzeit wird die Zuglast aufgebracht. Damit steigen der Widerstand, die Messlänge und die Kraft an. Die Steigung der Kurven ist unterschiedlich groß. Je dicker der Durchmesser der Fäden ist, desto langsamer der Anstieg des Widerstands. Das Widerstands- Längen Diagramm zeigt prinzipiell das gleiche Prinzip. Unebenheiten und horizontale Linien stellen Messfehler der Positionssensoren dar. Die Kurven steigen in diesem Diagramm direkt von Beginn an, da die Messlänge und nicht die Zeit auf der Ordinate skaliert ist.

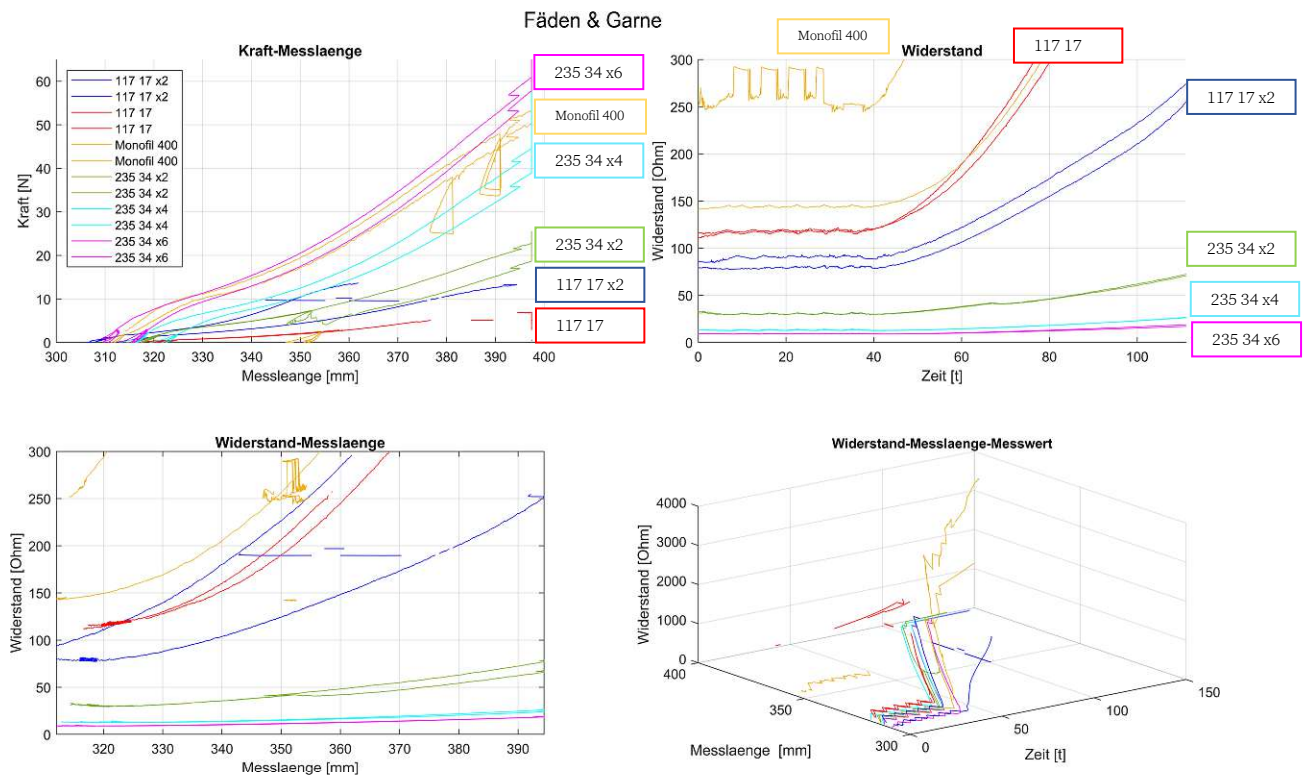


Abbildung 47 Vergleich von Shieldex-Fäden verschiedener Dicken und Wicklungen

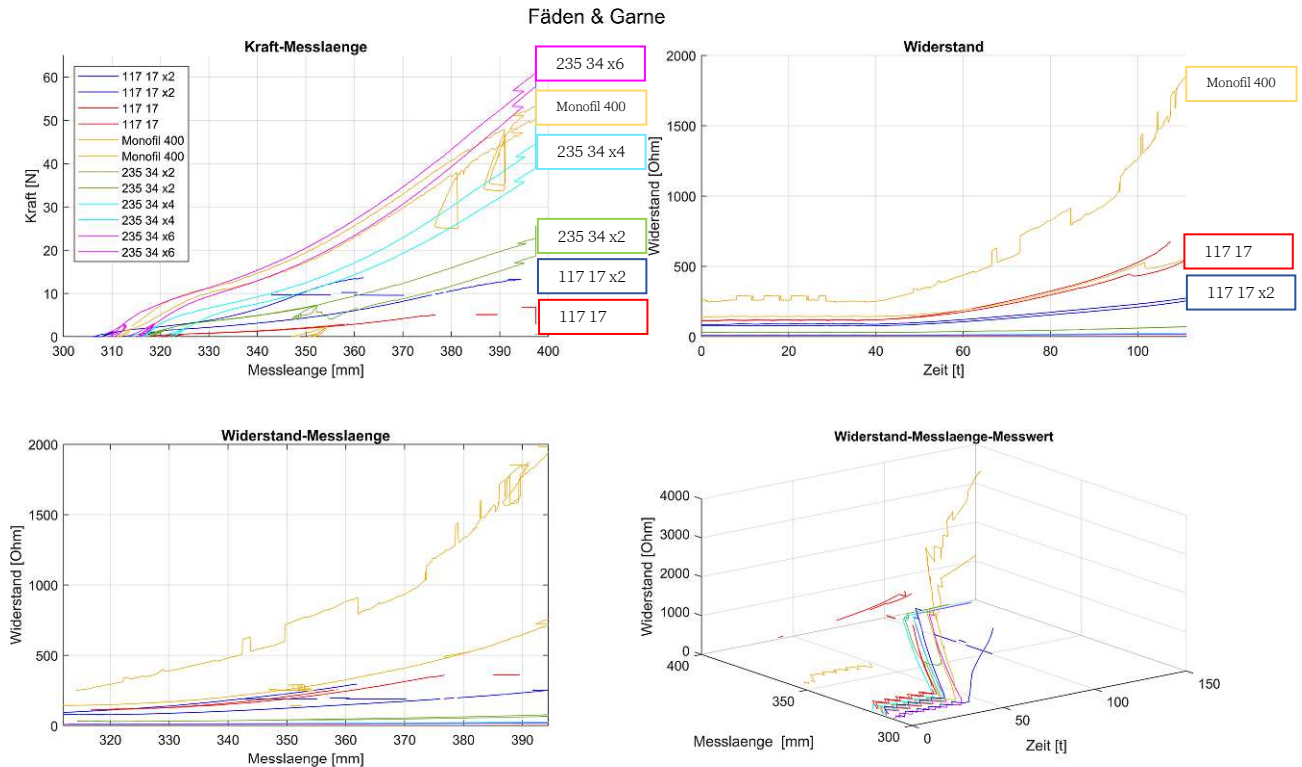


Abbildung 48 Vergleich von Shieldex-Fasern verschiedener Dicken und Wicklungen

Die Fäden 117 / 17, 117 17 x2, 235 34 x2, 235 34 x4, 235 34 x6 bestehen aus dem gleichen Material. Sie unterscheiden sich durch die Fadendicken und die Anzahl der Wicklungen. Daher wird erwartet, dass sich vergleichbare spezifische Widerstände, also der auf den Querschnitt bezogene elektrische Widerstand aus den Versuchen ergeben.

$$\rho = R \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot l}$$

Mit den Shieldexfäden werden insgesamt Messungen mit 17 Messproben unterschiedlicher Durchmesser durchgeführt. Um die Messungen vergleichbar zu machen, wird der durchschnittlich gemessene Widerstand einer unbelasteten Messprobe als Vergleichswert verwendet. Aus der Gesamtheit der Vergleichswerte errechnet sich dann der Mittelwert des spezifischen Widerstands. Die Standardabweichung berechnet sich zu $0,496 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. Damit wird der Mittelwert mit der Messunsicherheit angegeben.

$$3,47 \pm 0,12 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Die Herstellertoleranz der Fadendurchmesser ist mit weniger als $\pm 2\%$ des Durchmessers angegeben. Deswegen wird auf eine Berechnung mittels Gauß'scher Fehlerfortpflanzung verzichtet. Der Faden Monofil 400 ist aus anderem Material gefertigt und geht nicht in die Kalkulation von Mittelwert und Unsicherheit der anderen Fäden oben mit ein. Der spezifische Widerstand des Materials ist $3,47 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. Das heißt pro Quadratmillimeter Querschnittsfläche des Fadens, wird ein durchschnittlicher elektrischer Widerstand von $3,47 \frac{\text{Ohm}}{\text{m}}$ mit einer Unsicherheit von $0,12 \frac{\text{Ohm}}{\text{m}}$ erwartet werden. Der Zusammenhang zwischen spezifischem und elektrischem Widerstand ist quadratisch abhängig vom Durchmesser der Leiterbahn. Für eine schnelle Abschätzung des Leiterwiderstands in

Abhängigkeit der Leiterdimensionen von Shieldex Fäden, kann die Abbildung 49 herangezogen werden. Umgekehrt kann bei einem geforderten Widerstand die Messleitung dimensioniert werden. Das Diagramm dient als Anhaltswert zur Dimensionierung des Messsystems.

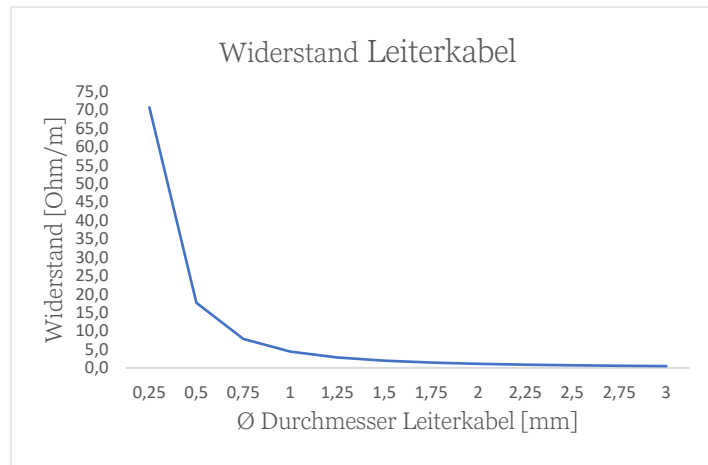


Abbildung 49 Widerstand-Leiterdurchmesser Diagramm

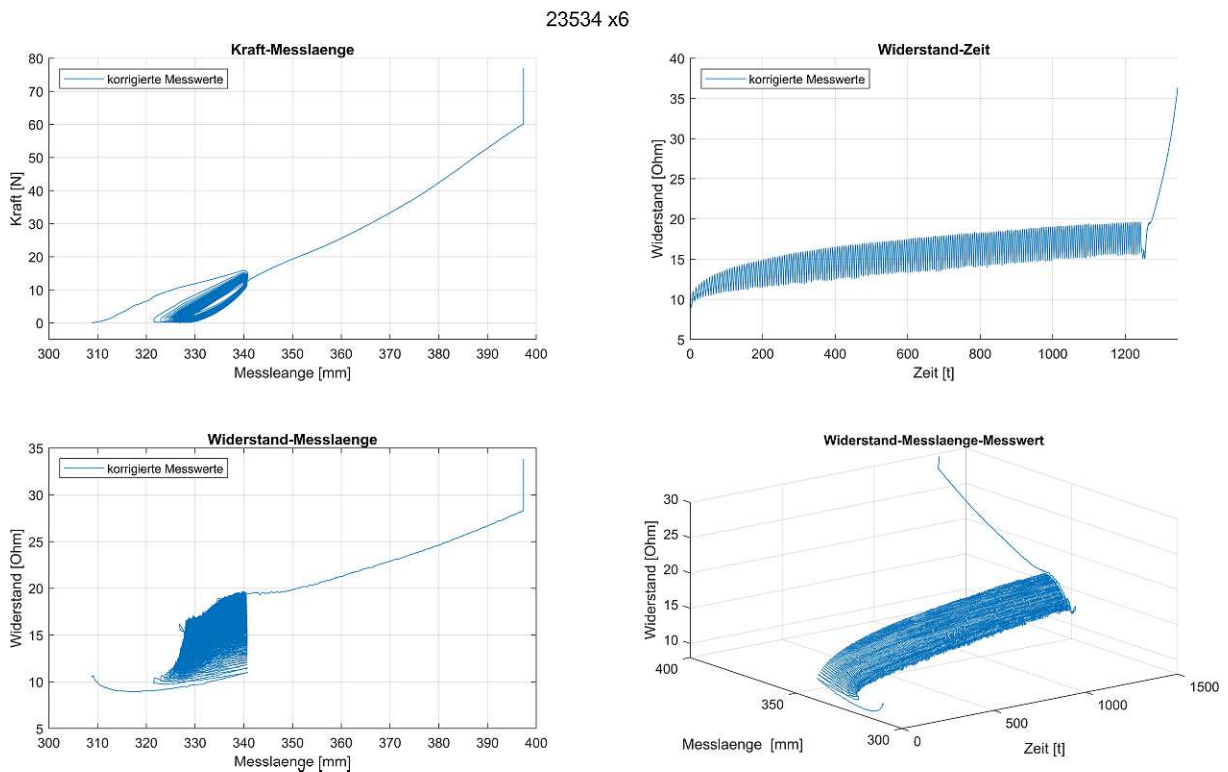


Abbildung 50 zyklische Dehnung um 10% und anschließender Bruch

Das Verhalten der Shieldex Fäden unter dynamischer bzw. wechselnder Belastung soll simuliert werden. Bisher wurde in den Bruchversuchen nur die einmalige Lastanbringung getestet und simuliert. Jetzt soll auch die dynamische Zuglast simuliert werden. Das Messverfahren orientiert sich, wie schon bei den Elastomeren, Steeltech, sowie Silvertch an der DIN 53835 Teil 3. Der eingespannte Faden wird zyklisch auf eine vorher festgelegte Länge gedehnt. Im ersten Versuch auf 10% und weiter bis Bruch. Im zweiten Teil auf 20% der Ausgangslänge. Damit soll festgestellt werden, wie sich die dynamischen Lastwechsel auf die Materialeigenschaften der Leiter auswirken. Die Kraft, die der Messfaden während

