



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Tanja Wedel

## **Konstruktion und Berechnung eines Modells zur experimentellen Spannungsanalyse am Schubfeldträger**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Tanja Wedel**

**Konstruktion und Berechnung eines  
Modells zur experimentellen  
Spannungsanalyse am Schubfeldträger**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
G.U.N.T Gerätebau GmbH  
Abteilung Konstruktion  
Fahrenberg 14  
22885 Barsbüttel

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Nast  
Zweitprüfer/in : Dr.-Ing. Abraham

Abgabedatum: 02.09.2016

# Zusammenfassung

Tanja Wedel

## Thema der Bachelorthesis

Konstruktion und Berechnung eines Modells zur experimentellen Spannungsanalyse am Schubfeldträger

## Stichworte

Festigkeit, Leichtbau, Schubfeldträger, DMS Messungen, Stabilitätsversagen, Bolzenauslegung, Vergleich Fachwerk

## Kurzzusammenfassung

Eine im Leichtbau häufig verwendete Idealisierung ist der Schubfeldträger, dessen Verhalten durch die Schubfeldtheorie beschrieben wird. Sie kann bei der Berechnung dünnwandiger, durch Gurte bzw. Stringer und Pfosten versteifter Strukturen eingesetzt werden. Kern der Theorie ist, dass wenn ein dünnwandiges, mit Steifen verstärktes Profil über eine Querkraft eine Biegebelastung erfährt, diese sich aufteilt auf eine Normalkraftbelastung in den Steifen und eine Schubbelastung im dünnen Hautfeld. Mit Hilfe dieser Idealisierung lassen sich Leichtbaustrukturen sehr leicht berechnen.

Ziel dieser Arbeit ist die Konstruktion und Berechnung eines Schubfeldträgermodells für den Einsatz in der Lehre. Das Modell muss dem Ideal der Schubfeldtheorie gerecht werden und dem Lernenden das theoretisch Erfahrene und Berechnete experimentell zugänglich machen. Außerdem soll mit Hilfe des Modells der Schubfeldträger mit anderen Leichtbaumodellen verglichen werden können. Der Aufbau des Modells orientiert sich in Form, Größe und Aufbau daher an bereits an der Hochschule vorhandenen Modellen und ist mit der gleichen Messmitteltechnik zu betreiben.

## Title of the paper

Design and calculation of a model for experimental stress analysis on a web shear structure

## Abstract

An often used idealization in light weight structures is the shear web structure, based on the shear web theory. It serves the calculation of thin-walled structures, supported by rods. It is based on the knowledge that in case of a bending moment, forced by a vertical load, the rods take all the normal forces and the thin shear webs become diagonal tension fields.

Aim of this thesis is to design and to calculate a model for application in teaching. The model needs to represent the shear web theory. In supplement to calculations it is intended to support the understanding of the students. Further it should be capable to compare the shear web theory with other light weight theories. Therefore the structure is based on other light weight models which are already used in HAW.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einordnung</b> .....	<b>2</b>
2.1	Bedeutung Leichtbau.....	2
2.2	Bedeutung Lehrmodelle im Studium.....	3
2.3	Der Schubfeldträger im Besonderen .....	4
<b>3</b>	<b>Methodische Konstruktion</b> .....	<b>5</b>
3.1	Lösungsfindung .....	6
3.1.1	Marktanalyse .....	6
3.1.2	Ergebnis Gespräch .....	6
3.1.3	Morphologischer Kasten .....	7
3.1.4	Analyse durch Wertigkeitsverfahren .....	11
3.1.5	Beschreibung der gewählten Lösung .....	12
3.2	Dimensionierung und Berechnung .....	14
3.2.1	Materialwerte .....	14
3.2.2	Stab- und Lagerkräfte .....	15
3.2.3	Stabilitätsnachweis .....	20
3.2.4	Festigkeitsnachweis .....	28
3.2.5	Verbindung Stab/Knotenscheibe/Bolzen .....	32
3.2.6	Verbindung Kraft Schubfeldträger .....	34
3.2.7	Klebung .....	35
3.2.8	Zusammenfassung der Werte: .....	37
3.3	DMS Messtechnik.....	38
3.3.1	Messbedingungen .....	39
3.3.2	Messaufbau .....	41
3.3.3	Platinenbestückung .....	46
<b>4</b>	<b>Versuchsträger</b> .....	<b>46</b>
4.1	Versuchsaufbau.....	47
4.1.1	Kraftpfad .....	47
4.1.2	Montage der mechanischen Komponenten .....	49
4.1.3	Montage der elektronischen Komponenten .....	52
4.2	Versuchsvorbereitung.....	57
4.3	Versuchsdurchführung .....	60
4.4	Messwerte und Auswertung .....	62
4.4.1	Messwerte und Auswertung Stäbe .....	62
4.4.2	Messwerte und Auswertung Hautfelder .....	73
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>Anhänge</b> .....	<b>88</b>

<i>Abb. 2-1: Spannungsverteilung im I-Träger</i> .....	5
<i>Abb. 2-2: Idealisierter Spannungsverlauf Schubfeldträger</i> .....	5
<i>Abb. 3-1: Sammlung Funktionen und Bewertungskriterien</i> .....	7
<i>Abb. 3-2: Morphologischer Kasten</i> .....	8
<i>Abb. 3-3: Schubfeldträger</i> .....	13
<i>Abb. 3-4: Werkstoffeigenschaften Aluminium</i> .....	14
<i>Abb. 3-5: Schubfeldträger Berechnung 1</i> .....	15
<i>Abb. 3-6: Schubfeldträger Berechnung 2</i> .....	16
<i>Abb. 3-7: Schubfeldträger Berechnung 3</i> .....	17
<i>Abb. 3-8: Schubfeldträger Schnitt 1</i> .....	18
<i>Abb. 3-9: Schubfeldträger Schnitt 2</i> .....	18
<i>Abb. 3-10: Schubfeldträger Schnitt 3</i> .....	19
<i>Abb. 3-11: Schubfeldträger Schnitt 4</i> .....	19
<i>Abb. 3-12: Stab</i> .....	21
<i>Abb. 3-13: Eulersche Knickfälle</i> .....	22
<i>Abb. 3-14: Knickrichtung im Stabquerschnitt</i> .....	23
<i>Abb. 3-15: Lagerbedingungen Stab</i> .....	24
<i>Abb. 3-16: Blech</i> .....	25
<i>Abb. 3-17: Beulwert</i> .....	27
<i>Abb. 3-18: Bolzen</i> .....	28
<i>Abb. 3-19: Bolzenverbindung</i> .....	29
<i>Abb. 3-20: Dimensionierung Augenstab</i> .....	30
<i>Abb. 3-21: Knotenscheibe</i> .....	31
<i>Abb. 3-22: Spiel Bolzen in Bohrung</i> .....	32
<i>Abb. 3-23: Verschiebung durch Spiel</i> .....	32
<i>Abb. 3-24: Winkeländerung Krafteinleitung</i> .....	33
<i>Abb. 3-25: Verbindung Kraft Schubfeldträger</i> .....	34
<i>Abb. 3-26: Überlappungslänge Klebung</i> .....	35
<i>Abb. 3-27: Beidseitige Klebung</i> .....	36
<i>Abb. 3-28: Spannungsnachweis Klebung</i> .....	36
<i>Abb. 3-29: Wheatstone'sche Messbrücke</i> .....	41
<i>Abb. 3-30: gewählte Messbrückenvariante</i> .....	43

<i>Abb. 3-31: DMS Anordnung</i> .....	43
<i>Abb. 3-32: unbekannte Hauptspannungsrichtung</i> .....	44
<i>Abb. 3-33: Aufteilung Mohrscher Spannungskreis</i> .....	45
<i>Abb. 3-34: Platinenbestückung</i> .....	46
<i>Abb. 4-1: Aufbau Schubfeldträger</i> .....	47
<i>Abb. 4-2: Kraftverlauf 2</i> .....	48
<i>Abb. 4-3: Kraftverlauf 3</i> .....	48
<i>Abb. 4-4: Montagehilfe</i> .....	49
<i>Abb. 4-5: Montage Blech 1</i> .....	50
<i>Abb. 4-6: Montage Blech 2</i> .....	50
<i>Abb. 4-7: Knotenscheibe vor dem Bohren und Reiben</i> .....	51
<i>Abb. 4-8: Loslager</i> .....	51
<i>Abb. 4-9: Messstellen</i> .....	53
<i>Abb. 4-10: Bezeichnung DMS</i> .....	54
<i>Abb. 4-11: Brückenaufbau an Platine</i> .....	54
<i>Abb. 4-12: Schaltplan Zusatzplatine</i> .....	55
<i>Abb. 4-13: Verbindung der Messstellen mit Flachbandkabeln</i> .....	55
<i>Abb. 4-14: Inhalt der Messboxen</i> .....	57
<i>Abb. 4-15: DMS-Abstände</i> .....	59
<i>Abb. 4-16: SOLL-IST Vergleich Versuch1 Messung 1</i> .....	63
<i>Abb. 4-17: SOLL-IST Vergleich Versuch 1 Messung 2</i> .....	64
<i>Abb. 4-18: SOLL-IST Vergleich Versuch 1 Messung 3</i> .....	64
<i>Abb. 4-19: SOLL-IST Vergleich Versuch 2 Messung 100N</i> .....	65
<i>Abb. 4-20: SOLL-IST Vergleich Versuch 2 Messung 150N</i> .....	66
<i>Abb. 4-21: SOLL-IST Vergleich Versuch 2 Messung 200N</i> .....	66
<i>Abb. 4-22: SOLL-IST Vergleich Versuch 2 Messung 250N</i> .....	67
<i>Abb. 4-23: SOLL-IST Vergleich Versuch 3</i> .....	68
<i>Abb. 4-24: SOLL-IST Vergleich Versuch 4 Messung 1</i> .....	69
<i>Abb. 4-25: SOLL-IST Vergleich Versuch 4 Messung 2</i> .....	69
<i>Abb. 4-26: Aufteilung Diagramm</i> .....	70
<i>Abb. 4-27: Verhalten am Loslager</i> .....	72
<i>Abb. 4-28: SOLL-IST Vergleich Versuch 5 Messung 1</i> .....	73

<i>Abb. 4-29: Messrichtung der DMS.....</i>	74
<i>Abb. 4-30: Beispiel Mohrscher Spannungskreis .....</i>	74
<i>Abb. 4-31: Spannungskreis auf Messstelle .....</i>	75
<i>Abb. 4-32: Realer Spannungszustand Messstelle .....</i>	75
<i>Abb. 4-33:Spannungskreis Versuch 1 Feld 1.....</i>	76
<i>Abb. 4-34: Spannungskreis Versuch 1 Feld 2.....</i>	77
<i>Abb. 4-35: Spannungskreis Versuch 1 Feld 3.....</i>	77
<i>Abb. 4-36: Spannungszustand Versuch 1 Feld 1.....</i>	78
<i>Abb. 4-37: Spannungszustand Versuch 1 Feld 2.....</i>	78
<i>Abb. 4-38: Spannungszustand Versuch 1 Feld 3.....</i>	79
<i>Abb. 4-39: Spannungskreis Versuch 3 Feld 1.....</i>	80
<i>Abb. 4-40: Spannungskreis Versuch 3 Feld 2.....</i>	80
<i>Abb. 4-41: Spannungskreis Versuch 3 Feld 3.....</i>	81
<i>Abb. 4-42: Spannungszustand Versuch 3 Feld 1.....</i>	81
<i>Abb. 4-43: Spannungszustand Versuch 3 Feld 2.....</i>	82
<i>Abb. 4-44: Spannungszustand Versuch 3 Feld 3.....</i>	82
<i>Abb. 4-45: Spannungskreis Versuch 4 Feld 1.....</i>	84
<i>Abb. 4-46: Spannungskreis Versuch 4 Feld 2.....</i>	84
<i>Abb. 4-47: Spannungszustand Versuch 4 Feld 1.....</i>	85
<i>Abb. 4-48: Spannungszustand Versuch 4 Feld 2.....</i>	85

<i>Tabelle 3-1: Werteanalyse</i> .....	12
<i>Tabelle 3-2: Stab- und Lagerreaktionen</i> .....	20
<i>Tabelle 3-3: Sicherheiten Stäbe</i> .....	25
<i>Tabelle 3-4: Sicherheiten Blech</i> .....	28
<i>Tabelle 3-5: Bolzendimensionierung</i> .....	30
<i>Tabelle 3-6: Tolerierung Bolzenverbindung – Stab/Knotenscheibe</i> .....	33
<i>Tabelle 3-7: Verschiebung am Gesamtbauteil durch Passungsspiel</i> .....	33
<i>Tabelle 3-8: Tolerierung Bolzenverbindung - Kräfteinleitung/Knotenscheibe</i> .....	34
<i>Tabelle 3-9: Bauteilabmaße</i> .....	37
<i>Tabelle 3-10: Sicherheiten</i> .....	38
<i>Tabelle 3-11: Anforderungen Dehnungsmessstreifen</i> .....	40
<i>Tabelle 4-1: Boxbelegung 1</i> .....	56
<i>Tabelle 4-2: Boxbelegung 2</i> .....	56
<i>Tabelle 4-3: Kräfte und Ausgangsspannungen</i> .....	60
<i>Tabelle 4-4: Versuchsreihe 1</i> .....	61
<i>Tabelle 4-5: Versuchsreihe 2</i> .....	61
<i>Tabelle 4-6: Versuchsreihe 3</i> .....	61
<i>Tabelle 4-7: Versuchsreihe 4</i> .....	62
<i>Tabelle 4-8: SOLL-Ist Vergleich Versuch 1</i> .....	63
<i>Tabelle 4-9: SOLL-IST Vergleich Versuch 2</i> .....	65
<i>Tabelle 4-10: SOLL-IST Vergleich Versuch 3</i> .....	67
<i>Tabelle 4-11: SOLL-IST Vergleich Versuch 4</i> .....	68
<i>Tabelle 4-12: Spannungswerte Versuch 1</i> .....	76
<i>Tabelle 4-13: Spannungswerte Versuch 3</i> .....	80
<i>Tabelle 4-14: Spannungswerte Versuch 4</i> .....	83



# 1 Einleitung

Zur Dimensionierung komplizierter Bauwerke und Konstruktionen wird deren reale Geometrie durch Ersatzmodelle vereinfacht. Ein Ersatzmodell schafft eine idealisierte, einfache Geometrie aus kontinuierlichen, gleichförmigen Elementen wie z.B. Stäben, Balken, Scheiben, Platten etc. mit einfachen Randbedingungen, also gelenkiger Lagerung, Einspannung oder freien Rändern und einer ebenso einfachen Lasteinleitung.

Wie das Ersatzmodell aussieht, hängt ab von der angenommenen dimensionierenden Belastungsart. Die Berechnung erfolgt ebenfalls idealisiert, mittels aufgestellter Theorien oder Prinzipien.

Wird zum Beispiel eine Flügelwurzel dimensioniert, wird der Flügel als Balken vereinfacht werden, um dann mittels der Balkentheorie die Größe des Biegemoments an der Flügelwurzel abschätzen und die Struktur nach den Ergebnissen auslegen zu können. Für eine Dimensionierung des Flügelkastens, der durch den Auftrieb z.B. verdrillt wird, braucht es ein anderes Ersatzmodell und eine andere Theorie.

Mit Hilfe der Idealisierung kann hierbei eine schnelle und anschauliche Lösung gefunden werden, welche Veränderungen in Geometrie- oder Steifigkeitsparametern direkt sichtbar werden lässt.

Je genauer die Einschätzung, welche Theorie angewandt werden kann und welche vereinfachenden Annahmen getroffen werden dürfen, desto genauer ist das Ergebnis.

Eine dieser Theorien ist die Schubfeldtheorie. Diese fungiert als Idealisierung für dünnwandige, mit Sicken oder Stäben versteifte Bauteile, wie z.B. ein durch Sicken versteiftes Autodach oder ein mit Stringern und Spanten versteifter Flugzeugrumpf. Zur Berechnung wird der Schubfeldträger abgebildet, der aus gelenkig miteinander verbundenen Stäben und dazwischen gespannten, kraftschlüssig mit den Stäben verbundenen Hautfeldern besteht. Die Kräfte und Spannungen lassen sich an diesem Modell leicht berechnen und auf die reale Struktur übertragen.

Zur Unterstützung der Lehre in den Fächern Technische Mechanik und Festigkeit im Leichtbau, in denen solche Theorien zur Anwendung kommen, werden an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) mechanische Modelle genutzt, welche die mechanische Einwirkung von Kräften auf ein Bauteil nachbilden, die daraus resultierenden Spannungen und Kräfte direkt messen und somit für die Studenten einen Vergleich zum theoretisch Berechneten schaffen.

Ziel dieser Arbeit ist es, das Modell eines Schubfeldträgers zu konstruieren, an dem die Spannungsanalyse am Schubfeldträger experimentell vorgenommen werden kann. Das Modell soll dem besseren Verständnis der Schubfeldtheorie dienen und außerdem einen praktischen Vergleich zu anderen bereits an der Hochschule genutzten Leichtbau-Modellen, insbesondere dem Fachwerk, ermöglichen.

Zur Einordnung dieser Arbeit wird eine kurze Einschätzung vorgenommen, welche Bedeutung der Leichtbau für den Industriestandort Deutschland und damit auch in der Lehre einnimmt und mit welcher Notwendigkeit Lehrsysteme im Studium angewendet werden. Die Einordnung endet mit der Beschreibung der Schubfeldtheorie.

Nach dieser Einschätzung erfolgt die methodische Konstruktion. Durch die Methoden der Werteanalyse wird ein Modell konzipiert und anschließend nach den Regeln und Methoden des Leichtbaus dimensioniert und auf Stabilität und Festigkeit überprüft. Im nächsten Schritt wird die Messtechnik des

Modells bestimmt und ihre Funktion erläutert. Da die Bachelorarbeit den Aufbau eines Versuchsträgers umfasst, werden alle dazu notwendigen Vorüberlegungen in Form von Tolerierungen, Arbeitsabläufen etc. getätigt und nötige Montagehilfen beschrieben und hergestellt. Ein nicht unwesentlicher Teil der Bearbeitungszeit wurde für die Herstellung des Versuchsträgers genutzt, daher wird selbige dokumentiert. Ebenfalls festgehalten werden die Daten einer Erstinbetriebnahme. Abschließend werden Fehler, Verbesserungsvorschläge, bzw. nötige Modifikationen formuliert, so dass zum Ende ein prozesssicheres Modell zur Verfügung steht.

## 2 Einordnung

### 2.1 Bedeutung Leichtbau

„Leichtbau ist zunächst eine Absichtserklärung: aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das Gewicht zu reduzieren oder zu minimieren, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern oder, was schließlich dasselbe bedeutet: die Tragfunktion ohne Gewichtszunahme zu verbessern.“ (1)

Die theoretische Begründung des Leichtbaus lässt sich etwa C. Maxwell und A. Michell zuordnen, die Grundsätze über optimale Kräftepfade für minimalen Volumenaufwand formuliert haben und liegt damit im Beginn des 20. Jahrhunderts. Damit ist der Leichtbau eine verhältnismäßig junge Disziplin und in seinen Möglichkeiten, sowohl konstruktiv als auch werkstofftechnisch, noch lange nicht erschöpft. Ebenso wenig erschöpft sind die Anwendungsgebiete. Auch wenn der Leichtbau klassisch der Luft- und Raumfahrt zugeordnet wird, spielt er eine große Rolle im Bauwesen, im Fahrzeugbau, im Maschinenbau und breitet sich auf weitere Industriezweige aus.

Die Untergliederung des Leichtbaus erfolgt zweckgebunden entweder nach der Art und Weise, wie „erleichtert“ wird oder nach dem gewünschten Effekt des Leichtbaus.

Hinsichtlich des Effekts wird unterschieden zwischen Zweck-, Spar- und Ökoleichtbau. Der Zweckleichtbau ist quasi die ursprünglichste Form. Der Leichtbau ist hier nötig, um die Funktionalität herzustellen. Anwendungsbeispiele sind große Brücken, Flugzeuge, breite hohe Hallen und ähnliche Konstrukte, die bei schwererer Bauart einbrechen oder am Boden bleiben würden.

Unter Sparleichtbau versteht man den sparsamen Einsatz von Material, unter Öko-Leichtbau ebenfalls eine Ressourcenschonung in der Weise, dass durch z.B. leichtere Flugzeuge weniger Kerosin benötigt wird und somit sowohl die dafür verwendeten Rohstoffe gespart werden, als auch die CO<sub>2</sub>-Produktion des Flugverkehrs reduziert wird.

Insbesondere die beiden letzteren Aspekte sind heutiger Antrieb für weitere Forschung und Entwicklung. Gerade die Bundesrepublik Deutschland ist mit ihren geringen Rohstoffquellen interessiert an effizienter Rohstoffnutzung. Aber auch weltweit ist die Endlichkeit der Ressourcen ins Bewusstsein gerückt. Das Interesse an zukunftsweisender Technologie, die die Menschheit aus der Eisenzeit in die Zeit neuer zum Teil noch unbekannter Werkstoffe und Strukturen bringt, ist nicht allein eine Frage von wissenschaftlicher Neugier, sondern über kurz oder lang eine Grundlage des weiteren Bestehens. Wer hier den Anschluss verpasst, ist die längste Zeit führende Industrienation gewesen.

Daher ist der Leichtbau als Ziel der Politik in den Koalitionsvertrag zwischen CDU/CSU und SPD eingegangen.

„Die Förderung von Leichtbautechnologien ist ein wichtiger Beitrag zur Ressourceneffizienz. Wir wollen Deutschland zum Leitanbieter in diesem Sektor entwickeln. Wir werden deshalb branchenübergreifend die material- und technologieoffene Industrialisierung von Leichtbaukonzepten weiter fördern und ausbauen“. (2)

## 2.2 Bedeutung Lehrmodelle im Studium

Im Jahr 1993 haben 279.631 Menschen ein Studium begonnen und etwa 580.000 ihr berufliches Leben mit einer Ausbildung gestartet. Im Jahr 2012 hat sich die Zahl der Studienanfänger fast verdoppelt und lag bei 506.632, die Zahl der neuen Auszubildenden bei 530.714. (3) Das bedeutet, dass rund die Hälfte eines Altersjahrgangs in Deutschland heute ein Studium aufnimmt. Oder, wie das Centrum für Hochschulentwicklung titelt: „Studieren wird zum Normalfall“.

Gleichzeitig stellt der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) in seinem „Nachwuchsbarometer Technikwissenschaften“ von 2009 fest, dass der Zugang der kommenden Studenten, also der Schülerinnen und Schüler, zu Technik im Sinne von „Wie funktioniert das?“ immer geringer wird. (4)

Erklärt wird der schwindende Zugang wie folgt: Das Interesse an Technik bildet sich bereits in der frühen Kindheit auf spielerische Art und Weise. Das Kinderzimmer von heute bietet aber nur noch wenig Raum für ein zu entwickelndes Interesse. Die alten Baukästen, Modelleisenbahnen, Spielzeuglabore etc. weichen Spielzeugen wie Fernseher, Computer, Spielekonsole. Dabei übernimmt das Kind die Rolle des Anwenders und nicht mehr die des Konstrukteurs oder Entdeckers. Was bleibt, ist die Erfahrung: Technik funktioniert und ich bin in der Lage sie zu nutzen. Wohingegen die Bauklotz-Generationen auf die Erfahrung zurückgreifen: Wie baue ich etwas, damit es funktioniert?

Das Ergebnis dieser Entwicklung ist eine stetig wachsende Anzahl von zunächst Schülern, die immer weniger technische Erfahrung sammelt.

Ebenfalls im Nachwuchsbarometer stellt der VDI fest, dass diese mangelnde Erfahrung auch nicht von Schulen aufgefangen wird. Experimentieren im Unterricht, der Besuch von Technikparks, Wissenschaftszentren oder ähnliche Möglichkeiten, um Technik spielerisch und manuell-sinnlich erfahrbar zu vermitteln, wird zu wenig oder gar nicht genutzt.

Daher ist die Situation unter den Studenten kaum anders.

In Kombination mit den steigenden Studentenzahlen ergibt das zwar eine steigende Zahl von Studenten in Ingenieurwissenschaftlichen Fächern (im Jahr 2015/16 136.947 gegenüber 2013/14 109.954 Studienanfänger (5)), aber auch ein Steigen der Abbruchquote (von den Studienanfängern der Jahrgänge 1999-2001 brachen 26 % ihr Ingenieurwissenschaftliches Studium ab, von den Studienanfängern der Jahrgänge 2006/2007 lag die Abbruchquote der Studienanfänger an den Fachhochschulen bereits bei 30 %, im darauffolgenden Jahrgang bei 31 % (6)).

Die Technischen Universitäten und Fachhochschulen stehen daher vor der Situation, diesen Mangel an Erfahrung entweder zu ignorieren und hohe Durchfall- und Abbruchquoten in Kauf zu nehmen oder ihn zumindest in Ansätzen zu kompensieren.

Der VDI resümiert in seinem Nachwuchsbarometer: „Die Mehrzahl der Ingenieurstudenten zählt nicht zur Leistungselite der Schulen. Die Hochschulen müssen daher mehr als bisher die Leistungsdefizite

durch gezielte Programme (z. B. Tutorien) ausgleichen und deutlich stärker praktische Anwendungen in den Vordergrund rücken, vor allem in Bachelor-Studiengängen.“

Zu diesem Zweck ist an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg ein Mechanik-Labor im Aufbau.

Dort werden für die Kernfächer der Studiengänge Fahrzeugbau und Flugzeugbau technische Modelle für die Studenten nutzbar gemacht. Grundlagen der Mechanik können begleitend zu den Vorlesungen experimentell erfahren werden, was den Studierenden eine weitere Aufnahmeebene eröffnet und das Lernen erleichtert.

## 2.3 Der Schubfeldträger im Besonderen

Die Schubfeldtheorie stammt aus dem Leichtbau. Wie bereits eingangs angedeutet, folgt die Wahl der Theorie zur Dimensionierung und Berechnung einer Struktur (a) der Art der Belastung, außerdem (b) der Geometrie des belasteten Körpers und (c) der erwünschten Erkenntnis.

a Die Schubfeldtheorie beschreibt das Verhalten einer Struktur bei reiner Biegebeanspruchung.

b Sie setzt eine Geometrie voraus, die einer Verkleidung bedarf, sei es aus aerodynamischen, thermischen oder auch ästhetischen Gründen. In diesem Fall ist es sinnvoll, dass die Verkleidung an der Lastübertragung beteiligt ist.

c Die erwünschte Erkenntnis umfasst neben dem Zeitpunkt des Versagens (also der Stärke der Belastung) auch eine Aussage darüber, in welchem Bauteil das Versagen eintritt.

Eine mittragende Verkleidung würde bereits durch eine versteifte Schalenkonstruktion realisiert. Allerdings verteilen sich hier die Belastungen auf die Gesamtstruktur, was zu einer inhomogenen Materialbeanspruchung führt und zu einer komplizierten Berechnung. Werden simple Strukturbauteile dagegen gezielt versteift, ergibt sich daraus eine Auftrennung der Belastungen in reine Normalspannungen in den Versteifungen und Schubspannungen in den Hautfeldern. Diese Belastungsteilung wird mit einem normalen Vollwandsystem erreicht. Das System besteht aus dünnen Hautfeldern, die in Längs- und/oder Querrichtung versteift werden. Das Hautfeld überträgt in diesem Modell die Schubanteile, die Versteifungen die Normalanteile der Belastung. Der Schritt der Idealisierung ist dabei recht groß:

Ausgehend von einem I-Träger wird ein realer Spannungsverlauf, wie in Abbildung 2-1 dargestellt, zum in Abbildung 2-2 abgebildeten Spannungsverlauf idealisiert:

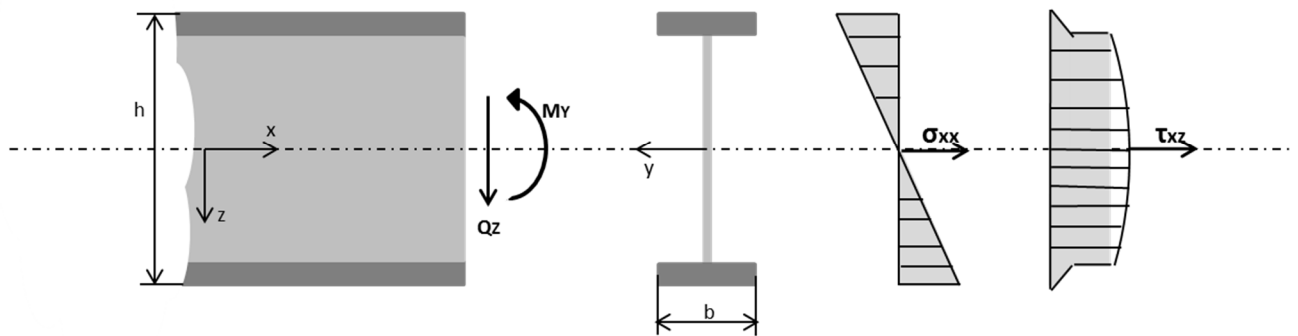


Abb. 2-1: Spannungsverteilung im I-Träger

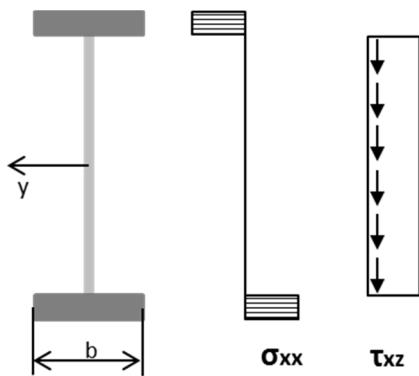


Abb. 2-2: Idealisierter Spannungsverlauf Schubfeldträgers

Ober- und Untergurt stellen die Steifen da, der Steg bildet das Hautfeld. Handelt es sich nun um Strukturen, die in jede Richtung eine Diskontinuität aufweisen, also ist das Hautfeld überall von einer Steife begrenzt, kann die Berechnung vereinfacht als Berechnung eines Schubfeldträgers erfolgen. Voraussetzung hierfür ist darüber hinaus:

- Eine kontinuierliche Verbindung zwischen Hautfeld und Steifen,
- eine Idealisierung der Steifen zu Stäben,
- eine gelenkige Verbindung der Stäbe in Knotenpunkten,
- und eine Einleitung der Kraft nur über die Knotenpunkte.

Außerdem wird angenommen, dass die Stäbe unter Belastung gerade und Hautfelder eben bleiben.

Die hier genannte Definition des Schubfelds ist in der Literatur nicht einheitlich. Da diese Arbeit auf Anregung und in Betreuung eines Professors angefertigt wird, dient die von ihm verwendete Definition als Grundlage.

### 3 Methodische Konstruktion

Die methodische Konstruktion erfolgt in Anlehnung an die im Skript „Werteanalyse und Value Management“ vorgestellte Methodik der Werteanalyse (7).

Diese Methode basiert auf der Annahme, dass der Nutzer eines Produktes in erster Linie an dessen Funktion interessiert ist. Daher wird das zu entwickelnde Produkt in seinen Funktionen beschrieben, gegliedert, strukturiert und bewertet.

## 3.1 Lösungsfindung

Im ersten Schritt werden die Anforderungen an das Modell gesammelt. Das beinhaltet sowohl Muss-, als auch Sollfunktionen. Ideen werden gesammelt mit Hilfe einer Marktanalyse, die Erkenntnisse darüber liefern soll, wie eventuell bereits vorhandene Modelle gestaltet sind und durch das Gespräch mit dem „Auftraggeber“, also dem Vertreter der Hochschule für Angewandte Wissenschaften, sowie dem leitenden Ingenieur der Firma G.U.N.T Gerätebau GmbH.

### 3.1.1 Marktanalyse

Der vielfältigste Anbieter von Lehrsystemen neben der Firma G.U.N.T Gerätebau GmbH ist die britische Firma Armfield - Engineering Teaching & Research Equipment. Im dort abrufbaren Programm ist kein Modell des Schubfeldträgers enthalten. Eine Software zum Aufbau und der Berechnung von Balkenstrukturen und Fachwerken ist nicht in der Lage, den Schubfeldträger abzubilden. Andere Anbieter von Lehrsystemen bieten lediglich branchenspezifische Lehrsysteme, wobei die „Branche“ Festigkeit im Leichtbau nicht vertreten ist. Zu den überprüften Firmen gehören: erfi, hps System Technik, Christiani, Topik Didaktik und TQ-Group. Die Auswahl der Firmen erfolgte nach der Angabe der Firma G.U.N.T Gerätebau GmbH über ihre Marktkonkurrenten.

Bei keiner der überprüften Firmen lassen sich Modelle für die Darstellung der Schubfeldtheorie generieren. Die Firma G.U.N.T Gerätebau GmbH dagegen hat bereits einmal ein Schubfeldträgermodell entwickelt, welches auf Grund der Größe und beschränkten Möglichkeiten nicht mehr im Programm ist.

Die experimentelle Spannungsanalyse am ungestörten Schubfeldträger ist an dem alten Modell nicht möglich, ein Vergleich zur Kräfteverteilung im ebenen Fachwerk ebenfalls nicht.

Das Modell besteht aus Aluminium. Hautfeld und Steifen sind vernietet. Die Spannungsanalyse (hier an einem gestörten Schubfeld), wird mittels Dehnungsmessstreifen vorgenommen. Analysiert wird nur der Spannungszustand des Hautfelds. Der Schwerpunkt liegt auf dem Vergleich zwischen einem gestörten und einem ungestörten Schubfeld.

### 3.1.2 Ergebnis Gespräch

Aus den Gesprächen, ergaben sich Anforderungen im Hinblick auf die Fertigung, die Handhabung und die Kompatibilität und Vergleichbarkeit mit anderen Leichtbaumodellen. Aus der Beschreibung des Schubfeldträgers ergaben sich die Funktionen für das Modell. Eine Sammlung aller Anforderungen und Funktionen, zugeordnet zu den zwei Hauptfunktionen, resultierte in der folgenden Mindmap.

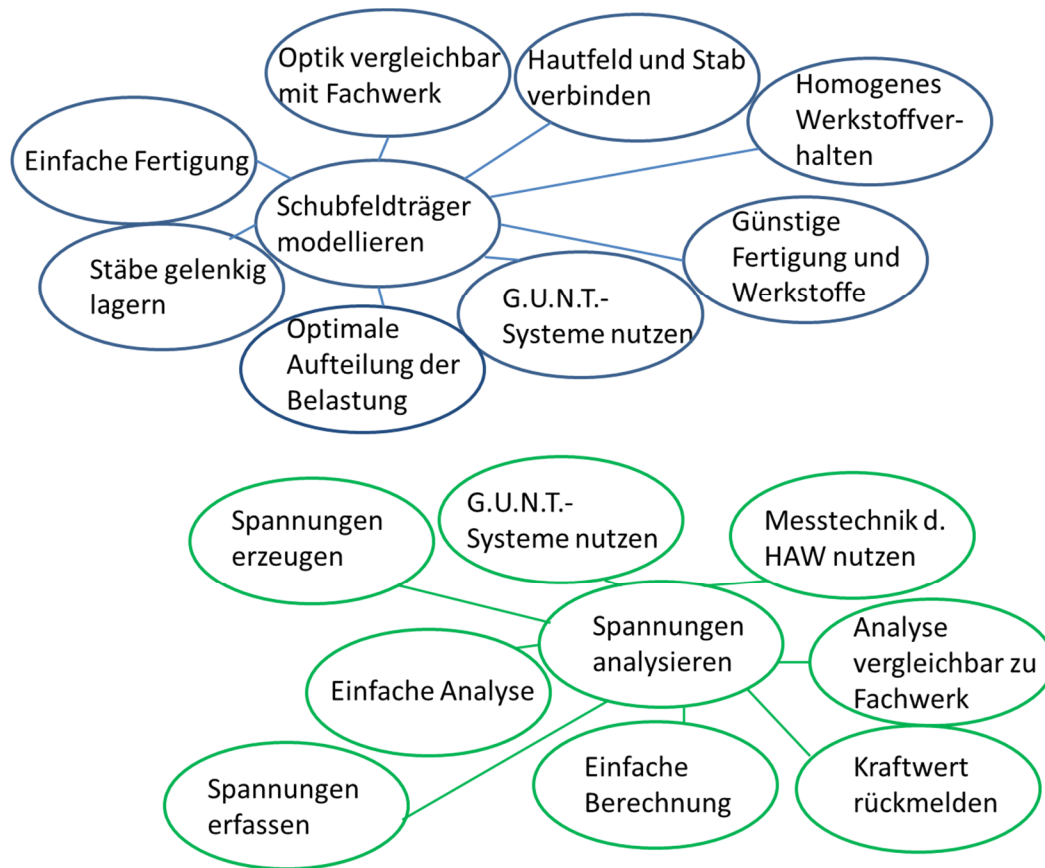


Abb. 3-1: Sammlung Funktionen und Bewertungskriterien

### 3.1.3 Morphologischer Kasten

Aus den Sammlungen werden nun die Funktionen gefiltert und in einer logischen Folge aufgelistet. Je Funktion wird nach einer Lösungsidee gesucht. Die Ideen werden miteinander kombiniert und dann mit den gesammelten Bewertungskriterien bewertet.






















		1	2	3	4	5	6
Schubfeldträger modellieren	Stäbe gelenkig verbinden	Bolzenverbindung 	Steckverbindung 	Scharnier 	aus einem Stück 		
	Feld und Stäbe verbinden	schweißen 	löten 	nieten 	kleben 	klemmen 	aus einem Stück 
Spannungen analysieren	Spannungen erzeugen	Gewicht anhängen 	Kraftspindel 	Temperatur ändern 			
	Spannungen erfassen	DMS-Brückenschaltung 	eingebaute Kraftdose 	optisch 			
	Eingeleitete Kraft rückmelden	elektrisch 	mechanisch 	optisch 			
	Spannungen analysieren	GUNT-Messverstärker alter Typus und PC 	GUNT-Messverstärker neuer Typus 				

Abb. 3-2: Morphologischer Kasten

Beschreibung der Teil-Lösungen:

### Stäbe gelenkig verbinden

#### Bolzenverbindung

Die Stäbe werden über ein Verbindungsstück mit Bolzen verbunden. Die Beweglichkeit in Bauteilebene bleibt erhalten, die Bewegung senkrecht zur Bauteilebene wird unterdrückt. So wird eine gelenkige Lagerung mit relativ geringem Spielraum realisiert.

#### Steckverbindung

Die Steckverbindung ermöglicht eine spätere Demontage, hat aber eine relativ steife Verbindung zur Folge. Von einer gelenkigen Lagerung kann nur bedingt die Rede sein. Genaue Fertigung nötig.

#### Scharnier

Das Scharnier erlaubt nur die Bewegung in Bauteilebene. Die Konstruktion wird durch die vielen Bauteile schwer.

#### Aus einem Stück

Der Schubfeldträger wird aus dem Vollen gefräst, die Stäbe sind dann optimal in Knotenpunkten verbunden, aber nicht gelenkig gelagert.

### Hautfeld und Stäbe verbinden

#### Schweißen



Kontinuierliche kraftschlüssige Verbindung, aber der Wärmeverzug sorgt für große Spannungen im Hautfeld (Blech).

Löten

Siehe Schweißen

Nieten

Die Kontinuität der Verbindung ist unterbrochen. Durch die Anzahl der verwendeten Bauteile und durch Mindestwandstärken schwere Konstruktion.

Kleben

Kontinuierliche, leichte Verbindung ohne Wärmeverzug. Verbindung ist nicht mehr lösbar.

Klemmen

Jeder Stab bekommt eine Kniehebelkonstruktion, die das Blech zwischen zwei flachen Stabelementen einpresst. Die Verbindung ist jederzeit lösbar, aber kompliziert zu fertigen und schwer.

Aus einem Stück

Der Schubfeldträger wird aus dem Vollen gefräst. Die Verbindung zwischen Stäben und Hautfeld ist optimal. Blechdicken um 1 mm sind sehr schwer zu realisieren, auf Grund der Kräfte, die beim Fräsen entstehen.

#### Spannungen erzeugen

Gewicht anhängen

Sehr leichte Konstruktion, Größe der Last mit verschiedenen Gewichten recht flexibel, Lasteinleitung nur in eine Richtung möglich.

Kraftspindel

Wird im Vergleichsfachwerk verwendet, das Bauteil ist daher bereits vorhanden und muss nur auf das neue Modell angepasst werden. Lasteinleitung in zwei Richtungen möglich, Größe der Last sehr flexibel.

Temperatur ändern

Die Spannung wird durch eine lokale Temperaturänderung erzeugt und daraus resultierender Änderung der Bauteilabmaße, ungenaue Methode, nicht vergleichbar mit Fachwerk.

#### Spannungen erfassen

DMS-Brückenschaltung

Auf die Stäbe werden DMS geklebt, die mit weiteren DMS in einer Messbox zu Brückenschaltungen verbunden werden. Recht genaue Spannungsermittlung, aufwendige Fertigung, keine Demontage möglich.

Kraftdose

Jeder Stab bekommt an den gewünschten Stellen eine Kraftmessdose eingesetzt, wie sie schon im Fachwerk verwendet wurde, das macht 2 Dosen pro Stab. Sehr schwere Konstruktion, erschwert auf Grund unterschiedlicher Stabdurchmesser die Verbindung zwischen Stab und Hautfeld.

Optisch

Die Konstruktion ist aus einem durchsichtigen Material gefertigt, welches mit polarisiertem Licht durchstrahlt wird. Die Spannungen erzeugen durch Lichtbrechung optische Effekte, z.B. Helligkeitsunterschiede, so dass die Spannungen sichtbar werden. Sehr detailliertes Spannungsbild, nur qualitative Aussagen zur Spannungsverteilung möglich.

#### Eingeleitete Kraft rückmelden

Elektrisch

Mit einer Kraftmessdose, wird der Wert erfasst und zurückgemeldet.

Mechanisch

In die Krafteinleitung ist eine Messschraube eingebracht, die den eingeleiteten Wert anzeigt.

Optisch

Ablesen der Angaben auf den Gewichten.

#### Spannungen analysieren

GUNT Messverstärker alter Typus

Bietet 16 Signalanschlüsse, erweiterbar auf 32. Eine Verstärkung ist jeweils für 8 Signale einstellbar. Geringe Flexibilität in der Signalverarbeitung.

GUNT Messverstärker neuer Typus

Bietet 16 Signalanschlüsse, erweiterbar auf 32. Eine Verstärkung ist für jedes Signal einzeln einstellbar. Große Flexibilität in der Signalverarbeitung. Sehr genaue Messergebnisse.

Farbanalyse

Die optischen Effekte der Lichtbrechung werden Spannungsgrößen zugeordnet.

#### Mögliche Lösungen

Aus allen möglichen Kombinationen ergaben sich im Sinne der Ziele: einfache Spannungsanalyse, einfacher Aufbau und gute Vergleichbarkeit von Fachwerk- und Schubfeldträgermodell, zwei möglichen Lösungsvarianten.

Lösung 1 (blau) – die variable Lösung

Diese Lösungsvariante ermöglicht eine weitgehend beliebige Form des Schubfeldträgers. Wie auch beim Fachwerk können hier verschiedene Aufbauten gewählt werden und damit eine Spannungsanalyse nicht nur am Rechteckfeld, sondern auch an Trapez- oder Dreiecksfeldern vorgenommen werden. Die Flexibilität erfordert aber sehr komplizierte Konstruktionen mit vielen Einzelteilen. Daher wird die Gesamtkonstruktion schwer und unhandlich.

Lösung 2 (orange) – die ideale SFT-Lösung

Diese Lösungsvariante ermöglicht nur einen einzigen Aufbau. Dieser Aufbau ist aber sehr exakt in der Abbildung des Schubfeldträgers, kommt mit wenigen Bauteilen aus und ist daher leicht und einfach zu fertigen. Die geringe Flexibilität hat eine deutlich geringere Störanfälligkeit zur Folge.

### 3.1.4 Analyse durch Wertigkeitsverfahren

Der Wert einer Lösung wie in der Werteanalyse definiert, ist die Bedeutsamkeit oder Wichtigkeit, die das fertige Objekt für den Nutzer hat. Für eine genaue Abschätzung muss der Wert quantifiziert werden. Dafür wird den zu Anfang gesammelten Bewertungskriterien eine Gewichtung zugeteilt, die sich danach richtet, ob es sich eher um ein Soll- oder um ein Muss- Kriterium handelt. Die Gewichtung wurde auf Grundlage der Gespräche vorgenommen, in denen neben den unabdingbaren Kriterien für die Funktion des Schubfeldträgers auch eine Priorisierung hinsichtlich der Anforderungen der Beteiligten vorgenommen wurde.

Gewichtung: 1 unwichtig, 4 sehr wichtig

Punkte: 1 erfüllt das Kriterium nicht, 4 erfüllt das Kriterium vollkommen

Bewertungskriterium	Gewichtung	Blau die variable Lösung		Orange die ideale SFT-Lösung	
		Pkt. ( $p_{ij}$ )	$g_j$	Pkt. ( $p_{ij}$ )	$g_j$
Einfache Fertigung	3	1	3	3	9
Stäbe gelenkig lagern	3	1	3	4	12
Konstanz Verbindung Stab und Feld	4	3	12	4	16
Spannungsfreier Grundzustand	4	4	16	4	16
Genaue Ergebnisse	3	3	9	3	9
Einfache Analyse	3	4	12	4	12
Mit vorhandener Messtechnik an HAW zu betreiben	2	4	8	4	8
Mit vorhandenen Bauteilen von G.U.N.T herzustellen	2	1	2	4	8
Optische Vergleichbarkeit Fachwerk	3	4	12	4	12
Flexibilität Aufbau	2	4	8	1	2
Summe der Punkte			85		104
Rangfolge			2		1

Tabelle 3-1: Werteanalyse

Die Gesamtlösung der Wertigkeit ergibt sich aus der Formel

$$w = \frac{\sum(p_{ij} \cdot g_j)}{p_{\max} \cdot \sum g_j} \quad (1)$$

Mit  $p_{\max} = 4$ , ergeben sich die Wertigkeiten der einzelnen Lösungsvarianten zu:

$$w1(\text{blau}) = 0,7328$$

$$w2(\text{orange}) = 0,8966$$

Eine Wertigkeit von knapp 0,9 kann als sehr gut betrachtet werden.

Gemäß dem Wertigkeitsverfahren wird Lösung 2 gewählt. Im Folgenden sollen Aufbau und Funktion genau beschrieben werden.

### 3.1.5 Beschreibung der gewählten Lösung

Der Schubfeldträger besteht aus drei Hautfeldern. Die Hautfelder sind in berandende Stäbe eingeklebt, welche über Knotenscheiben gelenkig miteinander verbunden werden. Die Lasteinleitung erfolgt in die Knotenscheiben durch Drehen einer Kraftspindel. Es kann sowohl in Zug- als auch in Druckrichtung belastet werden. Der Wert der Belastung wird über einen Ringkraftmesser mit Messuhr eingestellt. Der Aufbau zur Krafteinleitung wird bereits bei G.U.N.T. Gerätebau GmbH verwendet und ist nicht Teil der Konstruktionsarbeit. Lediglich die Verbindung zwischen Spindel und Schubfeldträger ist auf den Schubfeldträger angepasst. Der Schubfeldträger ist in einen Standard-Rahmen von G.U.N.T. Gerätebau GmbH eingehängt. Der Rahmen und die Klemmelemente sind ebenfalls bereits in Gebrauch und nicht Teil der Konstruktionsarbeit. Auch hier musste die Verbindung angepasst werden.

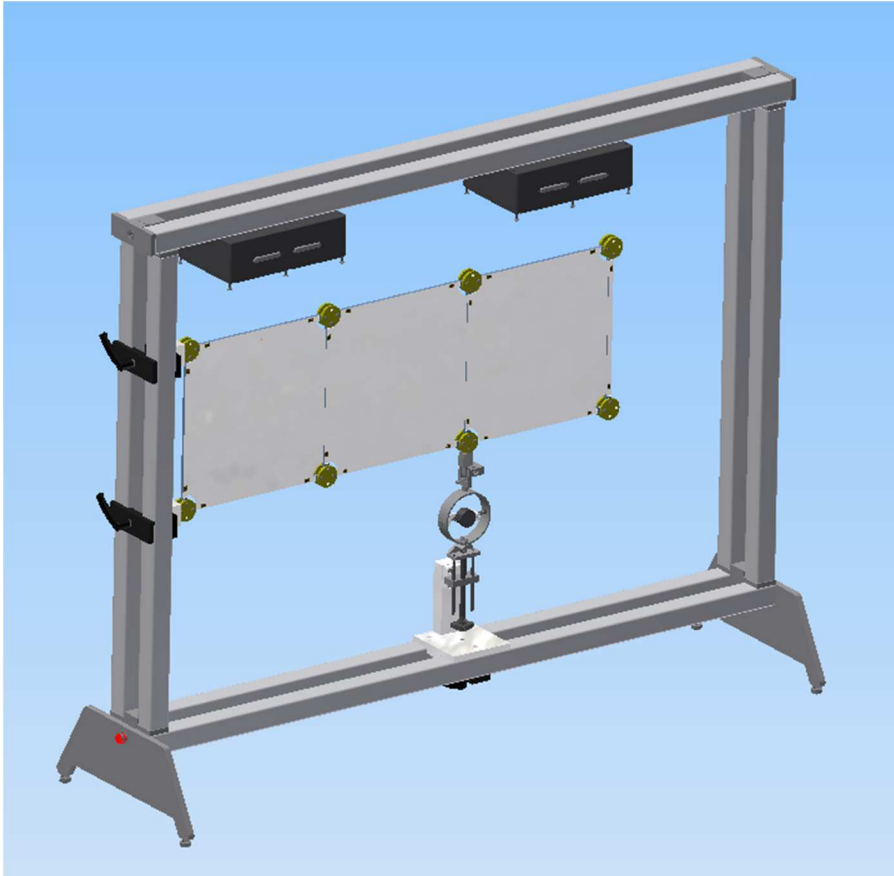


Abb. 3-3: Schubfeldträger

An den Stabenden werden Dehnmessstreifen (DMS) appliziert, die der Spannungsanalyse dienen. Es wird an beiden Stabenden gemessen, um die Linearität der Normalkraftverteilung nachweisen zu können. Dazu befindet sich jeweils ein DMS auf der Vorder- und einer auf der Rückseite des Stabs. Mit zwei passiven Ergänzungs-DMS auf Anschluss-Platinen wird so jeweils eine Messbrücke pro Messstelle aufgebaut. Die DMS sind über Flachbandkabel mit den Anschluss-Platinen verbunden, die in 2 Messboxen untergebracht sind, welche am Rahmen befestigt werden. Zur Funktion der DMS-Brückenschaltungen und dem Messaufbau folgen weitere Informationen unter dem Punkt „Messaufbau“.

Auch die Spannungen im Schubfeld sollen analysiert werden. Zu diesem Zweck werden auf den Hautfeldern ebenfalls DMS appliziert, allerdings nur auf der Rückseite, um eine spätere optische Spannungsanalyse zu ermöglichen. Im ersten Feld sind zwei Messstellen vorhanden. Dadurch kann die Konstanz des Schubflusses im Feld gezeigt werden. In den beiden anderen Feldern befindet sich jeweils nur eine Messstelle. Unter der Annahme eines konstanten Schubflusses kann die Verteilung des selbigen, je nach Lasteinleitung, genügend genau gezeigt werden. Auch diese DMS werden mit Ergänzungs-DMS auf den Anschluss-Platinen ergänzt. Von den Messboxen führt ein weiteres Flachbandkabel zum Messverstärker. Für die komplette Abbildung aller Spannungen werden entweder 2 Messverstärker benötigt oder ein Messverstärker plus Ergänzungssatz.

## 3.2 Dimensionierung und Berechnung

Nach der allgemeinen Lösungsfindung für den grundsätzlichen Aufbau des Modells wird die gewählte Lösung nun konkretisiert. Zunächst wird das Material für die Bauteile gewählt. Anschließend werden über die Berechnung des Schubfeldträgers die maximalen Stabkräfte und Lagerreaktionen ermittelt. Dann erfolgt die (Vor-)dimensionierung der einzelnen Bauteile und die nötigen Festigkeits- und/oder Stabilitätsnachweise.

### 3.2.1 Materialwerte

Im Sinne der Nähe zur Realität wird für den Schubfeldträger ein leichtbaugerechter Werkstoff gewählt, der nicht einen Spezialfall, sondern die Regel darstellt, Aluminium.

Stäbe, Knotenscheiben und die Verbindungselemente werden aus AlMgSi1 gefertigt. Der Werkstoff eignet sich für alle spangebenden Verfahren und ist in allen Halbzeugformen bei der Firma G.U.N.T Gerätebau GmbH verfügbar. Da aus dieser Legierung nur Bleche bis zu einer Stärke von 3 mm hergestellt werden, wurde für das Blech auf eine typische Legierung für Blechstärken unter 1 mm zurückgegriffen: AlMg3.

Die Eigenschaften beider Legierungen werden für Platten mit Dicken unter 80 mm allgemein angegeben mit den Angaben der Tabelle in Abbildung 3-4 (8)

Werkstoff nach DIN 1725 / 1745 (bzw. ASTM / AA)	Werkstoff-Nr. nach DIN	min. Streck- grenze Rp <sub>0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	min. Zug- festigkeit R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	Elasti- zitäts- modul KN/mm <sup>2</sup>
<b>AlMg3, weich</b>	3.3535	80	190	70
AlMg4,5Mn, weich	3.3547	125	275	71
<b>AlMgSi1, wa</b>	3.2315	240	295	70
AlCuMg1, ka	3.1325	245	385	72
AlZn4,5Mg1 wa	3.4335	270	340	70
AlZnMgCu0,5 wa	3.4345	350	430	71
AlZnMgCu1,5 wa	3.4365	410	480	72

Abb. 3-4: Werkstoffeigenschaften Aluminium

Für die Stabilitätsberechnungen wird im Wesentlichen der E-Modul benötigt. Dieser beträgt bei beiden Legierungen 70 000N/mm<sup>2</sup>.

Für die Bolzen wurde der Edelstahl 1.4305 –(X8CrNi18-9) gewählt. Dieser Edelstahl ist auf Grund seiner guten Verarbeitbarkeit und Eigenschaften gängig für Normbolzen. Daher wird er hier ebenfalls

verwendet. Laut Datenblatt der deutschen Edelstahlwerke gelten für diesen Werkstoffe bei einem Durchmesser von 1-20 mm folgende Werte: (9)

min. Streckgrenze  $R_{p0,2}$  300 MPa

min. Zugfestigkeit  $R_m$  620 MPa

### 3.2.2 Stab- und Lagerkräfte

Es erfolgt nun die Berechnung des Schubfeldträgers. Wie in der Beschreibung der Schubfeldtheorie erläutert, teilt sich die eingeleitete Last auf Schubfeld und Steifen auf. Die Bestimmung der inneren Kräfte des Schubfeldträgers erfolgt nach dem Skript der Vorlesung „Festigkeits im Leichtbau“ (10) mit Hilfe des Schnittprinzips und der Gleichgewichtsbeziehungen.

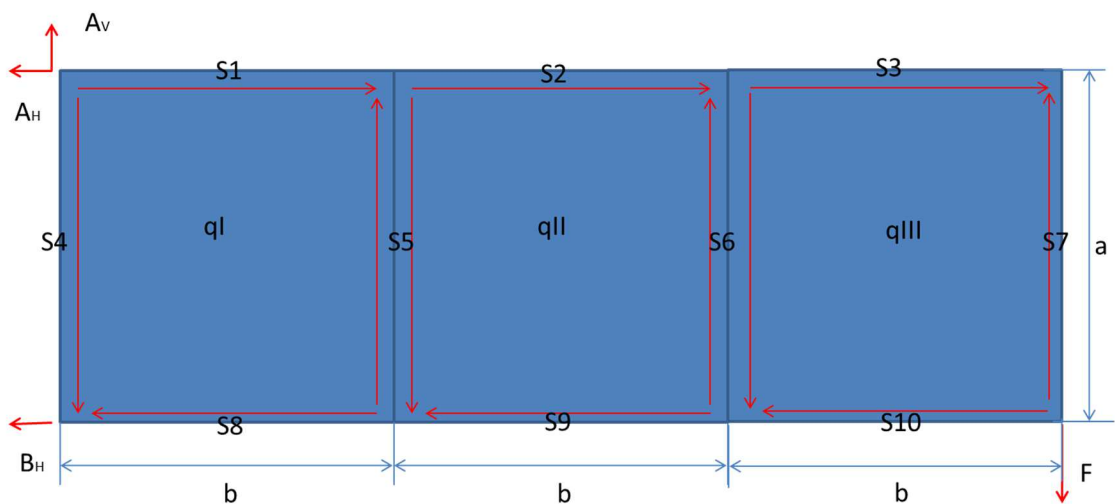


Abb. 3-5: Schubfeldträger Berechnung 1

Ermittlung der statischen Bestimmtheit:

Zunächst muss überprüft werden, ob es sich um ein statisch bestimmtes oder unbestimmtes System handelt. Das erfolgt mit der Formel:

$$U = k + m + r - 2o \quad (2)$$

Dabei ist

$k$  = Anzahl Längs- und Quersteifen

$m$  = Anzahl Hautfelder

$r$  = Anzahl Lagerreaktionen und

$o$  = Anzahl Knoten (Verbindungen der Steifen)

Das Ergebnis bedeutet

$U = 0$  System ist statisch bestimmt

$U > 0$  System ist statisch überbestimmt

$U < 0$  System ist statisch unterbestimmt

In diesem Fall ergibt sich  $U = 10 + 3 + 3 - 2 \cdot 8 = 0$

Das System ist statisch bestimmt.

Nullstabbeachtung:

Die aus den Gleichgewichtsbetrachtungen abgeleiteten Vereinfachungen, die am Fachwerk bezüglich des Erkennens von Nullstäben gelten, haben auch hier Gültigkeit, allerdings, auf Grund der linearen Veränderlichkeit der Kraft in den Stäben, nur lokal auf das Stabende begrenzt.

Es gilt demnach:

- Greifen am unbelasteten Knoten 2 Anschlussstäbe an, die nicht die gleiche Richtung haben, sind beide Stabkräfte am Knoten = 0.
- Werden Knoten mit 2 Anschlussstäben unterschiedlicher Richtung durch eine Kraft in Richtung eines Stabes belastet, ist diese Stabkraft am Knoten gleich der angreifenden Kraft und die andere Stabkraft am Knoten = 0.
- Greifen am unbelasteten Knoten 3 Anschlussstäbe an, wobei 2 Stäbe die gleiche Richtung haben, so sind diese Stabkräfte am Knoten gleich groß, und die dritte Stabkraft am Knoten = 0.

Berechnung:

Für die Berechnung der maximalen Stabkräfte im Schubfeldträger wird eine Lasteinleitung an der Stelle  $x = 3 \cdot b$  vorgenommen.

Weiter wird angenommen, dass der Schubfluss konstant ist, falls die Dicke  $t$  konstant ist. Die Überprüfung dieser Annahme erfolgt mit Hilfe des Freischnitts:

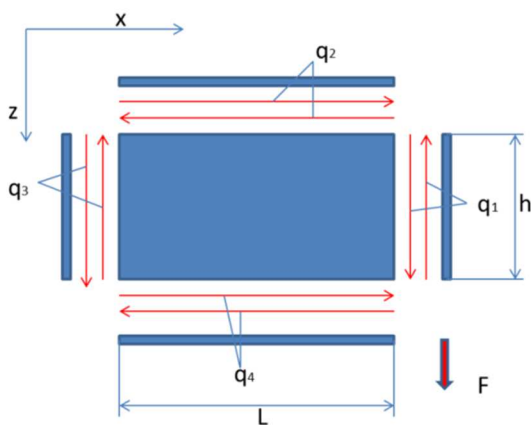


Abb. 3-6: Schubfeldträger Berechnung 2

Aus dem Gleichgewicht zwischen Feld und Stab folgt:

$$\frac{F}{h} = q_1 \quad (3)$$

Aus dem Gleichgewicht im Feld folgt:

$$\sum F_{(x)} = 0 \rightarrow q_2 \cdot L = q_4 \cdot L \rightarrow q_2 = q_4 \quad (4)$$



$$\sum F_{(z)} = 0 \rightarrow q_3 \cdot h = q_1 \cdot h \rightarrow q_3 = q_1 \quad (5)$$

$$\sum M_{(y)} = 0 \rightarrow q_1 \cdot h \cdot L = q_4 \cdot h \cdot L \rightarrow q_4 = q_1 \quad (6)$$

$$\rightarrow q_1 = q_2 = q_3 = q_4$$

Die Annahme stimmt.

Die Betrachtung der Nullstäbe ergibt für den oben beschriebenen Lastfall einen kompletten Nullstab in S5 und S6. Daher gilt:  $q_I = q_{II} = q_{III} = q$  und S5 und S6 können entnommen werden (siehe Abb. 3-5). Das 3-Flächenfeld kann wie ein einflächiges Feld betrachtet werden mit den Kantenlängen  $a$  und  $3b$ .

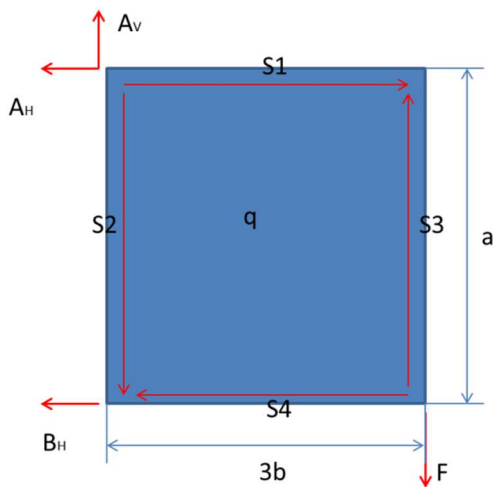


Abb. 3-7: Schubfeldträger Berechnung 3

Aus der Gleichgewichtsbetrachtung am Gesamtbauteil lassen sich die Lagerreaktionen folgendermaßen bestimmen:

$$\sum M_A: 0 = -F \cdot 3b - B_H \cdot a \quad (7)$$

$$\rightarrow B_H = \frac{-F \cdot 3b}{a}$$

$$\sum \leftarrow: 0 = -B_H - A_H \quad (8)$$

$$\rightarrow A_H = -B_H$$

Sowie:

$$\sum \uparrow: 0 = A_V - F \quad (9)$$

$$\rightarrow A_V = F$$

Die Stabkräfte werden mit einem Schnittverfahren bestimmt, das angelehnt ist an das Rittersche Schnittverfahren zur Berechnung von Fachwerken.

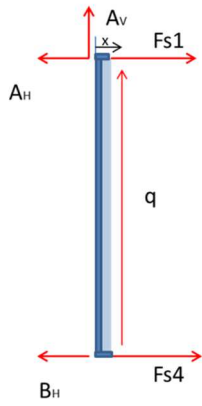


Abb. 3-8: Schubfeldträger Schnitt 1

$$\sum M_x(x=0): 0 = -B_H \cdot a + F_{S4} \cdot a \quad (10)$$

$$\rightarrow F_{S4} = B_H$$

$$\sum \leftarrow (x=0): 0 = B_H - F_{S4} - F_{S1} + A_H \quad (11)$$

$$\rightarrow F_{S1} = B_H - F_{S4} + A_H$$

$$\sum \uparrow (x=0): 0 = A_V + q_1 \cdot a \quad (12)$$

$$\rightarrow q = -\frac{A_V}{a}$$

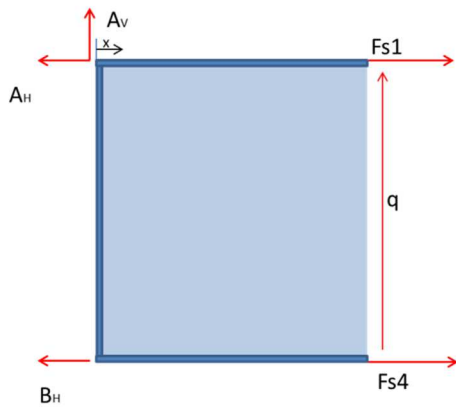


Abb. 3-9: Schubfeldträger Schnitt 2

$$\sum M_x(x=3b):$$

$$0 = -B_H \cdot a + F_{S4} \cdot a - A_V \cdot 3b \quad (13)$$

$$\rightarrow F_{S4} = \frac{B_H \cdot a + A_V \cdot 3b}{a}$$

$$\sum \leftarrow (x=3b) = 0 = B_H - F_{S4} - F_{S1} + A_H \quad (14)$$

$$\rightarrow Fs_1 = B_H - Fs_4 + A_H$$

$$\sum \uparrow (x = 3b) = 0 = A_V + q_1 \cdot a \quad (15)$$

$$\rightarrow q = -\frac{A_V}{a}$$

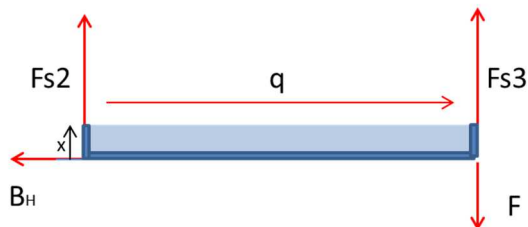


Abb. 3-10: Schubfeldträger Schnitt 3

$$\sum M_x(x = 0): 0 = -F \cdot 3b + Fs_3 \cdot 3b \quad (16)$$

$$\rightarrow Fs_3 = F$$

$$\sum \uparrow (x = 0): 0 = Fs_2 + Fs_3 - F \quad (17)$$

$$\rightarrow Fs_2 = F - Fs_3$$

$$\sum \leftarrow (x = 0): 0 = B_H - q_4 \cdot 3b \quad (18)$$

$$\rightarrow q = \frac{B_H}{3b}$$

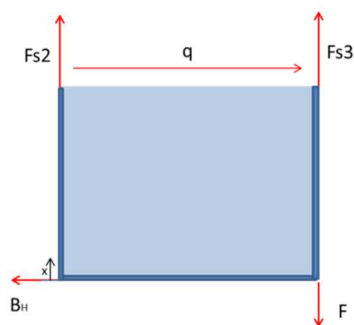


Abb. 3-11: Schubfeldträger Schnitt 4

$$\sum M_x(x = a): 0 = -F \cdot 3b + Fs_3 \cdot 3b - B_H \cdot a \quad (19)$$

$$\rightarrow Fs_3 = \frac{F \cdot 3b + B_H \cdot a}{3b}$$

$$\sum \uparrow (x = a): 0 = F_{S_2} + F_{S_3} - F \quad (20)$$

$$\rightarrow F_{S_2} = F - F_{S_3}$$

$$\sum \leftarrow (x = a): 0 = B_H - q_4 \cdot 3b \quad (21)$$

$$\rightarrow q = \frac{B_H}{3b}$$

Die Vordimensionierung des Schubfeldträgers erfolgt nach den Grundlagen der Schubfeldtheorie und in Anlehnung an das zum Vergleich stehende Fachwerk. Gewählt wird eine Feldgröße von 300 mm · 300 mm (Gesamtlänge = 900 mm) und eine maximale Belastung von F = 250N an der Stelle x = 3b = 900 mm. Mit den oben aufgeführten Formeln (7) – (21) ergeben sich dann folgende Stab- und Lagerkräfte in Newton:

BH	AH	AV	S1L	S2O	S3O	S4L
-750	750	250	750	250	0	-750
q 1-3			S1R	S2U	S3U	S4R
0,833			0	0	250	0

Tabelle 3-2: Stab- und Lagerreaktionen

Die maximalen Stabkräfte liegen bei +/- 750N.

Mit den nun bekannten Materialkennwerten und maximalen Belastungen können die Bauteile dimensioniert werden. Zuerst werden die stabilitätsgefährdeten Bauteile untersucht.

### 3.2.3 Stabilitätsnachweis

Bei elastischen Systemen gibt es eine kritische Kraft F, oberhalb derer die nach Statik und Festigkeitslehre berechnete Gleichgewichtslage nicht mehr realisierbar ist. Eine minimale Störung führt zu einer starken Verformung. Das Strukturversagen erfolgt nicht auf Grund von Überschreitung der Festigkeitswerte, sondern durch Instabilität. Da es sich beim Schubfeldträger um solch ein kritisches System handelt, ist ein Festigkeitsnachweis nicht ausreichend zur Beurteilung des Strukturversagens. Die Struktur muss auf Stabilitätsversagen untersucht werden.

Da wir davon ausgehen, dass die Stäbe eine reine Zug- Druckbelastung erfahren, es sich außerdem um lange schlanke Bauteile handelt, mit gleichbleibendem, doppelsymmetrischem Querschnitt, und die äußere Belastung entlang der Bauteilachse erfolgt, untersuchen wir sie auf das Stabilitätsversagen Euler-Knicken. Eine Untersuchung auf Fließen und inelastisches Knicken wird auf Grund der genannten Bauteildimensionen und des einachsigen Spannungszustands nicht vorgenommen. Die Bleche werden auf Grund ihres ebenen Spannungszustands und ihrer reinen Schubbelastung auf Beulen untersucht.

Die nachfolgenden Unterpunkte gliedern sich jeweils in (a) grundsätzliche Dimensionierungsüberlegungen, (b) eine Beschreibung des Belastungszustands, um dann anschließend (c) den nötigen Festigkeits- oder Stabilitätsnachweis zu führen.

### 3.2.3.1 Stab



Abb. 3-12: Stab

(a) Die Ausgangsmaße für die Betrachtung sind wieder in Anlehnung an das Fachwerk gewählt und lauten: 10 mm·10 mm·290 mm. In der Dimensionierung müssen folgende Aspekte beachtet werden:

- Die Stäbe müssen so dünn wie möglich sein, um eine maximale Dehnung zu erreichen, da die Größe der Dehnung die Größe des Signals der DMS bedeutet.
- Es muss an Vorder- und Rückseite Platz für DMS-Applikationen sein.
- Die gelenkige Lagerung der Stäbe erfolgt durch eine Bolzenverbindung. Die darf nicht ausreißen.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich ein dünner Stab mit verstärkten Enden mit folgenden Abmaßen: 10 mm·6 mm·290 mm. Die Stabenden werden auf 8 mm verstärkt, um ein Ausreißen des Bolzens zu verhindern. Über eine Länge von 250 mm ist jeder Stab mit einem 4 mm tiefen und 1,1 mm dicken Spalt versehen, um das Blech einkleben zu können. Die Mittenstäbe sind beidseitig geschlitzt. Die Spalttiefe wird im Kapitel „Spalttiefe“ hergeleitet.

(b) Bei der Verdickung und bei der Spaltanfertigung muss auf eine minimale Kerbwirkung geachtet werden. Daher werden im Übergang Radien gewählt statt scharfer Kanten und die Ausläufer enden an unterschiedlichen Stellen. Auf Grund der nahezu statischen Belastung ist die Gefahr durch Kerbwirkung jedoch so gering, dass auf einen Nachweis verzichtet wird.

Durch die Druckbelastung kann, wie beschrieben, die Struktur in Form von Euler-Knicken (Biegeknicken) versagen. Entscheidend für die Knickform und die Größe der Knickkraft sind die Randbedingungen - auf den Stab übertragen: die Lagerung des Stabs.

Dabei wird zwischen 4 Grundfällen unterschieden. Die 4 Eulerfälle sind der Abbildung 3-13 zu entnehmen. In diesem Fall wird eine Lagerung wie in Fall 4 beschrieben angenommen. Warum diese Annahme getroffen wird, wird in Begleitung der Rechnung genauer beschrieben.

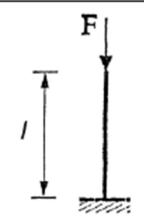
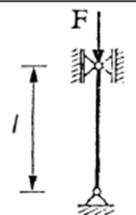
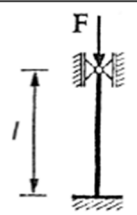
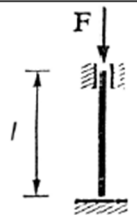
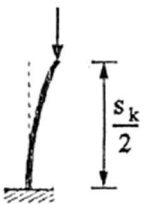
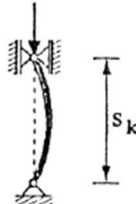
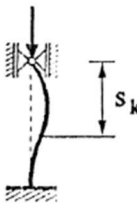
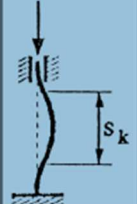
Eulerfall	I	II	III	IV
Lagerbedingungen				
$F_k$	$\frac{EI \pi^2}{4 \cdot l^2}$	$\frac{EI \pi^2}{l^2}$	$\frac{2.04 \cdot EI \pi^2}{l^2}$	$\frac{4 \cdot EI \pi^2}{l^2}$
"Knicklänge" $s_k$	$s_k = 2 l$	$s_k = l$	$s_k = 0.7 l$	$s_k = 0.5 l$
"Knickfigur" $\hat{=}$ Nachbarlage				

Abb. 3-13: Eulersche Knickfälle

(c) Zur Berechnung der kritischen Last wird nach der Theorie zweiter Ordnung vorgegangen. Diese geht davon aus, dass sich oberhalb der kritischen Last eine neue Gleichgewichtslage einstellt. Die Verformungen werden als sehr klein angenommen, so dass eine Linearisierung möglich ist. Mit dieser Theorie kann die kritische Last genau bestimmt werden. Die Verformungen, die sich oberhalb der kritischen Last einstellen, sind nicht berechenbar, aber an dieser Stelle auch nicht von Interesse. Die Theorie von Euler setzt linear-elastisches Materialverhalten voraus. Sie gilt daher nur, solange die Knickspannung unterhalb der Proportionalitätsgrenze bleibt. Die Berechnung der Knickspannung erfolgt nach dem erwähnten Skript mit:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{22}$$

Mit

$F$  (maximale Stabkraft) = 750 N und

$A$  (Fläche im geringsten Querschnitt) = 6 mm · 10 mm = 60 mm<sup>2</sup>,

ergibt sich daraus eine Knickspannung von:

$$\sigma = 12,5 \frac{N}{mm^2}$$

Der Wert liegt weit unterhalb der Proportionalitätsgrenze, die in oben abgebildeter Tabelle (Abb.3-4) mit  $240 \frac{N}{mm^2}$  angegeben ist.

Die Sicherheit gegen Knicken berechnet sich allgemein nach der Formel:

$$S = \frac{F_{crit}}{F_{vorh}} \quad (23)$$

Die kritische Last ist die Eulersche Knicklast. Die vorhandene Last ist die eingangs berechnete maximale Stabkraft von  $F_{S_{max}} = +/- 750N$ .

Die kritische Last wird mit der Formel:

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{s_k^2} \quad (24)$$

ermittelt.

Darin ist

E der E-Modul des verwendeten Werkstoffs,

I das Flächenträgheitsmoment des Stabquerschnitts bezüglich der Knickachse und

$s_k$  die kritische Knicklänge, die sich aus den Lagerbedingungen des Stabs ergibt.

Für die weitere Berechnung muss daher eine Einschätzung bezüglich der voraussichtlichen Knickrichtung getroffen werden und die Lagerbedingungen geprüft werden.

Zunächst die Knickrichtung: Der Stab ist mindestens einseitig mit dem Blech verklebt. Quer zum Blech würde ein Stabknicken, Reißen oder starkes Beulen des Bleches voraussetzen. Die Knickachse kann daher nur mit der Blechachse (der z-Achse) übereinstimmen.

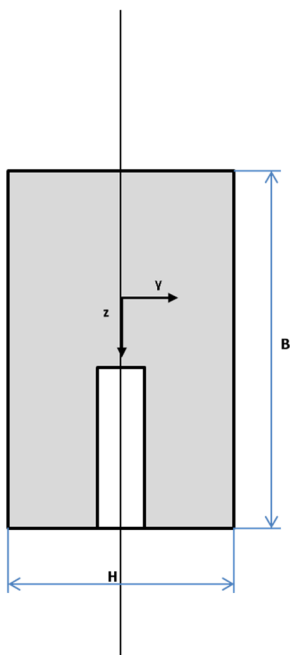


Abb. 3-14: Knickrichtung im Stabquerschnitt

Die Berechnung des Flächenträgheitsmoments erfolgt grundsätzlich nach der Formel:

$$I = \frac{B_{St} \cdot H_{St}^3}{12} \quad (25)$$

Das Flächenträgheitsmoment eines Randstabs (einseitig mit Spalt versehen → geschlitzt) ergibt sich aus dem Flächenträgheitsmoment des ungeschlitzten Stabs, abzüglich des Flächenträgheitsmoments des Spaltes:

$$I_{Rand} = \frac{B_{St} \cdot H_{St}^3}{12} - \frac{B_{Sp} \cdot H_{Sp}^3}{12}$$

Zur Berechnung des Mittenstabs (beidseitig geschlitzt) wird der Spalt zweimal abgezogen:

$$I_{Mitte} = \frac{B_{St} \cdot H_{St}^3}{12} - 2 \cdot \frac{B_{Sp} \cdot H_{Sp}^3}{12}$$

Die Lagerung ergibt sich aus der Verbindung des Stabs mit der Knotenscheibe. Für die folgende Erläuterung bitte Abbildung 3-15 betrachten. Die obere Abbildung zeigt einen Stab in horizontaler Einbaulage, von vorn betrachtet: In z-Richtung ist der Stab lediglich durch die Bolzen beschränkt. Um die Bolzen herum ist eine Drehung möglich, lediglich Verschiebungen sind gestoppt. Hier muss von einer gelenkigen Lagerung ausgegangen werden: Euler Fall 2. Die untere Abbildung zeigt einen Stab in horizontaler Einbaulage, von oben betrachtet: In y-Richtung ist der Stab durch die Knotenscheibe begrenzt. In dieser Richtung kann man von einer festen Einspannung ausgehen: Euler Fall 4.

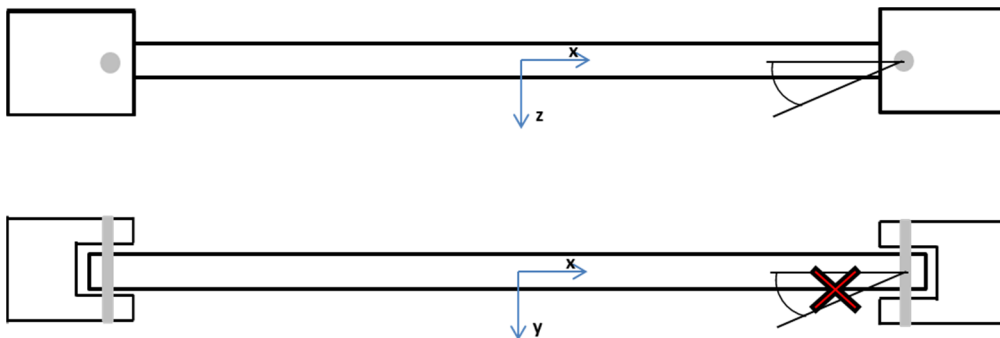


Abb. 3-15: Lagerbedingungen Stab

Da die Knickachse übereinstimmend mit der Blechachse angenommen wird, wird die kritische Last aus Euler-Fall 4 berechnet. Die Knicklänge beträgt pro Stab 290 mm. Aus diesen beiden Werten ergibt sich die erste Stabilitätsbetrachtung. Eine weitere wird nötig: Betrachtet man die 3 aneinander gereihten, durch Knotenscheiben verbundenen Stäbe wie einen Stab, ergibt sich eine Knicklänge von 900 mm. In diesem Fall kann nicht von einer maximalen Last von 750N ausgegangen werden, da diese nur unmittelbar vor dem Lager auftritt. Aber dieser Fall muss für eine mittlere Last von 500N überprüft werden. Es ergeben sich also zwei mögliche Knickfälle: Eulerfall 4 mit einer Knicklänge von 290 mm und einer maximalen Last von 750N und Eulerfall 4 mit einer Knicklänge von 900 mm und einer maximalen Last von 500N.

Mit

$$B_{ST} = 10 \text{ mm (Breite des Stabs)}$$



$H_{ST} = 6 \text{ mm}$  (Höhe des Stabs)

$B_{SP} = 4 \text{ mm}$  (Breite des Spalts)

$H_{SP} = 1,1 \text{ mm}$  (Höhe des Spalts)

ergeben sich folgende Werte:

Stab	I in mm <sup>4</sup>	l in mm	Sk in mm	F <sub>crit</sub> in N	F <sub>vorh</sub> in N	S
Rand	179,56	290	145	5900	750	7,87
		900	450	612,6	500	1,23
Mitte	179,11	290	145	5878	750	7,84
		900	450	610,3	500	1,22

Tabelle 3-3: Sicherheiten Stäbe

Die Stäbe sind ausreichend gegen Knicken dimensioniert.