des Versuchs auf die Kraftmessdose ausübt, pendelt während der Messung circa zwischen der Vorspannkraft (Entlastung) und 15N Maximalkraft (Belastung). Die wirkende Kraft sinkt nach dem ersten Messzyklus deutlich ab, da sich der Faden plastisch dehnt. Mit jedem weiteren Zyklus nimmt die Kraft weiter ab. Die Abnahme wird aber immer geringer, weshalb sich die gemessene Kraft mit zunehmender Anzahl an Zyklen auf ein Kraftniveau, verglichen mit dem vorherigen Zyklus, einpendelt. Das Verhalten ist circa zwischen der Messlänge von 310 mm und 340 mm zu beobachten. Danach wird der Faden bis zum Bruch gedehnt. Der Faden hat keine ausgeprägte Streckgrenze. Kurz vor dem Bruch verlässt das obere Messvolumen den Messbereich. Zu sehen als vertikale Linie im Kraft-Längen Diagramm. Der Bruch tritt bei circa 400 mm Länge ein. Das entspricht einer Bruchdehnung von circa 33%. Die Kraft steigt auf 75 N an. Um einen vergleichbaren Wert für die Zugfestigkeit zu haben, wird der Durchschnittswert aus allen 10 Bruchversuchen mit Shieldex gebildet. Die mittlere Zugfestigkeit errechnet sich damit zu:

$$\text{Zugfestigkeit } R_m = 505,7 \pm 11,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Das gleiche Schema zur Auswertung, wie bereits bei den anderen Versuchsmaterialien ist bei Shieldex angewendet worden. Der elektrische Widerstand wird einmal mit der Zeit auf der Abszisse und einmal mit der Messlänge auf der Abszisse projiziert und dargestellt. Im Diagramm Widerstand-Länge ist der Widerstand auf der Messlänge aufgetragen. Innerhalb eines Zyklus steigt der Widerstand durch die Dehnung der Messprobe an. Bei Wegnahme der Zugbeanspruchung sinkt der Widerstand wieder. Durch plastische Verformung und Mikrorisse im Faden steigt der Grundwiderstand aber auch mit jedem Zyklus weiter an. Der Anstieg ist im Diagramm Widerstand-Länge deutlich zu sehen. Die Zyklen sind die horizontal leicht ansteigenden Linien. Mit jedem Zyklus steigt der gemessene Widerstand dieser an. Von anfänglich 9 Ohm steigt der Widerstand auf 20 Ohm innerhalb der 20 Minuten Messzeit. Der Widerstand hat sich mehr als verdoppelt. Aus dem Diagramm geht auch hervor, dass die gemessene Messlänge bei Entlastung mit steigender Anzahl an Zyklen zunimmt. Das liegt an der plastischen Dehnung und damit der Verlängerung des Fadens. Der Widerstand bei Bruch ist 33 Ohm. Für einen Vergleichswert für den Widerstand bei Bruch der Probe, wird der Mittelwert der Bruchwiderstände aller 10 Bruchversuche mit Shieldexfäden angegeben:

$$\text{Widerstand } \rho_{\text{Bruch}} = 12,0 \pm 1,2 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Dieser Wert kann jetzt mit dem Mittelwert der spezifischen Widerstände unbelasteter Proben verglichen werden. Im Mittel erhöht sich der Widerstand einer Probe vom unbelasteten Zustand bis zum Bruch um 245% seines Ausgangswiderstands. Allerdings ist zu beachten, dass es sich hier um Durchschnittswerte handelt. Die Aussagekraft des durchschnittlichen Widerstands bei Bruch ist zu diskutieren. Das zeigt sich auch in der deutlich höheren Messunsicherheit des spezifischen Bruchwiderstands im Vergleich mit der Messunsicherheit des unbelasteten spezifischen Widerstands.

Im Diagramm Widerstand Zeit zeigt sich der Kurvenverlauf des Widerstands mit der Anzahl der Messzyklen sehr deutlich. Mit jedem Zyklus steigt der Widerstand an. Einerseits der Widerstand im belasteten (obere Kante), aber auch der Widerstand im unbelasteten Zustand (untere Kante). Der Anstieg wird aber immer geringer. Die Differenz des Widerstands von Messzyklus n zu Messzyklus n+1 nimmt mit steigender Anzahl der

Zyklen n ab. Möglicherweise nähert er sich einem Grenzwert an. In diesem Fall würde gelten:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_{n+1} - R_n = 0.$$

Die Kurve hat optisch stark logarithmischen Charakter. Nähert sich also in der Unendlichkeit einer Geraden an. Das logarithmische Verhalten klingt plausibel, da der Widerstand bei dauerhafter Belastung vermutlich geringfügig weiter ansteigen wird. Aufgrund einer begrenzten Anzahl an gemessenen Zyklen, kann das Verhalten nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden. Im nächsten Versuch ist die Messprobe zyklisch um 20% gedehnt worden. Hier ist eine gesamte Messzeit von 3000 Sekunden geplant. Außerdem wird diese Probe anschließend nicht bis zum Bruch gedehnt. Die Abbildung 51 ist qualitativ ähnlich und vergleichbar mit der Abbildung 50. Durch den Wegfall des Bruchs nach dem Zyklus bei dieser Messung ist die Achsenskalierung zentrierter auf die Zyklusbelastung selbst.

Im Diagramm links oben wird die Kraft dargestellt. Jede ovale Runde im Diagramm stellt einen Lastzyklus dar. Zu Beginn steigt die Kraft an. Mit dem Kraftanstieg auf die Probe dehnt sich der Faden. Die Kurve steigt. Dann hält die Kraft kurz an und sinkt wieder ab. Mit Abnahme der Belastung verkürzt sich der Faden wieder. Er verkürzt sich aber nicht auf die Ausgangslänge zurück. Der Faden hat sich plastisch gedehnt. Von links unten beginnt dann der nächste Zyklus. Die ovalen Kurven verschieben sich weiter nach rechts im Diagramm. Bei Beginn der Messung beträgt die Messlänge circa 300mm. Die erste Belastung auf die Probe ist nicht im Diagramm sichtbar. In dieser Messung ist das Messvolumen verrutscht. Der absolute Messwert Messlänge hat sich verschoben. Zur besseren Anschauung wird in der Auswertung ein Offset verwendet. Wie auch im vorherigen Versuch ist der Widerstand im ungedehnten Zustand bei ungefähr 9 Ohm. Bei 20%iger Dehnung steigt der Widerstand leicht schneller an im Vergleich mit der 10%igen Dehnung. Der Unterschied ist gering. Um die zwei Messungen zu vergleichen, wird der Zeitpunkt 1200 Sekunden gewählt. Hier ist der Widerstand der 10%-Probe bei 20 Ohm. Der Widerstand der 20%-Probe bei 22 Ohm. Trotz doppelter Dehnung ist der Widerstand nur marginal höher. Mehr Einfluss auf den maximalen Widerstand hat die Anzahl der Lastzyklen, bzw. äquivalent die Versuchszeit. Hier wurde bereits auf das logarithmische Verhalten der Widerstandskurve eingegangen.

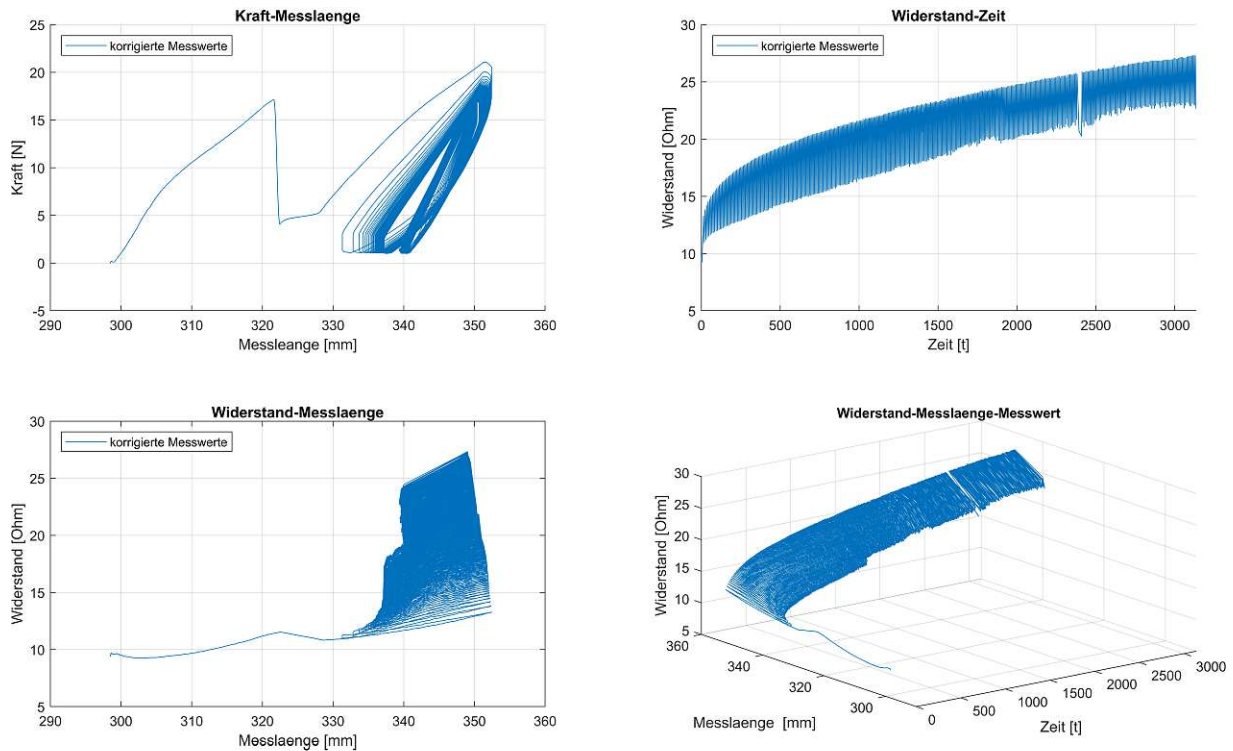


Abbildung 51 Dehnung eines Shieldex 2334 x6 Fadens um 20% ohne Bruch

Die zyklische Dehnung um 20% belastet die Leitfähigkeit der Messproben mehr wie die zyklische Dehnung um 10%. Die Differenz ist allerdings nicht herausstechend hoch. Allerdings könnten zu hohe Dehnungen zu einer großen plastischen Verformung führen und das Leiterkabel damit zu stark beschädigen.

Zeitversuch:

Im Kapitel Faserseile wurde das Phänomen Kriechen beschrieben. Kriechen ist eine Materialausdehnung unter konstanter statischer Belastung. In der Realität kann der Anwendungsfall oft auftreten, dass ein Faden mit statischer Last beaufschlagt wird und das Material unter Zug verharrt. Für die Gewährleistung einer unterbrechungsfreien Leitung wird ein Versuchstest durchgeführt. Der Faden wird den Bedingungen unter Zuglast ausgesetzt und die Entwicklung von Kraft, Messlänge und Widerstand beobachtet. Wie erwartet dehnt sich der Faden bei statischer Zuglast aus. Die gemessene Kraft an der Kraftmessdose nimmt durch die Längung des Fadens mit der Zeit ab. Interessant ist vor allem die Entwicklung des Widerstands mit der Zeit. Die zeitliche Entwicklung des Widerstands mit der Zeit ist in Abbildung 52 dargestellt. Geprüft wird ein Shieldex 235/34 x6 Faden. Der steile Anstieg zu Beginn ist das Anbringen der Zuglast auf die Messprobe. Beim Erreichen der Dehnung von 10 % stoppt die Traverse. Der Widerstand bei der statischen Zuglast wird aufgezeichnet. Beim Aufbringen der Last erreicht der Widerstand ein Plateau. Danach sinkt der Widerstand langsam wieder ab, da die Spannung in der Zugprobe sich mit der Zeitachse verringert. Hier tritt Kriechen auf. Danach nähert er sich dann einem Grenzwert nach circa 1500 Sekunden an. Nach circa 30 Minuten (1800s) wird die aufgebrachte Last wieder auf die Vorkraft reduziert. Der Widerstand sinkt plötzlich direkt ab. Er sinkt aber nicht auf das Niveau vor der Belastung. Bei weiterem Abwarten sinkt der Widerstand wieder etwas. Erreicht aber ebenfalls nicht das Vorbelastungsniveau. Der sich nach circa 60 Minuten einstellende Widerstand liegt bei circa 17,5 % über dem

Widerstand vor Belastung. Die Erklärung dafür ist die plastische Verformung der Zugprobe. Der elastische Verformungsanteil bildet sich langsam zurück. Deswegen sinkt der Widerstand mit der Zeit langsam ab. Der plastische Anteil der Verformung bleibt als permanente Veränderung in der Zugprobe. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Shieldex Fäden bei statischer Belastung zu Kriechen beginnen, das heißt der Widerstand sinkt nach Erreichen des Maximums bei Lastaufbringung wieder leicht ab. Nach Ende der Zuglast, sinkt der Widerstand schneller ab. Er manifestiert sich dann auf höherem Niveau wie vor der Lastaufbringung, da plastische Verformung eingetreten ist.