### 3.2.3.2 Blech

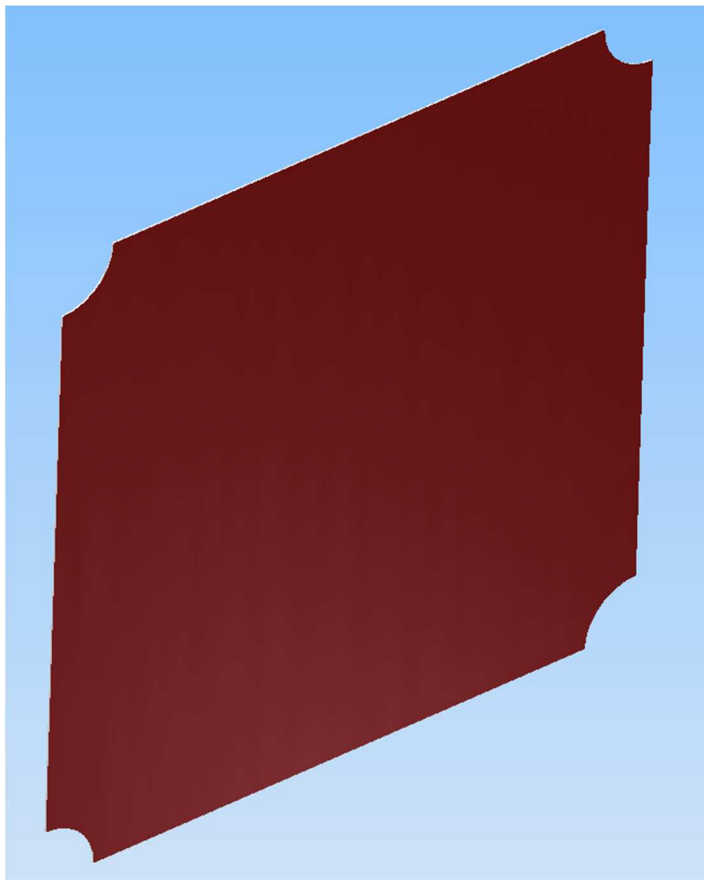


Abb. 3-16: Blech

(a) Die Dimensionierung des Bleches erfolgt nach ähnlichen Kriterien:

- Die Dicke des Blechs muss gegenüber der Stabdicke sehr klein sein (Geltungsbereich Schubfeldtheorie).
- Das Blech muss so dünn wie möglich sein, um ein möglichst großes Signal der DMS zu erhalten.
- Im Sinne der Wirtschaftlichkeit wird eine günstig verfügbare Blechdicke gewählt.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich ein Blech mit den Abmaßen 298 mm · 298 mm · 0,8 mm. Die Ecken des Bleches sind radienförmig ausgestanzt, um Platz für die gelenkige Lagerung der Stäbe in den Knotenscheiben zu machen.

(b) Auch beim Blech ist lange vor dem Materialversagen mit einem Stabilitätsversagen zu rechnen. Bei Überschreiten einer kritischen Last bzw. Spannung wird das Blech ausbeulen und so in einen neuen Gleichgewichtszustand übergehen. Das Beulen wird laut Vereinfachung der Schubfeldtheorie auf Grund einer reinen Schubbelastung eintreten.

(c) Die Ermittlung der kritischen Spannung unterscheidet sich nicht stark von der Ermittlung der kritischen Last des Stabilitätsversagens „Knicken“ des Stabs. Das Blech wird, da es vollständig von Stäben umrandet ist, als allseitig gelenkig gelagert betrachtet. Die Eulerformel für diesen Fall wird lediglich von einem einachsigen auf einen ebenen, also zweiachsigen Spannungsfall erweitert. Dazu wird die Kraft auf die Fläche bezogen und der Einfluss der Querkontraktion berücksichtigt.

Aus:

$$F = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{l^2} \quad (26)$$

Und:

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12} \quad (27)$$

Wird:

$$F = \frac{E \cdot \pi^2 \cdot b \cdot t^3}{l^2 \cdot 12} \quad (28)$$

Bezogen auf die Fläche und ergänzt um den Einfluss der Querkontraktion ergibt sich die Spannung zu:

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot t \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{b^2}{l^2} \cdot \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot E \cdot \frac{t^2}{b^2} \quad (29)$$

Das Verhältnis von  $l^2$  zu  $b^2$  wird Beulwert genannt. Dieser ist abhängig von der Hautfeldgeometrie und den Randbedingungen und kann für Standardfälle der Literatur entnommen werden. Oft wird  $k \cdot \frac{\pi^2}{12(1-\nu^2)}$  auch zum Beulfaktor  $k^*$  zusammengefasst. In Abbildung 3-17 lässt sich der Beulfaktor eines quadratischen Hautfelds mit allseitig gelenkiger Lagerung unter Schubbelastung zu etwa 8,2 ablesen.

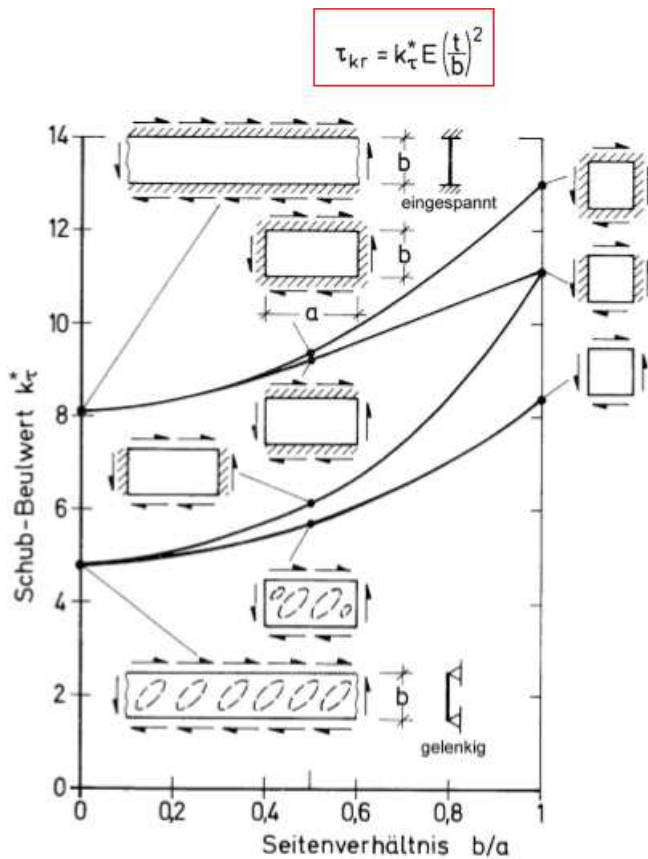


Abb. 3-17: Beulwert

Die kritische Spannung lässt sich schließlich wie folgt berechnen:

$$\sigma_{krit} = k^* \cdot E \cdot \frac{t^2}{a^2} \tag{30}$$

Da es sich hier um eine Schubbelastung handelt, muss natürlich mit der Schubspannung gerechnet werden, diese errechnet sich aber analog zur Druckbelastung

Für die Stabilitätsbetrachtung wird von einem homogenen, isotropen Hautfeld konstanter Dicke ausgegangen. Die Beulsicherheit des Bleches ergibt sich aus dem Verhältnis von kritischer zu vorhandener Spannung:

$$S = \frac{\tau_{krit}}{\tau_{vorh}} \tag{31}$$

Die vorhandene Spannung aus:

$$\tau_{vorh} = \frac{q}{t} \tag{32}$$

Mit

$k^*$  (Beulfaktor) = 8,2

$t$  (Bauteildicke) = 0,8 mm

$a$  (Feldbreite) = 300 mm, sowie

$$q \text{ (maximalen Belastung)} = 0,833 \frac{N}{mm^2}$$

ergeben sich folgende Werte:

$\tau_{krit}$ in $N/mm^2$	$\tau_{vorh}$ in $N/mm^2$	S
4,08	1,042	3,92

Tabelle 3-4: Sicherheiten Blech

### 3.2.4 Festigkeitsnachweis

Für alle weiteren Strukturen gilt das Stabilitätsproblem nicht mehr, hier reicht der einfache Festigkeitsnachweis. Dieser wird geführt gemäß den Erläuterungen im Roloff/Matek (11) und der dazugehörigen Formelsammlung. Die nun folgenden Unterpunkte untergliedern sich jeweils in (a) Beschreibung der Funktion, (b) Art der Belastung und (c) Festigkeitsnachweis.

#### 3.2.4.1 Bolzen

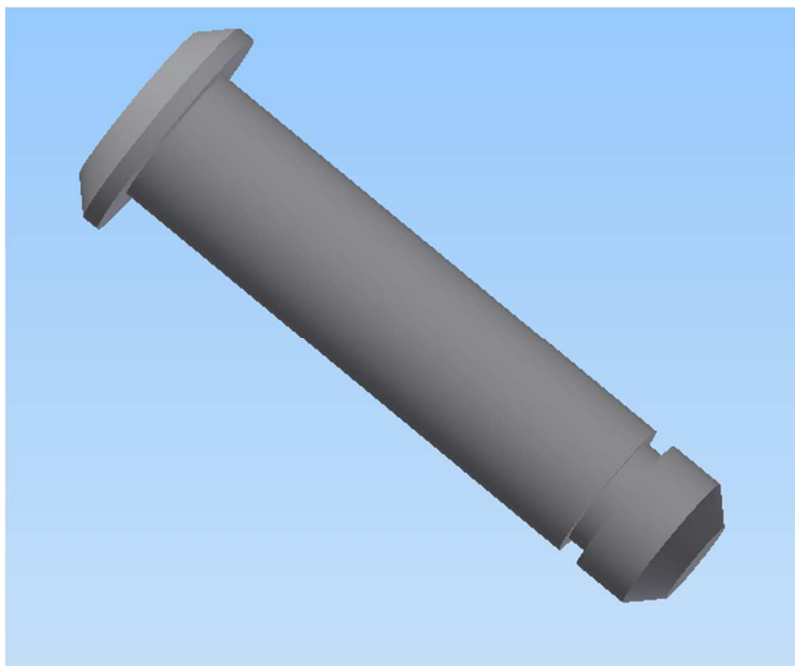


Abb. 3-18: Bolzen

(a) Die Stäbe sind nicht direkt miteinander verbunden, da das einen komplizierten Knotenpunkt ergeben hätte, sondern über eine Knotenscheibe. In diese wird der Stab eingeführt und dann mit einem Bolzen befestigt. Der grundsätzliche Aufbau sieht aus wie in Abb.3-19 dargestellt.

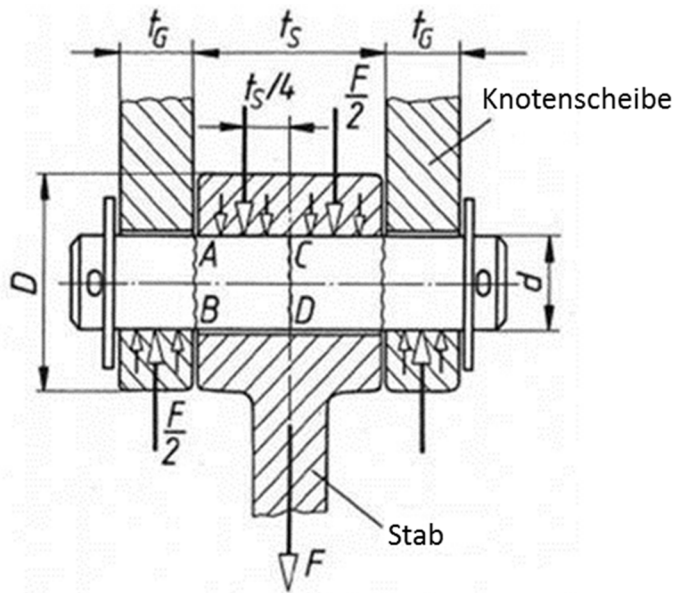


Abb. 3-19: Bolzenverbindung

(b) Der Bolzen sitzt lose in Stab und Knotenscheibe. Die Belastung erfolgt langsam, quasi statisch. Die angreifenden Kräfte bewirken daher in erster Linie eine Biegebelastung. Die Scherbeanspruchung ist gering, eine Torsionsbeanspruchung nicht vorhanden.

(c) Gemäß den Angaben im Rohloff/Matek wird für den Bolzen eine Vordimensionierung vorgenommen, für die im Anschluss der Festigkeitsnachweis geführt wird. Vordimensionierung und Festigkeitsnachweis dienen der Festigkeitsanalyse bezüglich der Biegebeanspruchung. Die Vordimensionierung erfolgt mit der Formel:

$$d \approx k \cdot \sqrt{\frac{K_A \cdot F_{nenn}}{\sigma_{bzul}}} \quad (33)$$

Wobei gilt:

$K_A$  (Anwendungsfaktor für stoßartige Belastung) = 1

$k$  (Einspannfaktor für Bolzen lose in Stange und Gabel) = 1,6

$F_{nenn}$  (maximale Stablast) = 750 N und

$\sigma_{bzul} = 0,3 \cdot R_m = 186 \frac{N}{mm^2}$  bei ruhender Belastung, wobei  $R_m$  mit  $620 \frac{N}{mm^2}$  als typischer Wert für X8CrNiS18-9 angenommen wird.

Der Mindestdurchmesser beträgt daher 3,2 mm.

Der nächste verfügbare Normbolzen hätte einen Durchmesser von 4 mm. Die Festigkeitsprüfung ergibt aber, dass ein Durchmesser von 5 mm gewählt werden muss: Die Sicherheit ergibt sich aus dem Verhältnis von zulässiger zu vorhandener Spannung. Die zulässige Spannung ist bereits bekannt, die vorhandene Spannung berechnet sich wie folgt:

$$\sigma_{bvorh} = \frac{K_A \cdot M_{bmax}}{0,1 \cdot d^3} \quad (34)$$

Das zugehörige maximale Biegemoment berechnet sich mit der Formel

$$M_{b_{max}} = \frac{F \cdot (t_S + 2t_G)}{8} \quad (35)$$

$t_S$  und  $t_G$  sind die Wandstärken der Stäbe und der Knotenscheibe und betragen  $t_G = 4$  mm bzw.  $t_S = 8$  mm. In Tabelle 3-5 sind die Spannungen und daraus resultierenden Sicherheiten für die Durchmesser 4 und 5 mm zusammengefasst.

d in mm	$M_{b_{max}}$ in Nmm	$\sigma_{b_{vorh}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{b_{zul}}$ in N/mm <sup>2</sup>	S
4	1500	234,38	186	0,79
5	1500	120	186	1,55

Tabelle 3-5: Bolzendimensionierung

Für den Bolzen wird daher ein Durchmesser von 5 mm gewählt.

### 3.2.4.2 Augenstab

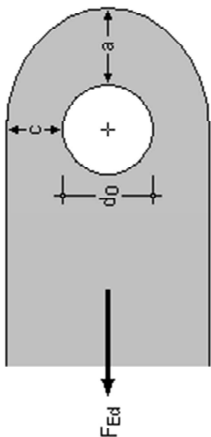


Abb. 3-20: Dimensionierung Augenstab

(a) Mit dem berechneten Bolzendurchmesser muss nun der Stab an den Stabenden auf seine Dimensionierung überprüft werden. Das Stabende bildet die Verbindungsstelle zur Knotenscheibe und sieht eine Bohrung für den Verbindungsbolzen vor. Der Stab verhält sich dabei wie ein Augenstab. Es gilt zu prüfen, ob das Material um die Bohrung in ausreichender Stärke vorhanden ist.

(b) Bei zu geringer Materialstärke besteht eine Rissgefahr.

(c) Die benötigte Materialstärke berechnet sich mit den Formeln aus dem Rohloff/Matek:

$$a \geq \frac{F}{2 \cdot t \cdot \frac{R_{p0,2}}{S_M}} + \frac{2}{3} \cdot d_L \quad (36)$$

$$c \geq \frac{F}{2 \cdot t \cdot \frac{R_{p0,2}}{S_M}} + \frac{1}{3} \cdot d_L \quad (37)$$

Die zugehörigen Werte sind:

$$F = 750 \text{ N}$$

$$t = 8 \text{ mm}$$

$$R_{p0,2} = 290 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$S_M \text{ (Teilsicherheitsbeiwert nach DIN 18800-1)} = 1,1$$

$$d_L = 5 \text{ mm}$$

Daraus ergibt sich für a ein Wert von 3,51 mm und für c ein Wert von 1,84 mm.

Gewählt werden

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$c = 2,5 \text{ mm}$$

### 3.2.4.3 Knotenscheibe

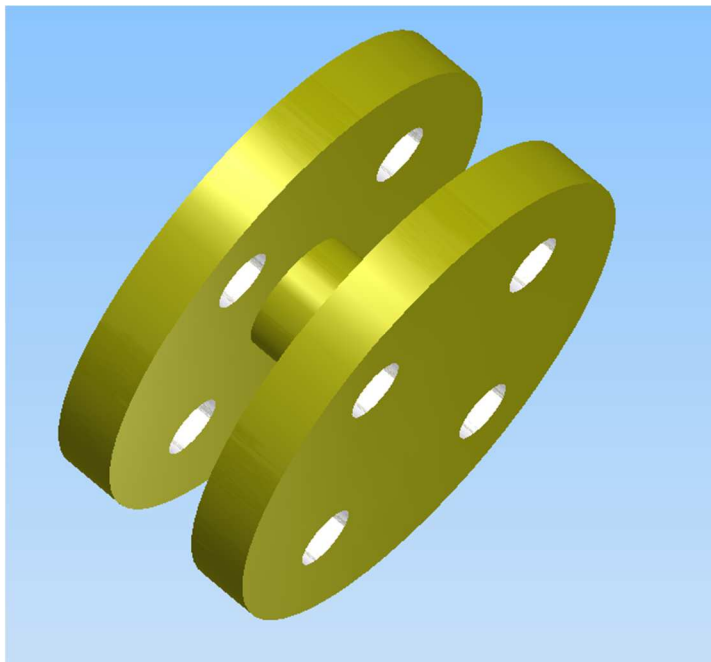


Abb. 3-21: Knotenscheibe

(a) Die Knotenscheibe soll eine Kräfteinleitung ermöglichen und die Stäbe gelenkig lagern. Form und Dimensionierung der Knotenscheibe ergeben sich im Wesentlichen aus fertigungstechnischen Überlegungen. Die einfachste Fertigung eines Bauteils, das in der Mitte einen verjüngten Querschnitt aufweist, ist die Fertigung als Drehteil. Daher hat die Knotenscheibe einen kreisförmigen Querschnitt. Aus der Drehfertigung ergibt sich eine minimale Spannlänge, die Auswirkung auf die Wandstärke der beiden Außenflächen hat. Die Spannlänge und damit die Wandstärke der Knotenscheibe beträgt 4 mm. Der Stab und die Außenwände der Knotenscheibe bilden die Augenstabverbindung des Bolzens.

(b) Die Knotenscheibe ist aus dem gleichen Material gefertigt wie die Stäbe und muss daher um die Bohrung für die Bolzenverbindung die gleiche Materialstärke aufweisen. Das bedeutet, dass die eben

errechneten Werte für die Maße a und c an der Augenstabverbindung auch für die Knotenscheibe gelten. Weitere Belastungen treten nicht auf, daher werden keine weiteren Festigkeitsnachweise benötigt.

### 3.2.5 Verbindung Stab/Knotenscheibe/Bolzen

Für die Verbindung zwischen Bolzen und Stab bzw. Knotenscheibe müssen geeignete Passungen gewählt werden. Das dimensionierende Element ist hierbei die seitliche Verschiebung des Trägers durch ein vorhandenes Spiel in den Verbindungsstellen. Ist das Spiel sehr groß, wird eine Krafteinleitung nicht mehr mittig erfolgen, was die Ergebnisse verfälscht und zu einem vorzeitigen Ausknicken der Stäbe führen kann. Gleichzeitig muss weiterhin eine annähernd gelenkige Lagerung simuliert werden. Es dürfen also keine Presspassungen gewählt werden. Das Ergebnis kann bestenfalls eine Annäherung an den Idealzustand darstellen.

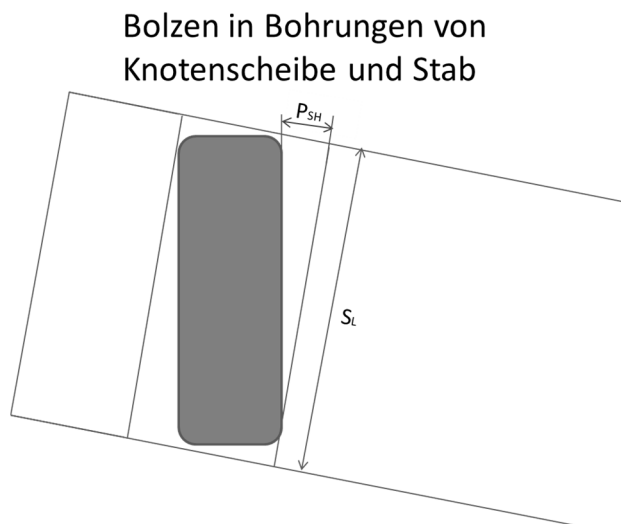


Abb. 3-22: Spiel Bolzen in Bohrung

Über die Gesamtlänge addiert sich das jeweilige Spiel in den Verbindungen, so dass bei scheinbar geringem Spiel eine große Gesamtverschiebung auftreten kann.

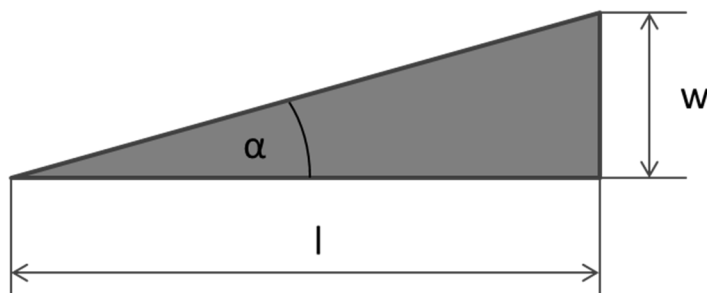


Abb. 3-23: Verschiebung durch Spiel

Der Winkel  $\alpha$ , der sich aus einer Schrägstellung des Bolzens in der Bohrung der Knotenscheibe und des Stabes ergibt, bewirkt eine Verschiebung  $w$  über die Feldlänge  $l$ . Da es mehrere Knotenscheiben gibt und an jeder Knotenscheibe 2 Bolzenverbindungen, summiert sich die Verschiebung zu:



$$w = 2 \cdot \tan(\alpha) \cdot l \cdot 3 + 2 \cdot \tan(\alpha) \cdot l \cdot 2 + 2 \cdot \tan(\alpha) \cdot l \quad (38)$$

Wird für die Bolzenverbindung eine H7/g6 Passung gewählt, ergeben sich die in der Tabelle 3-6 aufgeführten Maße und Toleranzen für einen Bolzendurchmesser von 5 mm.

Welle	Grenzabmaß in $\mu\text{m}$	Bohrung	Grenzabmaß in $\mu\text{m}$	Mindestspiel in mm( $P_{SM}$ )	Höchstspiel in mm( $P_{SH}$ )	SL in mm
g6	-4/-12	H7	0 / 12	0,004	0,024	16

Tabelle 3-6: Tolerierung Bolzenverbindung – Stab/Knotenscheibe

Mit der Formel:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P_{SH}}{S_L}\right) \quad (39)$$

kann daraus der Winkel  $\alpha$  berechnet werden, der für die Gesamtverschiebung verantwortlich ist.

$\alpha$ in $^\circ$	1,03
w in mm	5,4

Tabelle 3-7: Verschiebung am Gesamtbauteil durch Passungsspiel

Durch die gewählte Passung ist also ein seitliches Spiel von 5,4 mm über eine Länge von 900 mm möglich. Dieses Spiel ist dann auch an der Ecke oberhalb der Krafteinleitung vorhanden. Weicht also das obere Ende des Schubfeldträgers 5,4 mm von der Mittellinie ab, kann sich ein Kraftpfad in einer Winkelabweichung von  $1,03^\circ$  gegenüber der Senkrechten ergeben. Über den bekannten Winkel kann dann der senkrechte Anteil  $F_S$  der eingeleiteten Kraft  $F$  berechnet werden mit

$$F_S = \cos(\alpha) \cdot F$$

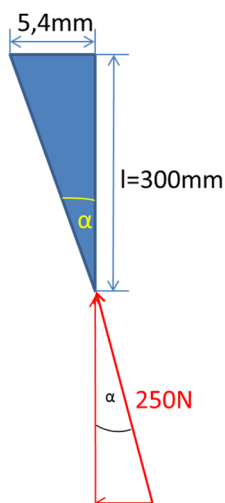


Abb. 3-24: Winkeländerung Krafteinleitung

Die Abweichung hätte eine Verringerung der zentrisch eingeleiteten 250N auf 249,96N zur Folge und eine dezentrale Krafteinleitung. Letzteres ist immer kritisch bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen. Angesichts der für die Idealisierung notwendigen gelenkigen Lagerung und auch im Sinne der leichten Fertigung wird es aber in Kauf genommen.

### 3.2.6 Verbindung Kraft Schubfeldträger

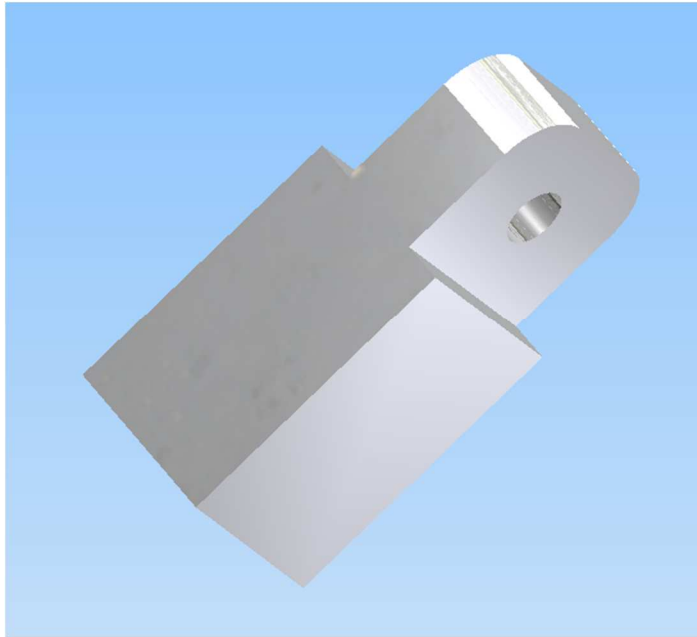


Abb. 3-25: Verbindung Kraft Schubfeldträger

Die Vorrichtung zur Krafteinleitung ist, wie bereits erwähnt, nicht Inhalt dieser Konstruktionsarbeit. Lediglich das Verbindungsstück zwischen der Kraftvorrichtung und dem Schubfeldträger muss auf den Schubfeldträger angepasst werden. Da das Verbindungsstück nur mit einer Kraft von 250N belastet wird, aber die gleiche Verbindung aufweist, wie die Stäbe mit den Knotenscheiben, wird auf einen separaten Festigkeitsnachweis verzichtet. Betrachtet wird lediglich die Tolerierung des Bauteils. Die sollte im Sinne der einfachen Handhabung und der möglichst zentrischen Lasteinleitung recht eng gefasst sein. Gewählt werden die gleichen Standardtoleranzen wie bereits zwischen Stab und Knotenscheibe.

Welle	Grenzabmaß in $\mu\text{m}$	Bohrung	Grenzabmaß in $\mu\text{m}$	Mindestspiel in mm( $P_{SM}$ )	Höchstspiel in mm( $P_{SH}$ )
g6	-4/-12	H7	0 / 12	0,004	0,024

Tabelle 3-8: Tolerierung Bolzenverbindung - Krafteinleitung/Knotenscheibe

Das CAD-Modell des Schubfeldträgers und die technischen Zeichnungen der einzelnen Komponenten befinden sich als 3D PDF auf der beigelegten CD.

### 3.2.7 Klebung

Die kontinuierliche kraftschlüssige Verbindung des Hautfeldes mit den Stäben wird durch Kleben hergestellt. Zunächst werden (a) die Anforderungen geschildert, um dann unter (b) den Kleber zu beschreiben und dann in (c) die nötige Überlappungslänge zu berechnen und abschließend den Festigkeitsnachweis der Klebung zu führen. Die Aufstellung der Kriterien und die Berechnungen erfolgen nach einem Skript der Maschinenbau Fakultät der Universität Siegen (12)

(a) Der Kleber muss folgenden Anforderungen genügen:

- Der Kleber muss im Spalt aushärten können, also ohne viel Licht und Sauerstoff.
- Der Kleber muss bei variabler Spaltdicke anwendbar sein, da sich die Spaltdicke nicht standardisieren lässt, sondern zwischen 0 und 0,3 mm schwanken wird.
- Der Kleber muss einen Schubfluss von  $0,833 \frac{N}{mm^2}$  übertragen können.
- Die Topfzeit muss so hoch sein, dass sich der Kleber auftragen lässt und das Bauteil in die Montagehilfe eingelegt werden kann, also mehr als eine Minute betragen.
- Die Aushärtezeit sollte möglichst gering sein, um unnötig lange Montagezeiten zu vermeiden.

(b) Nach diesen Kriterien ist der Kleber: LOCTITE 3090 ausgewählt (Datenblatt im Anhang):

Topfzeit 90-180sec bei 25°C

Spaltdicken von 0,05 mm-2 mm möglich

Handfestigkeit nach wenigen Minuten, komplett ausgehärtet nach 24h

Scherzugfestigkeit auf Aluminium, nach einer Aushärtezeit von 24h:  $\tau_b = 9 \frac{N}{mm^2}$

(c) Mit diesen Werten wird jetzt die Überlappungslänge ermittelt.

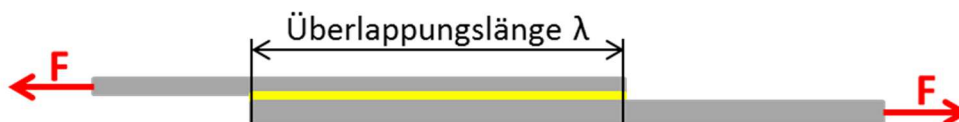


Abb. 3-26: Überlappungslänge Klebung

Diese ergibt sich aus dem optimalen Überlappungsverhältnis  $\ddot{u}$  und der minimalen Bauteildicke, in diesem Fall also der Blechstärke  $t = 0,8$  mm

$$\lambda = \ddot{u} \cdot t_{min} \quad (40)$$

Das Überlappungsverhältnis wiederum ist optimal, wenn die Festigkeit der Klebung gleich der Bauteilfestigkeit ist, also gilt:

$$F_S = F_{BK} \quad (41)$$

Dabei berechnet sich die Festigkeit des Bauteils nach:

$$F_S = R_e \cdot b \cdot t_{min} \quad (42)$$

Und die Festigkeit der Klebung aus:

$$F_{BK} = \tau_B \cdot \ddot{u} \cdot t_{min} \cdot b \quad (43)$$

Durch Einsetzen von (42) und (43) in (41) ergibt sich  $\ddot{u}$  zu:

$$\ddot{u} = \frac{R_e}{\tau_b} \quad (44)$$

Mit

$$R_e = 80 \frac{N}{mm^2} \text{ und}$$

$$\tau_b = 9 \frac{N}{mm^2} \text{ ergibt sich ein}$$

$\ddot{u}_{opt}$  von 8,889 mm und daraus eine

Überlappungslänge von  $\lambda = 7,11$  mm

Gewählt wird daher eine Überlappungslänge von 8 mm, die sich auf die zwei Seiten des Blechs aufteilt, pro Seite also 4 mm beträgt.

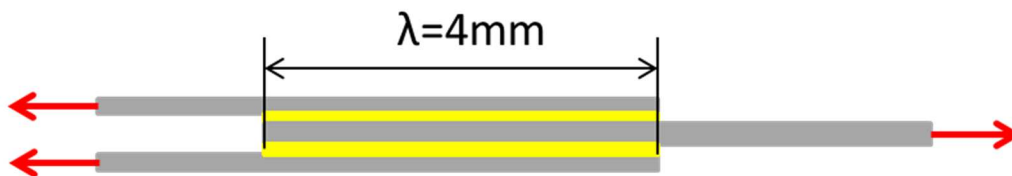


Abb. 3-27: Beidseitige Klebung

Mit dem gewählten Kleber und der gewählten Überlappungslänge wird der Spannungsnachweis geführt, wie in Abbildung 3-28 beschrieben. Die Grafik mit den Formeln entstammt dem angegebenen Skript.

**Spannungsnachweis**

$$\tau = \frac{F}{A} \leq \tau_{zul}$$

$$\tau_{zul} = \frac{\tau_B}{v}, \quad v = 2...3 \text{ (statisch)} \quad v = 3...10 \text{ (dynamisch)}$$

**Dimensionierung**

$$A_{erf} = \frac{F}{\tau_{zul}}$$

Abb. 3-28: Spannungsnachweis Klebung

$\tau_b = 9 \frac{N}{mm^2}$  ist bekannt aus den Angaben des Klebstoff-Herstellers. Da es sich um eine statische Belastung handelt, ergibt sich  $\tau_{zul}$ , wie in Abbildung 3-28 dargestellt zu

$$3 - 4,5 \frac{N}{mm^2}.$$

$\tau_{vorh}$  berechnet sich nach der ebenfalls in Abbildung 3-28 abgebildeten Formel aus  $F = 250 \text{ N}$  und der Fläche  $A = 8 \text{ mm} \cdot 298 \text{ mm} = 2384 \text{ mm}^2$  zu  $\tau = 0,105 \frac{N}{mm^2}$

und ist damit deutlich geringer als die zulässige Spannung. Da nicht sicher ist, wie gut der Kleber im Spalt verteilt ist und ob die komplette Tiefe des Spalts benetzt wird, ist diese Überdimensionierung in Ordnung.

### 3.2.8 Zusammenfassung der Werte:

<b>Belastung an Stelle x in N</b>	<b>Feldlänge in mm</b>				
250	300				
<b>Größte auftretende Stabkraft in N</b>	<b>Dazugehöriger Hebel in mm</b>	<b>Anzahl der Felder</b>			
750	900	3			
<b>Stabbreite in mm</b>	<b>Stablänge in mm</b>	<b>Stabdicke in mm</b>	<b>Stabenddicke in mm</b>	<b>Spaltdicke in mm</b>	<b>Spalttiefe in mm</b>
10	290	6	8	1,1	4
<b>Blechdicke in mm</b>	<b>Blechbreite in mm</b>	<b>Blechhöhe in mm</b>			
0,8	298	298			

Tabelle 3-9: Bauteilabmaße

<b>STAB</b>		Kleinster (dimensionierender) Wert
-------------	--	------------------------------------

<b>Sicherheit gegen Knicken</b>	Rand	1,23
	Mitte	1,22
<b>Sicherheit gegen Ausreißen</b>	a	1,42
	c	1,35
<b>BLECH</b>		
<b>Sicherheit gegen Beulen</b>		3,92
<b>BOLZEN</b>		
<b>Sicherheit gegen Biegen</b>		1,55

Tabelle 3-10: Sicherheiten

### 3.3 DMS Messtechnik

Die Spannungen im Schubfeldträger werden mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst. Die DMS- Messtechnik fällt in den Bereich der zerstörungsfreien Prüfung. Dabei werden Dehnungsmessstreifen auf der Oberfläche eines Bauteils angebracht. Die DMS messen nicht, wie ihr Name impliziert, die Dehnung, aber einen veränderten Widerstand, von dem auf eine Dehnung geschlossen werden kann. Und anhand der Dehnung kann nach dem Hookeschen Gesetz  $E \cdot \epsilon = \sigma$  die im Bauteil wirkende Spannung ermittelt werden.

Alle weiteren Ausführungen zur Messtechnik sowie die Wahl der richtigen DMS und der Aufbau der Brückenschaltung beruhen auf dem umfassenden Werk zur DMS-Messtechnik von Karl Hoffmann (13).

DMS bestehen in der Regel aus einem Trägermaterial und einem aufgetragenen metallischen Leiter, der mit einer Spannung versorgt wird. Der DMS wird auf das zu untersuchende Bauteil aufgeklebt. Dabei muss auf eine möglichst störungsfreie enge Verbindung geachtet werden. Wirkt nun eine Kraft auf das Bauteil und führt zu einer Dehnung oder Stauchung, wird der DMS an der Oberfläche im gleichen Maße gedehnt oder gestaucht und in dem DMS der metallische Leiter. Durch die Dehnung bzw. Stauchung verändern sich der Durchmesser und die Länge des Leiters. Verändern sich Durchmesser und Länge des Leiters, verändert sich auch der Widerstand. Die Änderung des Widerstands wird mit Hilfe einer Brückenschaltung erfasst und daraus lässt sich die Dehnung errechnen.

DMS wurden in viele verschiedene Richtungen weiter entwickelt, so dass heute nicht zwangsläufig geklebt wird und der Leiter nicht zwangsläufig aus Metall ist, das Grundprinzip ist aber das Gleiche geblieben.

In den folgenden Unterpunkten werden die DMS nach den Messbedingungen ausgewählt, die Messaufbauten beschrieben und erläutert und abschließend die benötigte Platinenbestückung abgebildet.

### 3.3.1 Messbedingungen

Zur Auswahl des geeigneten DMS muss zunächst geklärt werden, was dieser leisten muss. Dazu werden die Messbedingungen untersucht. Man unterscheidet zwischen mechanischen Bedingungen, Nebenbedingungen, elektrischen Bedingungen und Applikationsbedingungen. Es wird hier nur kurz erläutert, welche Bedingungen vorliegen. Auf eine Erläuterung der alternativen Möglichkeiten wird verzichtet.

Im vorliegenden Fall gibt es zwei verschiedene Wirkfelder: Stab und Blech. Für beide Wirkfelder werden die Bedingungen nach ihrer Kategorie beschrieben. Eine Zusammenfassung wird in Tabelle 3-11 vorgenommen. Abschließend werden die passenden DMS genannt, die alle Bedingungen erfüllen.

#### Mechanische Bedingungen:

Im Stab wird die Hauptdehnungsrichtung als bekannt voraus gesetzt. Der Begriff Stab sagt schon, dass es sich um einen einachsigen Spannungszustand handelt. Der Stab wird nur in Längsrichtung belastet. Die Aufgabe des DMS besteht also lediglich darin, heraus zu finden, wie groß die Dehnung und damit die Spannung im Bauteil ist.

Im Blech ist die Hauptspannungsrichtung nicht bekannt. Daher reicht ein DMS in eine Richtung nicht aus, um eine Aussage über den Spannungszustand im Blech zu treffen. Für eine Spannungsanalyse müssen die Dehnungen in drei Raumrichtungen gemessen werden. Aus den Ergebnissen lässt sich dann sowohl die Hauptspannungsrichtung als auch die Größe der Spannung berechnen. Wie das funktioniert, wird unter dem Punkt „Messaufbau“ erläutert

Es handelt sich um statische Messungen

#### Nebenbedingungen:

Zu den Nebenbedingungen zählen Einflüsse wie Temperatur und Witterungsverhältnisse sowie Störgrößen, die in Kontakt mit den DMS gelangen können, wie Strahlung, Chemikalien oder elektrische Felder. Im gegebenen Fall ist der DMS keiner Störgröße ausgesetzt, die Temperatur und Witterungsverhältnisse werden auf Grund des Betriebs unter Laborbedingungen nicht als relevant angenommen. Außerdem wird hier die Messdauer beachtet. Die wird auf Grund der Verwendung des Modells im Vorlesungsbetrieb als wiederholt kurzzeitig angenommen.

#### Elektrische Bedingungen:

Auf Grund der Beschränkungen des Messverstärkers kann für alle DMS nur eine Verstärkung eingestellt werden. Daher muss für Stab und Blech der gleiche Brückenaufbau gewählt werden. Es wird ein Halbbrückenaufbau gewählt. Was das ist und wie dieser funktioniert, wird unter dem Punkt „Messaufbau“ erläutert. Durch den Messverstärker ist auch der Widerstandswert des DMS festgelegt. Dieser beträgt 350 Ohm.