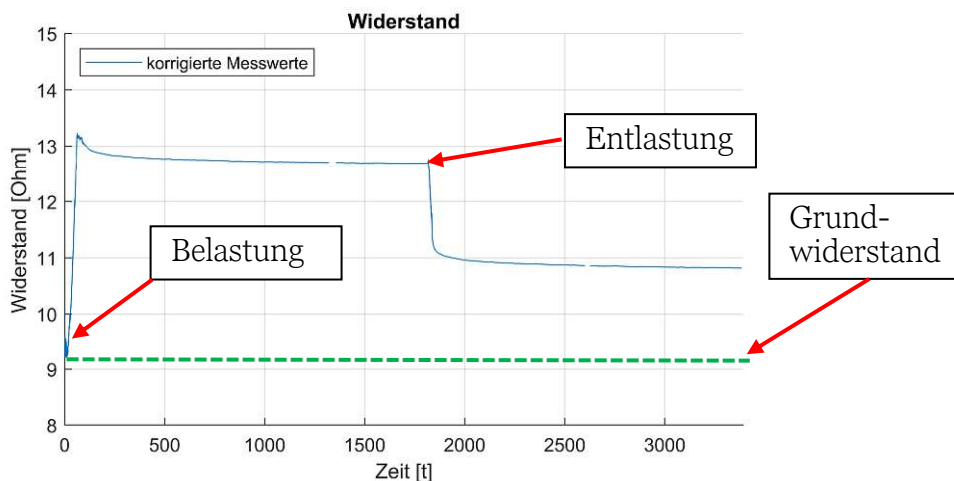


Abbildung 52 Zeitliche Entwicklung des Widerstands unter statischer Last sowie nach Entlastung

6 Interpretation der Ergebnisse

Das Ziel ist die Entwicklung eines Messsystems zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung von Faserseilen. Um dazu beizutragen, wird in dieser Arbeit nach einem adäquaten Leitermaterial für das Messsystem gesucht. Nach der Vorauswahl mehrerer Materialien sollen diese hinsichtlich ihrer Eignung für das Messsystem untersucht werden. Die Menge der erhobenen Daten ist groß. Daher gilt es diese geeignet zusammenzufassen. In diesem Kapitel soll aus den erfassten Daten die korrekten, und vor allem relevanten Ergebnisse herausgearbeitet werden. Im Verlauf soll sich aus den Ergebnissen eine Empfehlung für die Materialwahl ergeben. Grob wurden drei verschiedene Materialarten geprüft. Einerseits Metalle als die naturgemäß leitendsten Materialien. Außerdem Kunststoffe, als dehnbare Materialien, die mit Füllstoffen ebenfalls leitfähig gemacht werden können. Die Kunststoffe können in Polymere und Elastomere unterteilt werden. Die Polymere werden in gewickelter Fadenform geliefert. Die Elastomere werden in Form von runden Halbzeugen geliefert. Die Elastomere zeichnen sich durch sehr hohe Elastizität aus. Eine weitere Art der Erhöhung von Leitfähigkeit bei Kunststoffen ist die äußere Beschichtung von Fasern mit leitfähigem Material. Zum anderen gibt es auch Kunststofffäden mit metallischen durchgängigen Kernen. Diese werden ebenfalls messtechnisch geprüft.

6.1 Vergleich der Ergebnisse mit den Kennwerten der Faserseile

Um einen Vergleichswert für die Versuchsergebnisse zu haben, werden typische Kennwerte von Faserseilen herangezogen. Ein Kennwert für die Bruchdehnung eines typischen Faserseils liegt laut Angaben eines Herstellers bei 12-13%. Das ideale Kriterium wäre folgendes:

Elastische Dehnung Leitermaterial > Bruchdehnung Faserseil

Jedoch erreicht nur das Elastomer mit Nickel als Füllstoff eine elastische Dehnung, welche diese Bruchdehnung des Faserseils überschreiten kann. Das Elastomer aus Silikon hat sich als nicht leitfähig genug herausgestellt. Das Kriterium oben kann also nur von dem Elastomer erfüllt werden. Es ist aber nicht leitfähig genug. Daher wird nach einem guten Kompromiss aus Dehnbarkeit und Leitfähigkeit gesucht. Es wird ein Seilmaterial ausgesucht, dessen elastische Dehnung größer als die elastische Dehnung des Faserseils ist. Die Bruchdehnung von Shieldex ist um den Faktor zwei höher als ein typisches Faserseil. Damit liegt der Shieldexfaden mit guter Wahrscheinlichkeit im sicheren Bereich, nicht zu brechen, bevor das Faserseil dem Bruch nahekommt. Die Gewährleistung der elektrischen Leitfähigkeit wird im vorherigen Abschnitt dargelegt.

6.2 Interpretation der Versuchsergebnisse

Metallische Leiter

Zuerst werden die Metalle geprüft. Metalle haben eine naturgemäß hohe Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit ist deutlich ausreichend für die Versorgung eines Messsystems. Der Widerstand bleibt auch bei Dehnung bis zum Bruch nahezu konstant. Sie wird bei allen Werkstoffen in der Messung miterfasst. Die Bruchdehnung von Aluminium und Silber mit jeweils über 20% ist ein vielversprechender Wert für die geforderte Dehnung. Bei Kupfer immerhin noch über 10%. Problematisch ist die Eigenschaft der Duktilität von Metallen. Unter Belastung, wie Zuglast dehnt sich das Material aus, anstatt zu brechen. Allerdings erfolgt danach keine elastische Rückdehnung. Die Verformung ist zum größten Teil plastisch. Das Dehnungsverhältnis von Silber bei 10% Dehnung liegt bei 0,25. Das heißt das Dreiviertel der Dehnung plastischer Natur sind. Würde man die metallischen Leiter in einem Messsystem verwenden, dann entsteht ein Problem. Während sich die Dyneema Faser aus Polyethylen bei geringen Zugkräften wieder zurückdehnt, bleibt die plastische Verformung der Metalle bestehen. Beim Rückgang der Kraft würde sich die Leiterbahn aufstauen. Das soll vermieden werden, da die Positionierung und Bewegung des Leiters im Faserseil damit nicht vorhersagbar sind. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Metalle außergewöhnlich leitfähig sind. Ihr duktiles Verhalten bei Beanspruchung resultiert in vorwiegend plastischer Verformung. Für die Anwendung als Messleitung sind sie daher nicht optimal geeignet.

Elastomere

Die getesteten Halbzeuge aus Elastomer sind aus Silikon, vergleichbar mit Kautschuk. Der Werkstoff verhält sich bereits in der Handhabung stark elastisch und gummiartig. Herstellerseitig wird eine Bruchdehnung zwischen 75% und 150% der Ausgangslänge angegeben. Die außerordentliche Dehnbarkeit des Silikons übertrifft bei Weitem die erforderliche Dehnbarkeit der Leiter. Bei der Widerstandsmessung hat sich herausgestellt, dass drei der vier getesteten Materialien nicht leitfähig sind. Die Widerstandsmessung hat

keine verwendbaren Werte geliefert. Die Elastomere mit Nickel als Füllstoff wurden als leitfähig getestet. Die Leitfähigkeit mit Nickel als Füllstoff wird mit $320,4 \pm 19,0 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ gemessen. Diese Leitfähigkeit ist verglichen mit dem Silverttechfaden über Faktor 100 höher. Nach Tests mit dreistelliger Anzahl von zyklischer Belastung verändert sich der Widerstand deutlich. (1mm Durchmesser)

- Bei 10%iger Dehnung erhöht sich der Widerstand von 200 Ohm auf 1400 Ohm
- Bei 20%iger Dehnung erhöht sich der Widerstand von 200 Ohm auf 2500 Ohm

Zusammenfassend ist von allen geprüften Elastomeren nur das mit Nickelpartikeln als Füllstoff leitfähig. Das Nickel-Elastomer hat trotzdem einen zu hohen Grundwiderstand, welcher mit Belastung stark ansteigt. Damit ist es nicht geeignet als Leiter für das Messsystem.

Fasermaterialien

Die Fäden Silverttech und Steeltech sind vom gleichen Hersteller. Silverttech erhält seine Leitfähigkeit durch eine Silberbeschichtung auf der Außenseite. Steeltech wird durch Edelstahlfasern im Inneren leitfähig gemacht. Durch die unterschiedliche Struktur der zwei Fäden zeigen sie auch stark unterschiedliches mechanisches Verhalten. Steeltech hat im Versuch eine Bruchdehnung von 14 %. Die Bruchdehnung von Silverttech wurde mit circa 35% bestimmt. Wegen den Edelstahlfasern brechen die Steeltechfäden deutlich früher. Steeltech hat bei 10%iger Dehnung einen elastischen Anteil von 1,5%. Der Dehnungsanteil an der Gesamtdehnung ist 15%. Silverttech hat bei Dehnung von 10% einen elastischen Anteil von 3% bis 3,5%. Das Dehnungsverhältnis also 30% bis 35 %. Silverttech hat also einerseits eine höhere absolute Dehnbarkeit, zum anderen relativ einen höheren elastischen Dehnungsanteil im direkten Vergleich mit Steeltech. Im Weiteren wird der Widerstand betrachtet. Beide Fäden zeigen in der Messung vielversprechende Leitfähigkeiten. Steeltech hat die spezifische Leitfähigkeit $7,1 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$, Silverttech $3,0 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ im unbelasteten Zustand. Der Unterschied der zwei Fäden zeigt sich erst bei Belastung deutlich. Der Widerstand von Silverttech steigt bis zum Bruch um den Faktor 12 im Vergleich mit dem Ausgangswert an. Der Steeltechfaden bleibt dagegen deutlich konstanter mit einem Anstieg von nur 20% bis zum Bruch. Das liegt auch am früheren Bruch der Steeltech Fasern. Um einen Vergleich besser anstellen zu können, wird die Bruchdehnung von 14% der Steeltech Faser herangezogen. Bei 14% Dehnung erfährt der Widerstand von Silverttech eine Verdoppelung. Zusammenfassend ist Silverttech dehnbarer hinsichtlich Gesamtdehnung und elastischer Dehnung. Der Grundwiderstand von Silverttech ist geringer als der von Steeltech, bei Belastung steigt dieser aber deutlich stärker an. Das liegt an der elektrischen Leitung über die äußere Silberschicht. Es wird vermutet, dass in dieser bei Belastung Risse entstehen und der Widerstand dadurch ansteigt. Der Steeltech Faden spaltet sich bei zyklischer Belastung leicht in die einzelnen Fasern auf. Das ist bei der technischen Anwendung des Fadens zu bedenken. Die geringe elastische Dehnbarkeit von Steeltech macht den Faden eher ungeeignet für die Anwendung als Leiterbahn. Die zunehmende Aufspaltung unter Last der einzelnen Fasern trägt nicht zur technischen Anwendbarkeit bei. Silverttech dagegen hat eine hohe Bruchdehnung und gute elastische Dehnung. Der Widerstand im unbelasteten Zustand qualifiziert den Faden ebenfalls als potenzielle Leiterbahn. Durch die Außenbeschichtung des Fadens ist die

Leitfähigkeit stark von der anliegenden Last abhängig. Außerdem hat die vorherige Belastungshistorie des Fadens einen signifikanten Einfluss auf die bevorstehende Leitfähigkeit des Fadens.

Die Fäden mit dem Handelsnamen Shieldex werden vom Hersteller in zwei verschiedenen Faserdicken und drei unterschiedlichen Anzahlen an Wicklungen bereitgestellt. In Abhängigkeit von diesen Spezifikationen bewegt sich die Bruchdehnung der Fäden zwischen 25% und 33%. Bei 10%-iger Dehnung liegt der elastische Anteil über alle Fäden bei durchschnittlich 6%. Das Dehnungsverhältnis ist 0,6 bzw. 60%. Die Shieldexfäden sind, nach Silvertex, die mit der höchsten absoluten Dehnung. Im Vergleich sind sie die Fäden mit der höchsten elastischen Dehnung. Der durchschnittliche spezifische Widerstand der Fäden liegt bei $3,47 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. Das ist im Vergleich mit allen Materialien eine solide Leitfähigkeit. Mit allen Fäden wurden Bruchversuche durchgeführt. Der spezifische Widerstand der Fäden steigt bis vor Bruch durchschnittlich auf $12 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. Das ist ein Anstieg um 245% des Grundwiderstands. Der Widerstand der Fäden unter Zugbelastung steigt deutlich flacher im Vergleich zum Silvertexfaden. Bei längerer zyklischer Belastung bis 10% bzw. 20% Dehnung steigt der Widerstand logarithmisch an. Die Erhöhung des Widerstands nimmt also mit der Zeit weiter ab. Wird der Faden also kontinuierlich dynamisch belastet, steigt der Widerstand zwar weiter an, die Zunahme wird aber geringer. Zusätzlich wird der Einfluss von Kriechen auf die Messprobe gemessen. Wenn der Faden statisch unter Last verharrt, beginnt der Widerstand mit der Zeit zu sinken. Das kann mit sinkender Spannung im Faden erklärt werden. Wird die Belastung jetzt entfernt, dann sinkt der Widerstand ein zweites Mal um einige Prozentpunkte ab.