#### Applikationsbedingungen:

Stab und Blech bestehen aus Aluminium ohne eine störende Oberflächenbehandlung. Daher können die DMS nach gründlicher Säuberung der Messstelle mit Aceton aufgeklebt werden. Der dafür bei G.U.N.T. bewährte Kleber ist LOCTITE 6038. Die Messstellen sind frei zugänglich und bieten ausreichend Platz. Es können daher DMS mit der optimalen Messgitterlänge von 3-6 mm genutzt werden. Die Messstelle soll vor mechanischen Einflüssen geschützt werden. Gleichzeitig dürfen Stäbe und Bleche nicht durch Abdeckungen zusätzlich versteift werden. Die Messstelle wird daher nur mit einem Kautschuk

übergossen, der die Dehnung des Materials nicht behindert, aber eine Zugentlastung darstellt und mechanischen Einwirkungen auf den DMS im Weg steht.

Es ergibt sich für die DMS folgende Anforderungstabelle.

<b>Bedingung</b>	<b>Stab</b>	<b>Blech</b>
<b>Spannungszustand:</b>		
Anzahl der Achsen	1	mehrachsig
Richtung	bekannt	unbekannt
<b>Topographie des Spannungsfeldes:</b>		
Homogenität	quasihomogen	homogen
Veränderlichkeit	konstant	konstant
<b>Art der Beanspruchung</b>	statisch	statisch
<b>Richtung</b>	positiv und negativ	positiv und negativ
<b>Messdauer</b>	wiederholt kurzzeitig	wiederholt kurzzeitig
<b>Temperatur</b>	konstant 20°C	konstant 20°C
<b>Störeinflüsse</b>	nein	nein
<b>Widerstandswert</b>	350 Ohm	350 Ohm
<b>Schaltung</b>	Halbbrücke	Halbbrücke
<b>Speisespannung</b>	10V	10V
<b>Applikationsbedingungen:</b>		
Bauteilwerkstoff	beklebbar	beklebbar
Oberflächenbeschaffenheit	nicht behandelt	nicht behandelt
Platzverhältnisse	gut	gut
Zulässiger Schutz	Kautschukguss	Kautschukguss

Tabelle 3-11: Anforderungen Dehnungsmessstreifen

Auf Grund dieser Kriterien werden die folgenden DMS ausgewählt:

FAE-12S-35-S13E-J für die Stäbe

1-RY93-6/350 für die Bleche

Die Typenerklärung befindet sich im Anhang.



### 3.3.2 Messaufbau

Die DMS müssen an möglichst repräsentativen Stellen appliziert werden. Das heißt, für die Stäbe: möglichst weit außen, um die Spannung in Knotennähe messen zu können, allerdings nicht zu weit außen, da sonst der Einfluss der Bolzenverbindung dominiert. Gemäß der St. Venantschen Verteilung muss ein Abstand in Größe der Querschnittsabmessung von einer Störgröße gewahrt werden, um von Störeinflüssen befreit zu sein.

Für den Messaufbau wird, wie oben erwähnt, eine Halbbrücke gewählt. Die Halbbrücke ist eine Variante der Wheatstone'schen Brückenschaltung.

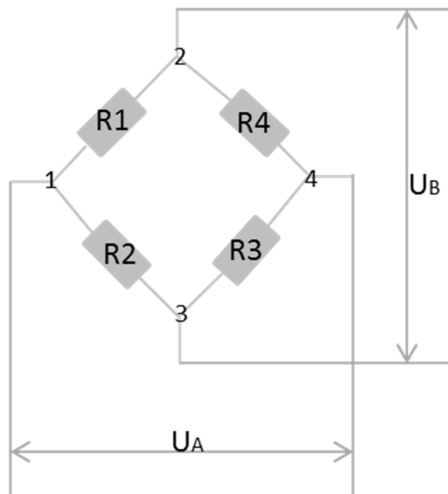


Abb. 3-29: Wheatstone'sche Messbrücke

Mit Hilfe der Wheatstone'schen Brückenschaltung können elektrische Widerstände genau gemessen werden.

Legt man an die beiden Brückeneinspeisepunkte 2 und 3 eine Brückenspeisespannung  $U_B$  an, dann teilt sich diese in den beiden Brückenhälften im Verhältnis der Widerstände auf. Die eine Hälfte besteht aus dem Spannungszweig  $\frac{R_1}{R_2}$ , die andere Hälfte aus dem Arm  $\frac{R_3}{R_4}$ . Die Teilspannung  $u_1$  am Brückeneckpunkt 1 errechnet sich daher zu:

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_B \quad (45)$$

Die Teilspannung  $u_4$  an Brückeneckpunkt 4 zu:

$$u_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_B \quad (46)$$

Die Differenz zwischen den Teilspannungen ergibt die Brückenausgangsspannung  $U_A$ :

$$U_A = U_B \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = (u_1 - u_4) \quad (47)$$

Sind alle Widerstände gleich groß, ist die Ausgangsspannung  $U_A=0$ . In diesem Fall ist die Brücke abgeglichen. Sind die Widerstände durch eine Dehnung des Bauteils, auf dem sie appliziert sind, nicht gleich groß, ist  $U_A \neq 0$  und die Brücke verstimmt. An Hand der Ausgangsspannung kann dann die Änderung des Widerstands bestimmt werden. Es gilt:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \quad (48)$$

Auf Grund der kleinen Beträge der Widerstandsänderungen kann aber auch die Näherungsgleichung

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (49)$$

verwendet werden.

Mit Hilfe des k-Faktors kann nun jede einzelne Widerstandsänderung ermittelt werden. Der k-Faktor beschreibt das Verhältnis von relativer Widerstandsänderung zur Dehnung.

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon} \quad (50)$$

Dieser Wert ist abhängig von der Materialbeschaffenheit der DMS und variiert. Daher wird er auf jeder DMS-Verpackung explizit angegeben. Durch Umstellen erhält man:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$

So dass gilt:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (51)$$

Diese Gleichungen gehen davon aus, dass sich alle Widerstände der Brückenschaltung ändern. In der experimentellen Spannungsanalyse ist aber meist ein Teil der DMS-Widerstände durch Ergänzungswiderstände ersetzt. So ergeben sich Vollbrücken (alle Widerstände sind messende DMS-Widerstände), Halbbrücken (zwei der messenden DMS-Widerstände sind durch Ergänzungswiderstände ersetzt), Viertelbrücken etc.

Durch den Einsatz von Ergänzungswiderständen tritt häufig ein neues Problem auf, der Temperaturgang. Verändert sich das Messsignal bei konstanter Belastung, ist die Ursache ein Temperaturgang. Dieser tritt auf, wenn sich während des Messvorgangs die Temperatur des Messobjektes oder seiner Umgebung ändert und nicht alle Elemente der Brücke den gleichen Temperaturkoeffizienten, also die gleiche Wärmedehnung, besitzen oder nicht alle Elemente den gleichen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind. In diesem Fall stellt sich auf Grund der Temperatur eine unterschiedliche Dehnung in den einzelnen Brückenelementen ein und verfälscht das Gesamtergebnis. Um dieses Phänomen zu vermeiden, werden im Schubfeldträger statt der Ergänzungswiderstände zwei Ausgleichs DMS eingesetzt. Diese sind von der gleichen Sorte, wie die auf dem SFT applizierten DMS und sie werden ebenfalls auf einer Aluminiumleiste angebracht, so dass die gleichen Umgebungseinflüsse herrschen.

Der für den Schubfeldträger gewählte Messaufbau ist in Abbildung 3-30 abgebildet.

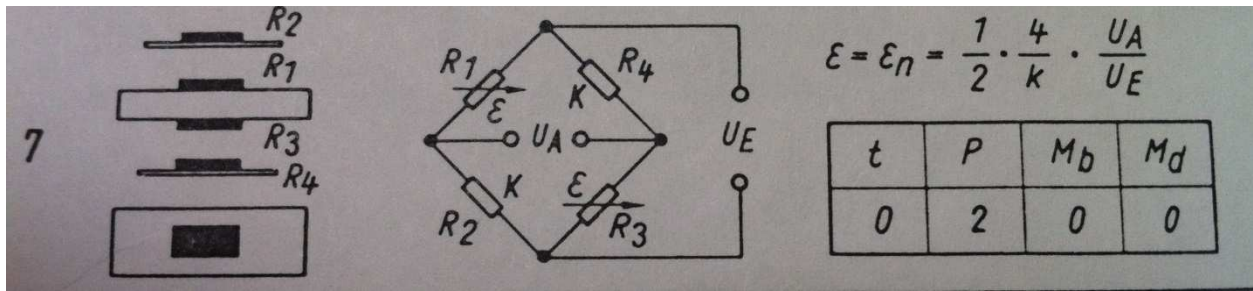


Abb. 3-30: gewählte Messbrückenvariante

Übertragen auf den Schubfeldträger sieht der Messaufbau aus wie auf Abbildung 3-31:

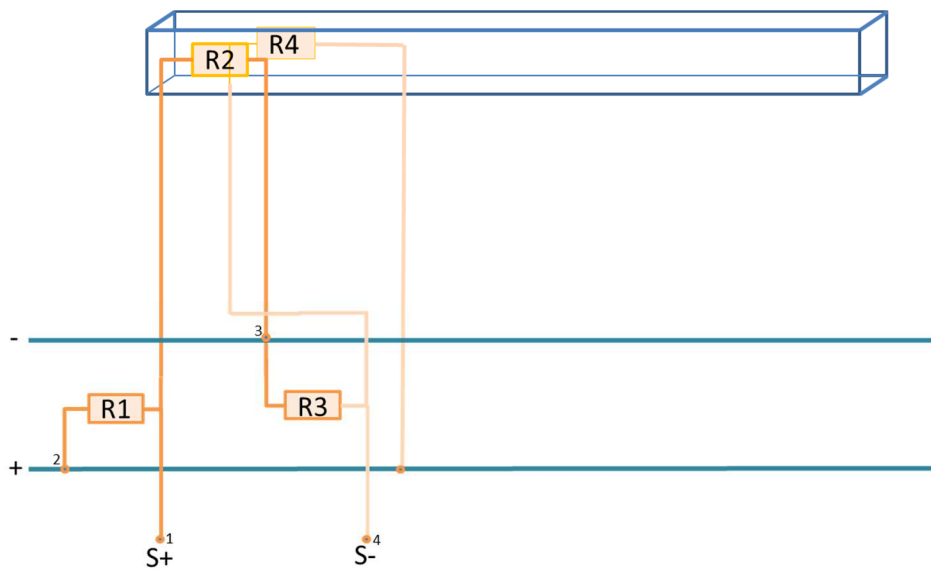


Abb. 3-31: DMS Anordnung

Für den Stab wird an jeder Messstelle auf der Vorder- und der Rückseite ein DMS angebracht. Beide erfassen also die gleiche Dehnung, während die dazu gehörigen Ergänzungs-DMS keine Widerstandswertänderung erfahren. Daher ist  $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 0$  und  $\epsilon_2 = \epsilon_4$ . Mit Formel (51) gilt also

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (2 \cdot \epsilon)$$

Durch Umstellen ergibt sich die Dehnung zu:

$$\epsilon = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (52)$$

Der Messaufbau für das Hautfeld bzw. Blech unterscheidet sich vom Messaufbau der Stäbe. Im Blech ist weder Hauptspannungsbetrag noch -richtung bekannt. Daher reicht eine Messung in eine Richtung nicht aus. In diesem Fall muss eine Messung in 3 Richtungen vorgenommen werden. In welchen Richtungen gemessen wird, ist dabei fast egal. Im Sinne einer simplen Rechnung sind DMS mit 0°/60°/120° Orientierung oder 0°/45°/90° Orientierung üblich. Die Orientierung der Messgitter der bei G.U.N.T. Gerätebau GmbH verwendeten DMS liegt bei a=0°/b=45°/c=90°.

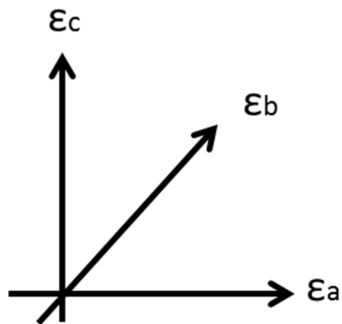


Abb. 3-32: unbekannte Hauptspannungsrichtung

In jede Richtung wird eine separate Halbbrücke aufgebaut. Jede Halbbrücke liefert eine Dehnung. Die Berechnung der Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  erfolgt dann aus den Dehnungswerten mit der Formel

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (53)$$

Neben den Hauptnormalspannungen müssen auch die Richtungen der Hauptspannungen ermittelt werden. Diese sind identisch mit den Hauptdehnungsrichtungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ . Die Hauptdehnungsrichtungen lassen sich nach geometrischen Beziehungen aus den gemessenen Dehnungen  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  und  $\varepsilon_c$  bestimmen. Die Basis dafür bildet der Mohrsche Spannungskreis. Wie dieser funktioniert, lässt sich im Werk von Karl Hoffmann nachlesen; auf eine Darstellung in dieser Arbeit wird verzichtet, hier werden nur die dort abgeleiteten Formeln verwendet.

Zunächst muss ein Hilfswinkel  $\psi$  berechnet werden nach der Formel

$$\tan\psi = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right. \quad (54)$$

Der Tangens ergibt sich im rechtwinkligen Dreieck aus dem Verhältnis von Gegenkathete (Zähler Z) zu Ankathete (Nenner N). Das Dreieck bildet sich aus der Lage der Hauptspannung im Mohrschen Spannungskreis.

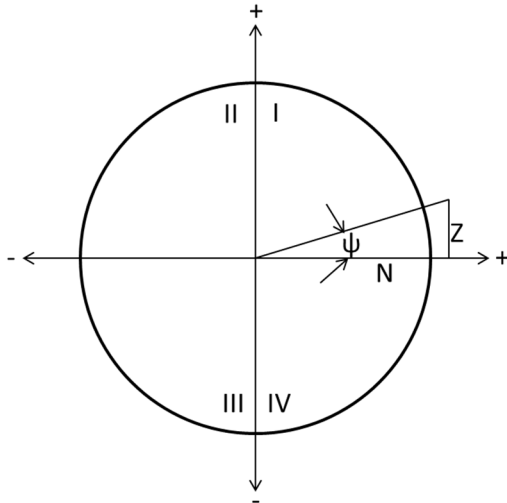


Abb. 3-33: Aufteilung Mohrscher Spannungskreis

Noch nicht klar ist, in welchem Abschnitt des Kreises das Dreieck liegt. Dazu müssen die Vorzeichen von  $Z$  und  $N$  betrachtet werden.

Ist  $Z \geq 0$  und  $N > 0$ , befindet sich das Dreieck im ersten Abschnitt.

Ist  $Z > 0$  und  $N \leq 0$ , befindet sich das Dreieck im zweiten Abschnitt.

Ist  $Z \leq 0$  und  $N < 0$ , befindet sich das Dreieck im dritten Abschnitt.

Ist  $Z < 0$  und  $N \geq 0$ , befindet sich das Dreieck im vierten Abschnitt.

Ist der Abschnitt bekannt, lässt sich der Winkel  $\varphi$  bestimmen. Das ist der Winkel zwischen der Richtung der DMS-Gitterachse von Messgitter  $a$  (siehe Abbildung 3-32) und der ersten Hauptspannungsrichtung. Die zweite Hauptspannungsrichtung steht senkrecht auf der ersten, ihr Winkel beträgt also  $90^\circ + \varphi$ .

$\varphi$  ergibt sich im

ersten Abschnitt zu  $\frac{1}{2} \cdot (0^\circ + |\varphi|)$

zweiten Abschnitt zu  $\frac{1}{2} \cdot (180^\circ - |\varphi|)$

dritten Abschnitt zu  $\frac{1}{2} \cdot (180^\circ + |\varphi|)$

vierten Abschnitt zu  $\frac{1}{2} \cdot (360^\circ - |\varphi|)$

Mit den gemessenen Dehnungen und dem Schubmodul von Aluminium  $G = 27068 \frac{N}{mm^2}$  lässt sich außerdem die Schubspannung berechnen zu

$$\tau_{xy} = 2G \left( \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} - \varepsilon_b \right) \quad (55)$$

An jeder Messstelle werden 2 DMS nebeneinander aufgetragen, so dass sich die gleiche Verschaltung wie bei den Stäben ergibt, bloß dass beide DMS statt auf Vorder- und Rückseite nur auf einer Seite (hier der Rückseite) angebracht sind. Die Messungen finden daher nicht exakt in einem Punkt statt, sondern in einem Abstand von der Länge zweier DMS-Hälften. Die Verschiebung bewirkt natürlich, dass sich ein

anderer Spannungszustand an den beiden Stellen einstellen kann. Angesichts der Bauteilbreite von 300 mm und der Messstreifenbreite von weniger als 10 mm werden jedoch keine großen Abweichungen erwartet.

### 3.3.3 Platinenbestückung

Die Ausgleichs DMS werden auf einer Aluminiumleiste aufgebracht, die wie in Abbildung 3-34 dargestellt, auf einer Platine befestigt ist. Die Platinenbestückung umfasst pro Brücke noch einen Widerstand und einen Spindeltrimmer. Über diese beiden Komponenten werden die Brücken einmalig manuell abgeglichen.



Abb. 3-34: Platinenbestückung

## 4 Versuchsträger

Wie eingangs erläutert, ist ein Versuchsträger Bestandteil der Bachelorarbeit. Dieses Kapitel behandelt daher den Aufbau eines Versuchsträgers und dessen Erprobung. Dafür sind einige ergänzende Überlegungen, Angaben und sogar Konstruktionen sinnvoll.

Im Kapitel „Versuchsaufbau“ wird zunächst der erwünschte Kraftpfad durch den Schubfeldträger skizziert. Daraus ergeben sich Anforderungen für die Form- und Lagetoleranzen der Bauteile. Für die Montage der mechanischen Bauteile wird eine Montagehilfe konstruiert und hergestellt, sowie deren Anwendung beschrieben. Im Unterpunkt „Montage der elektronischen Komponenten“ wird für die Verdrahtung der DMS und den korrekten Anschluss an den Messverstärker ein genauer Verdrahtungsplan erstellt.

Ein weiteres Kapitel befasst sich mit der Versuchsvorbereitung. Das beinhaltet die Berechnung der erhofften Messergebnisse. Anschließend werden einige Testreihen durchgeführt, deren Ergebnisse mit den zuvor berechneten verglichen und bewertet werden. Auf Grundlage der daraus gewonnenen Erkenntnisse wird eine Fehleranalyse betrieben und Verbesserungen überlegt.

## 4.1 Versuchsaufbau

Wie im Punkt Dimensionierung beschrieben, sind die Anforderungen an das Modell in Hinblick auf die Genauigkeit sehr hoch. Die Kombination aus möglichst geringem Spiel für eine nur geringe Verschiebung und der Realisierung einer gelenkigen Lagerung aller Stäbe macht einen Kompromiss erforderlich. Für die Lagerung der Stäbe, also ihre Bolzenverbindung mit den Knotenscheiben, dürfen Spielpassungen gewählt werden, aber das Spiel muss sehr gering sein. Daher muss in der Fertigung genau gearbeitet werden. Darüber hinaus muss ein richtiger Kraftverlauf sichergestellt werden. Damit der Kraftpfad durch den Schubfeldträger richtig verläuft, also Kräfte genau dort übertragen werden, wo sie übertragen werden sollen, wird eine genaue Tolerierung der Bauteile nötig. Die fertigungsgerechten Zeichnungen der einzelnen Bauteile finden sich im Anhang. Hier werden nur grundsätzliche Überlegungen dargestellt.

### 4.1.1 Kraftpfad

Für eine ideale Kraftübertragung im Schubfeldträger wird der Weg der Belastung durch den Träger simuliert und alle Verbindungsstellen auf ihre Funktionalität überprüft. Daraus ergeben sich Hinweise für die Fertigung und Montage.

Abbildung 4-1 zeigt den fertigen Schubfeldträger. Über die Spindel wird eine Kraft in den Schubfeldträger eingeleitet, hier an der Stelle  $x = 2b = 600 \text{ mm}$ .

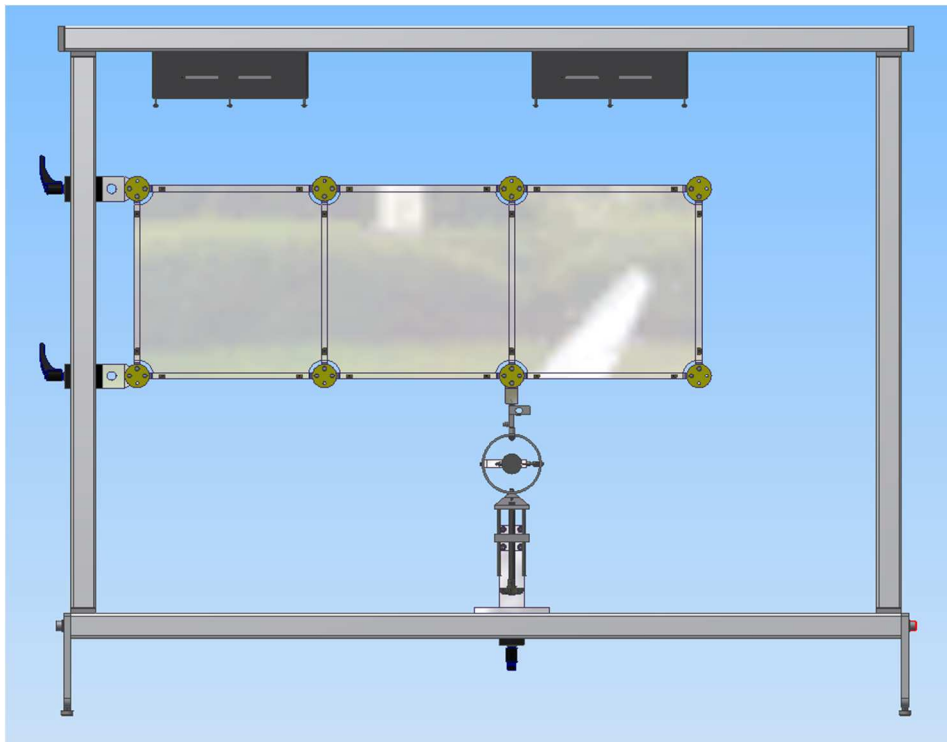


Abb. 4-1: Aufbau Schubfeldträger

Die Einleitung erfolgt über ein Verbindungsstück. Dieses ist in die Knotenscheibe gefügt und über einen Bolzen mit der Knotenscheibe verbunden, dargestellt in Abbildung 4-2.

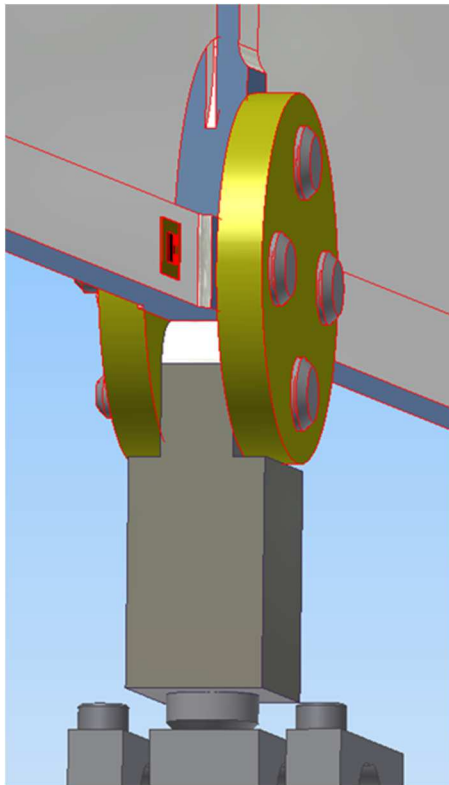


Abb. 4-2: Kraftverlauf 2

Abbildung 4-3 zeigt die Verbindungsstelle ohne die Knotenscheibe. Auch bei minimalen Toleranzen darf die Kraft nicht durch direkten Kontakt des Verbindungsstücks mit den Stäben übertragen werden. Eine Kraftübertragung ist allein über die Bolzenverbindung zulässig.

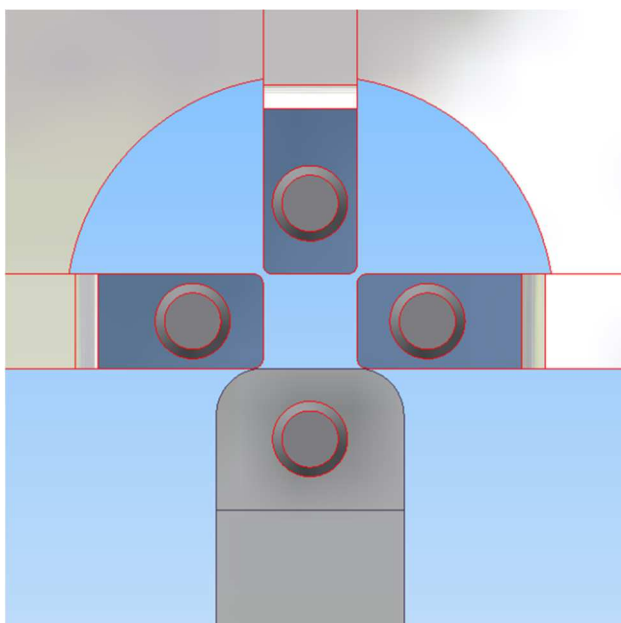


Abb. 4-3: Kraftverlauf 3



Aus diesem Grund wird eine negative Tolerierung der Stablänge, der Verbindungsstückhöhe und des Knotenscheibenmittendurchmessers gewählt. Der Mindestabstand zwischen Stab und Knotenscheibenmitte bzw. Verbindungsstück und Knotenscheibenmitte beträgt 0,1 mm.

Um die benötigte Genauigkeit in der Fertigung etwas zu reduzieren, werden alle Bohrungen für die Bolzenverbindung zunächst kleiner gefertigt. Erst wenn der Schubfeldträger fertig verklebt ist, werden die Knotenscheiben zusammen mit den vormontierten Stäben aufgebohrt und gerieben.

#### 4.1.2 Montage der mechanischen Komponenten

Um die Stäbe im richtigen Abstand zueinander mit den Blechen zu verkleben, wird eine Montagehilfe angefertigt, die die Stäbe beim Aushärten fixiert. Abbildung 4-5 zeigt die Montagehilfe, bestehend aus einer großen Grundplatte aus Aluminium. Eine normgerechte Zeichnung befindet sich im Anhang.

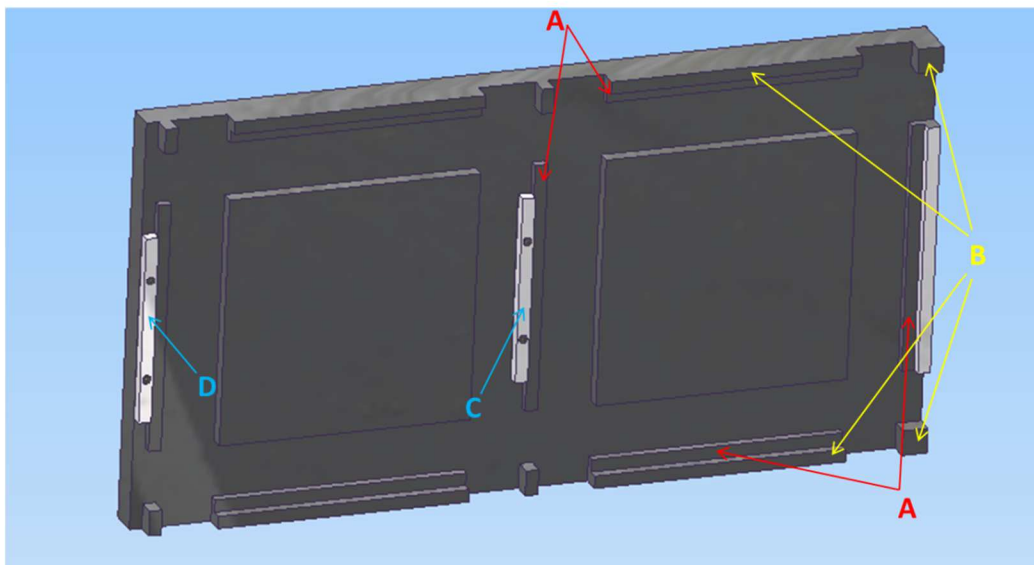


Abb. 4-4: Montagehilfe

Die Montage kann auf Grund der geringen Topfzeit nur Stück für Stück erfolgen. Zunächst wird der Kleber in die Spalte von drei Randstäben und einem Mittenstab aufgetragen. Dann werden die Stäbe auf das Blech geschoben. Ein Blech mit 4 umrandenden Stäben, wie in Abbildung 4-5 dargestellt, kann dann in die rechte Hälfte der Montagehilfe eingelegt werden und darin austrocknen.

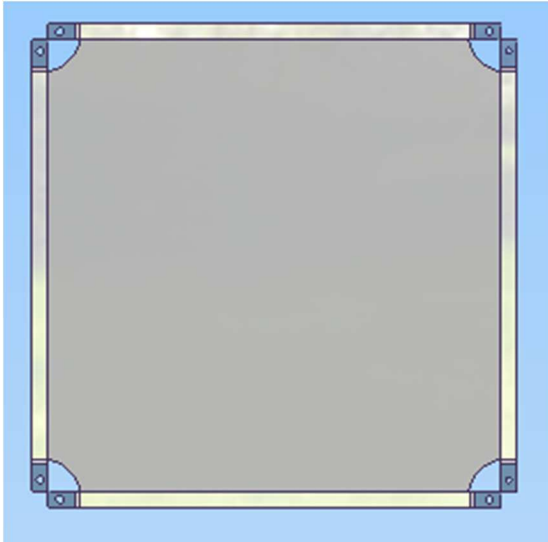


Abb. 4-5: Montage Blech 1

Das Blech liegt dabei auf der Mittelfläche auf, die Stäbe auf den in Abbildung 4-4 mit A gekennzeichneten Flächen. Ihre Position zueinander wird durch die mit B gekennzeichneten Vorsprünge bestimmt. Nachdem das Blech in den Stäben ausgehärtet ist, kann Position C entfernt werden. Jetzt wird Blech Nr. 2 an drei Seiten mit Stäben umrandet und in die linke Hälfte der Montagehilfe eingelegt. Dabei wird die freie Seite des Blechs in den Mittenstab von Blech 1 eingefügt.

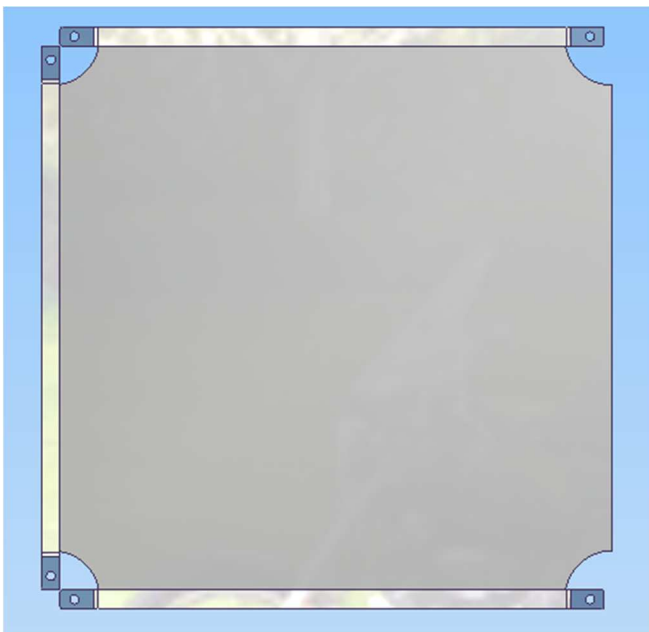


Abb. 4-6: Montage Blech 2

Ist auch dieser Teil ausgehärtet, kann das Bauteil aus der Montagehilfe genommen werden. Blech Nummer 3 wird nun mit 3 Stäben versehen und in die rechte Hälfte eingelegt. Die Kombination aus Blech 1 und 2 wird gedreht und in die linke Seite eingelegt, wobei Blech 3 in den Mittenstab von Blech 2 eingefügt wird. Blech 1 ist nun außerhalb der Vorrichtung.

Sind alle Bleche mit den Stäben verklebt, werden die Knotenscheiben über die Stäbe geschoben und fixiert.



Abb. 4-7: Knotenscheibe vor dem Bohren und Reiben

Die Verbindung aus Knotenscheibe und Stab wird nun zusammen aufgebohrt und gerieben. In die fertigen Bohrungen werden die Bolzen eingefügt und rückseitig mit Sicherungsringen fixiert. Der Schubfeldträger kann erst in den G.U.N.T. Rahmen eingehängt werden, wenn auch die DMS appliziert und verdrahtet sind. Der Vorgang wird dennoch an dieser Stelle beschrieben, da er zum Zusammenbau der mechanischen Komponenten zählt. Um den Schubfeldträger in den Rahmen einzuhängen, müssen die Klemmelemente an selbigem vorjustiert werden. Jetzt können die Knotenscheiben über die Verbindungsstücke geschoben werden. Da es sich um ein Fest- und ein Loslager handeln soll, darf nur ein Verbindungsstück mit dem Bolzen ausgestattet werden. Abbildung 4-8 zeigt das Loslager ohne Bolzen.

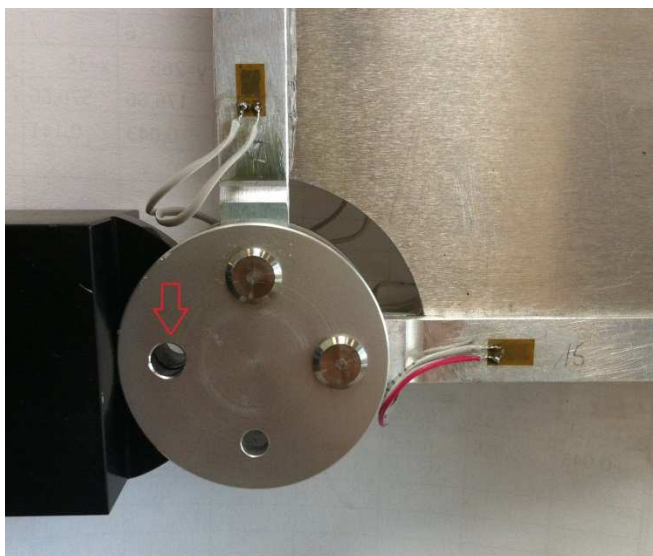


Abb. 4-8: Loslager

Erfolgt die Lasteinleitung nach unten, wird die obere Verbindungsstelle mit einem Bolzen versehen, erfolgt die Lasteinleitung nach oben, muss die untere Verbindungsstelle mit dem Bolzen gesichert

werden. Werden beide Verbindungsstellen mit Bolzen ausgestattet, handelt es sich um zwei Festlager, in diesem Fall ist der Schubfeldträger statisch überbestimmt.

### **4.1.3 Montage der elektronischen Komponenten**

Nach dem Zusammenbau der mechanischen Bauteile erfolgt die Applikation der Dehnungsmessstreifen und der Anschluss aller elektronischen Komponenten. Für die Spannungsanalyse verfügt der Schubfeldträger über 32 Messstellen, dargestellt in Abbildung 4-9. Die merkwürdige Verteilung ist der günstigen Verdrahtung und Zuordnung zu den Messverstärkern geschuldet.

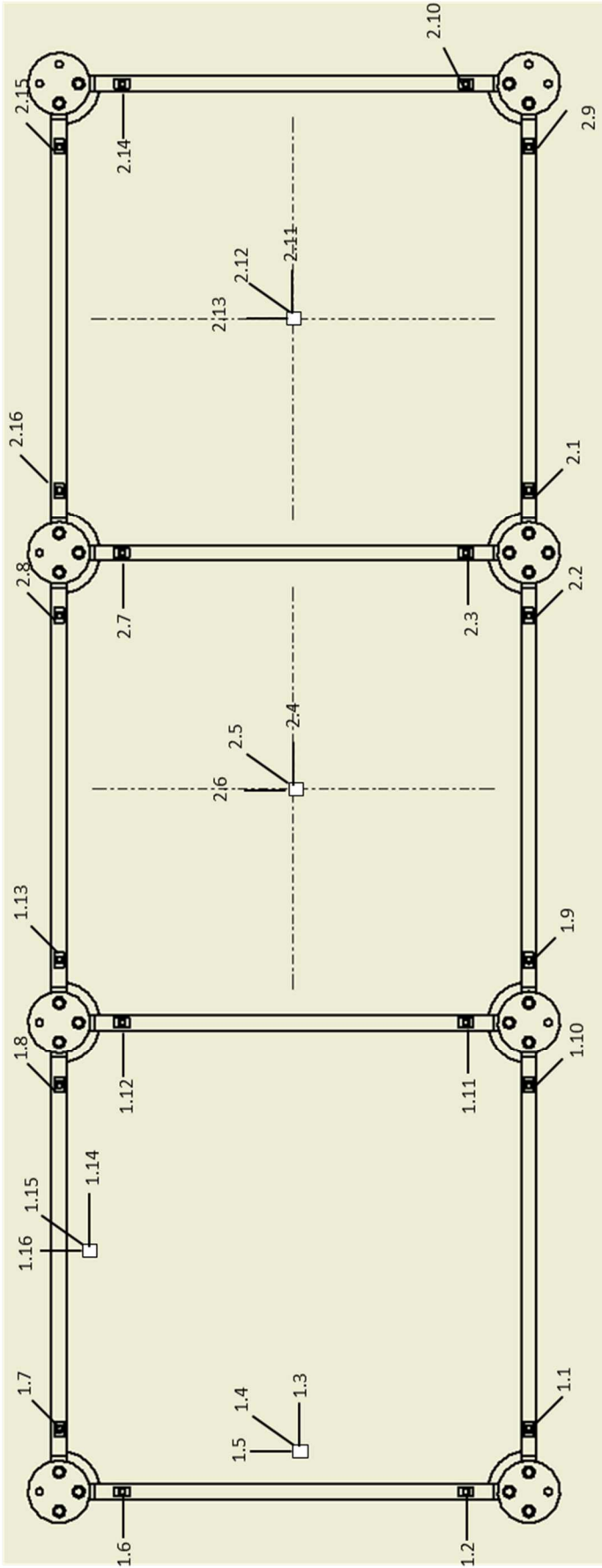


Abb. 4-9: Messstellen

Jede Messstelle besteht aus zwei DMS auf dem Schubfeldträger, die mit jeweils 2 DMS auf der Anschlussplatine zu einer Vollbrücke ergänzt werden. Siehe noch einmal Abbildung 3-30. Die DMS mit der Bezeichnung R2 und R4 befinden sich auf dem Schubfeldträger, die DMS mit der Bezeichnung R1 und R3 sind auf der Anschlussplatine angebracht. Die auf den Stäben applizierten DMS tragen auf der Vorderseite des Schubfeldträgers die Bezeichnung R4, auf der Rückseite die Bezeichnung R2.

Die auf den Blechen applizierten DMS sind wie in Abbildung 4-10 dargestellt bezeichnet.