7 Résumé

Ausgewählte Materialien wurden ausführlich auf ihre Eigenschaften getestet. Die relevanten Eigenschaften für die Eignung als Leitermaterial für ein Messsystem zur Zustandsüberwachung von Faserseilen wurden ausgewählt und diese mithilfe der Materialeigenschaften bewertet. Metalle als Leiter bieten eine hohe Leitfähigkeit, aber nur einen geringen elastischen Dehnungsanteil. Die Verwendung einer Leiterbahn aus einem leitfähigen Metall könnte nur als gewickelte, ähnlich einer Feder, nicht als gerade gelegte Leiterbahn in Betracht kommen. Damit resultiert die Dehnung des Faserseils nicht in plastischer Verformung. Die gummiartigen Elastomere haben sich als nicht leitfähig genug herausgestellt. Sie werden nicht in Betracht gezogen. Silvertch und Steeltech sind beide grundsätzlich vielversprechend. Ihre Grundwiderstände sind im verwendbaren Bereich. Beide haben aber potenziell problematische Eigenschaften. Die Bruchdehnung von Steeltech ist zu gering. Bei Silvertch ist der Anstieg des Widerstands groß. Die Verwendung der Fäden als Messleitungen macht nur dann Sinn, wenn geringe Dehnungen des Faserseils erwartet werden. Zum Beispiel beim Faserseil soLite 34 mit geringer Bruchdehnung. Die Fäden von Shieldex bieten ein gutes Paket aus hoher Bruchdehnung, vergleichbar hohem elastischem Dehnungsanteil sowie geringem spezifischem Widerstand. Sie geben für die Anwendung einen soliden Kompromiss aus den verschiedenen geforderten Zielen. Um die geforderte Leitfähigkeit erreichen zu können, wird der Durchmesser der Fäden variiert. Zusätzlich ist der Aspekt attraktiv, dass die Fäden in verschiedenen Fadendicken und Wicklungen gefertigt und geliefert werden. Eine andere Möglichkeit für die Auslegung der Leiterbahnen ist die Verwendung von Metallen in gewickelter Form. Die Leiterbahn wird länger als das Faserseil ausgelegt. Bei Belastung ziehen sich dann die Wicklungen auseinander. Der Faden kommt noch nicht in die plastische Dehnung. Jedoch muss dies in der Auslegung des ganzen Messsystems bereits vorgesehen werden. Für eine spiralförmige Wicklung ist zudem mehr Platz erforderlich. Die klare Empfehlung dieser Arbeit ist die Verwendung von Shieldexfäden als Leiter im Messsystem. Die Wahl des Fadens wird dann hinsichtlich des erforderlichen Widerstands und des verfügbaren Platzes bei der technischen Auslegung des Messsystems getroffen.

8 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
σ	Spannung
\emptyset	Durchmesser
abs()	Betragsfunktion
CAD	Computer aided design
CNT	Carbon nanotubes
DIN	Deutsches Institut für Normung
dtex	Dezitex Feinheit
EPR	Elektronenparamagnetischer Resonanzspektroskopie
FIR	Finite impulse response
FMPE	Fasermaterial mit Polyethylen
HMPE	High modulus polyethylene
ISO	International Standardisation Organisation
[K]	Kelvin
[kg]	Kilogramm
kHz	Kilohertz
[kN]	Kilonewton
[m]	Meter
[N]	Newton
UHMWPE	Ultra-high molecular weight polyethylene
UV	Ultraviolette Strahlung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

9 Literaturverzeichnis

- [1] M. Ferrari und G. Kartnig: „*Entwicklung einer multifaktoriellen Messmethode für die Zustandsüberwachung von Faserseilen für Krane*“ Fachkolloquium der WGTL, p. 2, 2021.
- [2] A. Schmieder, T. Heinze und M. Michael: "*Failure Analysis of high strength fiber ropes*" Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2015.
- [3] Y. Mupende und B. Ernst: „*Hochfeste Faserseile für Krane - Erfolgreich getestet in Hubanwendungen*,“ Technische Logistik, pp. 20-23, 09 2019.
- [4] Hearle J.W.S., O'Hear N. und H. McKenna: "*Handbook of fibre rope technology*", Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2004.
- [5] D. Smitherman Jr.: „*Space Elevators - An Advanced Earth-Space Infrastructure for the New Millenium*“ Advanced Space Infrastructure Workshop on Geostationary Orbiting Tether "Space Elevator Concepts, NASA Marshall Space Flights Center, 2000.
- [6] O. Espen, R. Schlanbusch und S. Falconer: "*Condition Monitoring Technologies for Synthetic Fiber Ropes*" Norwegen: Teknova AS, Kristiansand, 2017.
- [7] P. H. Mayrhofer, "*Werkstoffkunde Metallischer Werkstoffe*", Wien: Technische Universität Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, WS2019/20.
- [8] H.-J. Bargel und G. Schulze: "*Werkstoffkunde*", Berlin: Springer, 2008.
- [9] Deutsches Institut für Normung: "*Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019)*", Berlin: Beuth, 2020.
- [10] H. Schiebold: "*Zerstörende Werkstoffprüfung - Mechanisch-technologische Verfahren*", Berlin: Springer, 2018.
- [11] W. Pläßmann und D. Schulz: "*Handbuch Elektrotechnik 5. Auflage*", Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [12] S. Tako: „*Thermische Leitfähigkeit von hochleitfähigen Verbundwerkstoffen*“, Wien: Technische Universität Wien, 2015.
- [13] E. Krautz und H. Schultz: „*Die Abweichungen von der Matthiessenschen Regel bei Gold und Silber im Temperaturbereich von 10 - 300°K*,“ OSRAM Studiengesellschaft Augsburg, pp. 710-714, 15 Juli 1957.
- [14] VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP): "*VDI 2221 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*", VDI, 2019.
- [15] M. Weigand: "*Skriptum Maschinenelemente 7. Auflage*", Wien: Technische Universität Wien Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, 2019.
- [16] „Datenblatt Zwick Z250,“ Zwick Roell, [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/de/news-events/news/allroundline-z250/>. [Zugriff im Oktober 2022].

- [17] HBM Messtechnik GmbH, „Datenblatt Messverstärker,“ [Online]. Available: www.hbm.com. [Zugriff im Februar 2022].
- [18] E. Macherauch und H.-W. Zoch: "Praktikum in Werkstoffkunde - 100 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik 13. Auflage", Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [19] MICRO-EPSILON Eltrotec GmbH, „Datenblatt “ [Online]. Available: www.micro-epsilon.de. [Zugriff im Februar 2022].
- [20] K. Siebertz, D. van Bebber und T. Hochkirchen: "Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE) 2. Auflage", Aachen: Springer Vieweg, 2017.
- [21] R. Parthier, *Messtechnik: "Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik"*, Mittweida: Springer Vieweg, 2016.
- [22] E. Kienecke, *Messtechnik: "Systemtheorie für Elektrotechniker 7. Auflage"*, Karlsruhe: Springer, 2008.
- [23] DIN: "DIN EN ISO 2062 Textilien – Garne von Aufmachungseinheiten – Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgeräts mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit (CRE) (ISO 2062:2009)", Berlin: Beuth, 2009.
- [24] DIN: "DIN 53835-3 Prüfung von Textilien - Prüfung des zugelastischen Verhaltens Garne und Zwirne, einmalige Zugbeanspruchung zwischen konstanten Dehngrenzen, Normenausschuß Materialprüfung (NMP)", 1981.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Prinzipskizze des Messsystems in Faserseilen [1] S.2	1
Abbildung 2 Kraft-Dehnungsdiagramm verschiedener Fasermaterialien [4] S. 118.....	4
Abbildung 3 Kraft-Dehnungs-Diagramm verschiedener Materialien [4] S.55	5
Abbildung 4 Kraft-Dehnungsdiagramm verschiedener Verdrillungen [4] S.110	6
Abbildung 5 Kraft-Dehnungsdiagramm verschiedener Vordehnungen [4] S. 111	6
Abbildung 6 Kraft-Zeit Diagramm - Bruchkraft in Abhängigkeit der Lastdauer [4] S.132	7
Abbildung 7 elektrischer Widerstand in Abhängigkeit der Anzahl an Lastzyklen [6] S.5 ..	9
Abbildung 8 qualitatives Diagramm: elektrische Leitfähigkeit-Verformungsgrad der Kaltverformung [8] S.11	10
Abbildung 9 Eigenschaften der Kunststoffgruppen [8] S. 348.....	11
Abbildung 10 qualitatives Spannungs-Dehnung Diagramm [9] S. 29.....	12
Abbildung 11 qualitatives Spannungs-Dehnungs Diagramm [8] S.98.....	13
Abbildung 12 Bandlücke und Fermi-Energie [12] S.8	15
Abbildung 13 Die Ablaufschemata der VDI 2221 [14] S.13.....	22
Abbildung 14 Morphologischer Kasten.....	25
Abbildung 15 Nutzwertanalyse	26
Abbildung 16 Qualitatives 3D-Modell des Versuchsaufbaus in CAD.....	27
Abbildung 17 Technische Zeichnung der Probenaufnahme.....	29
Abbildung 18 Schematische Abbildung der Seilkräfte.....	30
Abbildung 19 Versuchsaufbau aufgebaut in der Zugprüfmaschine.....	31
Abbildung 20 Messschema der Erfassung der Probenlänge	32
Abbildung 21 Materialprüfmaschine Zwick Z250	33
Abbildung 22 Messbrückenschema zum Anschluss am Messverstärker [17]	33
Abbildung 23 - Spannungsteiler.....	34
Abbildung 24 Nichtlineare Abhängigkeit R_2 von U_2 am Spannungsteiler	35
Abbildung 25 elektrische Schaltung der Wheatstone'schen Brücke	35
Abbildung 26 Digitalmikrometer [19] S.6	37
Abbildung 27 Laser-Mikrometer [19] S.10.....	37
Abbildung 28 Versuchsaufbau mit eingespannter Probe	38
Abbildung 29 Glättung der Messwerte mit gleitendem Durchschnitt.....	47
Abbildung 30 Datenbereinigung mit Offset	47
Abbildung 31 Kraft-Längen-Diagramm von Silberdraht.....	49
Abbildung 32 Kraft-Längen-Diagramm: Elastische Dehnbarkeit von Silberdraht	49
Abbildung 33 Kraft-Längen-Diagramm von Kupferdraht.....	50
Abbildung 34 Kraft-Längen-Diagramm von Aluminiumdraht.....	51
Abbildung 35 Bruch einer Aluminiumprobe direkt am oberen Wicklungszyylinder	51
Abbildung 36 Kraft-Längen-Diagramm von Federstahldraht	52
Abbildung 37 Bruchversuch von Silvertex.....	54

Abbildung 38 Zyklische Belastung eines Faserseils [6] S. 3.....	55
Abbildung 39 Zyklusversuch mit 10% Dehnung von Silvertertech	56
Abbildung 40 Zyklusversuch mit 20% Dehnung von Silvertech.....	57
Abbildung 41 Bruchversuch von Steeltech	58
Abbildung 42 Zyklusversuch von Steeltech	58
Abbildung 43 Vergleich von Silvertech und Steeltech	59
Abbildung 44 Steeltech Faden nach dem Bruch	60
Abbildung 45 10%ige Dehnung von Elastomeren mit Nickelfüllstoff.....	62
Abbildung 46 Shieldex-Faden nach dem Bruch mit Messvolumen am Faden	63
Abbildung 47 Vergleich von Shieldex-Fäden verschiedener Dicken und Wicklungen	65
Abbildung 48 Vergleich von Shieldex-Fasern verschiedener Dicken und Wicklungen	66
Abbildung 49 Widerstand-Leiterdurchmesser Diagramm	67
Abbildung 50 zyklische Dehnung um 10% und anschließender Bruch	67
Abbildung 51 Dehnung eines Shieldex 2334 x6 Fadens um 20% ohne Bruch	70
Abbildung 52 Zeitliche Entwicklung des Widerstands unter statischer Last sowie nach Entlastung	71

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 typische Bruchdehnung von verschiedenen Werkstoffen [4] S. 123	5
Tabelle 2 Technische Eigenschaften der geprüften Proben	21
Tabelle 3 Vorspannkraft der verschiedenen Probenmaterialien	42
Tabelle 4 Gesamter Versuchsplan	44
Tabelle 5 Messwerte der metallischen Werkstoffe	53
Tabelle 6 Bruchdehnungen und spezifische Widerstände der Shieldex Fäden	64

12 Anhang

I.	Datenblatt Amann® Steel-tech	83
II.	Datenblatt Amann® Silver-tech.....	83
III.	Datenblatt MTC® Elastomer Nickel (SRV-NIC)	84
IV.	Datenblatt Shieldex® 117/17 HC +B.....	85
V.	Datenblatt Shieldex® 117/17 2-ply HC + B TPU	86
VI.	Datenblatt Shieldex® 117/17 2-ply HC + B.....	86
VII.	Datenblatt Shieldex® 235/36 2 ply HC + B	87
VIII.	Datenblatt Shieldex® 235/36 4-ply HC+B.....	87
IX.	Datenblatt Shieldex® 235/36 6-ply HC + B.....	88
X.	Datenblatt Shieldex® 400µ Monofil	88
XI.	Zusammenstellungszeichnung und Einzelteilzeichnungen der Versuchskonstruktion.....	88

I. Datenblatt Amann® Steel-tech



Steel-tech

Edelstahl/Polyester Hybridzwirn

- elektrisch leitfähiges Garn auf Edelstahl-Basis
- sehr gute Waschbeständigkeit, auch für Industrewäschen
- für Heizanwendungen und RFID-Antennen
- das multifunktionale Smart Yam zum Wirken, Stricken, Weben und Sticken

Feinheit dtex	Tex Nr	Aufmachung	Widerstand
930	93	5.000 m Sp	ca. 90 Ω/m
100	-	1.500 m KS	ca. 110 Ω/m

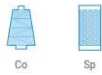
Hauptanwendung:



- Smart textiles
- Automotive

Erhältliche Farbnummer: 1000 = roh, grau durch den Edelstahlanteil.