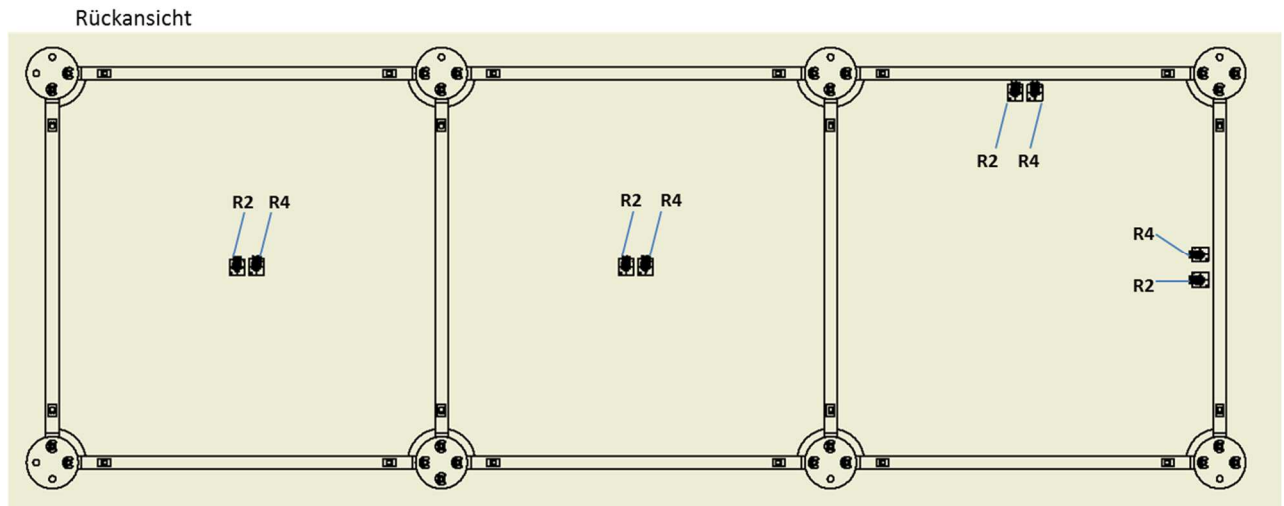


Abb. 4-10: Bezeichnung DMS

Für jede einzelne Messstelle ergibt sich daher auf der Platine folgender grundsätzlicher Aufbau:

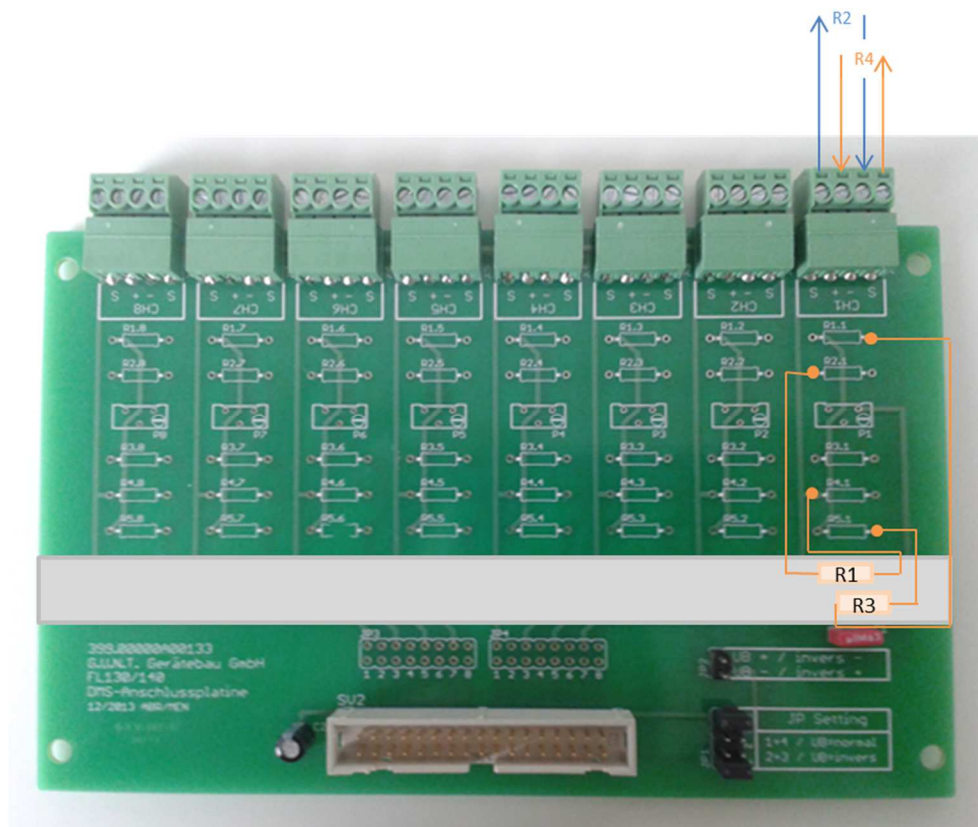


Abb. 4-11: Brückenaufbau an Platine

Eine Besonderheit ergibt sich für die auf den Blechen applizierten DMS. Dort kann mit Hilfe einer kleinen Zusatz-Platine auf dem Blech die Versorgung mit der Speisespannung für alle drei Richtungen mit einem Anschluss verwirklicht werden. Der Schaltplan für die Zusatz-Platine ist in Abb. 4-12 abgebildet. Die Zusatzplatine ist gelb hinterlegt. Das blaue Kreuz mit den Bezeichnungen 21, 22 und 23 stellt den DMS da. Die länglichen Kästen mit der Ch.-Bezeichnung repräsentieren die Schnittstelle zur Platine. Rot ist der positive Spannungsanschluss, blau der negative. Lila, gelb und grün stellt die Signalverdrahtung der drei Richtungen, also der drei einzelnen Brückenaufbauten der DMS, dar.

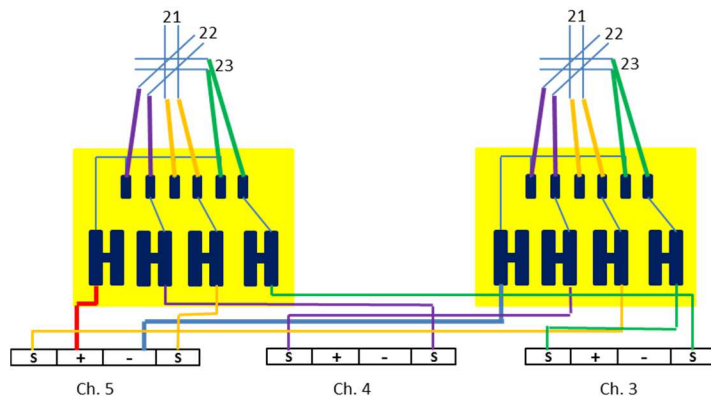


Abb. 4-12: Schaltplan Zusatzplatine

Die Verbindung zwischen den DMS wird mit zu Flachbandkabeln zusammengeführten Drähten geschaffen. Jede Messstelle ist über 4 Drähte mit der Anschlussplatine verbunden.



Abb. 4-13: Verbindung der Messstellen mit Flachbandkabeln

Bei 32 Messstellen mit je 4 benötigten Drähten müssen 128 Drähte richtig verlötet bzw. Anschlüsse richtig kombiniert werden. Eine Übersicht über die Anschluss- und Platinenaufteilung auf die Boxen ist den Tabellen 4-1 und 4-2 zu entnehmen. Abbildung 4-14 zeigt eine geöffnete Box mit Platinen.

Box1								
Platine 1	Anschl.		1-8					
+								
Platine 2	Anschl.		9-16					
Platine 1								
Anschl.	1	2	3	4	5	6	7	8
Messstelle	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Platine 2								
Anschl.	9	10	11	12	13	14	15	16
Messstelle	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16

Tabelle 4-1: Boxbelegung 1

Box2								
Platine 3	Anschl.		17-24					
+								
Platine 4	Anschl.		25-32					
Platine 3								
Anschl.	17	18	19	20	21	22	23	24
Messstelle	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
Platine 4								
Anschl.	25	26	27	28	29	30	31	32
Messstelle	2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16

Tabelle 4-2: Boxbelegung 2



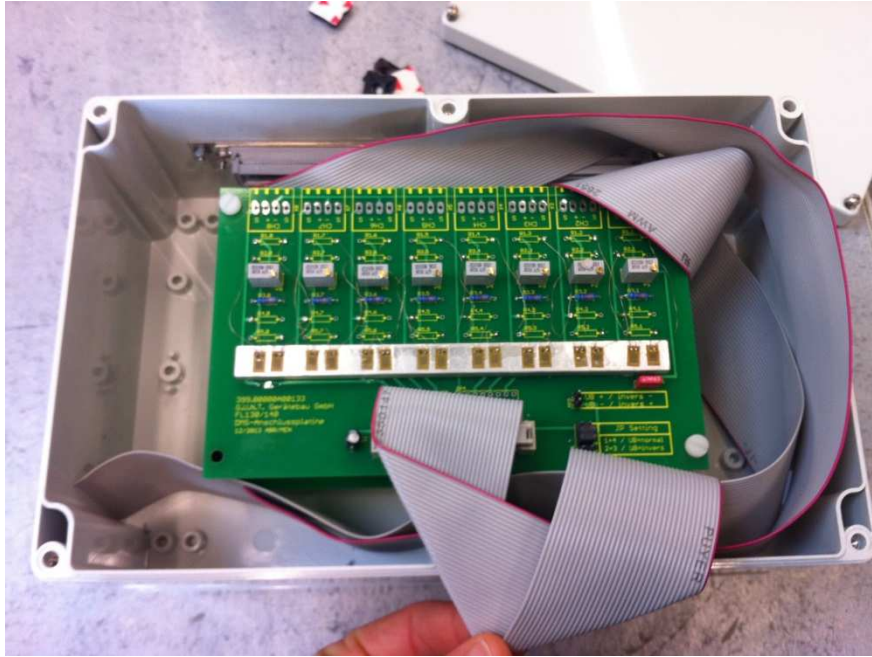


Abb. 4-14: Inhalt der Messboxen

Jede Messstelle muss vor der Applikation des DMS angeraut und gründlich gesäubert werden. Dann kann der DMS aufgeklebt werden. Sind alle Kabel verlötet, wird ein Schutzlack über die Lötstellen gegeben, um diese vor Umwelteinflüssen zu schützen. Ist der Schubfeldträger auf Funktion getestet und für gut befunden worden, werden die Lötstellen außerdem mit einem Kautschuk übergossen, der eine Zugentlastung darstellt und weiteren Schutz bietet gegenüber mechanischen Einflüssen.

## 4.2 Versuchsvorbereitung

Der Messverstärker liefert als Ausgangswerte die jeweilige Ausgangsspannung  $U_A$  der verstimmtten Brücke in  $\frac{mV}{V}$ . Aus diesem Wert soll im studentischen Versuch die im Stab an der Messstelle wirkende Normalkraft berechnet werden.

Um den Versuchsträger zu testen, wird zunächst der gegenteilige Fall berechnet. Aus den bekannten Kräften des idealisierten Schubfeldträgers wird die voraussichtliche Ausgangsspannung der DMS-Brücken berechnet. Dazu kombinieren wir das Hooke'sche Gesetz

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

mit der Formel

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

zu

$$F = A \cdot E \cdot \varepsilon \tag{56}$$

Jetzt wird Gl. 52 in Gl. 56 eingesetzt und nach der Ausgangsspannung  $U_A$  umgestellt. Daraus ergibt sich für

$$U_A = \frac{U_B \cdot F \cdot k}{2 \cdot A \cdot E} \tag{57}$$

mit

$$U_B \text{ (Speisespannung)} = 10V$$

$$k \text{ (Faktor) für Stab-DMS} = 2$$

$$k \text{ (Faktor) für Hautfeld-DMS} = 2,09$$

$$A \text{ (Querschnittsfläche)} = 60 \text{ mm}^2 \text{ und}$$

$$E \text{ (E-Modul)} = 70\,000 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Die jeweilige Kraft ist abhängig vom Ort der Messstelle.

Die DMS-Mittelpunkte, die wir als Messstelle annehmen, liegen auf den in Abbildung 4-15 dargestellten x- bzw. z-Achsenwerten. Mit dem bekannten x- bzw. z-Abstand kann die Kraft im Stab berechnet werden. Dazu werden die in der Schubfeldträgerberechnung aufgeführten Formeln genutzt.

Aus Gleichung 13 wird die Kraft im unteren Stab ( $F_{S4}$ ) in Abhängigkeit vom Ort x berechnet zu:

$$F_{S4} = \frac{B_H \cdot a + A_v \cdot x}{a}$$

Aus Gleichung 14 wird die Kraft im oberen Stab ( $F_{S1}$ ) in Abhängigkeit vom Ort x berechnet zu:

$$F_{S1} = B_H - F_{S4} + A_H$$

Aus Gleichung 19 wird die Kraft im rechten Stab ( $F_{S3}$ ) in Abhängigkeit vom Ort z berechnet zu:

$$F_{S3} = \frac{F \cdot 3b + B_H \cdot z}{3b}$$

Aus Gleichung 19 wird die Kraft im linken Stab ( $F_{S2}$ ) in Abhängigkeit vom Ort z berechnet zu:

$$F_{S2} = F - F_{S3}$$

Die Kräfte in den beiden Mittenstäben müssen, wie bereits in der Schubfeldträgerberechnung erläutert, Null werden.

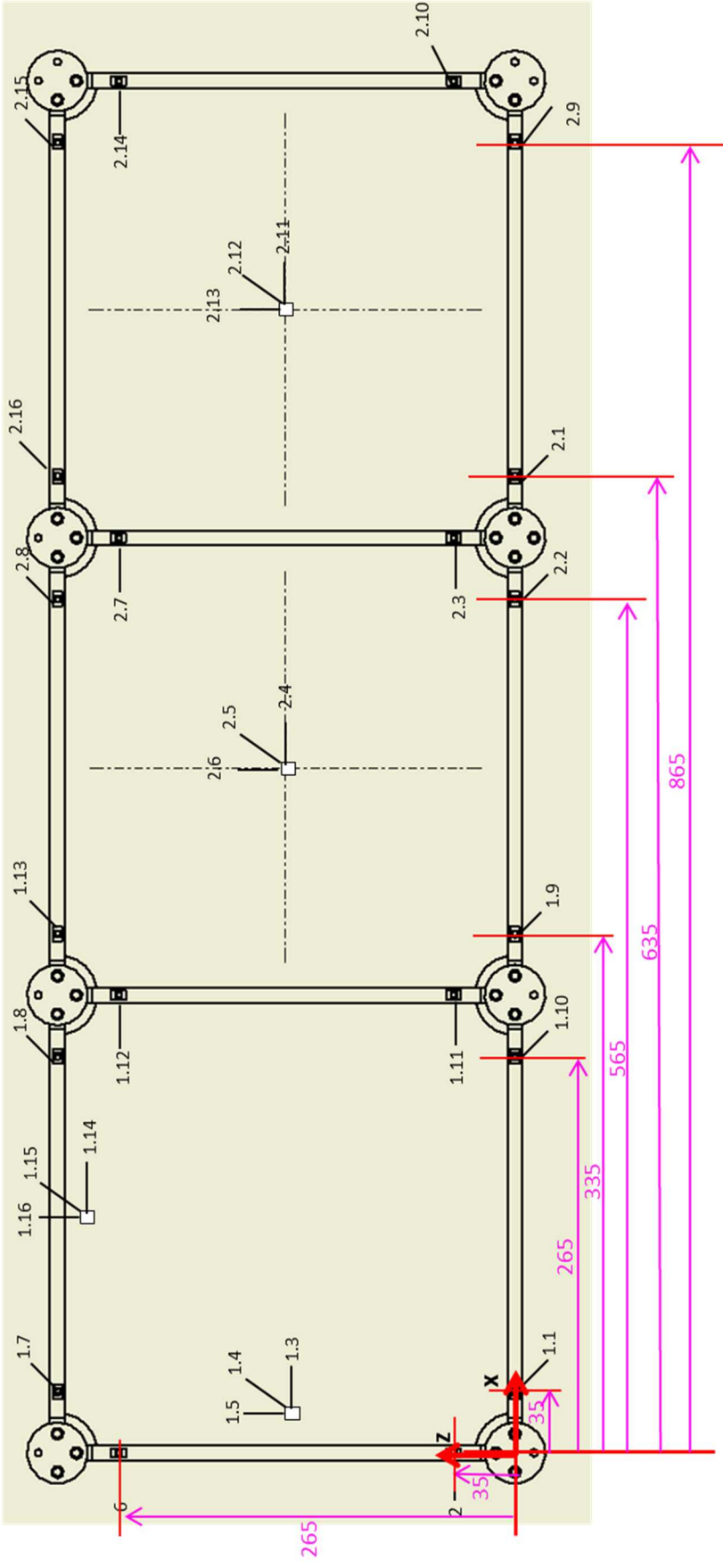


Abb. 4-15: DMS-Abstände

Die Ergebnisse der Berechnung der Stabkräfte und der dazu gehörigen Ausgangsspannungen sind in der Tabelle 4-3 exemplarisch für eine eingeleitete Kraft von 250N zusammengefasst. Alle weiteren gleichartigen Tabellen finden sich aus Gründen der Übersichtlichkeit im Anhang.

<b>Box 1</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.5</b>	<b>1.6</b>	<b>1.7</b>	<b>1.8</b>
Abstand	x=35	z=35				z=265	x=35	x=265
Kraft	-720,83	29,17				220,83	720,83	529,17
UA in mV/V	-0,176	0,007				0,054	0,176	0,129
	<b>1.9</b>	<b>1.10</b>	<b>1.11</b>	<b>1.12</b>	<b>1.13</b>	<b>1.14</b>	<b>1.15</b>	<b>1.16</b>
Abstand	x=335	x=265			x=335			
Kraft	-470,83	-529,17	0,00	0,00	470,83			
UA in mV/V	-0,115	-0,129	0,000	0,000	0,115			
<b>Box 2</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	<b>2.5</b>	<b>2.6</b>	<b>2.7</b>	<b>2.8</b>
Abstand	x=635	x=565						x=565
Kraft	-220,83	-279,17	0,00				0,00	279,17
UA in mV/V	-0,054	-0,068	0,000				0,000	0,068
	<b>2.9</b>	<b>2.10</b>	<b>2.11</b>	<b>2.12</b>	<b>2.13</b>	<b>2.14</b>	<b>2.15</b>	<b>2.16</b>
Abstand	x=865	z=35				z=265	x=865	x=635
Kraft	-29,17	220,83				29,17	29,17	220,83
UA in mV/V	-0,007	0,054				0,007	0,007	0,054

Tabelle 4-3: Kräfte und Ausgangsspannungen

Die in der Tabelle freigelassenen Messstellen bilden die Messstellen auf den Blechen ab, mit unbekannter Hauptspannung. Dort findet eine Messauswertung mit aufgenommenen Messdaten mehrerer Versuche statt.

### 4.3 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung werden 2 Messverstärker und 2 Computer benötigt. Die für die Erprobung genutzte Software ist die für den FL151. Zunächst wird an der Kraftspindel ein lastfreier Zustand hergestellt. In diesem Zustand werden alle Messanzeigen mit der Funktion Tara noch einmal genullt. Mit der Lastspindel wird dann die gewünschte Belastung an der Position x (z.B.  $x = 3b = 900$  mm) in den Schubfeldträger eingeleitet. Trotz des Messaufbaus mit den Ergänzungs-DMS ergeben sich minimale Schwankungen, daher sollte immer einige Sekunden gewartet werden, bevor ein Messwert abgelesen wird. Die abgelesenen Werte werden erfasst. An dieser Stelle sei noch einmal daran erinnert, dass zur Verwirklichung der richtigen Lagerung auf die Bolzenverbindung zum Rahmen geachtet werden muss.

Es werden 4 Versuchsreihen durchgeführt:

Versuchsreihe 1:

Überprüfung der Funktion aller Messstellen:

Überprüfung der Messverlässlichkeit.

Eingeleitete Last in N	250
------------------------	-----

Ort der Lasteinleitung x in mm	900
Richtung der Lasteinleitung	Vertikal nach unten
Anzahl der Wiederholungen	3

*Tabelle 4-4: Versuchsreihe 1*

Die Soll-Werte sind der Tabelle 4-3 zu entnehmen.

Versuchsreihe 2:

Überprüfung Schubfeldträgerfunktion:

Bildet das Modell den richtigen Kraftverlauf ab?

Verhält sich der Schubfeldträger synchron zur eingeleiteten Last?

Eingeleitete Last in N	100, 150, 200, 250
Ort der Lasteinleitung x in mm	900
Richtung der Lasteinleitung	Vertikal nach unten
Anzahl der Wiederholungen	1 Durchgang

*Tabelle 4-5: Versuchsreihe 2*

Die Soll-Werte sind dem Anhang zu entnehmen.

Versuchsreihe 3:

Überprüfung Schubfeldträgerfunktion:

Bildet das Modell den richtigen Kraftverlauf ab?

Überprüfung der Lagerung.

Eingeleitete Last in N	250
Ort der Lasteinleitung x in mm	900
Richtung der Lasteinleitung	Vertikal nach oben
Anzahl der Wiederholungen	1

*Tabelle 4-6: Versuchsreihe 3*

Die Soll-Werte sind dem Anhang zu entnehmen.

Versuchsreihe 4:

Überprüfung der Schubfeldträgerfunktion:

Bildet das Modell den richtigen Kraftverlauf ab?

Verhält sich der Schubfeldträger synchron zum Ort der Lasteinleitung?

Eingeleitete Last in N	250
Ort der Lasteinleitung x in mm	300, 600, 900
Richtung der Lasteinleitung	Vertikal nach unten
Anzahl der Wiederholungen	1 Durchgang

Tabelle 4-7: Versuchsreihe 4

Die Soll-Werte sind dem Anhang zu entnehmen.

## 4.4 Messwerte und Auswertung

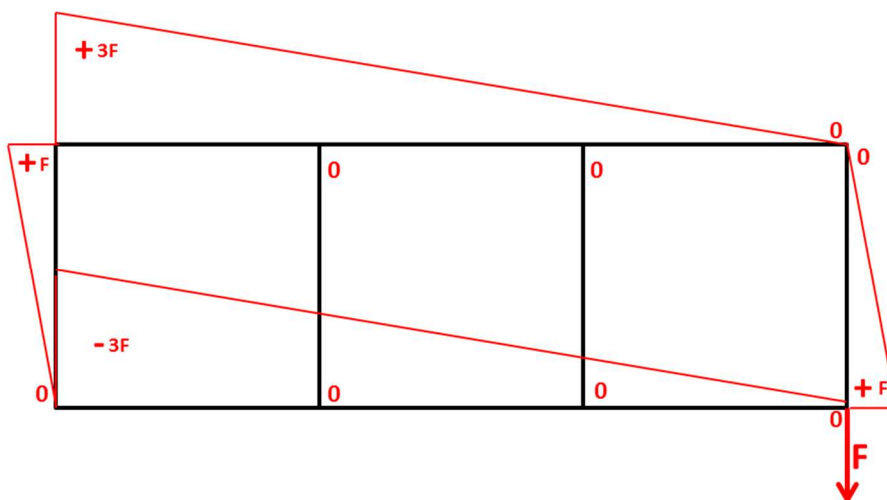
Die Ergebnisse der Messreihen machen es erforderlich, dass die Auswertung getrennt vorgenommen wird. Im ersten Abschnitt werden die Messergebnisse in den Stäben betrachtet, im zweiten Abschnitt die Messergebnisse in den Blechen. Beide Abschnitte sind so aufgebaut, dass zunächst die Messwerte betrachtet und, wenn hilfreich, grafisch dargestellt werden. Erst dann folgt eine gemeinsame Auswertung, die sich aus allen Messreihen ergibt. Sämtliche Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen. Die wichtigsten Werte sind im laufenden Text in Tabellen zusammengefasst.

### 4.4.1 Messwerte und Auswertung Stäbe

#### Versuchsreihe 1

Der erste Blick auf die Messergebnisse zeigt, an Messstelle 1.14 und 2.14 schwanken die Werte so stark, dass keine sinnvolle Ablesung möglich ist. Eventuell liegt hier ein Fehler im Messverstärker vor, da es sich beide Male um die Anschlussstelle 14 handelt. Alle anderen Messstellen sind funktionstüchtig. Die Messergebnisse sind in den 3 Messungen konstant.

Der Vergleich mit den Soll-Werten zeigt, dass die Messergebnisse zum Teil stark von diesen abweichen. Die Abweichungen müssen unterschieden werden in quantitative Abweichungen und qualitative Abweichungen. Der Schubfeldträger soll qualitativ folgenden Spannungsverlauf in den Stäben abbilden:



Die Messergebnisse bilden alle Nullstellen richtig ab. D.h. die Messwerte der beiden mittleren Stäbe sowie die der mit Null gekennzeichneten Ecken sind Null. Außerdem zeigen die Messergebnisse eine Zuglast im oberen Stab und eine Drucklast im unteren Stab. Die Verteilung ist allerdings nicht linear. Darüber hinaus sind die Abweichungen im oberen Stab größer als die im unteren Stab. Die Abbildungen 4-16 bis 4-18 zeigen den Soll-Ist Vergleich der Messungen im oberen und unteren Stab der drei Messreihen von Versuchsreihe 1.

Die dazu gehörigen Daten sind der Tabelle 4-8 zu entnehmen

Versuchsreihe 1			Messung 1		Messung 2		Messung 3	
Abstand	oben SOLL	unten SOLL	oben IST 1	unten IST 1	oben IST 2	unten IST 2	oben IST 3	unten IST 3
35	0,172	-0,172	0,151	-0,144	0,15	-0,146	0,15	-0,149
265	0,126	-0,126	0,06	-0,081	0,06	-0,079	0,061	-0,082
335	0,112	-0,112	0,056	-0,073	0,06	-0,071	0,056	-0,073
565	0,066	-0,066	0,024	-0,032	0,022	-0,032	0,023	-0,029
635	0,053	-0,053	0,023	-0,028	0,022	-0,029	0,021	-0,027
865	0	0	0,002	0	0	-0,001	0,004	0

Tabelle 4-8: SOLL-Ist Vergleich Versuch 1

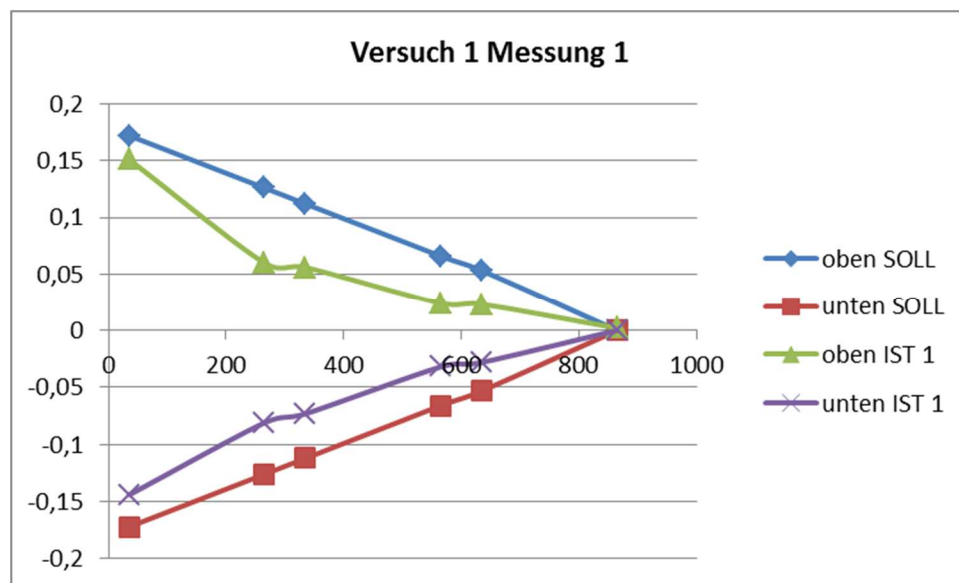


Abb. 4-16: SOLL-IST Vergleich Versuch1 Messung 1

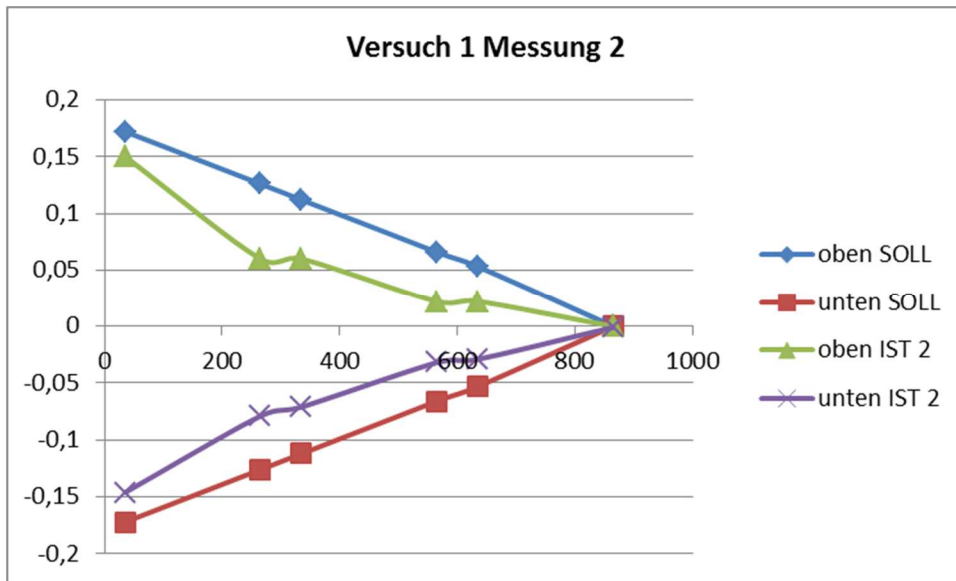


Abb. 4-17: SOLL-IST Vergleich Versuch 1 Messung 2

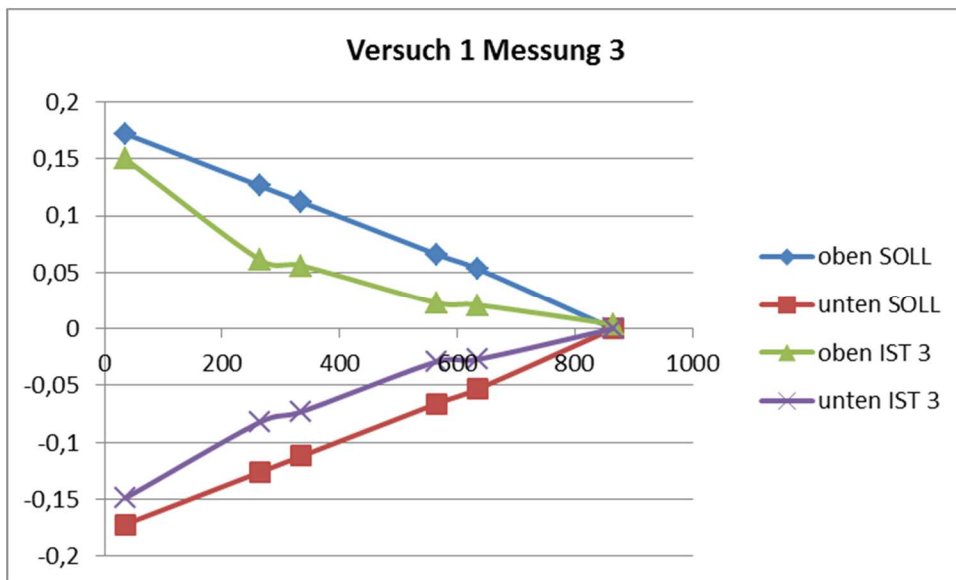


Abb. 4-18: SOLL-IST Vergleich Versuch 1 Messung 3

Die abgeflachten Bereiche der Kurven bilden die Verbindungsstellen der Stäbe, also die Knotenscheiben ab. An dieser Stelle ist das Blech nicht mit dem Stab verbunden, es kann keine Übertragung des Schubs in den Stab erfolgen. Somit ist es logisch, dass die Kraft nach der Knotenscheibe in etwa der Kraft vor der Knotenscheibe entsprechen muss, auch wenn die Distanz zwischen den Messpunkten 70 mm beträgt. Die Steigungen der Geraden, die das verbundene Blech abbilden, unterscheiden sich stark, so dass sich im Ganzen eher ein logarithmischer Kurvenverlauf ergibt als eine Gerade.

### Versuchsreihe 2

Der Blick auf die Messwerte zeigt: eine Verdopplung der eingeleiteten Kraft hat auch eine Verdopplung der ausgegebenen Spannung zur Folge. Der Kurvenverlauf ist gleichbleibend. Sowohl die abgeflachten Bereiche an den Verbindungsstellen als auch die unterschiedlichen Steigungen an den übrigen Geraden sind über alle Kräfte gleichbleibend. Lediglich die Abweichungen bei 100N fallen etwas größer aus, was auf die nur minimalen Dehnungen und daraus resultierenden nur minimalen Spannungsdifferenzen



zurückgeht, diese sind schwer zu erfassen. Wie bereits eingangs vermutet, sind die Messergebnisse in den Stäben umso genauer, je höher die eingeleitete Last ist. Die Stäbe des Schubfeldträgers verhalten sich im Ganzen aber synchron zu der eingeleiteten Last.

Die Abbildungen 4-19 bis 4-22 zeigen den SOLL-IST Vergleich der Messungen im oberen und unteren Stab. Die Tabelle 4-9 gibt die dazu gehörigen Daten wieder.

Versuchsreihe 2								
	100N		150N		200N		250N	
Abstand	oben SOLL1	unten SOLL1	oben SOLL2	unten SOLL2	oben SOLL3	unten SOLL3	oben SOLL4	unten SOLL4
35	0,07	-0,07	0,106	-0,106	0,141	-0,141	0,176	-0,176
265	0,052	-0,052	0,077	-0,077	0,103	-0,103	0,129	-0,129
335	0,046	-0,046	0,069	-0,069	0,092	-0,092	0,115	-0,115
565	0,027	-0,027	0,041	-0,041	0,055	-0,055	0,068	-0,068
635	0,022	-0,022	0,032	-0,032	0,043	-0,043	0,054	-0,054
865	0,003	-0,003	0,004	-0,004	0,006	-0,006	0,007	-0,007
	100N		150N		200N		250N	
Abstand	oben IST 1	unten IST 1	oben IST 2	unten IST 2	oben IST 3	unten IST 3	oben IST 4	unten IST 4
35	0,061	-0,062	0,09	-0,089	0,117	-0,118	0,149	-0,146
265	0,017	-0,031	0,029	-0,045	0,044	-0,062	0,061	-0,078
335	0,016	-0,027	0,023	-0,042	0,043	-0,057	0,056	-0,076
565	0,006	-0,009	0,013	-0,013	0,018	-0,02	0,024	-0,028
635	0,002	-0,009	0,006	-0,013	0,015	-0,018	0,021	-0,026
865	0	0	0,002	0	0,002	0	0,002	-0,001

Tabelle 4-9: SOLL-IST Vergleich Versuch 2

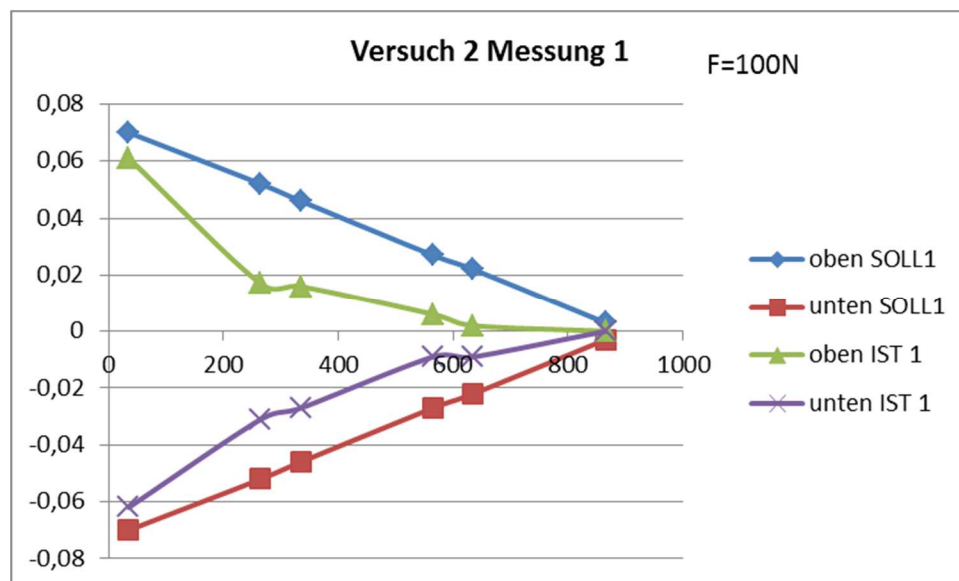


Abb. 4-19: SOLL-IST Vergleich Versuch 2 Messung 100N

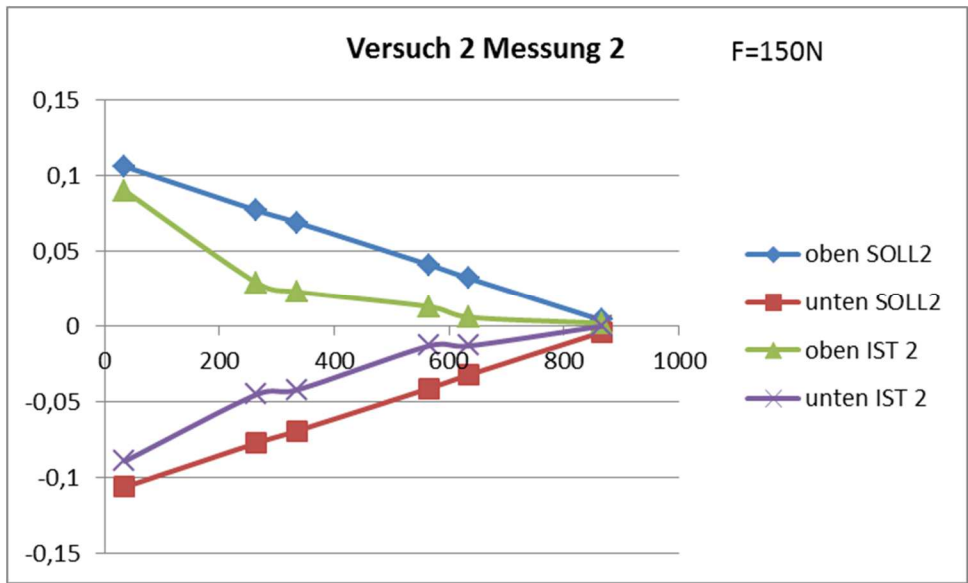


Abb. 4-20: SOLL-IST Vergleich Versuch 2 Messung 150N

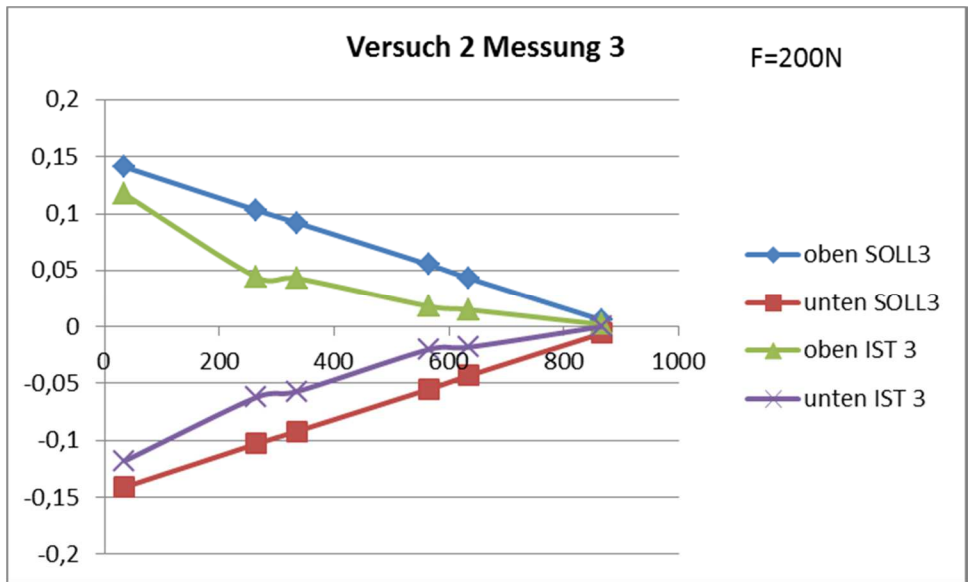


Abb. 4-21: SOLL-IST Vergleich Versuch 2 Messung 200N

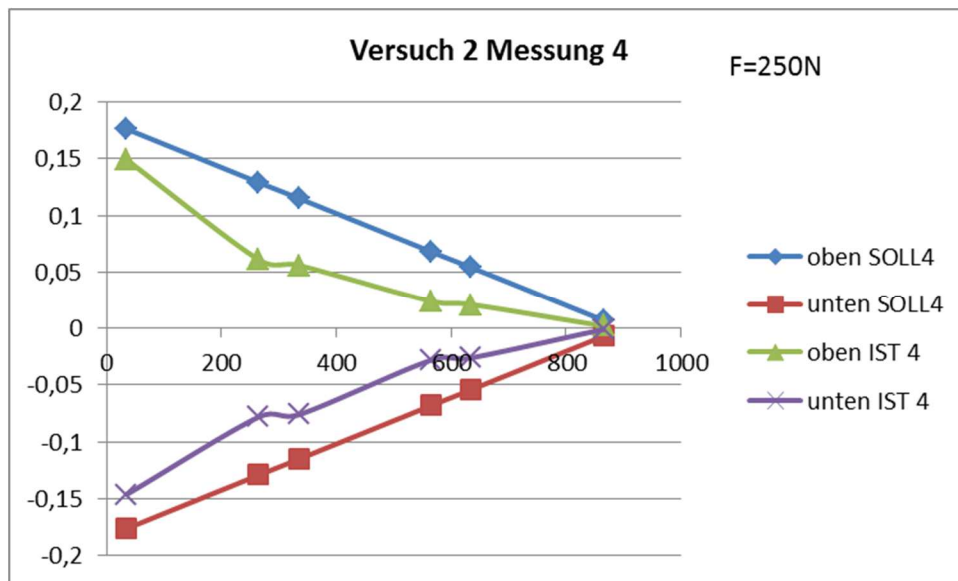


Abb. 4-22: SOLL-IST Vergleich Versuch 2 Messung 250N

### Versuchsreihe 3

In Versuchsreihe 3 unterliegt der Schubfeldträger einer Belastung in der entgegengesetzten Richtung. Das hat zur Folge, dass nun der untere Stab der Zugstab und der obere Stab der Druckstab ist. Die betragsmäßige Verteilung der Kräfte muss aber gleich bleiben. Abbildung 4-23 zeigt den SOLL-IST Vergleich der Messungen in den Stäben. In Tabelle 4-10 finden sich die zugehörigen Werte. Es lässt sich deutlich erkennen, dass die Umkehrung der Lastrichtung eine Annäherung der unteren Stabwerte an die Idealisierung bewirkt (da dort nun positive Kräfte wirken, ist der untere Stab im oberen Feld des Diagramms abgebildet) und das gegenteilige Verhalten der oberen Stabwerte.

Versuchsreihe 3				
Abstand	Oben IST	Unten IST	Oben Soll	Unten Soll
35	-0,138	0,177	-0,176	0,176
265	-0,021	0,116	-0,129	0,129
335	-0,035	0,114	-0,115	0,115
565	-0,012	0,042	-0,068	0,068
635	0	0,037	-0,054	0,054
865	0	0,002	-0,007	0,007

Tabelle 4-10: SOLL-IST Vergleich Versuch 3

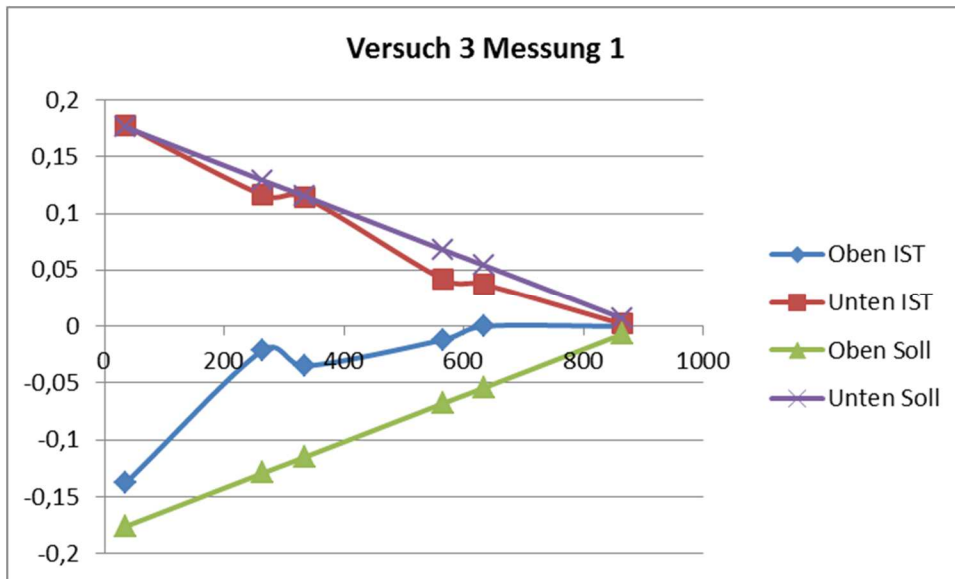


Abb. 4-23: SOLL-IST Vergleich Versuch 3

Die Steigungen der Unten-IST Kurve nähern sich ebenfalls an. Filtert man den Effekt der Knotenscheiben-Unterbrechung heraus, legt sich die Kurve fast an die ideale Kurve an.

#### Versuchsreihe 4

In Versuchsreihe 4 wird der Abstand der Lasteinleitung geändert. Der Bereich rechts der Kräfteinleitung muss kräftefrei bleiben, da das ein frei beweglicher Bereich ist. Links der Lasteinleitung muss sich ein gleicher Kraftverlauf ergeben wie zuvor, nur mit verringerten Werten. Die Messwerte zeigen, dass der Bereich rechts der Lasteinleitung kräftefrei bleibt. Die Abbildungen 4-24 und 4-25 zeigen den SOLL-IST Vergleich links der Lasteinleitung. In Tabelle 4-11 sind die dazugehörigen Werte aufgelistet. Wie bei allen anderen Messungen sind in Abbildung 4-24 die abgeflachten Stellen an den Knotenscheiben zu erkennen, die variierende Steigung und der betragsliche Unterschied zwischen oberem und unterem Stab.

Versuchsreihe 4								
	F bei x = 600 mm				F bei x = 300 mm			
Abstand	Oben Soll	Unten Soll	Oben IST	Unten IST	Oben Soll	Unten Soll	Oben IST	Unten IST
35	0,115	-0,115	0,098	-0,092	0,054	-0,054	0,045	-0,044
265	0,068	-0,068	0,024	-0,038	0,007	-0,007	0,004	-0,004
335	0,054	-0,054	0,018	-0,031				
565	0,007	-0,007	0,001	-0,001				

Tabelle 4-11: SOLL-IST Vergleich Versuch 4

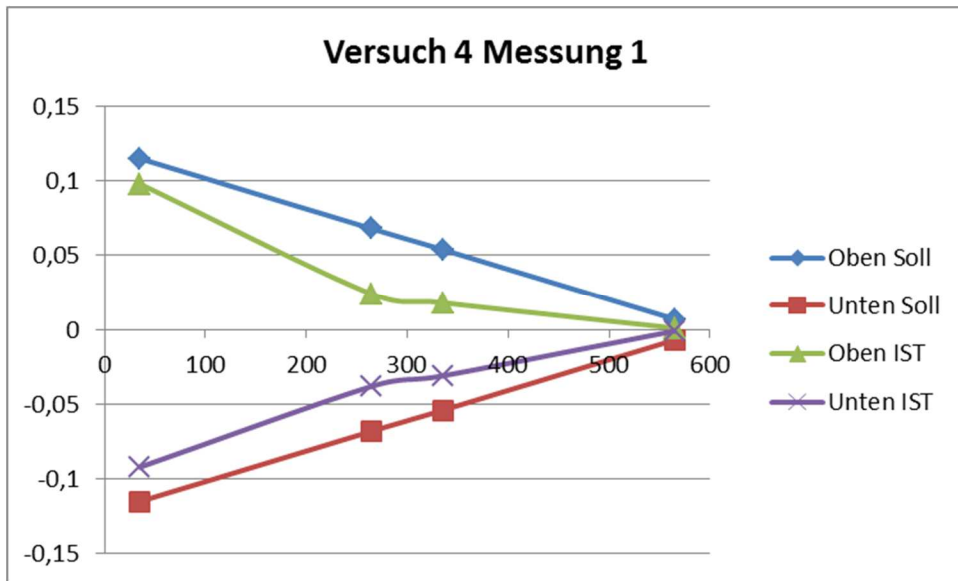


Abb. 4-24: SOLL-IST Vergleich Versuch 4 Messung 1

Abbildung 4-25 zeigt das Verhalten des Schubfeldträgers mit nur einem Feld. Die Knotenscheiben können nun kein Hindernis mehr darstellen, da es keine Knotenscheiben mehr gibt. Der Kurvenverlauf der IST-Kurven ist linear und fast parallel zu den SOLL-Kurven.

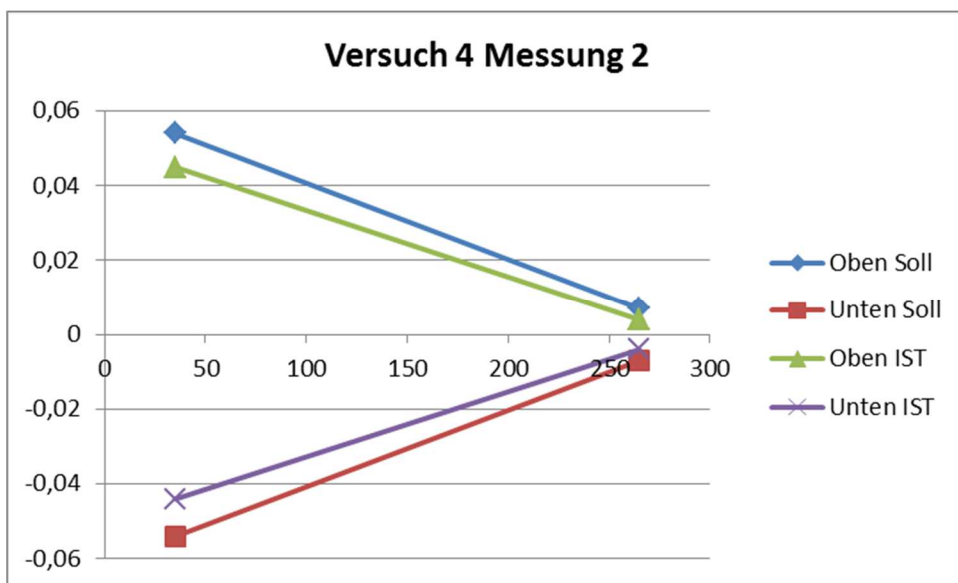


Abb. 4-25: SOLL-IST Vergleich Versuch 4 Messung 2

Zusammenfassung der Messergebnisse:

Für die Zusammenfassung der Messergebnisse wird in Abbildung 4-26 beispielhaft ein Diagramm für das bessere Verständnis der Erläuterungen beschriftet:

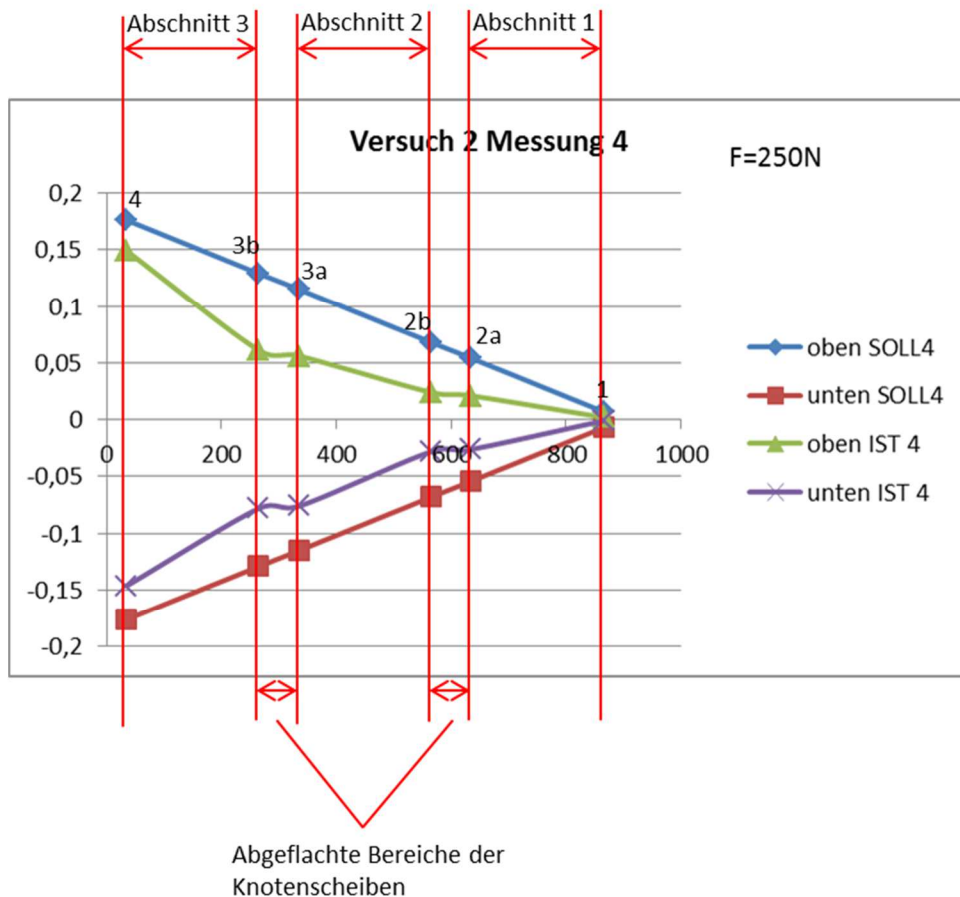


Abb. 4-26: Aufteilung Diagramm

Die einzelnen Messstellen funktionieren. Die Kräfte im Schubfeldträger werden größer, wenn die eingeleitete Last größer wird, und kleiner, wenn die eingeleitete Last kleiner wird. Außerdem verhalten sich die Kräfte synchron zur Änderung der Lasteinleitungsstelle.

Aber die Kräfte steigen, über den Gesamtstab betrachtet, nicht linear, da die Steigungen der einzelnen Stababschnitte variieren. In Abschnitt 1 ist die Steigung der IST-Kurve geringer als die der SOLL-Kurve, im zweiten Abschnitt ist sie annähernd parallel zur SOLL-Kurve und im dritten Abschnitt ist die Steigung steiler als die der Soll-Kurve. Außerdem gibt es betragslich deutliche Unterschiede zwischen den Kräften im oberen und unteren Stab. Wird die Richtung der Lasteinleitung geändert, nähert sich die eine Kurve dem idealen Verlauf an, die andere entfernt sich.

#### Auswertung der Messergebnisse

Die auffälligsten Unterschiede des Modells zum idealen Schubfeldträger sind (1) der betragslich große Unterschied zwischen den Kräften im Modell und in der Idealisierung, (die Kräfte im Modell sind viel geringer),

(2) der nicht lineare Kraftverlauf und außerdem

(3) die betragslichen Unterschiede der Kräfte im unteren und oberen Stab.

Zu (1): Der Grund hierfür liegt vermutlich in einem nicht beachteten Geltungsbereich der Schubfeldtheorie. Die Anforderungen an den idealen Schubfeldträger, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, wurden umgesetzt. Stefan Dieker und Hans-Günther Reimerdes haben in ihrem Werk zur Elementaren

Festigkeitslehre (14) allerdings noch weitere Bedingungen aufgeführt, die in der Konstruktion nicht berücksichtigt wurden.

Dort formulieren sie einen Geltungsbereich, der sich auf das Verhältnis der Querschnittsflächen von Stab und Hautfeld stützt.

Konkret heißt es dort, dass das Verhältnis von Stegquerschnittsfläche (also die Querschnittsfläche des Hautfelds), zur Gurtquerschnittsfläche (Stab) sehr viel kleiner als 4 sein muss.

$$\frac{A_S}{A_G} \ll 4$$

Wird diese Bedingung nicht eingehalten, muss, um ein sinnvolles Ergebnis zu erzielen, den Gurtflächen ein mittragender Teil der Stegflächen zugeschlagen werden. Im Modell liegt das Verhältnis der beiden Querschnittsflächen gerade bei 4.

Die Nicht-Erfüllung hat bezüglich des Modells die Folge, dass ein Teil der Normalkräfte über die Bleche übertragen wird, in den Stäben also nie die vollständigen Kräfte gemessen werden können. Diese Vermutung erhärtet sich in der Auswertung der Messwerte im Hautfeld.

Zu (2) und (3): Die kommenden Ausführungen beziehen sich zunächst auf die Abbildungen 4-16 bis einschließlich 4-22. Sieht man sich die Kurvenverläufe an, wird deutlich, dass der Kurvenverlauf im zweiten Abschnitt dem idealen Kurvenverlauf am nächsten kommt, dort verlaufen die Kurven annähernd parallel. Im ersten Abschnitt trifft das überhaupt nicht zu, im dritten Abschnitt ist der Verlauf der unteren Kurven ebenfalls fast parallel, die oberen Kurven weichen in der Steigung wieder deutlich voneinander ab.

Der zweite Abschnitt ist der Abschnitt mit den geringsten Störeinflüssen. Der erste Abschnitt wird `gestört` durch die Lasteinleitung, der dritte durch die Lagerung des Schubfeldträgers.

Nur Abschnitt 2 ist beidseitig von Schubfeldern umgeben und daher dem Ideal am nächsten. So erklärt sich auch der qualitativ bessere Verlauf der Kurve des unteren Stabs. Der untere Stab ist nur mit einem Loslager verbunden. In der Praxis heißt das, die Knotenscheibe wird über das Verbindungsstück der Rahmenklemmung geschoben, aber nicht mittels Bolzen verbunden. Dadurch wird die Bewegung des Schubfeldträgers zwar nach vorne und hinten begrenzt, außerdem nach links, ist aber sonst frei beweglich. Siehe Abbildung 4-27. Hier wirken daher geringere Kräfte auf den Schubfeldträger als am Festlager. Die Störgröße ist deutlich kleiner.

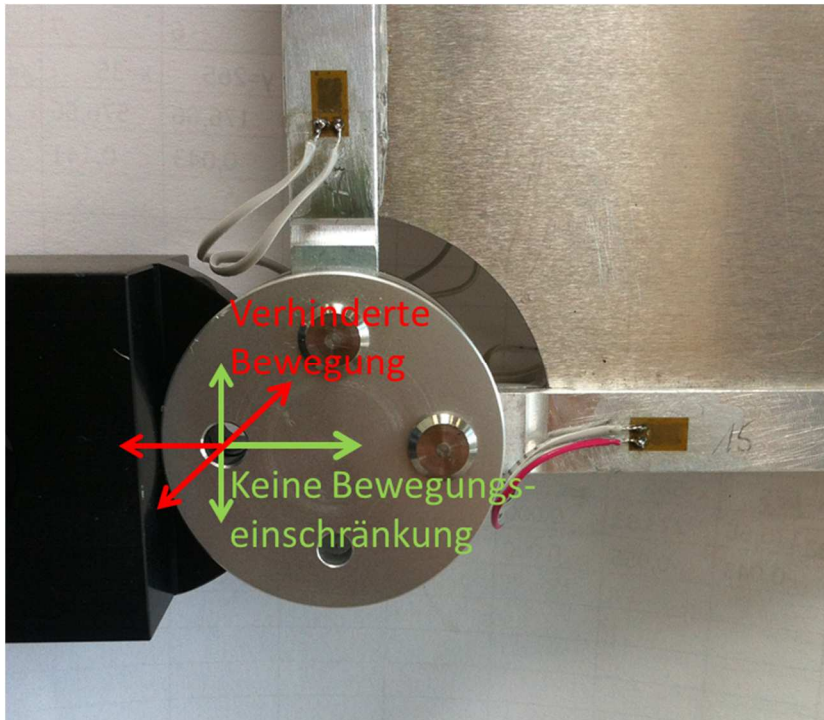


Abb. 4-27: Verhalten am Loslager

Wird der Abstand der Lasteinleitung verringert, also der Schubfeldträger nur noch zweizellig, wird das ideale Feld quasi herausgekürzt. Der Kurvenverlauf in Abbildung 4-24 zeigt den daraus folgenden oberen Kurvenverlauf, der sich zusammensetzt aus zu schwacher Steigung in Abschnitt 1 und zu starker Steigung in Abschnitt 2 und den unteren Kurvenverlauf, der sich zusammensetzt aus zu schwacher Steigung in Abschnitt 1 und annähernd paralleler Steigung in Abschnitt 2. Die beschriebenen Verläufe werden umso deutlicher, wenn sie um den Einfluss der Knotenscheiben bereinigt werden. Dazu muss jeweils eine Gerade gezogen werden von a-Knoten zu a-Knoten (siehe Abbildung 4-26). Abbildung 4-25 zeigt den Verlauf im einzelligen Schubfeldträger. Hier ist das Feld beidseitig von Störeinflüssen gerahmt. Von rechts müsste sich analog zu den vorherigen Messungen eine zu schwache Steigung herausbilden, von links eine zu starke. Das Resultat ist eine Steigung, in der sich die Störeinflüsse summieren und daher fast auslöschen.

Ein gänzlich anderer Kurvenverlauf ergibt sich bei einer Drehung der Lasteinwirkung. Siehe Abbildung 4-23. Wird die Last von unten in den Schubfeldträger eingeleitet, kann die freie Ecke des Schubfeldträgers (oben rechts) ausweichen. Sie bricht nach vorne oder hinten aus. Das ist im Versuch deutlich zu sehen gewesen. Die Lasteinleitung ist nun nicht mehr zentral, und die Kräfte des oberen Stabs weichen stark von der Idealisierung ab. Grund für diese Abweichungen des Schubfeldträgers liegt in den sich summierenden Toleranzen, die eine Beweglichkeit des Schubfeldträgers zur Folge haben. Es tritt ein Stabilitätsproblem auf, das in der Berechnung des Modells nicht berücksichtigt wurde. Wird die gleiche Messung vorgenommen, nicht durch eine von unten drückende, sondern durch eine von oben ziehende Last, kann der Schubfeldträger nicht ausbrechen. Der Kurvenverlauf sieht dann aus wie in Abbildung 4-28, er ähnelt also wieder dem ursprünglichen Kurvenverlauf. Die andere Kurve in Abbildung 4-23 schmiegt sich an den idealen Kurvenverlauf an. Hier kann eine Kräfteübertragung von der Last bis zum Lager, das in diesem Fall ein Festlager ist, direkt, ohne den Querweg durch ein Feld erfolgen. Die Wirkung der mittragenden Breite ist daher fast ausgelöscht.



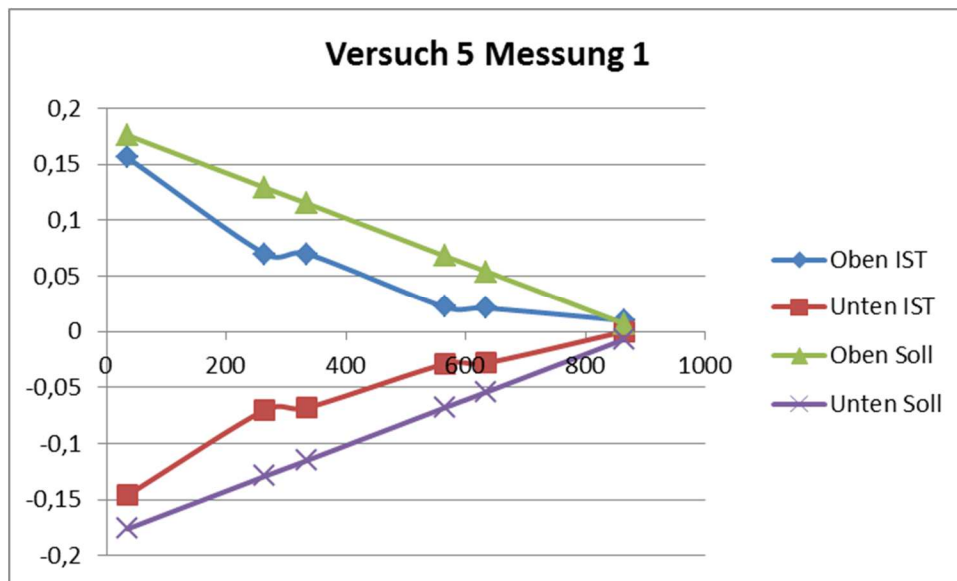


Abb. 4-28: SOLL-IST Vergleich Versuch 5 Messung 1

#### 4.4.2 Messwerte und Auswertung Hautfelder

Entsprechend den Anforderungen aus der Konstruktion, die eine ungestörte Oberfläche auf der Vorderseite des Schubfeldträgers vorsieht, wurden die zwei DMS jeder Messstelle nebeneinander auf der Rückseite der Hautfelder angebracht. Die ersten Testreihen haben eine übergroße Empfindlichkeit dieser Messstellen gegenüber geringsten Belastungen aufgezeigt. Selbst eine sanfte Berührung des DMS ergab einen sofortigen großen Spannungsausgang. Die mit diesem Messaufbau gewonnenen Messergebnisse waren nicht brauchbar. Der Schubfeldträger wurde daraufhin umgerüstet, so dass nun jede Messstelle mit einem DMS auf der Vorder- und einem auf der Rückseite des Hautfeldes ausgestattet wurde. Die Messstelle am oberen Rand des ersten Feldes wurde von dieser Umrüstung ausgenommen, da hier die Messstelle 14 ohnehin keine verwertbaren Ergebnisse liefert. Alle Messdaten finden sich im Anhang.

Mit den drei Messstellen wurden daraufhin die Versuchsreihen 1, 3 und 4 durchgeführt – in leicht abgewandelter Form. Versuchsreihe 4 beschränkte sich auf die Messung bei einer Lasteinleitung bei  $x = 600$  mm. Die wiederholten Messungen zeigen, dass die Ergebnisse reproduzierbar sind. Allein an Hand der Messdaten lässt sich aber nichts über den Spannungszustand im Hautfeld sagen. Dazu müssen mehrere Schritte vorgenommen werden.

Im ersten Schritt werden mit den Gleichungen 52-55 aus Kapitel 3.3.2 die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ , der Winkel  $\varphi$  zwischen der ersten Hauptspannung und dem Referenzmessgitter sowie der resultierende Schubfluss  $\tau$  berechnet.

Im zweiten Schritt werden mit den berechneten Werten die Mohrschen Spannungskreise gezeichnet. Im dritten Schritt wird der Mohrsche Spannungskreis auf die Messstelle übertragen. Erst dann kann abgelesen werden, wie der Spannungszustand im Feld ist. Für die Auswertung der Messergebnisse ist daher wichtig, in welche Richtung die DMS auf den Hautfeldern appliziert sind. Die Richtungen sind Abbildung 4-29 zu entnehmen.

## Rückansicht Schubfeldträger

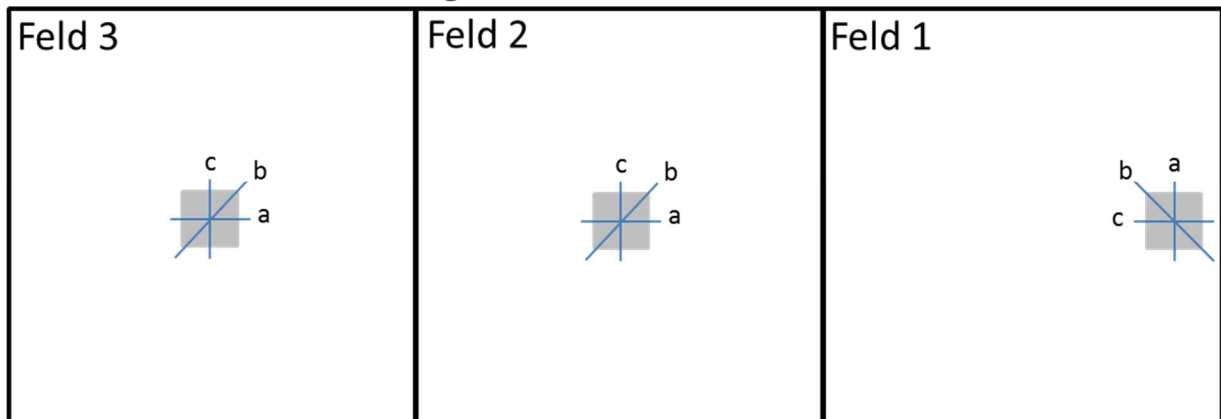


Abb. 4-29: Messrichtung der DMS

Richtung a bildet das Referenzgitter. Ausgehend von dieser Richtung gilt der Winkel  $\varphi$ , in dem die erste Hauptspannung  $\sigma_1$  liegt. Im Mohrschen Spannungskreis bilden die beiden Hauptspannungen die x-Achse und die Schubspannung die y-Achse. Die Spannungen des Spannungskreis' werden hier mit einem \* indiziert, um eine Verwechslung zwischen realer Richtung und Spannungskreisrichtung zu vermeiden.

Ausgehend von  $\sigma_1^*$  (x positiv) wird nun gegen den Uhrzeigersinn die gemessene Spannung  $\sigma_x$  (Spannung in Messrichtung a) angetragen. Da im Mohrschen Spannungskreis alle Winkel verdoppelt werden, wird auch  $\sigma_x$  im Abstand von  $2\varphi$  eingetragen. Im Winkel von  $180^\circ$  wird  $\sigma_y$  (Spannung in Messrichtung c) eingetragen.  $\sigma_{45}$  (Spannung in Messrichtung b) bildet die Senkrechte zu beiden. Es ergibt sich ein Spannungskreis wie in Abbildung 4-30.

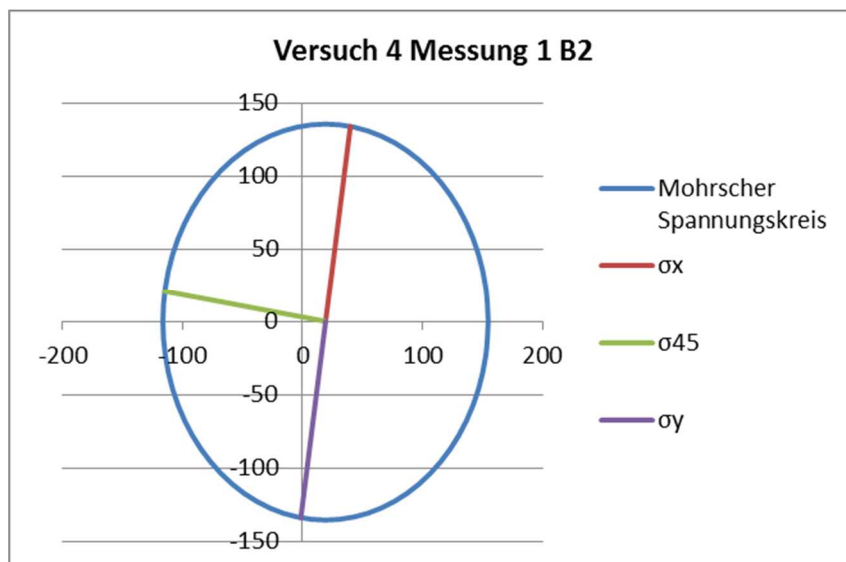


Abb. 4-30: Beispiel Mohrscher Spannungskreis

Dieser Spannungskreis muss nun wieder auf die Messstelle gelegt werden. Dazu wird die Richtung von  $\sigma_x$  auf die Messrichtung a gelegt. Es bildet sich dadurch folgendes Bild:

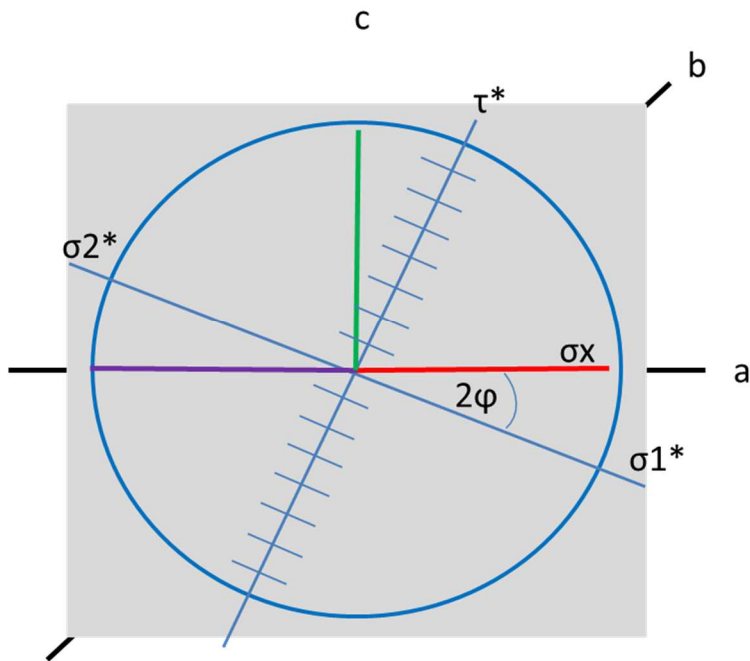


Abb. 4-31: Spannungskreis auf Messstelle

Im realen Feld gelten natürlich nicht die doppelten Winkel. Daher muss das reale  $\sigma_1$ , ausgehend von  $\sigma_x$ , im Winkel  $\varphi$  angetragen werden.  $\sigma_2$  im Winkel von  $90^\circ$  zu  $\sigma_1$  und  $\tau$  im Winkel von  $45^\circ$  zu  $\sigma_1$ .

Es ergibt sich folgendes etwas unübersichtliches Bild:

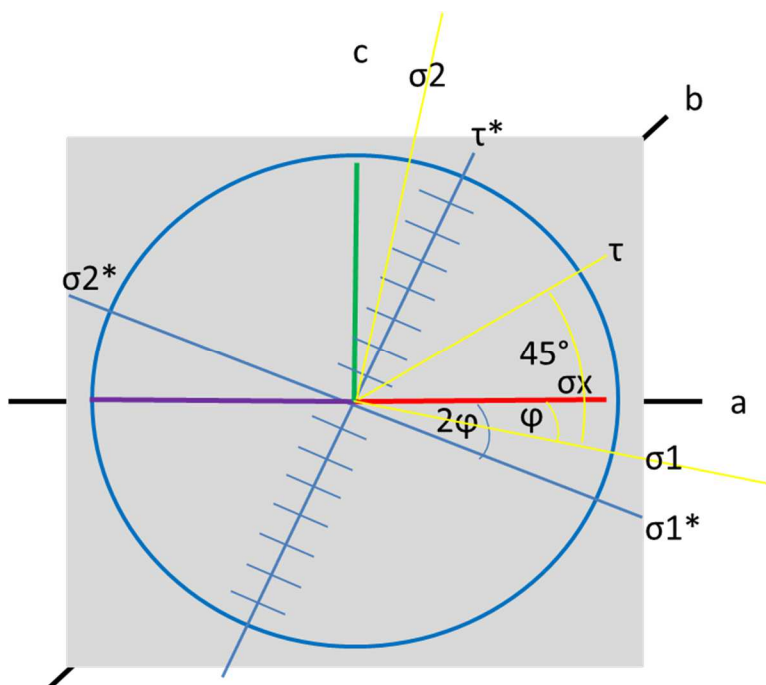


Abb. 4-32: Realer Spannungszustand Messstelle

Die gelb eingezeichneten Spannungen bilden nun den realen Spannungszustand im Feld ab. In der Auswertung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nur der reale Spannungszustand abgebildet.

### Versuchsreihe 1

In Versuchsreihe 1 wird der Träger mit einer Last von 250N an der Stelle  $x = 900$  mm belastet. Aus den Messungen lassen sich die in der Tabelle 4-12 aufgelisteten Werte berechnen. Aus diesen Werten lassen sich die Mohrschen Spannungskreise wie in Abbildung 4-33 bis 4-35 dargestellt zeichnen. Die Kreise werden in allen Versuchsreihen exemplarisch für die Messung 1 gezeichnet. Abbildung 4-36 bis 4-38 zeigen den Spannungszustand an der jeweiligen Messstelle. Für die Übersichtlichkeit der Spannungszustände wurden alle Spannungswerte mit dem Faktor 100 multipliziert.