Legende:



II. Datenblatt Amann® Silver-tech



Silver-tech

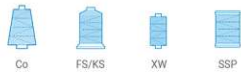
Silber beschichteter Polyamid/Polyester Hybridzwirn

- Spezialnäh- und Stickfäden mit Silberbeschichtung
- für leitfähige Nähte und Flächen
- textile Elektroden als Sensoren und Aktoren
- für Nahtpositionen, die antimikrobielle Eigenschaften erfordern
- Ausschluss einer zellschädigenden Wirkung durch Zytotoxizitätstest nach DIN EN ISO 10993-5

Etikett-Nr	Stickgarnstärke	Tex-Nr	Aufmachung	Farbanzahl	Nadelstärke (in Nm)	Nadelstärke (in Nr.)	Widerstand
120	40	28	2500 m FS	1	75-90	11-14	< 530 Ω/m

Erhältliche Farbnummer 1000 = roh, silber-grau durch den Silberanteil. Bedingt durch den Silberanteil und Oxidationsprozessen, dunkelt die Farbe mit der Zeit etwas nach.

Legende:



Hauptanwendung:



- Smart textiles
- Medtech

Weitere Anwendungen:



III. Datenblatt MTC® Elastomer Nickel (SRV-NIC)

///EMC Shielding Materials

CONSTANT CONDUCTIVE ELASTOMERS
SRV-SERIES nickel plated graphite

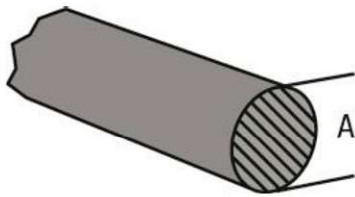


Silicone / Fluorosilicone solid round cords are loaded with a variety of highly conductive particles providing superior EMI/RFI shielding performance combined with excellent environmental sealing.

It is recommended to use fluorosilicone as elastomer if the conductive elastomer should be resistant against aggressive substances like fuel oils and kerosene.

Nickel plated graphite is a high quality cost effective material with increased use in the military market. It is optionally available as flame retardant version.

- Filler material: Nickel plated graphite (NIC)
- Conductive filler ensures galvanic compatability
- Wide variety of profiles as standard
- Customer-specific lengths, cross-section designs and pasted O-rings available
- Low contact resistance between mating surfaces
- Fluorosilicone for harsh environments: fuel oils and solvents



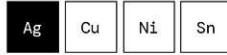
RoHS ✓ REACH ✓     

PRODUCT SPECIFICATIONS

PROPERTY	VALUE / TOLERANCE		TEST METHOD
Conductive filler material	Nickel plated graphite (NIC)		-
Basic rubber material	Silicone	Fluorosilicone	-
Hardness	60 Shore A ± 7	65 Shore A ± 7	ASTM D2240
Volume resistivity	0,05 Ω-cm	0,05 Ω-cm	MIL-DTL 83528 C
Elongation (min)	150 %	150 %	ASTM D412
Tear strength	8,75 N/mm	7,0 N/mm	ASTM D624
Specific gravity	2,0 g/cm ³ ± 13 %	2,2 g/cm ³ ± 13 %	ASTM D792
Compression set	25,0 % (70h @ 100 °C)	30,0 % (70h @ 100 °C)	ASTM D395
Tensile strength (min)	1,38 MPa	1,38 MPa	ASTM D412
Operating temperature	-55 – 160 °C	-55 – 160 °C	-
Colour	Dark grey	Dark green	-
Outer diameter range (A)	1,0 – 8,0 mm		-

IV. Datenblatt Shieldex® 117/17 HC +B

shieldex



Shieldex® 117/17 HC + B

200161111717HCB

Material	Polyamide / Nylon 6.6
Metal Plated	99.9 % Pure Silver
+ B Coating	Nitrile rubber as additional protective coating
Yarn count raw	117 dtex
Yarn count silverized	142 dtex
Electrical Resistivity	< 500 Ω/m
Yield	70.000 m/kg
Tenacity	48 cN/tex
Elongation / Break	23 % ± 6
Make Up	On cones 230 mm 3° 30
Packaging	Average 450 g net yarn per cone 15 or 30 cones per carton
Storage and Handling	According to our care and handling instructions
Compliance and Certification	OEKO-TEX® Standard 100, DIN EN ISO 9001:2015, REACH, RoHS

Alterations Reserved 01.05.21/04 – The above information has been compiled from our manufacturer area according to the latest state of development and application technology. Since application and further processing are beyond our control, no liability of the producer can be derived from the contents of the data sheet. All deviant or transcending data sheet information must be confirmed in written form by the manufacturer. Our general terms and conditions apply in all cases. All previous data sheets are invalid with the publication of this data sheet. Please note our handling and storage instructions as well accessible at www.shieldex.de.

**Statex Produktions-
und Vertriebs GmbH**
Kleiner Ort 9-11
28357 Bremen, Germany

Contact
Tel. +49 421 27 50 47
Fax +49 421 27 36 43
info@shieldex.de



V. Datenblatt Shieldex® 117/17 2-ply HC + B TPU

Shieldex® 117/17 2-ply HC + B TPU

2001211719TPU

Material	117/17 dtex Polyamide / Nylon 6.6
Metal Plated	99.9 % Pure Silver
TPU Coating	Thermoplastic Polyurethane (TPU) transparent
+ B Coating	Nitrile rubber as additional protective coating
Composition	92 % TPU + 8 % 117/17 dtex 2-ply HC + B
Yarn count silverized	3.000 dtex
Electrical Resistivity	< 300 Ω/m
Yield	100 or 1.000 m/kg
Tenacity	44 ± 5 cN/tex / based on 117/17 dtex 2-ply HC + B
Elongation / Break	21 % ± 5 / based on 117/17 dtex 2-ply HC + B
Make Up	8 inch cross bobbin
Packaging	On request
Storage and Handling	According to our care and handling instructions
Compliance and Certification	OEKO-TEX® Standard 100, DIN EN ISO 9001:2015, REACH, RoHS

VI. Datenblatt Shieldex® 117/17 2-ply HC + B

Shieldex® 117/17 2-ply HC + B

260121011717HC

Material	Polyamide / Nylon 6.6
Metal Plated	99.9 % Pure Silver
+ B Coating	Nitrile rubber as additional protective coating
Yarn count silverized	295 ± 3 dtex
Twist	Z 550
Electrical Resistivity	< 300 Ω/m
Yield	33.800 m/kg ± 3 %
Tenacity	44 ± 5 cN/tex
Elongation / Break	21 % ± 5
Make Up	On cones 230 mm 3° 30
Packaging	Average 450 g net yarn per cone 15 or 30 cones per carton
Storage and Handling	According to our care and handling instructions
Compliance and Certification	Hohenstein Biological Safety / Z-161795, DIN EN ISO 9001:2015, REACH, RoHS

VII. Datenblatt Shieldex® 235/36 2 ply HC + B

Shieldex® 235/36 2-ply HC + B

200121235362HCB

Material	Polyamide / Nylon 6.6
Metal Plated	99.9 % Pure Silver
+ B Coating	Nitrile rubber as additional protective coating
Yarn count raw	476 ± 6 dtex
Yarn count silverized	605 ± 10 dtex
Twist	Z 480
Electrical Resistivity	80 Ω/m ± 30 Ω/m
Yield	16.500 m/kg ± 3 %
Tenacity	50 ± 10 cN/tex
Elongation / Break	25 % ± 6
Make Up	On cones 230 mm 3° 30
Packaging	Average 530 g net yarn per cone 12 or 24 cones per carton
Storage and Handling	According to our care and handling instructions
Compliance and Certification	Hohenstein Biological Safety / Z-161795, DIN EN ISO 9001:2015, REACH, RoHS

VIII. Datenblatt Shieldex® 235/36 4-ply HC+B

Shieldex® 235/36 4-ply HC + B

200121235364HCB

Material	Polyamide / Nylon 6.6
Metal Plated	99.9 % Pure Silver
+ B Coating	Nitrile rubber as additional protective coating
Yarn count raw	235/36 -2/+4 dtex
Yarn count silverized	1.220 ± 15 dtex
Twist	Z 400
Electrical Resistivity	40 Ω/m ± 10 Ω/m
Yield	8.060 m/kg ± 2.5 %
Tenacity	47 ± 5 cN/tex
Elongation / Break	26 % ± 6
Make Up	On cones 230 mm 3° 30
Packaging	Average 820 g net yarn per cone 12 or 24 cones per carton
Storage and Handling	According to our care and handling instructions
Compliance and Certification	DIN EN ISO 9001:2015, REACH, RoHS

IX. Datenblatt Shieldex® 235/36 6-ply HC + B

Shieldex® 235/36 6-ply HC + B

200121235366HCB

Material	Polyamide / Nylon 6.6
Metal Plated	99.9 % Pure Silver
+ B Coating	Nitrile rubber as additional protective coating
Yarn count raw	235/36 -2/+4 dtex
Yarn count silverized	1.905 ± 15 dtex
Twist	Z 400
Electrical Resistivity	30 Ω/m ± 10 Ω/m
Yield	5.200 m/kg ± 2.5 %
Tenacity	47 ± 5 cN/tex
Elongation / Break	27 % ± 6
Make Up	On cones 230 mm 3° 30
Packaging	Average 850 g net yarn per cone 12 or 24 cones per carton
Storage and Handling	According to our care and handling instructions
Compliance and Certification	DIN EN ISO 9001:2015, REACH, RoHS

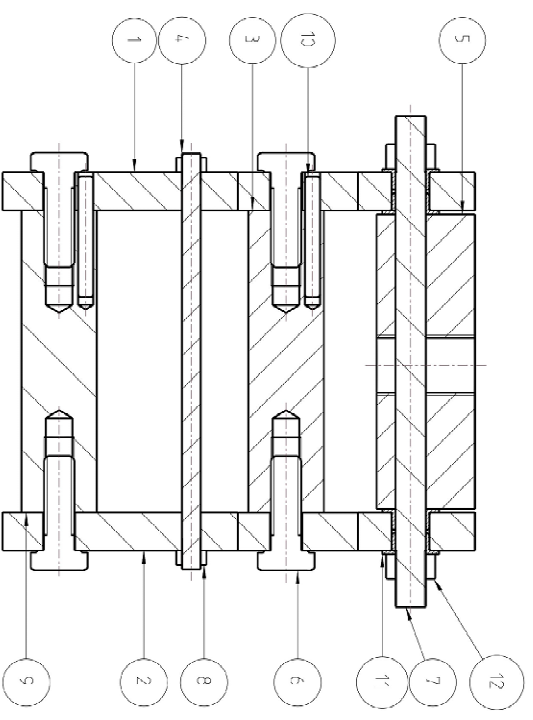
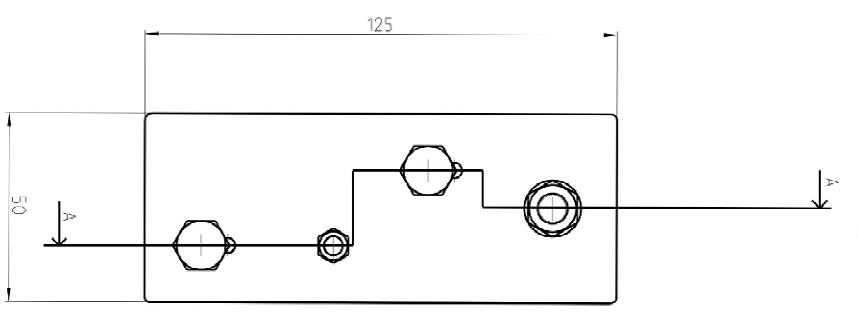
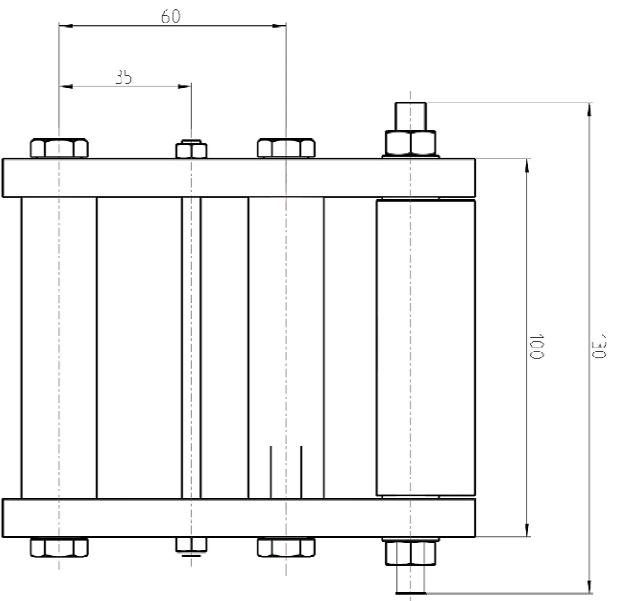
X. Datenblatt Shieldex® 400μ Monofil

Shieldex® 400 μ Monofil

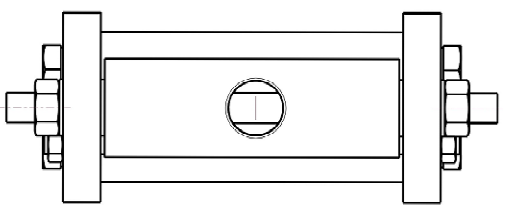
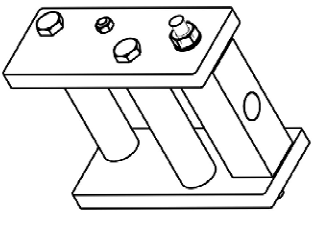
4002410400