			Feld 1	Feld 2	Feld 3
Versuchsreihe 1	Messung 1	$\sigma_1$	<b>0,20</b>	<b>1,29</b>	<b>1,91</b>
		$\sigma_2$	<b>-0,40</b>	<b>-0,71</b>	<b>-0,66</b>
		$\varphi$	15,50	39,05	39,80
		$\tau$	-0,16	-0,98	-1,27
	Messung 2	$\sigma_1$	<b>0,33</b>	<b>1,38</b>	<b>1,90</b>
		$\sigma_2$	<b>-0,33</b>	<b>-0,81</b>	<b>-0,75</b>
		$\varphi$	19,30	40,95	38,25
		$\tau$	-0,21	-1,09	-1,30
	Messung 3	$\sigma_1$	<b>0,22</b>	<b>1,22</b>	<b>1,77</b>
		$\sigma_2$	<b>-0,31</b>	<b>-0,93</b>	<b>-0,81</b>
		$\varphi$	14,52	40,15	36,85
		$\tau$	-0,13	-1,06	-1,24

Tabelle 4-12: Spannungswerte Versuch 1

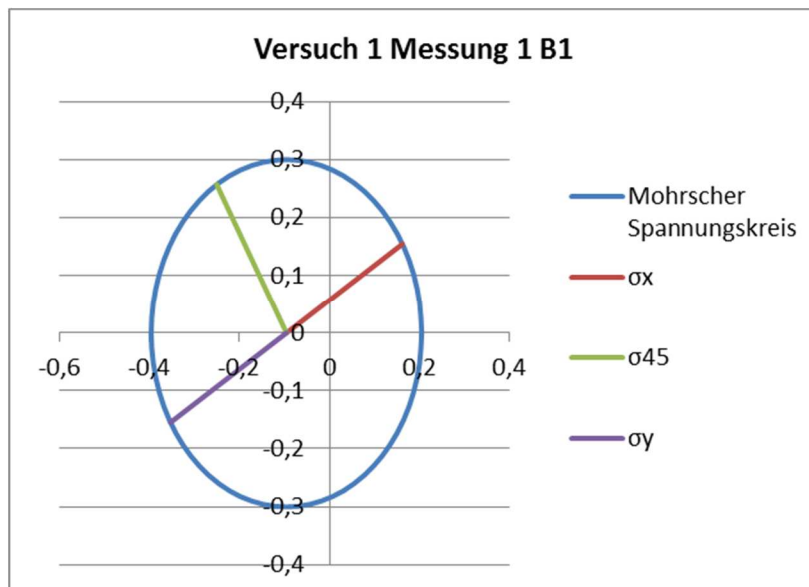


Abb. 4-33: Spannungskreis Versuch 1 Feld 1

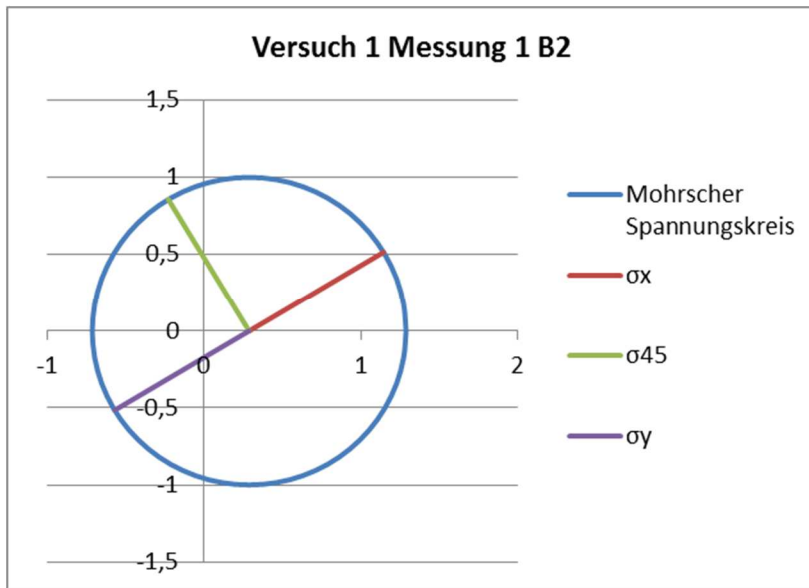


Abb. 4-34: Spannungskreis Versuch 1 Feld 2

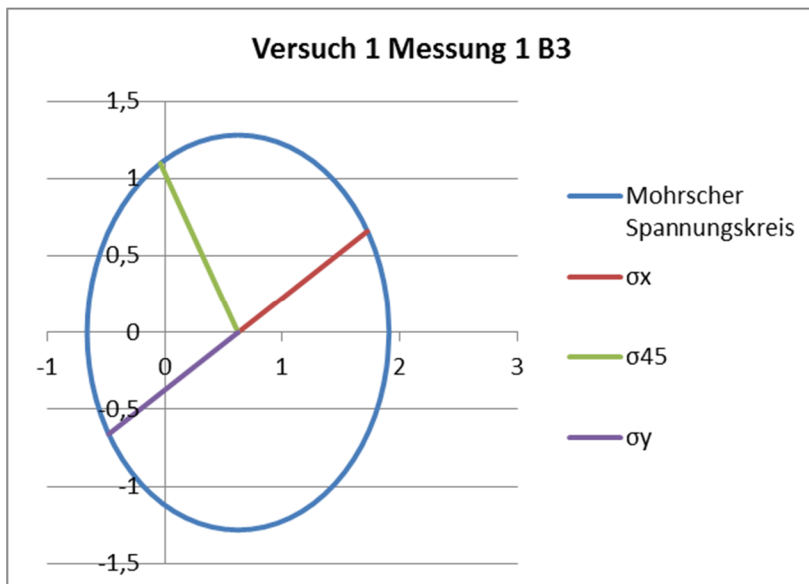


Abb. 4-35: Spannungskreis Versuch 1 Feld 3

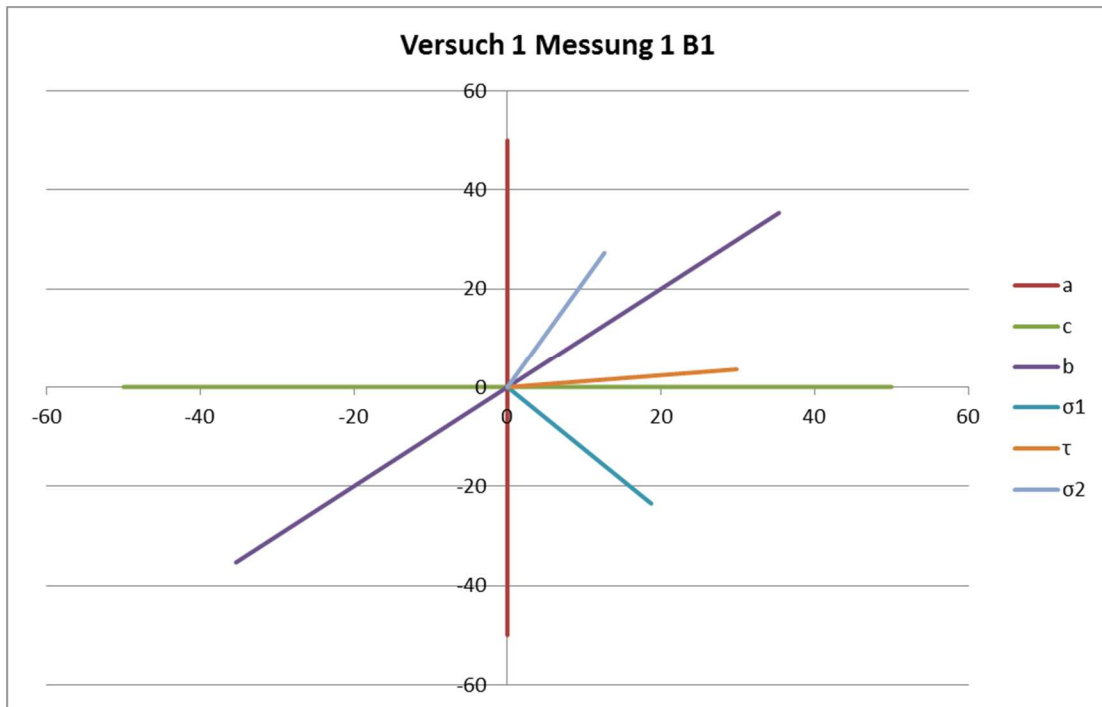


Abb. 4-36: Spannungszustand Versuch 1 Feld 1

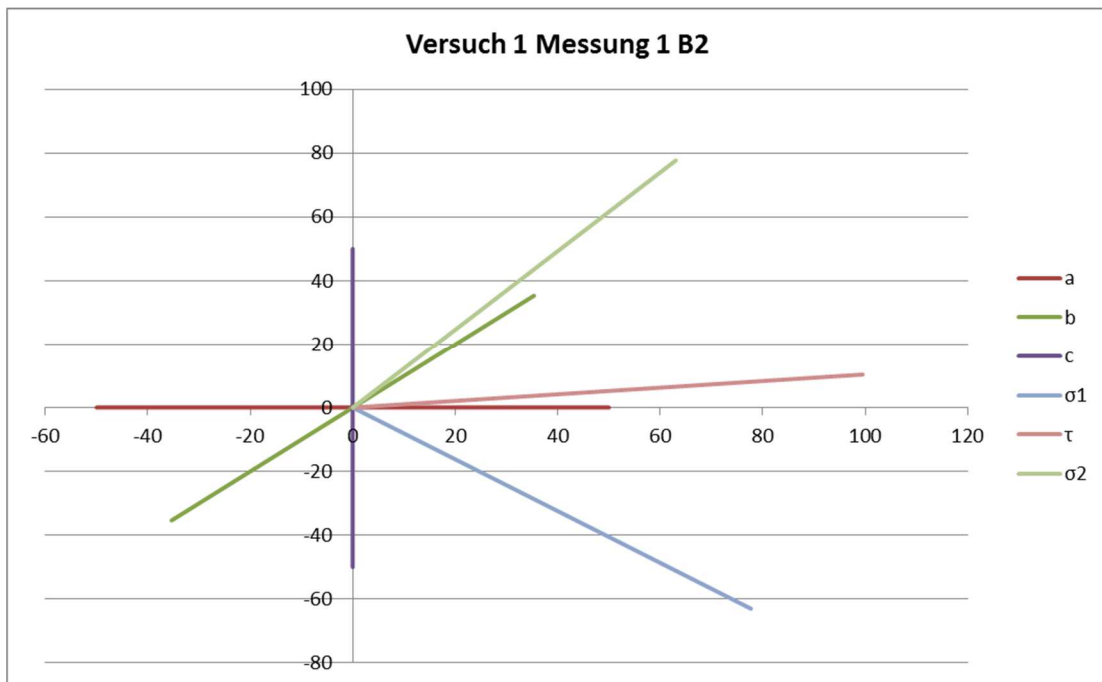


Abb. 4-37: Spannungszustand Versuch 1 Feld 2

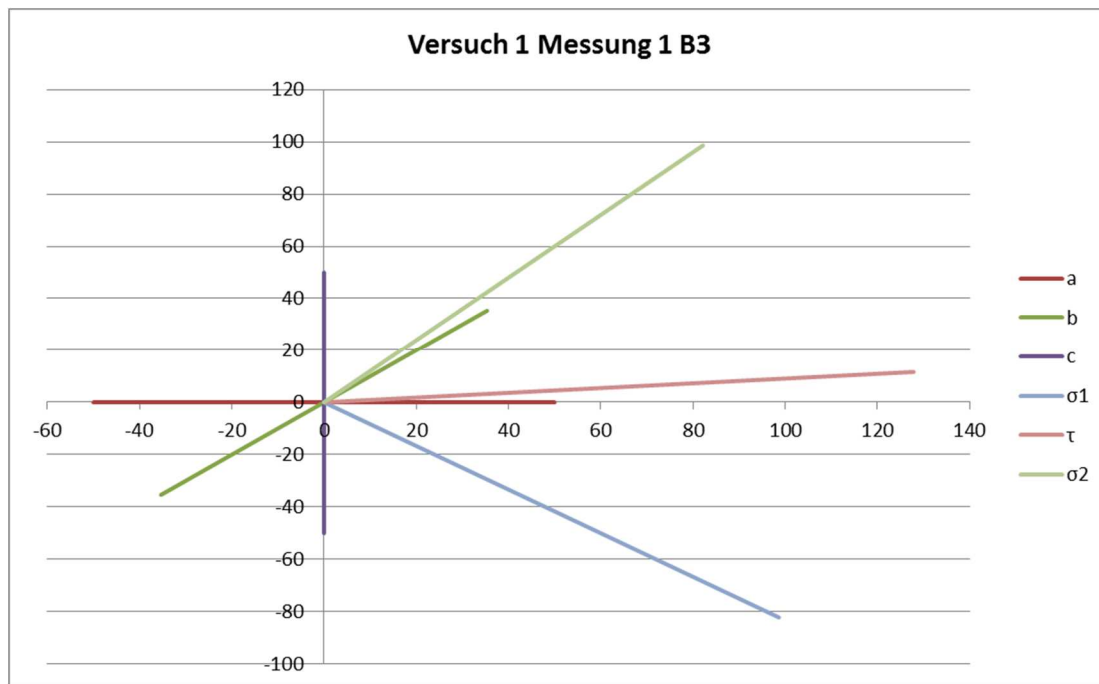


Abb. 4-38: Spannungszustand Versuch 1 Feld 3

Die Tabelle gibt Auskunft über die Höhe und Orientierung der Hauptspannungen und der Schubspannung. Die Schubspannung entspricht in Feld 2 etwa dem berechneten  $\tau$  von  $-1,0375 \frac{N}{mm^2}$ . In Feld 1 ist die Schubspannung deutlich geringer, in Feld 3 etwas höher.

Die Verteilung der Hauptspannungen um Null ist in Feld 1 am besten und nimmt mit zunehmendem Abstand zur Lagerung des Schubfeldträgers ab. Das hat eine Verschiebung des Mittelpunktes des Mohrschen Spannungskreises auf der x-Achse zur Folge. Das Feld mit dem größten Abstand zur Lagerung, also Feld 3, weist die größte Verschiebung des Mittelpunktes auf. Das lässt vermuten, dass sich die Verschiebung aus der Beweglichkeit ergibt, also die Folge der dezentralen Lasteinleitung und einer daraus hervorgehenden überlagerten Normalspannung ist.

Der Vergleich der Spannungskreise zeigt bereits eine gute Übereinstimmung zwischen Feld 2 und 3 und ein Abweichen von Feld 1. Bisher sind die Abweichungen von Feld 1 allerdings noch nicht aussagekräftig, da hier eine andere Messrichtung vorliegt. Jetzt werden die Kreise, wie oben beschrieben, auf die jeweilige Messstelle übertragen. Die abgebildeten Spannungszustände zeigen eine gute Übereinstimmung in allen 3 Feldern. Da sich im Hautfeld eine reine Schubbelastung herausbilden soll, muss  $\tau$  waagrecht durch das Feld verlaufen. Die Abbildungen weisen einen annähernd waagerechten Verlauf und somit einen qualitativ guten Verlauf der Spannungen auf. Anhand dieser ersten Messreihe lässt sich daher eine Verschiebung der Mittelpunktlage des Spannungskreises auf Grund überlagerter Normalspannungen vermuten, die sich aus einer dezentralen Lasteinleitung ergeben.

### Versuchsreihe 3

In Versuchsreihe 3 wird das Verhalten der Felder bei umgekehrter Lastrichtung untersucht. Tabelle 4-13 gibt die berechneten Werte wieder. Die Abbildungen 4-39 bis 4-41 zeigen die daraus gezeichneten Spannungskreise, Abbildung 4-42 bis 4-44 die Spannungszustände an den Messstellen.

Versuchsreihe 3	Messung 1	$\sigma_1$	1,02	2,70	0,75
		$\sigma_2$	-1,02	0,46	-1,81
		$\varphi$	29,77	105,94	122,49
		$\tau$	-0,88	0,60	1,17
	Messung 2	$\sigma_1$	0,93	2,65	0,81
		$\sigma_2$	-1,03	0,42	-1,77
		$\varphi$	30,03	106,85	123,25
		$\tau$	-0,85	0,62	1,19

Tabelle 4-13: Spannungswerte Versuch 3

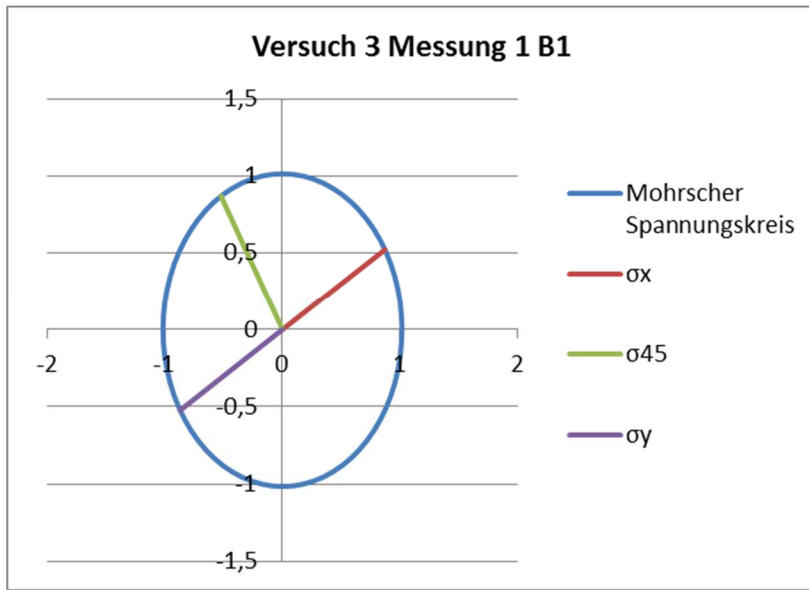


Abb. 4-39: Spannungskreis Versuch 3 Feld 1

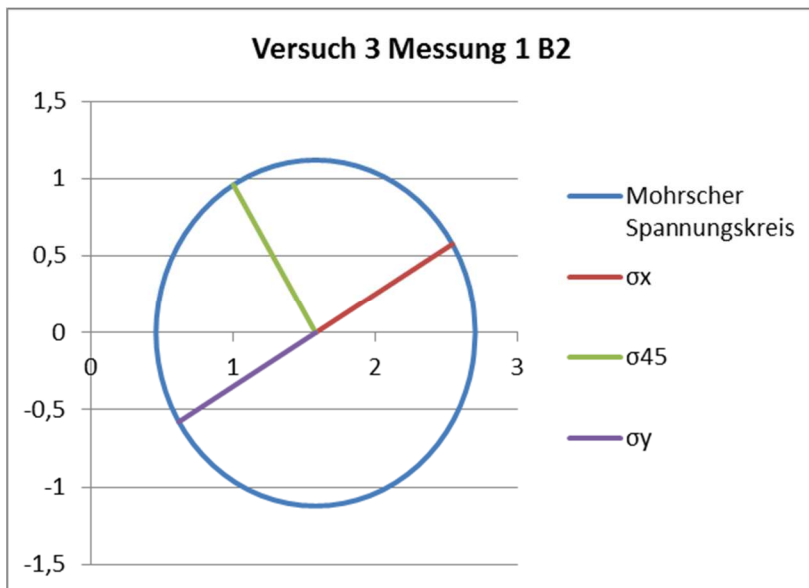


Abb. 4-40: Spannungskreis Versuch 3 Feld 2



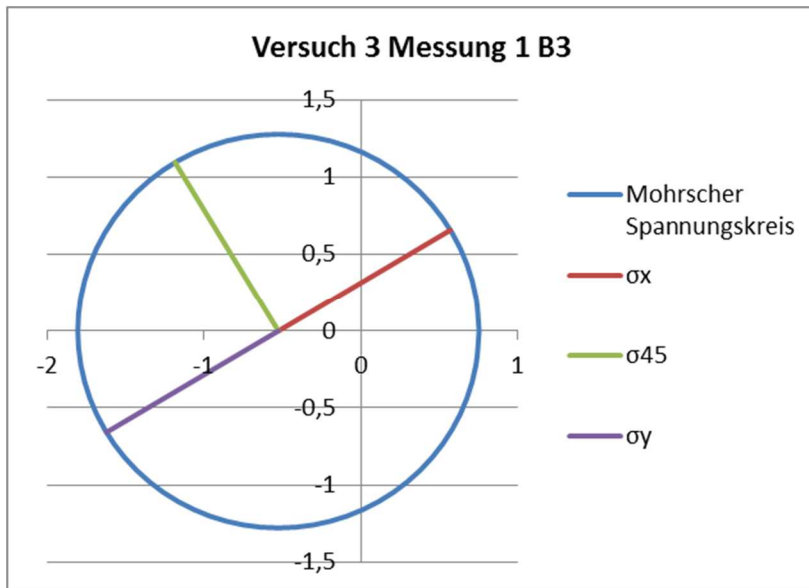


Abb. 4-41: Spannungskreis Versuch 3 Feld 3

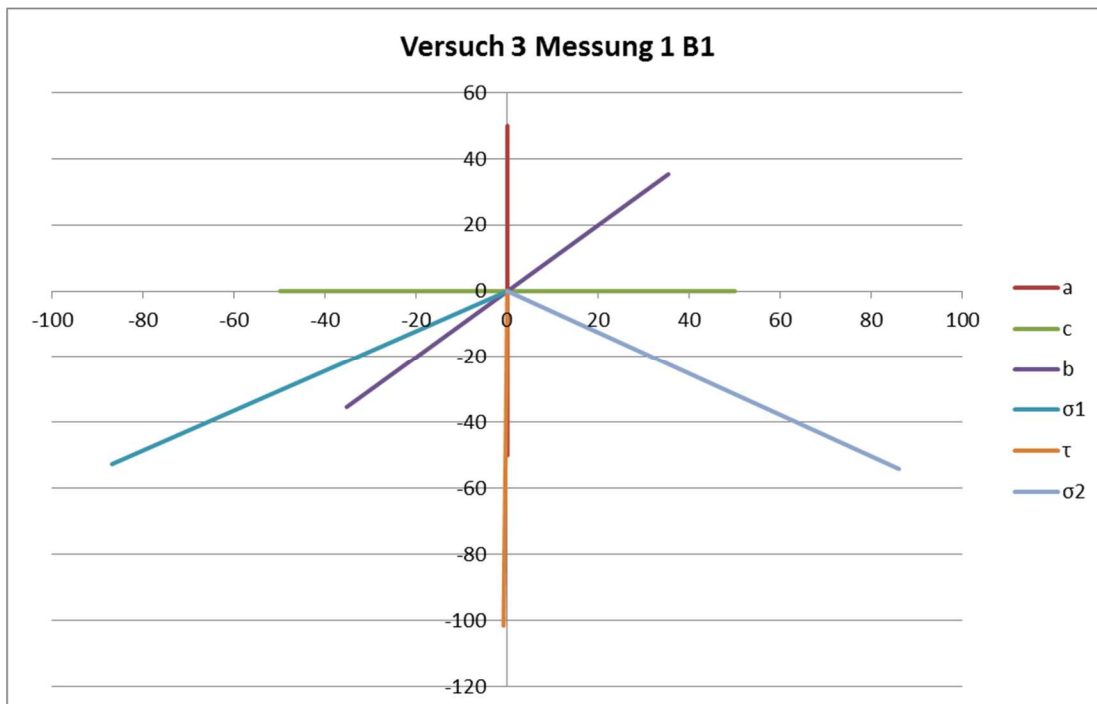


Abb. 4-42: Spannungszustand Versuch 3 Feld 1

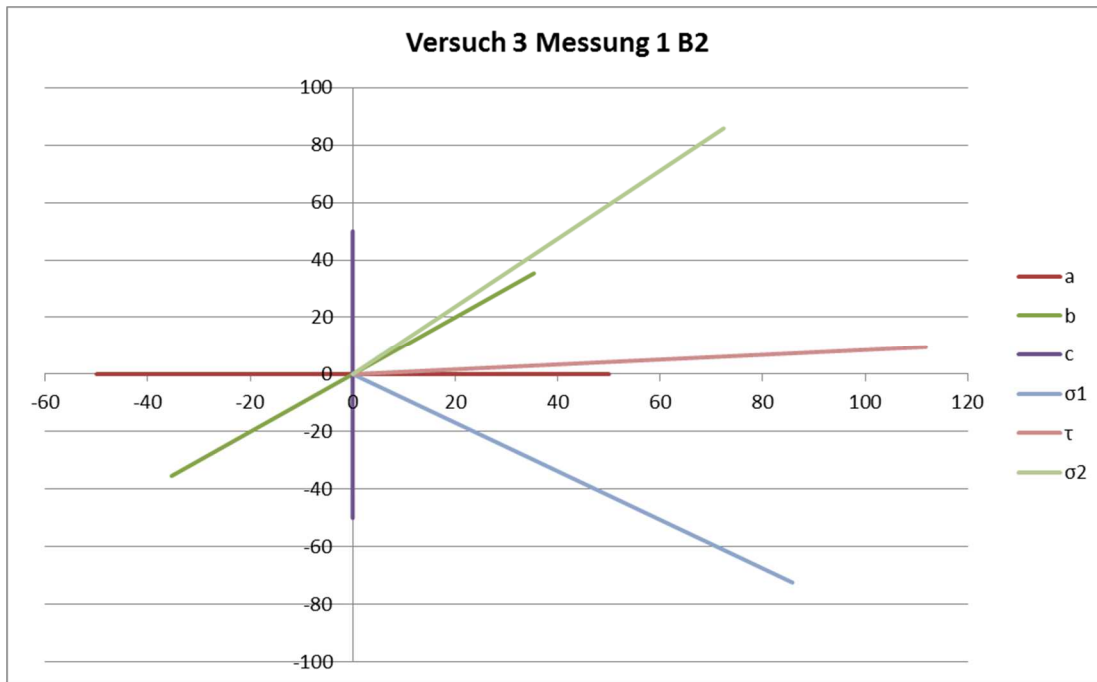


Abb. 4-43: Spannungszustand Versuch 3 Feld 2

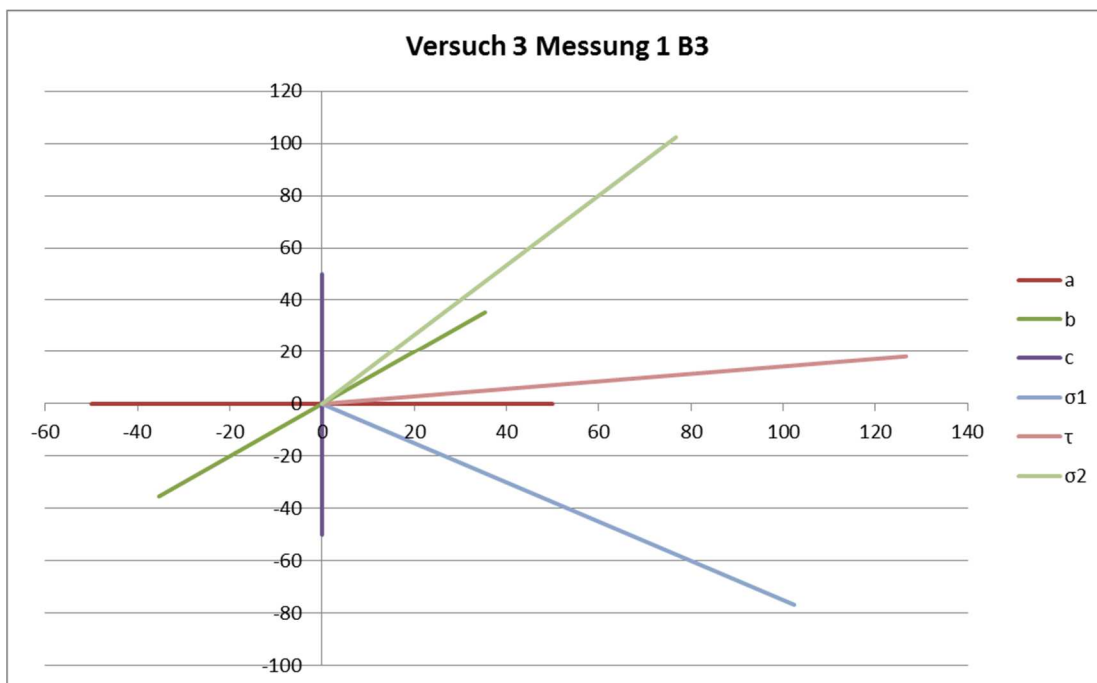


Abb. 4-44: Spannungszustand Versuch 3 Feld 3

Die Tabelle zeigt, dass sich in Feld 2 und 3 das Vorzeichen der Schubspannung ändert, was den Berechnungen entspricht. In Feld 1 ändert sich das Vorzeichen nicht. In Feld 2 entspricht die Größe nun aber nicht mehr dem Sollwert von  $\tau = 1,0375 \frac{N}{mm^2}$ . Der Wert ist deutlich kleiner. In Feld 3 sind die Werte etwas näher an den Berechnungen. Die Spannungskreise zeigen auch hier eine sehr gute Verteilung der Normalspannungen in Feld 1, was eine zentrale Mittelpunktlage zur Folge hat. In Feld 2 und 3 ist sie sehr schlecht. Die Darstellung des Spannungszustands im Feld zeigt wieder den annähernd waagerechten

Verlauf von  $\tau$  durch Feld 2 und 3, wobei die Hauptspannungen die Plätze gewechselt haben. In Feld 1 hat sich der Verlauf um etwa  $90^\circ$  gedreht. Er verläuft nun senkrecht nach unten.

In der Auswertung der Messungen in den Stäben wurde der ausbrechende Träger bei diesem Versuch beschrieben. Dort ist gut zu erkennen, dass vor allem in Feld 2 große Abweichungen auftreten. Diese Beobachtung lässt sich auch in der Auswertung der Messungen in den Hautfeldern machen. Das Stabilitätsversagen tritt also sowohl in den Stäben, als auch in den Hautfeldern auf. Für Feld 1 ergibt sich ein sehr stark abweichender Spannungszustand. Das liegt am Ort der Messungen. Die Messstelle befindet sich im Randbereich des Trägers. In der Auswertung der Stäbe wurde bereits angesprochen, dass in den Hautfeldern von einer mittragenden Breite der Hautfelder ausgegangen werden kann, also einer Teilübertragung der in den Stäben auftretenden Normalspannungen im Randbereich des Hautfelds. Dieser Effekt würde die große Änderung von Richtung und Betrag der Schubspannung in Feld 1 erklären.

#### Versuchsreihe 4

In Versuchsreihe 4 wird das Verhalten des Trägers untersucht bei einer Verringerung des Abstands zum Ort der Lasteinleitung. Die Werte in Feld 3 werden etwa Null, in diesem Feld liegt nun keine Schubbelastung mehr vor. Die übrigen Messdaten wurden wieder zu den in Tabelle 4-14 aufgeführten Werten umgerechnet. Abbildung 4-45 bis 4-46 zeigen die zugehörigen Spannungskreise, Abbildung 4-47 bis 4-48 den Spannungszustand an der jeweiligen Messstelle.

Versuchsreihe 4	Messung 1	$\sigma_1$	<b>0,63</b>	<b>1,55</b>
		$\sigma_2$	<b>-0,25</b>	<b>-1,16</b>
		$\varphi$	145,28	40,63
		$\tau$	0,41	-1,35
	Messung 2	$\sigma_1$	<b>0,78</b>	<b>1,41</b>
		$\sigma_2$	<b>-0,20</b>	<b>-1,41</b>
		$\varphi$	144,22	39,75
		$\tau$	0,47	-1,40

Tabelle 4-14: Spannungswerte Versuch 4

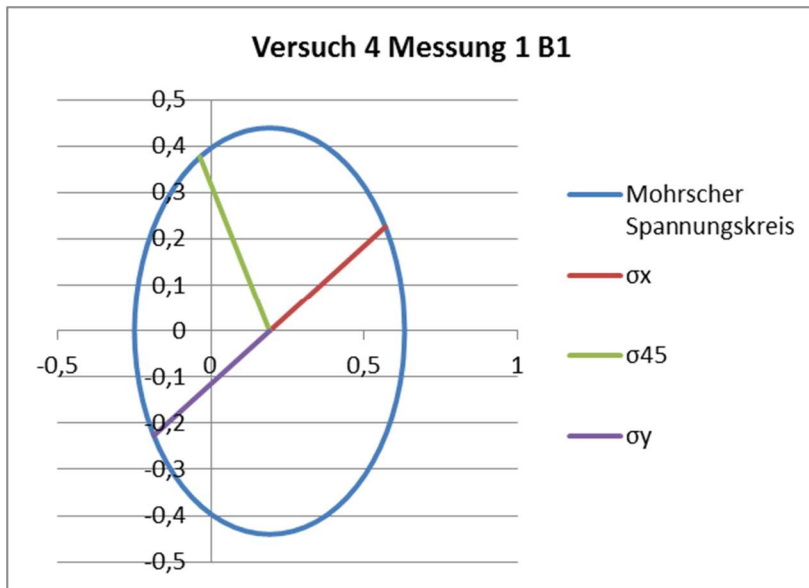


Abb. 4-45: Spannungskreis Versuch 4 Feld 1

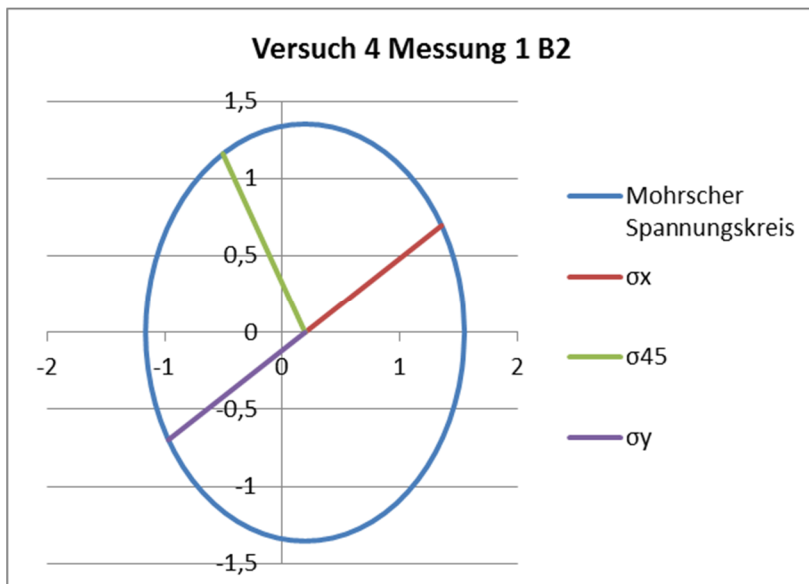


Abb. 4-46: Spannungskreis Versuch 4 Feld 2

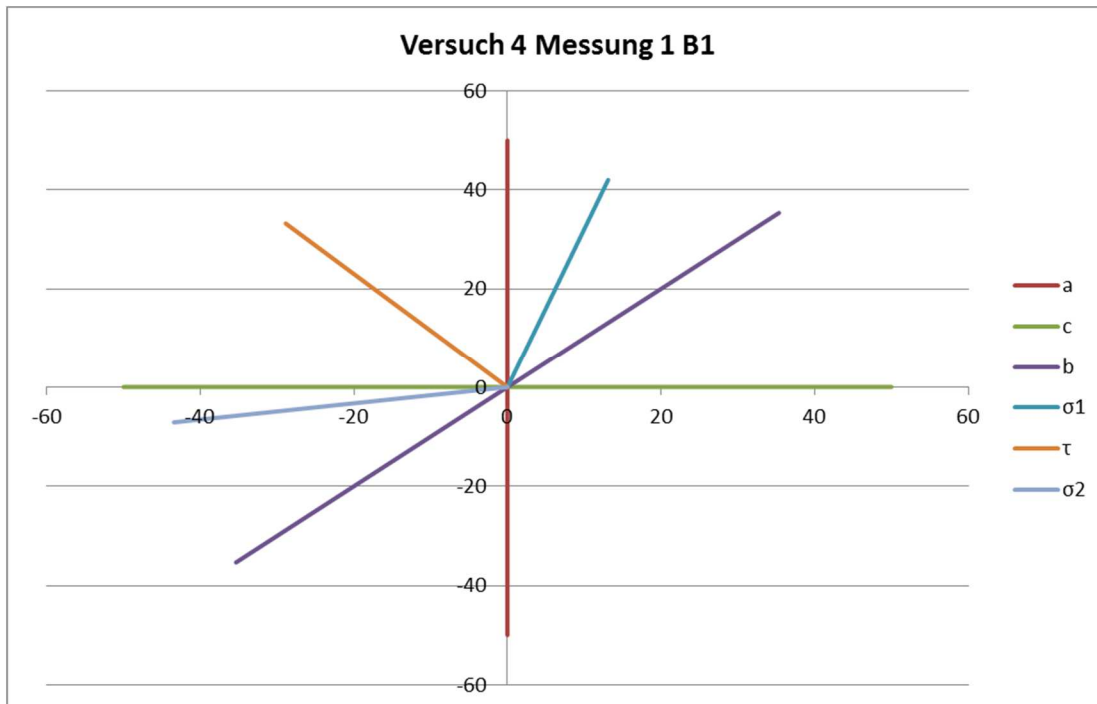


Abb. 4-47: Spannungszustand Versuch 4 Feld 1

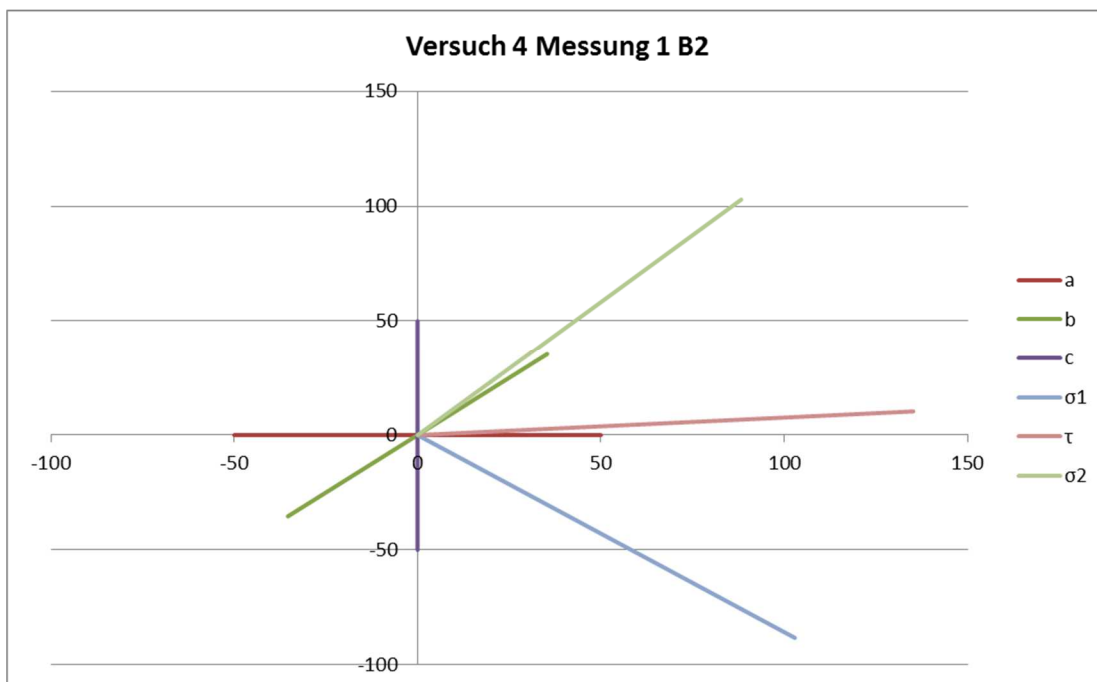


Abb. 4-48: Spannungszustand Versuch 4 Feld 2

Die Tabelle zeigt, dass in Feld 2 wieder eine negative Schubspannung auftritt. Da sich die Richtung der Lasteinleitung wieder geändert hat, ist das gut. In Feld 1 bildet sich eine positive Schubspannung. Der Wert von Feld 2 entspricht etwa dem Wert von Feld 3 in Versuchsreihe 1. Die Verschiebung des Mittelpunktes dagegen gleicht der Verschiebung von Feld 2 in Versuch 1. Diese Kombination ergibt Sinn, da sich zwar die gleichen Störgrößen wie in Feld 3 einstellen, sich durch den veränderten Lasteinleitungsort an der Beweglichkeit aber nichts ändert. Die Abbildung des Spannungszustands zeigt wieder den annähernd waagerechten Verlauf der Schubspannung durch das Feld 2. In Feld 1 stellt sich

erneut ein anderer Spannungszustand ein. Dieser weicht von allen bisherigen ab. Da er als Einziger direkt abhängig ist von den benachbarten Normalspannungen, ist das logisch.

### Zusammenfassung

Die Idealisierung des Schubfeldträgers postuliert im Hautfeld eine reine Schubbelastung und in allen 3 Hautfeldern genau die gleiche Schubspannung. Die Auswertung der Messergebnisse in den Hautfeldern zeigt, wie bereits die Auswertung der Messergebnisse auf den Stäben, dass wir nur in Feld 2 annähernd optimale Bedingungen und damit ein ungestörtes Schubfeld vorfinden. In Feld 3 sind die Messergebnisse von den 2 Störgrößen „Lasteinleitung“ und „großer Abstand von der Lagerung“ geprägt. Die aus dem großen Abstand zur Lagerung resultierende Beweglichkeit des Systems führt zu einer Verschiebung der Nullpunktlage des Mohrschen Spannungskreis. Die Störgröße „Lasteinleitung“ führt zu einer betragslichen Änderung der Schubspannung. Dennoch lässt sich im Groben erkennen, was erkannt werden soll, nämlich dass sich in den Schubfeldern die gleichen Schubspannungen einstellen. Die Messungen in Feld 1 zeigen deutlich die Schwachstellen des jetzigen Versuchsaufbaus. Darin summieren sich die Störgrößen, die durch die Lagerung entstehen, mit dem Effekt der mittragenden Breite, so dass sich hier ein nahezu undefinierbarer Spannungszustand einstellt. Da nirgendwo eine Aussage darüber zu finden war, wie sich die mittragende Breite konkret auf den Spannungszustand im Feld auswirkt, oder wie man den Einfluss berechnen könnte, lassen sich die Messergebnisse nicht gut interpretieren.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Schubfeldträgermodells für die Anwendung im Lehrbetrieb. Die Anforderungen an das Modell ergaben sich aus den Idealisierungen der Schubfeldtheorie, den Produktionsbedingungen im betreuenden Betrieb und aus dem Einsatzgebiet des Modells in der Hochschule. Entscheidend war ein geringer konstruktiver Neuaufwand, Kompatibilität mit anderen GUNT-Systemen und Vergleichbarkeit mit anderen Modellen des Leichtbaus, insbesondere dem Fachwerk. In diesem Sinne wurde auf Basis der Werteanalyse das Modell entworfen, anschließend dimensioniert und berechnet. Der Schwerpunkt der konstruktiven Arbeit lag in den Stabilitätsberechnungen der Schubfelder und Stäbe. Der zweite Schwerpunkt lag in der Gestaltung des Messaufbaus. Dieser erforderte ausführliche Kenntnisse im Gebrauch von Dehnungsmesstreifen und dem Aufbau und der Nutzung von Wheatstoneschen Messbrücken.

Das Modell wurde in folgender Form gefertigt: Der Schubfeldträger besteht aus drei quadratischen Schubfeldern. Diese sind kontinuierlich und kraftschlüssig mit gelenkig in Knotenscheiben gelagerten Stäben verbunden. Dieser Verbund ist mit aus dem Fachwerkaufbau entnommenen Klemmelementen in den GUNT-Standartrahmen eingehängt und wird mit einer ebenfalls dem Fachwerkaufbau entnommenen Kraftspindel belastet. Die Messung der Kräfte in den Stäben und der Spannungen in den Hautfeldern erfolgt mittels applizierter Dehnungsmessstreifen, die auf Platinen zu wheatstoneschen Messbrücken ergänzt werden.

Die Erprobung des Messträgers erfolgte in Form von Messreihen, die unterschiedliche Belastungszustände des Trägers abbildeten und so das Verhalten des Modells einer Analyse zugänglich machten.

Die Auswertung der Messdaten ergibt eine sehr gute Abbildung des idealen Schubfeldträgers im mittleren der drei Felder.

In den äußeren Feldern ergeben sich auf Grund von Störeinflüssen, die der Lagerung und der Belastung des Trägers entstammen, Abweichungen vom idealen Schubfeldträger.

Der Einfluss des Verhältnisses von Querschnittsfläche des Hautfelds zu Querschnittsfläche des Stabs auf die Abweichungen des Modells vom idealen Schubfeldträger konnte, da nur ein Versuchsträger zur Verfügung stand, nicht abschließend geklärt werden. Es wird eine mittragende Breite vermutet, was eine Belastung des Feldes im Randbereich durch die angrenzenden Normalspannungen bedeutet.

Für ein weiteres Vorgehen gibt es zwei Optionen. Die erste Option, die kostengünstigere, besteht in der Weiternutzung des bestehenden Modells. Dazu müsste der Messaufbau um weitere Messstellen ergänzt werden. Zu empfehlen ist ein sternförmiger Messaufbau in Feld 2, der das Verhalten des ungestörten Schubfeldträgers nur unter Einfluss der vermuteten mittragenden Breite abbildet und eine weitere Messstelle mittig in Feld 1. Aus dem Abgleich der Ergebnisse, lässt sich ein Korrekturfaktor ermitteln, der die Störeinflüsse aus den Messergebnissen filtert.