Material	Polyamide / Nylon 6.6
Metal Plated	99.9 % Pure Silver
Yarn count raw	1.430/1 ± 50 dtex
Yarn count silverized	1.550/1 ± 50 dtex
Electrical Resistivity	< 60 Ω/cm
Yield	6.250 m/kg
Tenacity	50 cN/tex
Elongation / Break	30 % ± 5
Make Up	On cones 230 mm 3° 30
Packaging	Average 400 g net yarn per cone 15 or 30 cones per carton
Storage and Handling	According to our care and handling instructions
Compliance and Certification	DIN EN ISO 9001:2015, REACH, RoHS

XI. Zusammenstellungszeichnung und Einzelteilzeichnungen der Versuchskonstruktion

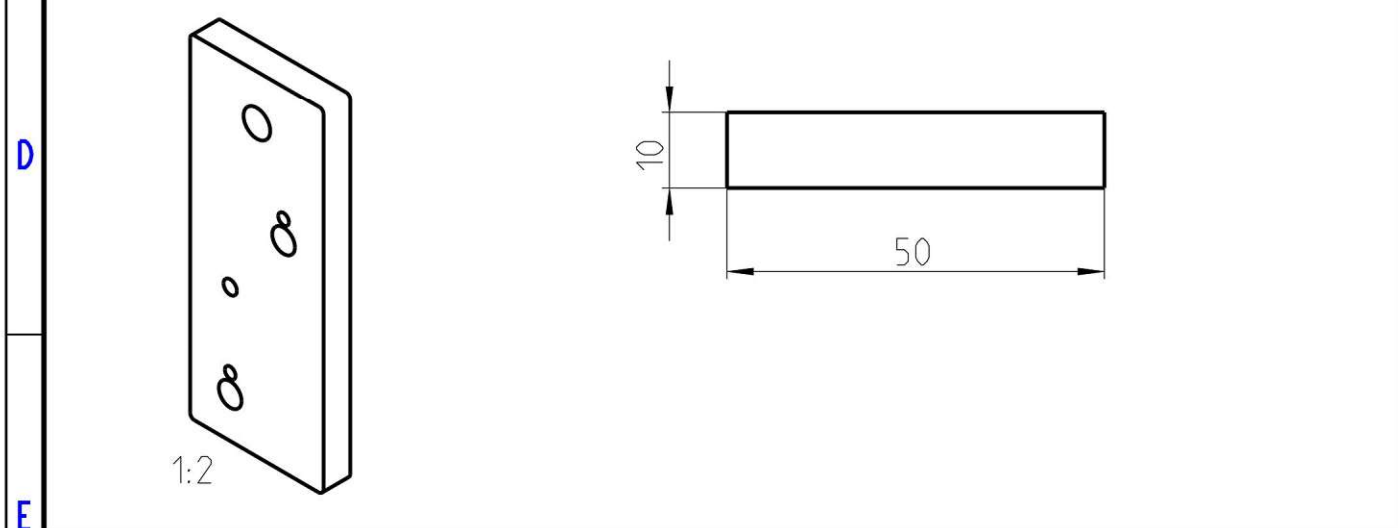
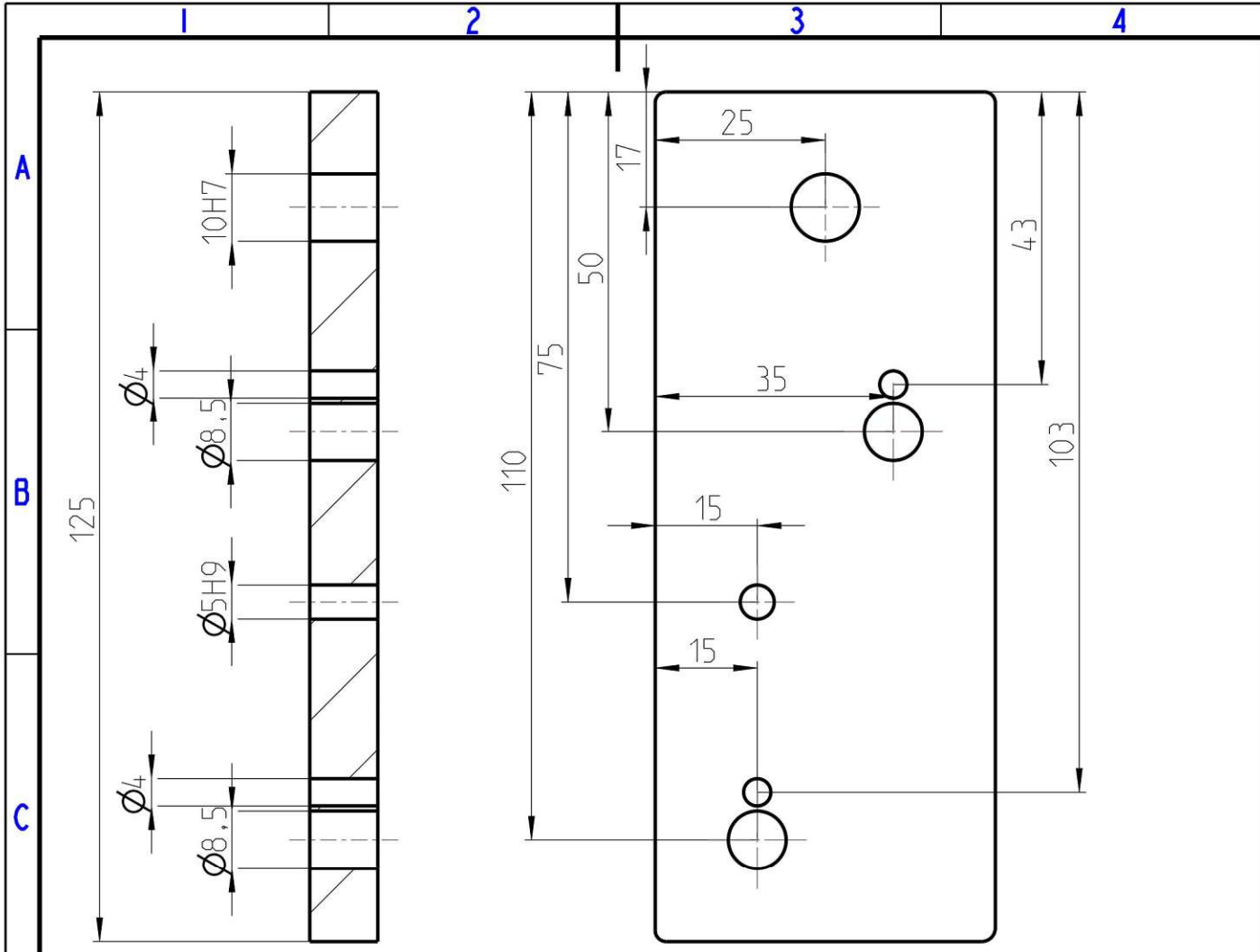


Schnitt A-A

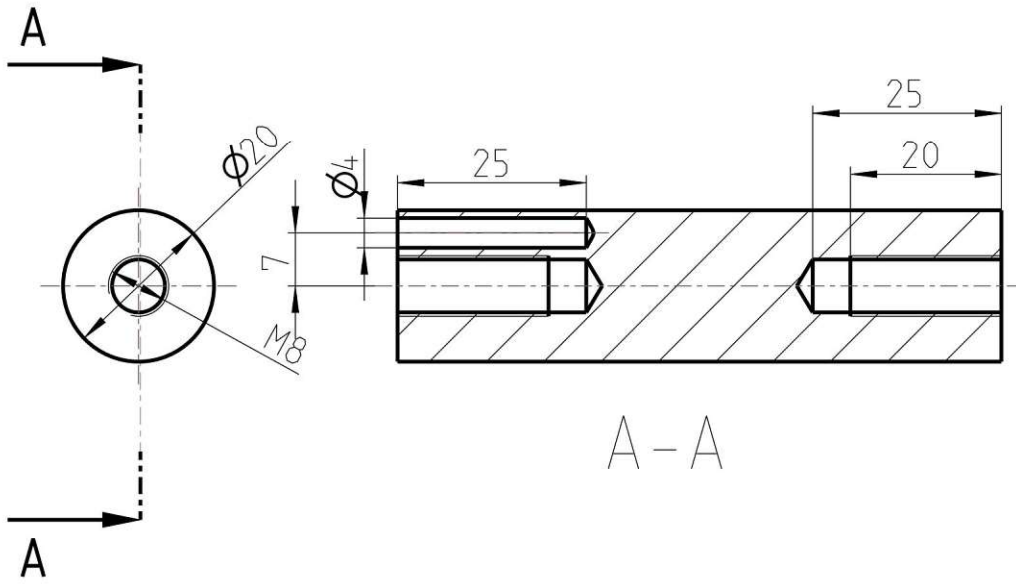
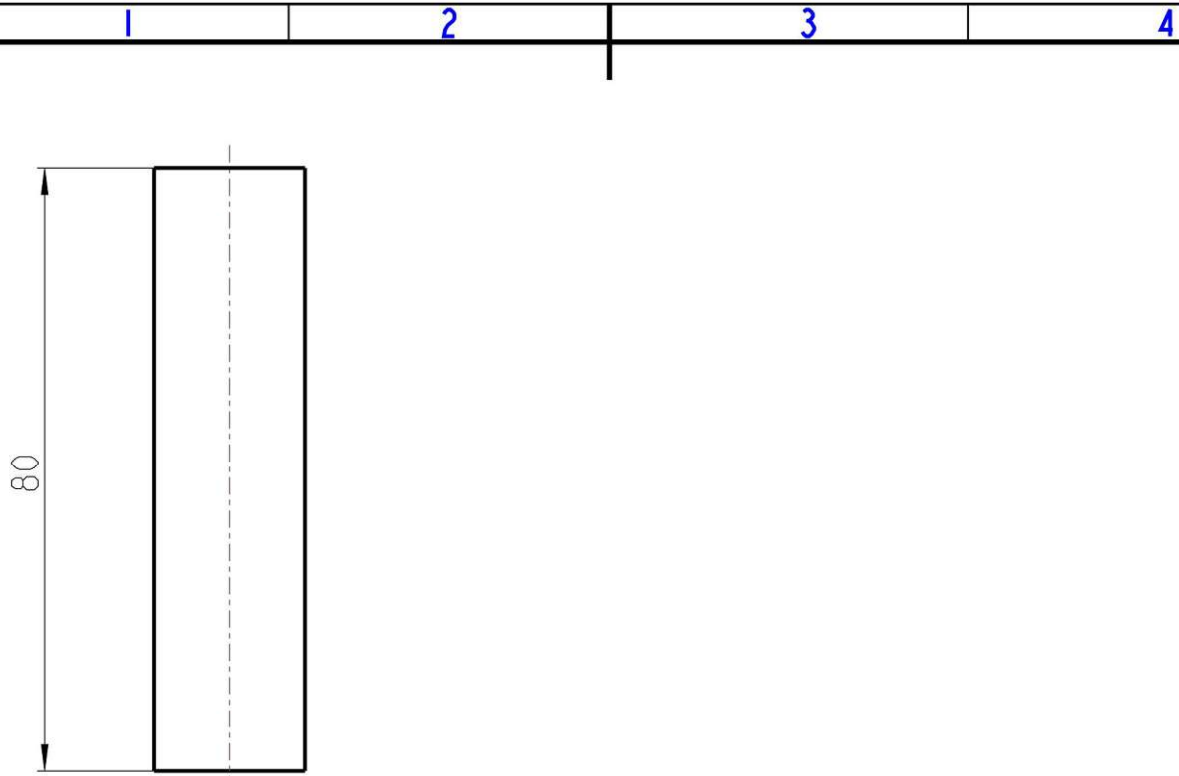


12

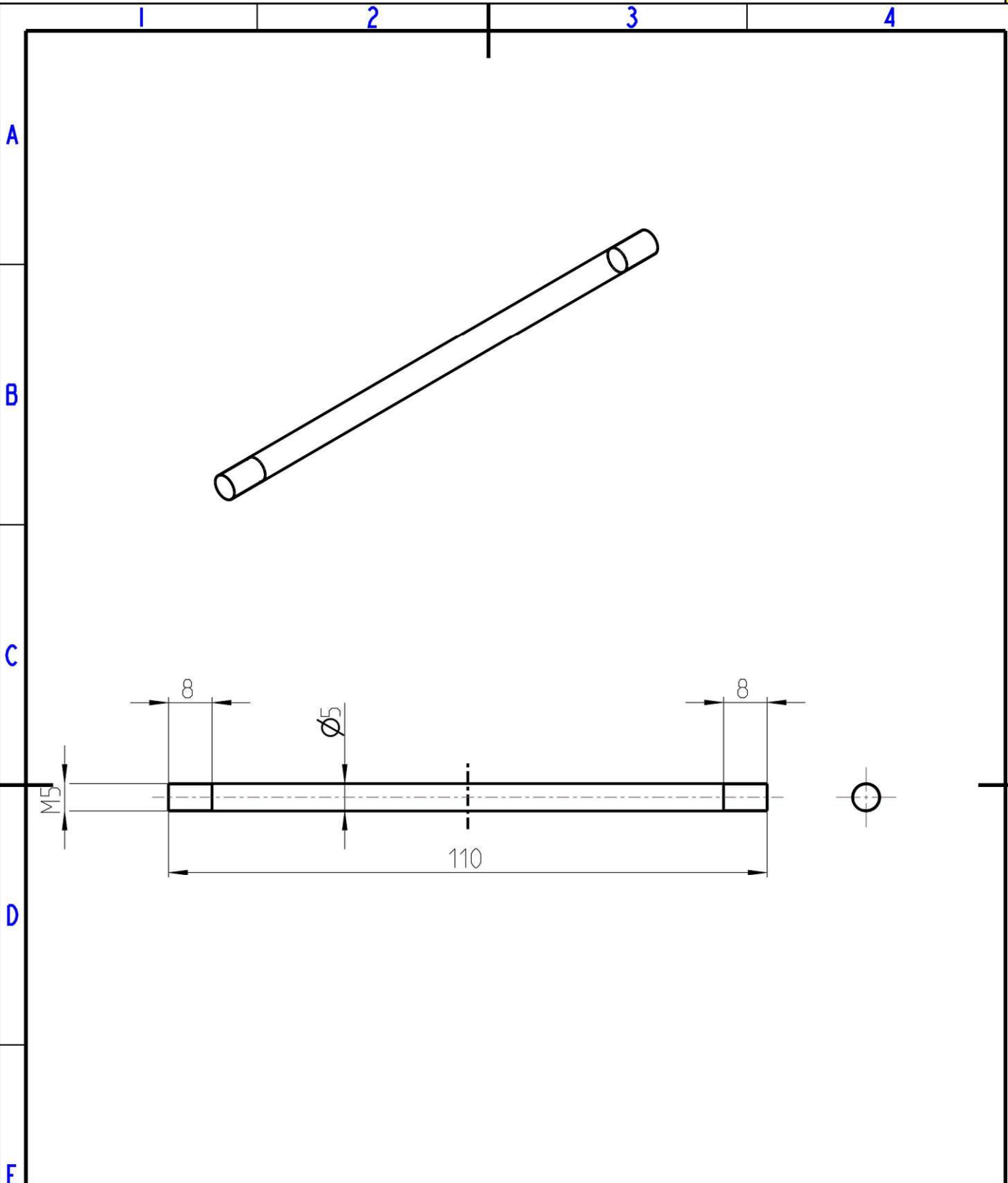
2	MUTTER-M8	12	ST37	DIN 934	
4	HÜLSE-M8	12	Kunststoff	ISO 3547-2	
2	PASSSTÜCK	10	Stahl	DIN 5225	
1	HAUPT-ZYLINDER	9	Aluminium		
2	MUTTER-M5	8	ST37	DIN 934	
1	EDELSTAHLSTANGE	7	Stahl		
4	M8x25	6	ST37	DIN 931	
1	QUADER1	5	Stahl		
1	STANGE2	4	Stahl		
1	AUSSELSCHSYL	3	Aluminium		
1	PLATTE2	2	Aluminium		
1	PLATTE1	1	Aluminium		
Srn. Benennung		Teil. Werkstoff/Anweis.		Sachnummer/-Bezeichn. Masse (kg)	
Werkstoff		Zaehnrung		Stueck. Anloeger/Anloegerarten	
Masse: [21 kg		Erstellt von: Wieland		Fertigt an: Fel-03-22	
TU Wien		Freigegeben von: ---		Freigegeben am: ---	
Projekt: ---		Projektor: ---		Maßstab: 1:1	
Aufnahme		Blatt		Blatt	



E	Werkstoff: Aluminium	Bemerkung: -	Stueck: 2	Allgemeintoleranzen: ISO 2768 -
	Masse: [.2] kg	Erstellt von: Wieland	Erstellt am: Feb-01-22	Freigegeben am: ---
F	TU Wien Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung www.tuwien.ac.at	Freigegeben von: ---	Benennung: Kunststoff_links	Projektion:
		Maßstab: 1:2	Rev. 00	Spr. de
	Dokumentenart: Zeichnung	Dokumentnummer: Z_KUNSTSTOFFLINKS	A4	Blatt 2 / 2

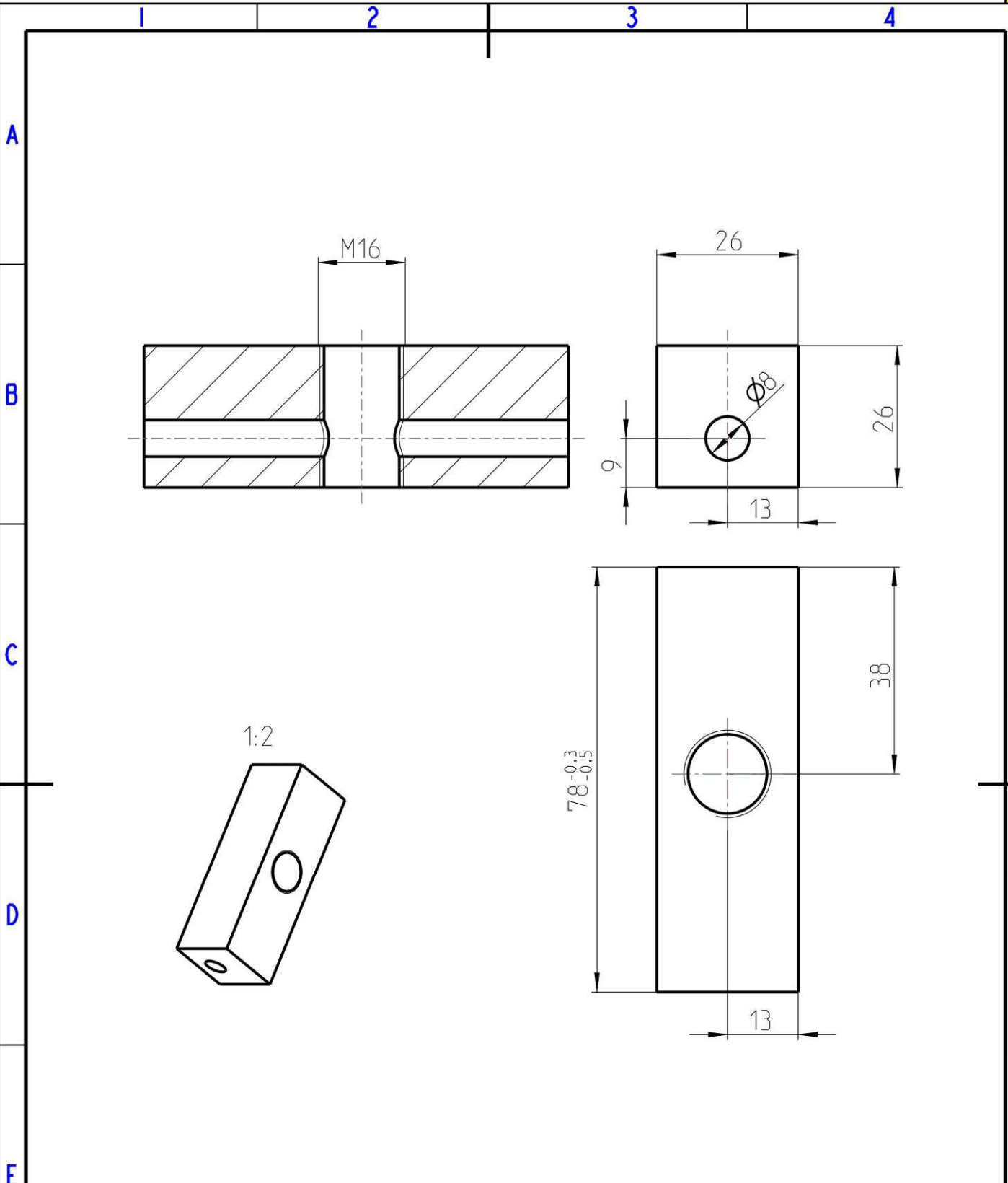


Werkstoff: Aluminium	Bemerkung: -2 Hauptzylinder -2 Ausgleichszylinder	Stueck: 4	Allgemeintoleranzen: ISO 2768 -		
Masse: [.2] kg	Erstellt von: Wieland	Erstellt am: Feb-01-22		Freigegeben am: ---	
TU Wien Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung www.tuwien.ac.at	Freigegeben von: ---	Benennung: Hauptzylinder & Ausgleichszylinder		Projektion: 	Maßstab: 1:1
	Dokumentenart: Zeichnung	Dokumentennummer: Z_HAUPTZYLINDER	Rev. 00	Spr. de	A4 Blatt 2 / 2

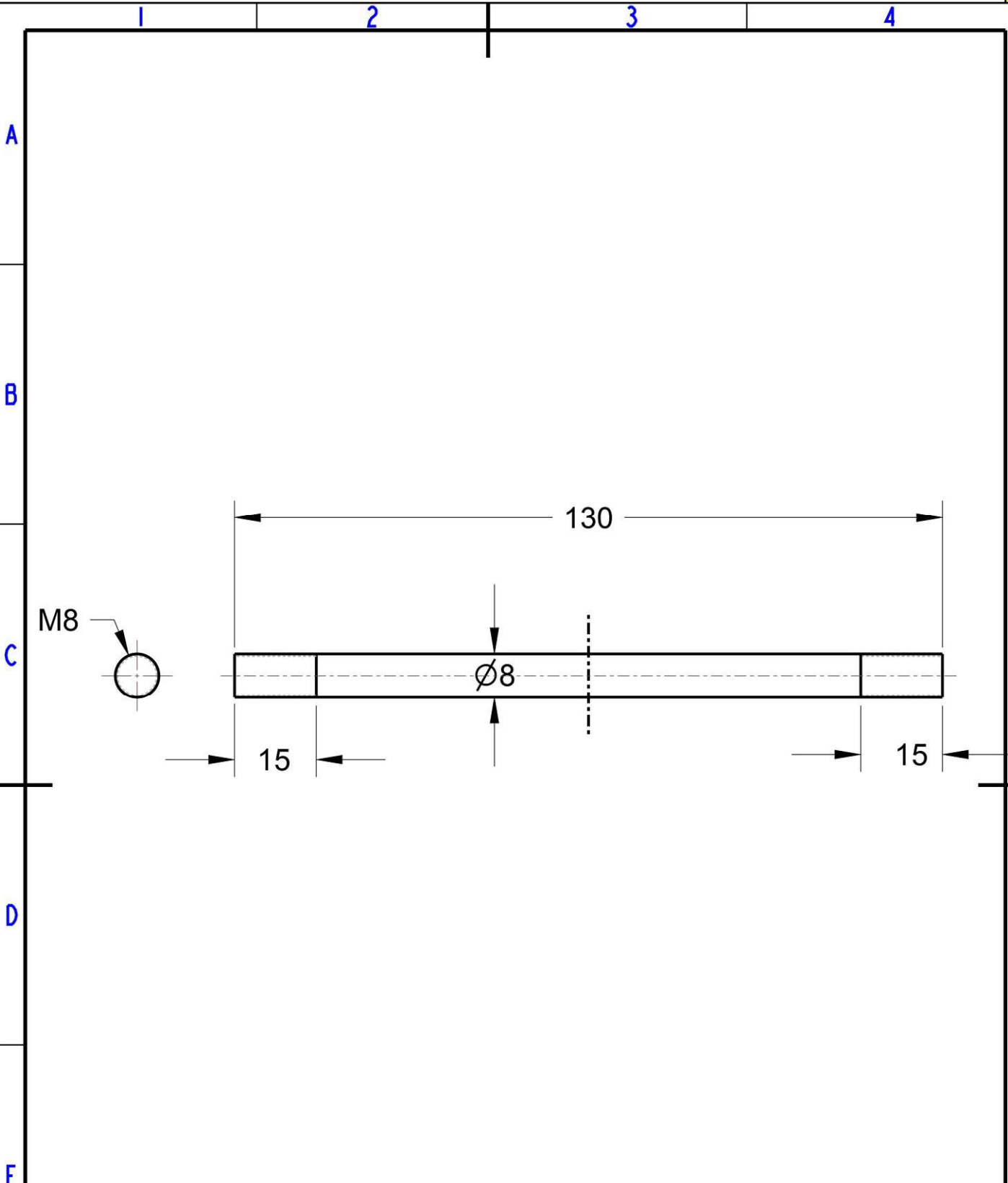


E	Werkstoff: Stahl	Bemerkung: -	Stueck: 2	Allgemeintoleranzen: ISO 2768 -	
	Masse: [.2] kg	Erstellt von: Wieland		Erstellt am: Feb-03-22	
F	TU Wien Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung www.tuwien.ac.at	Freigegeben von: ---		Freigegeben am: ---	
		Benennung: Fixierstange		Projektion: 	Maßstab: 1:1
	Dokumentenart: Zeichnung	Dokumentennummer: Z_STANGE	Rev. 00	Spr. de	A4 Blatt 2 / 2

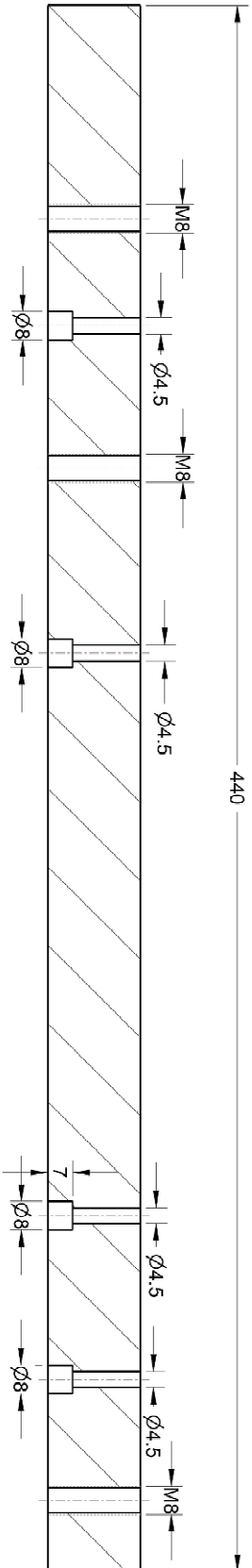
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



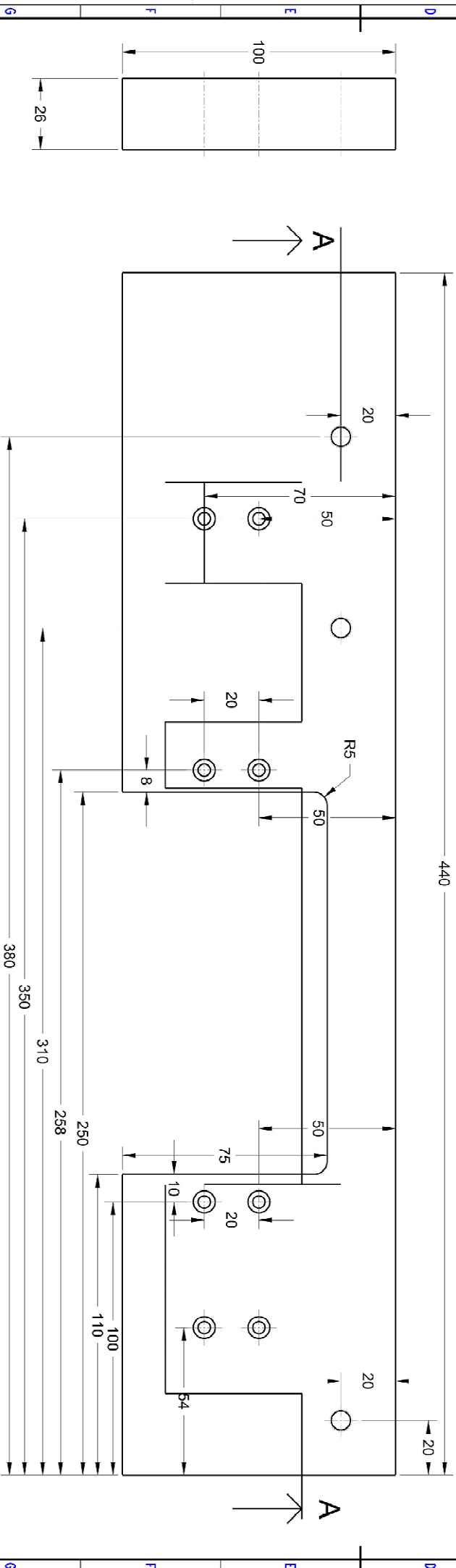
E	Werkstoff: Aluminium	Bemerkung: -	Stueck: 2	Allgemeintoleranzen: ISO 2768 -	
	Masse: [.2] kg	Erstellt von: Wieland	Erstellt am: Jan-31-22	Freigegeben am: ---	
F	TU Wien Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung www.tuwien.ac.at	Freigegeben von: ---	Freigegeben am: ---		Projektion:
		Benennung:	Maßstab: 1:1		
	Dokumentenart: Zeichnung	Dokumentnummer: Z_QUADER	Rev. 00	Spr. de	A4 Blatt 2 / 2



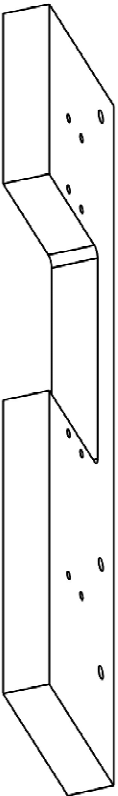
F	Werkstoff: Stahl	Bemerkung: -	Stueck: 2	Allgemeintoleranzen: ISO 2768 -	
	Masse: [.2] kg	Erstellt von: Wieland	Erstellt am: Feb-03-22		
F	TU Wien Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung www.tuwien.ac.at	Freigegeben von: ---	Freigegeben am: ---		
		Benennung: Edelstahlstange	Projektion: 	Maßstab: 1.000	
	Dokumentenart: Zeichnung	Dokumentnummer: EDELSTAHLSTANGE	Rev. 00	Spr. de	A4 Blatt 1/1



SCHNITT A-A

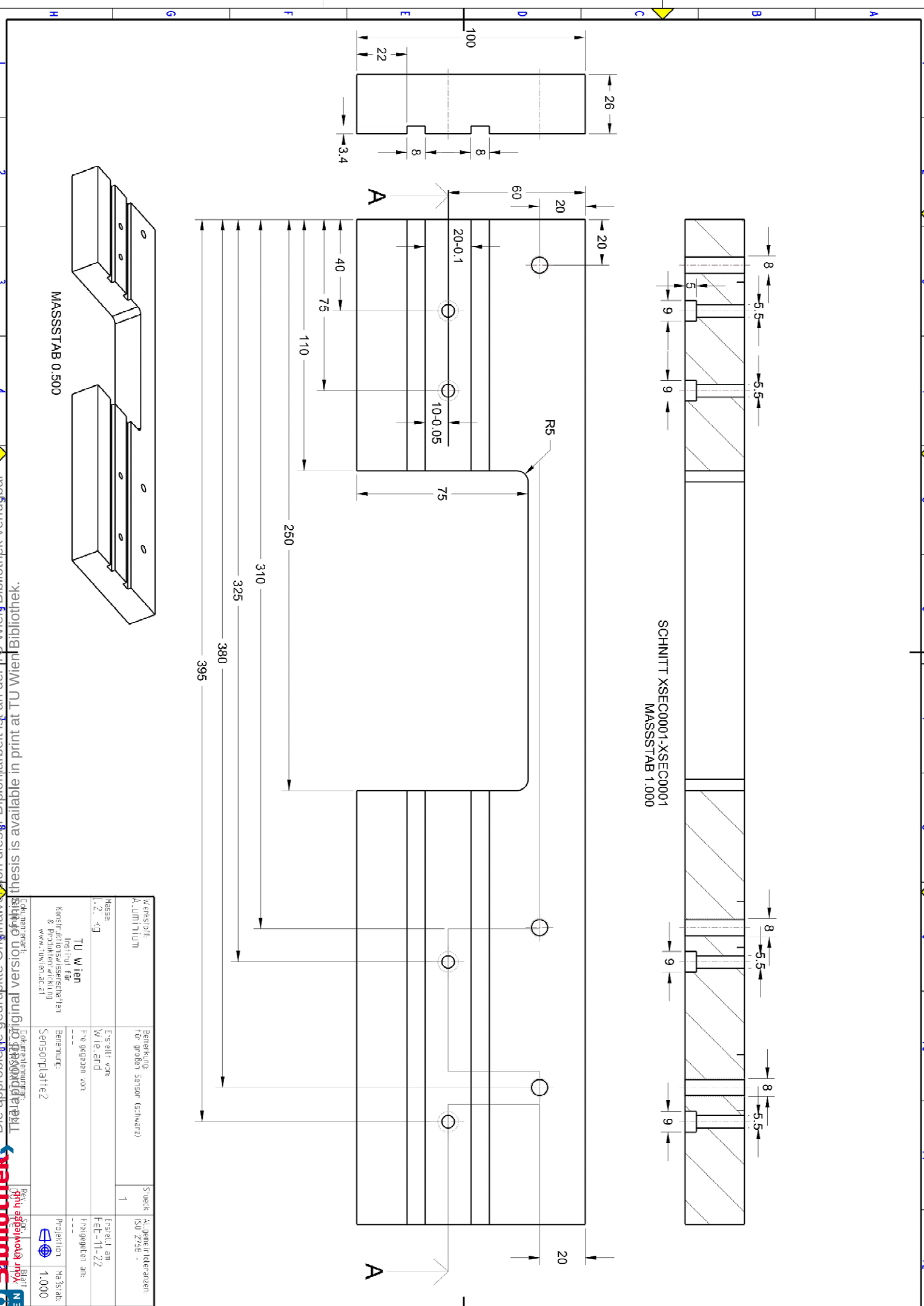


MASSSTAB 1.000



MASSSTAB 0.500

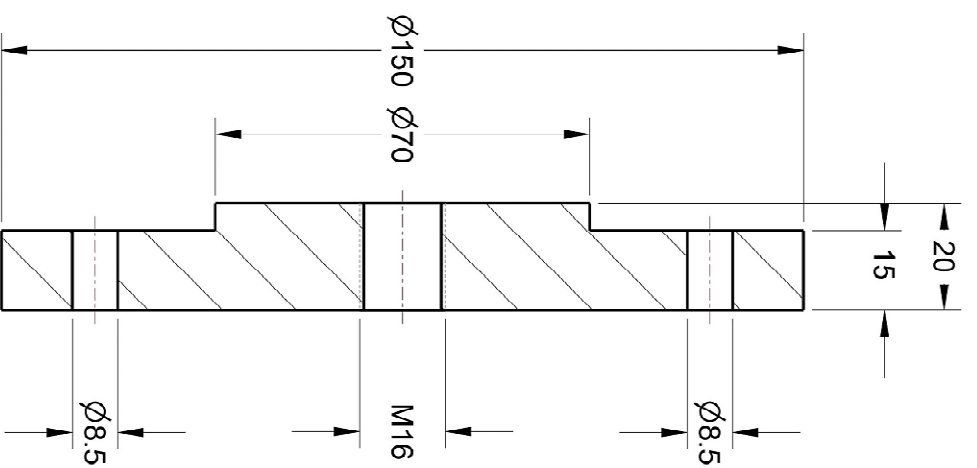
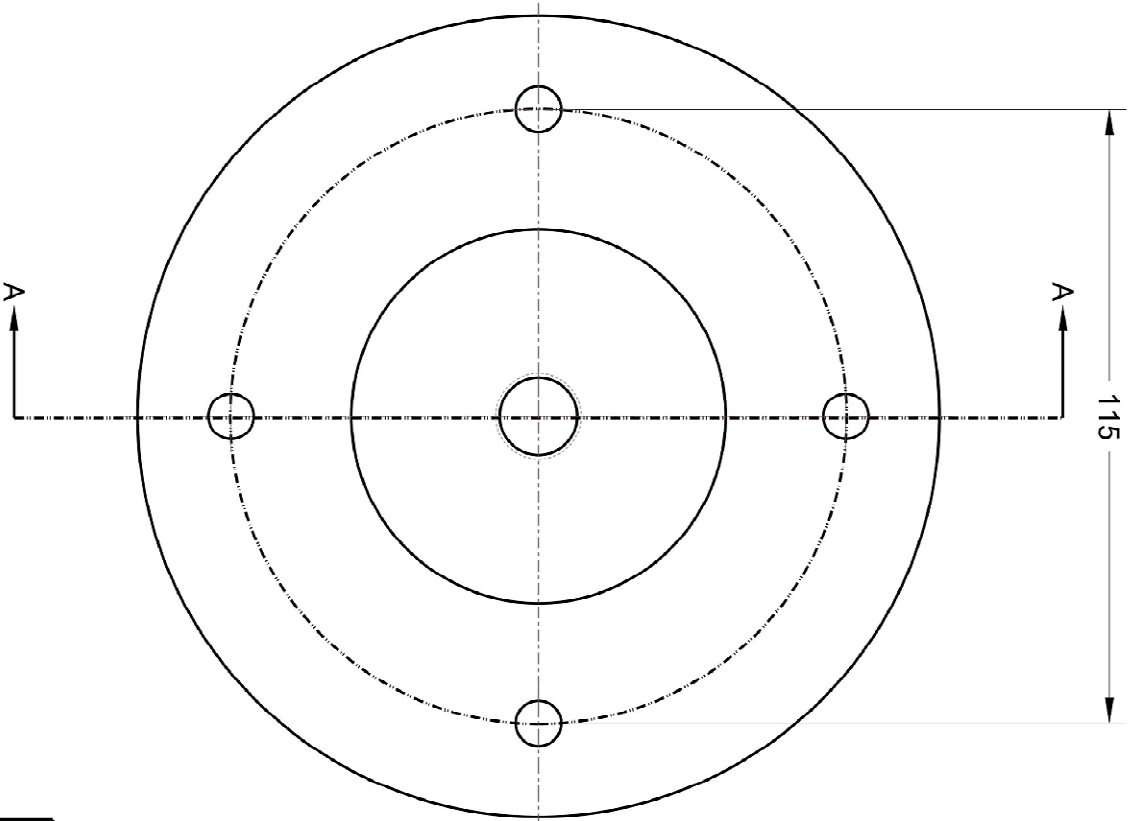
Werkstoff: Aluminium	Bearbeitung:	Streckart: ISO 2768 -
Masse: 1,21 kg	Erstellt von: W. Leland	Erstellt am: 2011-11-22
TU Wien Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung www.tuwien.at	Freigegeben von: ---	Freigegeben am: ---
Dokumententyp: Schnittzeichnung	Dokumentnummer: SENSOR-PLATE1	Projekt nr.: MAGSIB-0.333



MASSSTAB 0.500



Kennstoff: A.LUMI71.UM	Bemerkung: Für großen Sensor (Schwarz)	Stück: ISU 2755
Masse: 12,4 g	Erstellt von: W.L.erd	Freigelegt am: F&E - 11-22
Hersteller: TU Wien Institut für Kontinuierliche & Prozesskontrolle www.tuwien.ac.at	Benennung: Sensorplatte 2	Projektion: Maßstab: 1:1000
Dokumententwurf: S. Kowalewski	Dokumentprüfung: S. Kowalewski	Blatt: 1 von 1



SCHNITT A-A

Material: **Aluminium**

Bemerkung: Maße des Rohmaterials irrelevant, Anschlussmaße und Benennungen wichtig

Stück: 1

Allgemeinrolenzen: ISO 2768 -

Masse: 1.2 kg

Erstellt von: Wieland

Erstellt am: May-02-22

TU Wien

Freigegeben von: ---

Freigegeben an: ---

Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung
www.tuwien.ac.at

Benennung: Bodenplatte

Projekt nr.: Maßstab: 1.000

Documententwurf: RÖDNER ATT

Erkennungsnummer: ---

Rev.: 00 Spr.: A3 Blatt: 1/1