Die zweite Option besteht in der Änderung des Modells.

Für eine optimale Auswertung des Verhaltens eines Schubfeldträgers sind mindestens 4, besser noch 5 Schubfelder nötig. Dann ließen sich 2 – 3 störungsfreie Felder betrachten und auswerten. Für diese Änderung muss die Feldgröße verkleinert werden, der Schubfeldträger würde sonst zu lang. Ebenfalls sinnvoll ist dann die Verringerung der Blechdicke um den Effekt der mittragenden Breite zu reduzieren.

Ich empfehle die zweite Option.

## 6 Literaturverzeichnis

1. **Wiedemann.** *Leichtbau Elemente und Konstruktion.* s.l. : Springer, 2007.
2. Deutschlands Zukunft gestalten. *Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD.* Berlin : Union Betriebs-GmbH, 16. Dezember 2013.
3. **Centrum für Hochschulentwicklung.** *Hochschulbildung wir zum Normalfall Ein gesellschaftlicher Wandel und seine Folgen.* Gütersloh : s.n., 2014.
4. **Verein Deutscher Ingenieure / acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.** *Nachwuchsbarometer Technikwissenschaften.* Düsseldorf : s.n., 2009.
5. **destatis [online].** destatis [online]. [Online] 19.. Mai 2016. [Zitat vom: Donnerstag, 19.. Mai 2016.] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/BildungForschungKultur/Hochschulen/Tabellen/StudierendeErstesHSFaechergruppen.html>.
6. **Sommer, Ulrich Heublei/ Johanna Richter/ Robert Schmelzer/ Dieter.** Die Entwicklung der Studienabbruchquoten an deutschen Hochschulen. *Statistische Berechnungen auf der Basis des Absolventenjahrgangs 2012.* Hannover : DZHW, Mai 2014. 04/2014.
7. **Schernikau, Dipl.-Ing. Bernd.** Skript: Werteanalyse und Value Management. Hamburg : s.n., SoSe 2016.
8. **Edelstahl, Geier-Metalle und.** Lagerliste Aluminium Platten EN 573-3 / 485-1-2-4. *Werkstoffeigenschaften von Aluminium-Platten.* MA-Rheinau : s.n., Januar 2008.
9. **Edelstahlwerke, Deutsche.** Datenblatt. *Nichtrostender austenitischer Stahl 1.4305.* Witten : s.n., 01.03.2008.
10. **Nast, Prof. Dr.-Ing. E.** Skript: Festigkeit im Leichtbau. Hamburg : s.n., WiSe 2015/16.
11. **Wittel, Herbert, et al.** *Roloff/Matek Maschinenelemente : Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch. 20. überarbeitete und erweiterte Auflage.* Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2011.
12. **Keller, E.** Skript Maschinenelemente Universität Siegen. [Online] 20. 10 2006. [Zitat vom: 15. Mai 2016.] [http://www.mb.uni-siegen.de/inko\\_schwarz/download/me2b/?lang=de%3fref=](http://www.mb.uni-siegen.de/inko_schwarz/download/me2b/?lang=de%3fref=).
13. **Hoffmann, Karl.** *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen.* Darmstadt : Hottiner Baldwin Messtechnik GmbH, 1987.
14. **Reimerdes, Stefan Dieker/ Hans-Günther.** *Elementare Festigkeitslehre im Leichtbau.* Bremen : Donat Verlag.

## 7 Anhänge

Anhang 1: Datenblatt Kleber

Anhang 2: Typenerklärung DMS

Anhang 3: technische Zeichnungen



Anhang 4: Zeichnung Montagehilfe

Anhang 5: Soll-Werte

Anhang 6: Messwerte

## LOCTITE® 3090™

September 2012

### PRODUKTBESCHREIBUNG

LOCTITE® 3090™ besitzt die folgenden Produkteigenschaften:

<b>Technologie</b>	Cyanacrylat
Chemische Basis	Ethyl-Cyanacrylat
Farbe (Komp. A)	Klar bis leicht trüb gelförmig <sup>LMS</sup>
Farbe (Komp. B)	Transparent, farblos, flüssig
Farbe (Mischung A+B)	Klar bis leicht trüb gelförmig
Komponenten	Zwei Komponenten - Mischen erforderlich
Viskosität	Thixotropes Gel
<b>Aushärtung</b>	Aushärtung nach dem Mischen von zwei Komponenten
<b>Anwendung</b>	Kleben

LOCTITE® 3090™ ist ein zweikomponentiger, schnell härtender, spaltfüllender Klebstoff, der hervorragende Haftfestigkeiten auf vielen verschiedenen Werkstoffen erzielt, u.a. auf Kunststoffen, Gummi und Metall. LOCTITE® 3090™ wird zum Verbinden von Teilen mit unterschiedlichen oder undefinierten Klebspalten (bis 5mm) oder für Anwendungen eingesetzt, wo Klebstoffüberschüsse vollständig aushärten müssen. Die gelförmige Konsistenz verhindert Abfließen selbst auf senkrechten Flächen. LOCTITE® 3090™ eignet sich auch zum Kleben von porösen Materialien wie Holz, Papier, Leder und Textilien.

### MATERIALEIGENSCHAFTEN

#### Komponente A:

Spez. Dichte bei 25 °C	1,1
Flammpunkt - siehe Sicherheitsdatenblatt	
Casson-Viskosität, 25 °C, mPa·s (cP): Kegel-Platte-Rheometer	150 bis 450 <sup>LMS</sup>

#### Komponente B:

Casson-Viskosität, 25 °C, mPa·s (cP): Kegel-Platte-Rheometer	10 bis 30
Flammpunkt - siehe Sicherheitsdatenblatt	

#### Mischung:

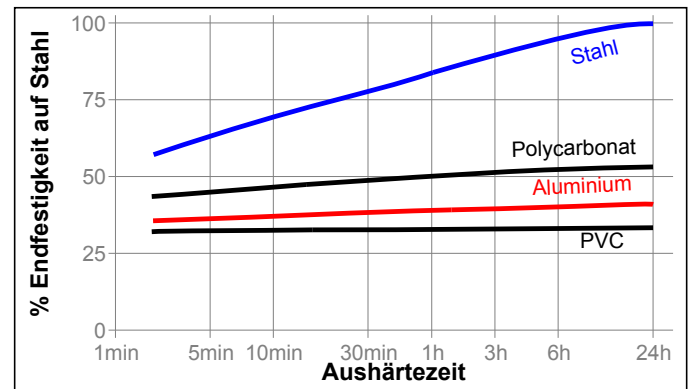
Offene Zeit bei 25 °C, Sekunden	90 bis 180
---------------------------------	------------

### TYPISCHE AUSHÄRTEEIGENSCHAFTEN

Die Aushärtung wird durch Mischen der Komponenten A und B ausgelöst. Handfestigkeit wird schnell erreicht, Funktionsfestigkeit innerhalb von 24 Stunden.

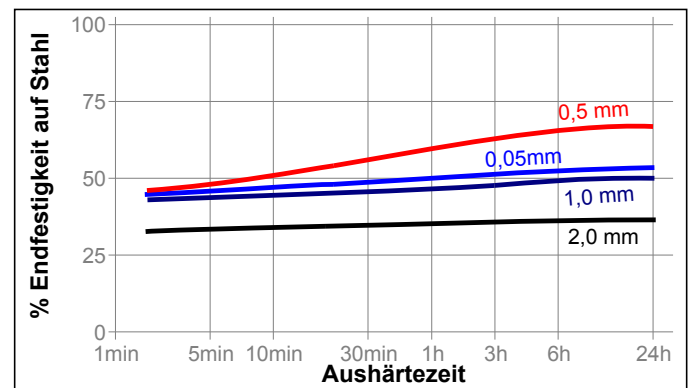
### Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Material

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der verwendeten Materialoberfläche. Das untenstehende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit auf Zugscherproben aus Stahl verglichen mit anderen Materialien. Geprüft gemäß ISO 4587.



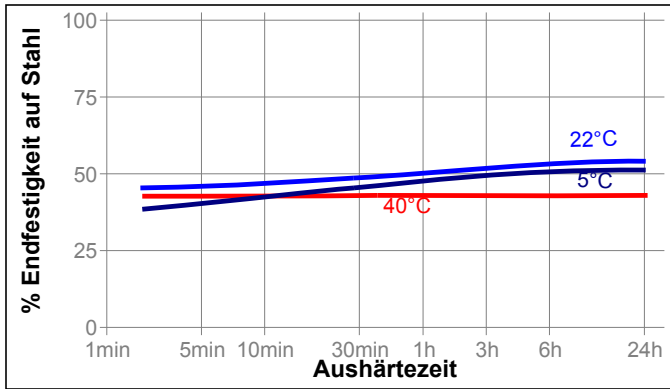
### Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Spalt

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig vom Klebspalt. Das untenstehende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit auf Zugscherproben aus Polycarbonat bei unterschiedlichen Spalten. Geprüft gemäß ISO 4587.



### Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der Umgebungstemperatur. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei Zugscherproben aus Polycarbonat bei unterschiedlichen Temperaturen. Geprüft gemäß ISO 4587.



Aushärtezeit 24 Stunden bei 22°C

Zugscherfestigkeit, ISO 4587:

Stahl (sandgestrahlt)	N/mm <sup>2</sup>	21
	(psi)	(3.045)
Aluminium (gebeizt)	N/mm <sup>2</sup>	9
	(psi)	(1.300)
Zinkdichromat	N/mm <sup>2</sup>	9
	(psi)	(1.300)
ABS	* N/mm <sup>2</sup>	8
	(psi)	(1.200)
PVC	N/mm <sup>2</sup>	8
	(psi)	(1.200)
Phenolharz	N/mm <sup>2</sup>	2
	(psi)	(290)
Polycarbonat	* N/mm <sup>2</sup>	12
	(psi)	(1.740)
GFK	N/mm <sup>2</sup>	4
	(psi)	(580)
Nitrilgummi	N/mm <sup>2</sup>	1
	(psi)	(145)
Neopren	N/mm <sup>2</sup>	1
	(psi)	(145)
Holz (Eiche)	N/mm <sup>2</sup>	11
	(psi)	(1.600)
Holz (Kiefer)	N/mm <sup>2</sup>	11
	(psi)	(1.600)
Holz (Spanplatte)	N/mm <sup>2</sup>	1,5
	(psi)	(220)
Leder	N/mm <sup>2</sup>	2
	(psi)	(290)

\* Materialversagen

**TYPISCHE EIGENSCHAFTEN IM AUSGEHÄRTETEN ZUSTAND**

Aushärtezeit 1 Woche bei 22°C

**Physikalische Eigenschaften:**

Glasübergangstemperatur, ASTM E 831, °C	116
Shore Härte, ISO 868, Durometer D	79
Zugfestigkeit bei Bruch, ISO 527-3	N/mm <sup>2</sup> 28 (psi) (4.060)
Zugfestigkeit bei Streckgrenze, ISO 527-3	N/mm <sup>2</sup> 28 (psi) (4.060)
Zugmodul, ISO 527-3	N/mm <sup>2</sup> 1.870 (psi) (271.150)
Dehnung bei Bruch, ISO 527-3, %	2,5
Dehnung bei Streckgrenze, ISO 527-3, %	2,5
Wärmeausdehnungskoeffizient, ASTM D 696, K <sup>-1</sup>	110×10 <sup>-6</sup>
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient, ASTM C 177, W/(m·K)	0,35

**Elektrische Eigenschaften:**

Spezifischer Durchgangswiderstand, IEC 60093, Ω·cm	250×10 <sup>15</sup>
Oberflächenwiderstand, IEC 60093, Ω	400×10 <sup>15</sup>

**FUNKTIONSEIGENSCHAFTEN IM AUSGEHÄRTETEN ZUSTAND**

**Eigenschaften**

Aushärtezeit 30 Sekunden bei 22°C

Zugfestigkeit, ISO 6922:

Buna-N(Nur Komponente A)	N/mm <sup>2</sup>	≥6 <sup>LMS</sup>
	(psi)	(≥870)

**BESTÄNDIGKEIT GEGEN UMGEBUNGSEINFLÜSSE**

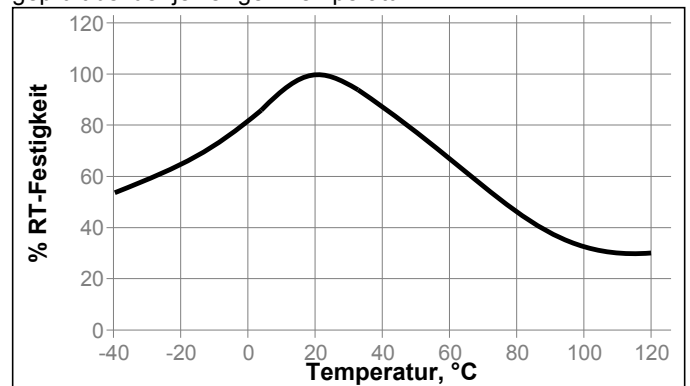
Aushärtezeit 1 Woche bei 22°C

Zugscherfestigkeit, ISO 4587:

Stahl (sandgestrahlt)

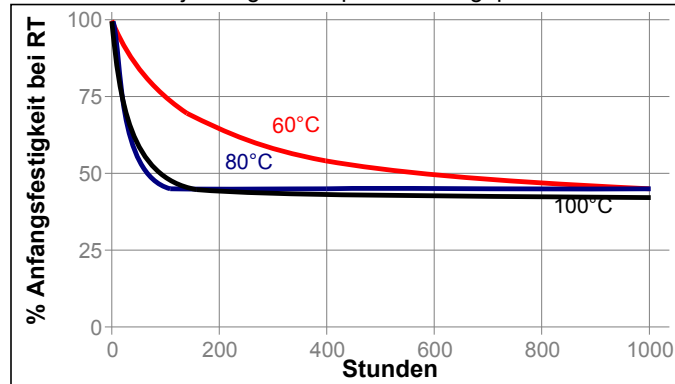
**Temperaturfestigkeit**

geprüft bei der jeweiligen Temperatur



**Wärmealterung**

Gealtert bei der jeweiligen Temperatur und geprüft bei 22°C

**Beständigkeit gegen Medien**

Alterungstest wie beschrieben und geprüft bei 22°C.

Medium	°C	% Anfangsfestigkeit			
		100 h	500 h	1000 h	5000 h
Wasser	22	80	70	60	50
Motoröl	40	85	80	70	65
Bleifreies Benzin	22	95	90	80	70
Ethanol	22	90	90	90	80
Isopropanol	22	95	95	95	95
98% rel. LF	40	45	30	30	5

Zugscherfestigkeit, ISO 4587:

Polycarbonat

Medium	°C	% Anfangsfestigkeit			
		100 h	500 h	1000 h	5000 h
Wasser	22	100	95	95	95
Wasser	60	90	70	70	60
98% rel. LF	40	95	90	80	75

**ALLGEMEINE INFORMATION**

**Dieses Produkt ist nicht geeignet für reinen Sauerstoff und/oder sauerstoffangereicherte Systeme und sollte nicht als Dichtstoff für Chlor oder stark oxidierende Medien gewählt werden.**

**Sicherheitshinweise zu diesem Produkt entnehmen Sie bitte dem Sicherheitsdatenblatt.**

**Gebrauchshinweise**

1. Die Oberflächen sollten sauber und fettfrei sein. Alle Oberflächen mit einem Loctite® Reiniger reinigen und trocknen lassen.
2. Die Komponenten A und B müssen vor Gebrauch gemischt werden. Das Produkt kann mit Hilfe des mitgelieferten statischen Mischers direkt aus Doppelkartuschen aufgetragen werden. Die ersten 1 bis 2 cm der dosierten Raupe sollten nicht verwendet werden.
3. Den gemischten Klebstoff auf eine der Oberflächen auftragen. Klebstoff nicht mit einem Tuch, Pinsel o.ä. verteilen. Teile innerhalb von wenigen Sekunden montieren. Die Teile sollten genau positioniert werden, da der Klebstoff rasch abbindet und deshalb nur wenig Zeit zum Ausrichten bleibt.
4. Teile fixieren oder zusammendrücken, bis der Klebstoff Handfestigkeit erreicht hat.
5. Die Verbindung sollte vor Belastung vollständig aushärten. (typische Wartezeit 24 Stunden nach dem Montieren).

**Loctite Material-Spezifikation <sup>LMS</sup>**

LMS vom 12. Februar 2010. Prüfberichte über die angegebenen Eigenschaften sind für jede Charge erhältlich. LMS-Prüfberichte enthalten ausgewählte, im Rahmen der Qualitätskontrolle festgelegte Prüfwerte, die als relevant für Kunden-Spezifikationen erachtet werden. Darüber hinaus sind umfassende Kontrollmaßnahmen in Kraft, die eine gleichbleibend hohe Produktqualität gewährleisten. Spezifikationen unter Berücksichtigung von speziellen Kundenwünschen können über die Qualitätsabteilung von Henkel koordiniert werden.

**Lagerung**

Produkt im ungeöffneten Behälter in trockenen Räumen lagern. Hinweise zur Lagerung können sich auf dem Etikett des Produktbehälters befinden.

**Optimale Lagerung: 2°C bis 8°C. Durch Lagerung unter 2°C und über 8°C können die Produkteigenschaften nachteilig beeinflusst werden.**

Aus dem Gebinde entnommenes Produkt kann beim Gebrauch verunreinigt worden sein. Deshalb keine Produktreste in den Originalbehälter zurückschütten. Henkel kann keine Haftung für Material übernehmen, das verunreinigt oder in einer Weise gelagert wurde, die von den oben aufgeführten Bedingungen abweicht. Wenn Sie weitere Informationen benötigen, wenden Sie sich bitte an Ihren zuständigen technischen Service oder den Kundenbetreuer vor Ort.

**Umrechnungsfaktoren**

$(^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32 = ^{\circ}\text{F}$   
 $\text{kV/mm} \times 25.4 = \text{V/mil}$   
 $\text{mm} / 25.4 = \text{inches}$   
 $\mu\text{m} / 25.4 = \text{mil}$   
 $\text{N} \times 0.225 = \text{lb}$   
 $\text{N/mm} \times 5.71 = \text{lb/in}$   
 $\text{N/mm}^2 \times 145 = \text{psi}$   
 $\text{MPa} \times 145 = \text{psi}$   
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 8.851 = \text{lb}\cdot\text{in}$   
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 0.738 = \text{lb}\cdot\text{ft}$   
 $\text{N}\cdot\text{mm} \times 0.142 = \text{oz}\cdot\text{in}$   
 $\text{mPa}\cdot\text{s} = \text{cP}$

**Haftungsausschluss****Hinweis:**

Die vorstehenden Angaben in diesem technischen Datenblatt (TDS),

insbesondere Vorschläge für die Verarbeitung und den Einsatzbereich unserer Produkte, beruhen auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Auf Grund der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten und der außerhalb unseres Einflussbereiches liegenden Einsatz- und Arbeitsbedingungen übernehmen wir keine Haftung für die Eignung unserer Produkte für die relevanten Produktionsverfahren unter den konkreten Arbeitsbedingungen sowie die beabsichtigten Verarbeitungszwecke und Ergebnisse. Um eine solche Eignung sicherzustellen empfehlen wir in jedem Fall ausreichende vorherige Eigenversuche und Tests.

Jede aus den Hinweisen in diesem technischen Datenblatt und jede aus sonstiger schriftlicher oder mündlicher Beratung für das vorliegende Produkt resultierende Haftung ist ausdrücklich ausgeschlossen, es sei denn, dass individualvertraglich etwas anderes vereinbart wurde, ein Fall der Verletzung von Leib, Leben oder Gesundheit vorliegt, uns Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt oder eine Haftung nach zwingendem Produkthaftungsrecht besteht.

**Bei Lieferung unserer Produkte durch Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS und Henkel France SA beachten Sie bitte zusätzlich folgendes:**

Für den Fall, dass Henkel dennoch, aus welchem Rechtsgrund auch immer, in Anspruch genommen wird, ist die Haftung von Henkel in jedem Fall beschränkt auf den Wert der jeweils betroffenen Lieferung.

**Bei Lieferung unserer Produkte durch Henkel Colombiana, S.A.S. findet Folgendes Anwendung:**

Die vorstehenden Angaben in diesem technischen Datenblatt (TDS), insbesondere Vorschläge für die Verarbeitung und den Einsatzbereich unserer Produkte, beruhen auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Wir übernehmen keine Haftung für die Eignung unserer Produkte für die relevanten Produktionsverfahren unter den konkreten Arbeitsbedingungen sowie die beabsichtigten Verarbeitungszwecke und Ergebnisse. Um eine solche Eignung sicherzustellen empfehlen wir in jedem Fall ausreichende vorherige Eigenversuche und Tests.

Jede aus den Hinweisen in diesem technischen Datenblatt und jede aus sonstiger schriftlicher oder mündlicher Beratung für das vorliegende Produkt resultierende Haftung ist ausdrücklich ausgeschlossen, es sei denn, dass individualvertraglich etwas anderes vereinbart wurde, ein Fall der Verletzung von Leib, Leben oder Gesundheit vorliegt, uns Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt oder eine Haftung nach zwingendem Produkthaftungsrecht besteht.

**Bei Lieferung unserer Produkte durch Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc. oder Henkel Canada Corporation, findet Folgendes Anwendung:**

Die hierin enthaltenen Daten dienen lediglich zur Information und gelten nach bestem Wissen als zuverlässig. Wir können jedoch keine Haftung für Ergebnisse übernehmen, die von anderen erzielt wurden, über deren Methoden wir keine Kontrolle haben. Der Anwender selbst ist dafür verantwortlich, die Eignung von hierin erwähnten Produktionsmethoden für seine Zwecke festzustellen und Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, die zum Schutz von Sachen und Personen vor den Gefahren angezeigt wären, die möglicherweise bei der Handhabung und dem Gebrauch dieser Produkte auftreten. **Dementsprechend lehnt die Firma Henkel im besonderen jede aus dem Verkauf oder Gebrauch von Produkten der Firma Henkel entstehende ausdrücklich oder stillschweigend gewährte Garantie ab, einschließlich aller Gewährleistungsverpflichtungen oder Eignungsgarantien für einen bestimmten Zweck. Die Firma Henkel lehnt im besonderen jede Haftung für Folgeschäden oder mittelbare Schäden jeder Art ab, einschließlich entgangener Gewinne.**

Die Tatsache, dass hier verschiedene Verfahren oder Zusammensetzungen erörtert werden, soll nicht zum Ausdruck bringen, dass diese nicht durch Patente für andere geschützt sind, bzw. unter Patenten der Firma Henkel lizenziert sind, die solche Verfahren oder Zusammensetzungen abdecken. Wir empfehlen jedem Interessenten, die von ihm beabsichtigte Anwendung vor dem serienmäßigen Einsatz zu testen und dabei diese Daten als Anleitung zu benutzen. Dieses Produkt kann durch eines oder mehrere in- oder ausländische Patente oder Patentanmeldungen geschützt sein.

**Verwendung von Warenzeichen**

Sofern nicht anderweitig ausgewiesen sind alle in diesem Dokument genannten Marken solche der Henkel Corporation in den USA und in anderen Ländern. Mit ® gekennzeichnet sind alle beim US- Patent- und Markenamt registrierte Marken.

Referenz 0.1

**FAE-12S-35-S13E-J**

**F A E T - 25 B - 12 - S6 ET**

**Aktives Element**

F = Folien-DMS  
S = Halbleiter-DMS  
R = Folien-Widerstand

**Gitterlegierung**

A = Konstantan (400)  
C = ISO-Elastic  
N = Nichrome V  
S = Stabiloy (800) (Karma)  
P = Platin (1200)

**Trägerwerkstoff**

B = Phenol +Glasfaser  
E = Polyimid  
M = Polyimid+Glasfaser  
P = Papier

**Gittergestaltung**

D = Dual-Diagonal (Torsion)  
R = Rosette (3 Elemente)  
S = Membrane  
T = Transversal (2 Elemente)  
X = übereinander angeordnet (2 Elemente)  
Zahl = Zahl der Messgitter  
kein Buchstabe oder Zahl = Einzelmessgitter

**Aktive Gitterlänge**

(x 0.254 = aktive Länge in mm)

Punkte geben lieferbare Optionen an

E	L	S	C	E	E	E	E	P
●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●

**Option-Suffix**

(s. Beschreibung)

**Temperatur-Kompensation**

( $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{F}$ )

0 = Quartz  $\cong 0,0 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
3 = Molybdän  $\cong 5,4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
5 = Titan  $\cong 9,0 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
6 = Stahl  $\cong 10,8 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
9 = Edelstahl  $\cong 16,2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
13 = Aluminium  $\cong 23,4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
15 = Magnesium  $\cong 27,0 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
) = Kunststoffe

Post Yield keine Farbenzuordnung

**Widerstand**

x 10 Ohm

**Anschluss- und Gitteranordnung**

A = Anschlussordnung innerhalb eines DMS  
B = Anschlussordnung innerhalb eines DMS  
C = Anschlussordnung innerhalb eines DMS  
D = Anschlussordnung innerhalb eines DMS-Typs oder einer Delta-Rosette von 60°  
G = Anschlüsse auf jeder Gitterseite  
H = beide Anschlüsse auf der gleichen Gitterseite  
J = Anschlüsse oberh. und unterh. vom Gitter  
N = Schmales Gitter  
R = Rosette 45°  
S = quadratisches Gitter  
U = ein Anschluss unter dem anderen  
W = breites Gitter

\*) auf Anfrage

**F A E T - 25 B - 12 - S6 ET**

Dots Indicate Option Available

E	L	S	C	E	E	E	E	P
●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●

**Option-Suffix**

(s. description)

**Temperatur-Kompensation**

( $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{F}$ )

0 = Quartz  $\cong 0,0 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
3 = Molybdenum  $\cong 5,4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
5 = Titanium  $\cong 9,0 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
6 = Mild steel  $\cong 10,8 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
9 = Stainless steel  $\cong 16,2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
13 = Aluminium  $\cong 23,4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
15 = Magnesium  $\cong 27,0 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$   
) = Plastic

Post Yield No colour assigned

**Resistance of Element**

x 10 Ohms

**Anschluss- und Gitteranordnung**

A = Tab arrangement within a gage type  
B = Tab arrangement within a gage type  
C = Tab arrangement within a gage type  
D = Tab arrangement within a gage type or delta rosette 60 degrees  
G = Tabs on each side of grid  
H = Tabs both on same side of grid  
J = Tabs above and below grid  
N = Narrow grid  
R = Rectangular rosette 45 degrees  
S = Square grid  
U = Tabs one below the other  
W = Wide grid

\*) Consult Factory

**Sensing Element**

F = Foil-Gage  
S = Semiconductor  
R = Foil-Resistor

**Type of Alloy**

A = Constantan (400)  
C = ISO-Elastic  
N = Nichrome V (200)  
S = Stabiloy (800) (Karma)  
P = Platinum (1200)

**Carrier Materials**

B = Phenolic-glass  
E = Polyimide  
M = Polyimide-glass  
P = Paper

**Grid Configuration**

D = Dual diagonal (Torque)  
R = Rosette (3 elements)  
S = Diaphragm  
T = Transverse (2 Elements)  
X = stacked (2 elements)  
Number = Number of elements  
No letter or number = Single element

**Sensing Element Length**

(x 0,254 = active gage length in mm)

399.00000A00131

DMS-Modell	Gage Pattern	Abmessungen in mm			Dimensions in mm		R-Ohm	Bild Nr.	Typenbezeichnung	Optionen								
		Gitterlänge (a)	Gesamtlänge (b)	Gitterbreite (c)	Matrix					R-Ohms	Fig.	Designation	Options					
					L (d)	B (e)							L (d)	W (e)	EL	S	CL	ST
		12,70	17,78	6,35	23,06	9,40	120	1	FAE-50-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		12,70	17,78	6,35	23,06	9,40	350	1	FAE-50-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		8,56	13,21	4,93	20,32	12,07	120	2	FAE-37-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		9,27	13,34	4,83	18,64	9,27	350	2	FAE-37-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		6,35	8,89	3,18	13,92	6,35	120	3	FAE-25-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		6,35	8,89	3,18	13,92	6,35	350	3	FAE-25-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		4,76	6,60	2,41	11,79	6,22	120	4	FAE-18-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		4,45	7,37	2,03	13,00	12,95	350	4	FAE-18-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		3,18	4,57	1,65	8,99	4,45	120	5	FAE-12-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		3,18	4,57	1,57	9,12	4,57	350	5	FAE-12-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		1,57	2,54	1,27	7,06	4,57	120	6	FAE-06-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		1,57	2,79	1,52	7,34	4,57	350	6	FAE-06-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		1,27	2,54	1,02	7,06	3,81	120	7	FAE-05-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		0,79	1,78	1,27	6,17	4,57	120	8	FAE-03-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		<p>Quadratisches Gitter für hohe Verlustleistung</p> <p>Square Grid High Power Dissipation</p>		6,35	9,65	6,35	15,85	13,46	120	9	FAE-25S-12-SX	•	•	•	•	•	•	
				6,35	8,89	6,35	13,94	9,27	350	9	FAE-25S-35-SX	•	•	•	•	•	•	
4,11	6,48			4,57	13,72	11,81	120	10	FAE-18S-12-SX	•	•	•	•	•	•			
4,70	7,29			5,21	13,56	13,08	350	10	FAE-18S-35-SX	•	•	•	•	•	•			
3,10	4,38			3,18	9,25	6,10	120	11	FAE-12S-12-SX	•	•	•	•	•	•			
3,18	4,38			3,18	9,53	6,10	350	11	FAE-12S-35-SX	•	•	•	•	•	•			
1,57	3,30			1,57	7,82	4,57	120	12	FAE-06S-12-SX	•	•	•	•	•	•			
1,57	3,30			1,57	7,82	4,57	350	12	FAE-06S-35-SX	•	•	•	•	•	•			
0,79	1,78			0,79	6,32	4,57	120	13	FAE-03S-12-SX	•	•	•	•	•	•			
				3,18	7,11	4,60	12,95	12,57	120	15	FAE-12W-12-SX	•	•	•	•	•	•	
				3,18	7,11	4,60	12,95	12,57	350	15	FAE-12W-35-SX	•	•	•	•	•	•	
				1,52	3,68	3,23	8,38	8,89	120	16	FAE-06W-12-SX	•	•	•	•	•	•	
				1,57	3,43	3,18	8,59	7,85	350	16	FAE-06W-35-SX	•	•	•	•	•	•	
		0,79	1,90	1,57	6,83	3,56	120	18	FAE-03W-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		0,79	1,90	1,57	6,83	3,86	350	18	FAE-03W-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		0,51	1,65	1,02	4,83	2,79	350	19	FAE-02W-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		0,38	1,14	0,76	3,05	1,78	120	20	FAE-01W-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		6,35	7,11	7,11	12,57	18,52	120	21	FAE-25G-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		6,35	6,86	7,11	12,70	18,03	350	21	FAE-25G-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		3,23	3,56	3,30	9,53	9,91	120	22	FAE-12G-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		3,18	3,30	3,30	10,41	13,08	350	22	FAE-12G-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		1,57	1,78	1,78	4,57	6,86	120	23	FAE-06G-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		1,57	1,65	1,53	5,72	8,26	350	23	FAE-06G-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		0,97	1,09	2,28	3,20	6,10	350	-	FAE-03G-35-SX	•	•	•	•	•	•			
		0,79	0,81	0,94	3,56	4,83	120	24	FAE-03G-12-SX	•	•	•	•	•	•			
		0,38	0,43	0,74	3,91	4,29	120	25	FAE-01G-12-SX	•	•	•	•	•	•			

\* in doppelter Effektivgrösse  
\* twice actual size

# Serie Y

## mit 3 Messgittern / Rosetten

### RY81

0°/45°/90° – Kanten – Rosette  
Temperaturgang angepasst an Stahl  
mit  $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6}/K$

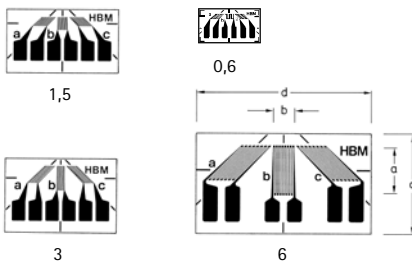
### RY83

Temperaturgang angepasst an Aluminium  
mit  $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$

### RY8x

Temperaturgang angepasst nach Kundenwunsch  
siehe Seite 16

Abbildungen in natürlicher Größe  
(Angabe: Gitterlänge in mm)



Inhalt je Packung 5 Stück

### RY91

0°/45°/90° – Rosette, Messgitter gestapelt  
Temperaturgang angepasst an Stahl  
mit  $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6}/K$

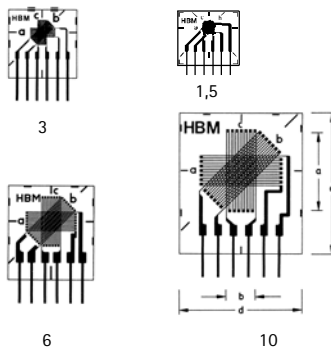
### RY93

Temperaturgang angepasst an Aluminium  
mit  $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$

### RY9x

Temperaturgang angepasst nach Kundenwunsch  
siehe Seite 16

Abbildungen in natürlicher Größe  
(Angabe: Gitterlänge in mm)



Inhalt je Packung 5 Stück

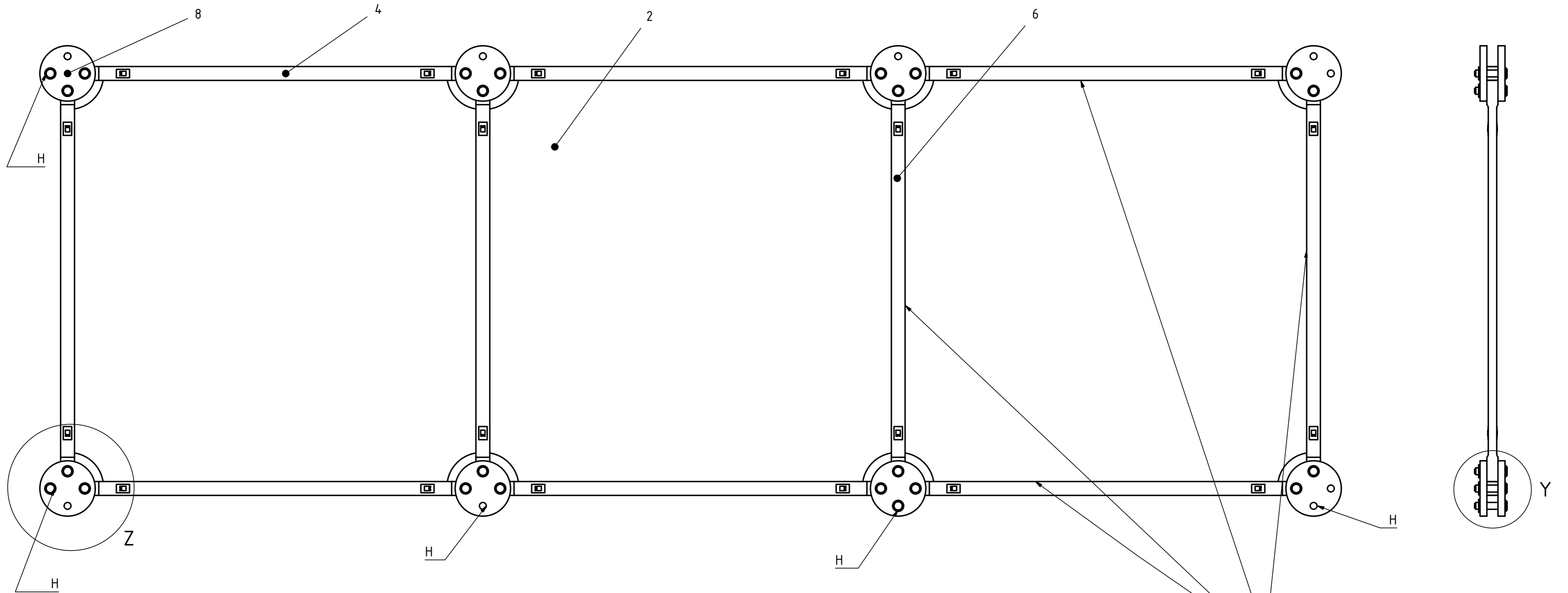
Ab Lager lieferbare Typen		Varianten	Nennwiderstand	Abmessungen (mm)				Max. zul. effektive Brückenspeisesp.	Lötstützpunkte (1)
Stahl	Aluminium			Messgitter		Messgitterträger			
		Sonstige	$\Omega$	a	b	c	d	V	
		1-RY8x-0.6/120 <sup>(#)</sup>	120	0,6	1,2	4,8	8,7	1,6	LS 7
1-RY81-1.5/120		1-RY8x-1.5/120	120	1,5	1,4	8,2	14,6	2,5	LS 7
1-RY81-3/120	1-RY83-3/120	1-RY8x-3/120	120	3	1,1	9,7	14,6	3	LS 7
1-RY81-6/120		1-RY8x-6/120	120	6	3	13	22,9	7,5	LS 7
		1-RY8x-1.5/350 <sup>(#)</sup>	350	1,5	1,6	8,2	14,6	5	LS 7
		1-RY8x-3/350	350	3	1,2	9,7	14,6	5,5	LS 7
1-RY81-6/350		1-RY8x-6/350	350	6	2,8	13,1	22,9	13	LS 5

Ab Lager lieferbare Typen		Varianten	Nennwiderstand	Abmessungen (mm)				Max. zul. effektive Brückenspeisesp.	Lötstützpunkte
Stahl	Aluminium			Messgitter		Messgitterträger			
		Sonstige	$\Omega$	a	b	c	d	V	
1-RY91-1.5/120		1-RY9x-1.5/120	120	1,5	1,3	9	8	1,5	LS 7
1-RY91-3/120	1-RY93-3/120	1-RY9x-3/120	120	3	1,3	9	9	2	LS 7
1-RY91-6/120	1-RY93-6/120	1-RY9x-6/120	120	6	2,6	12,5	11,4	4,5	LS 7
1-RY91-10/120		1-RY9x-10/120	120	10	4	17,5	16	7	LS 7
1-RY91-1.5/350		1-RY9x-1.5/350 <sup>(#)</sup>	350	1,5	1,5	8	9	2,5	LS 7
1-RY91-3/350	1-RY93-3/350	1-RY9x-3/350	350	3	1,5	9	9	3,5	LS 7
1-RY91-6/350	1-RY93-6/350	1-RY9x-6/350	350	6	2,6	12,5	11,4	6	LS 7
		1-RY9x-10/350	350	10	4	17,6	16	11,5	LS 7

(1) Lötstützpunkte sind nicht zwingend erforderlich

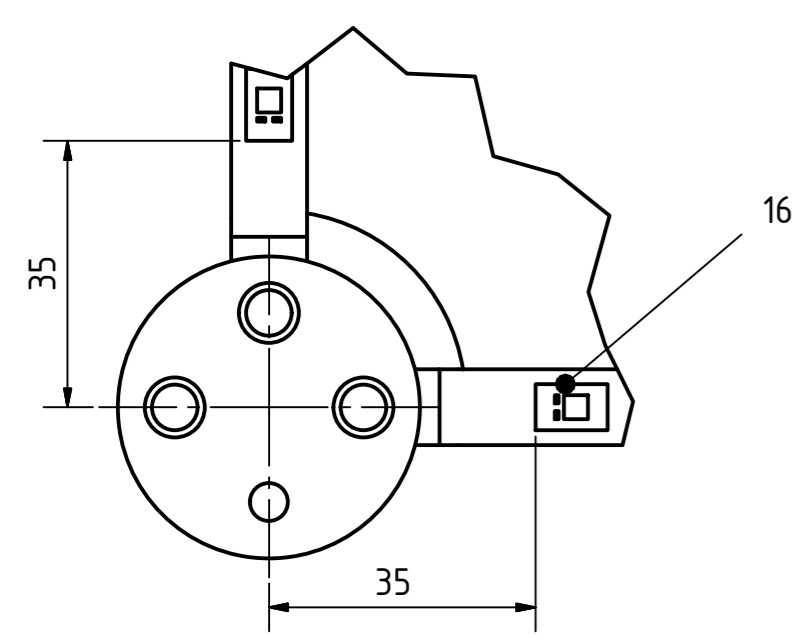
(#) Typen sind nur für Aluminium, ferritischen oder austenitischen Stahl angepasst lieferbar





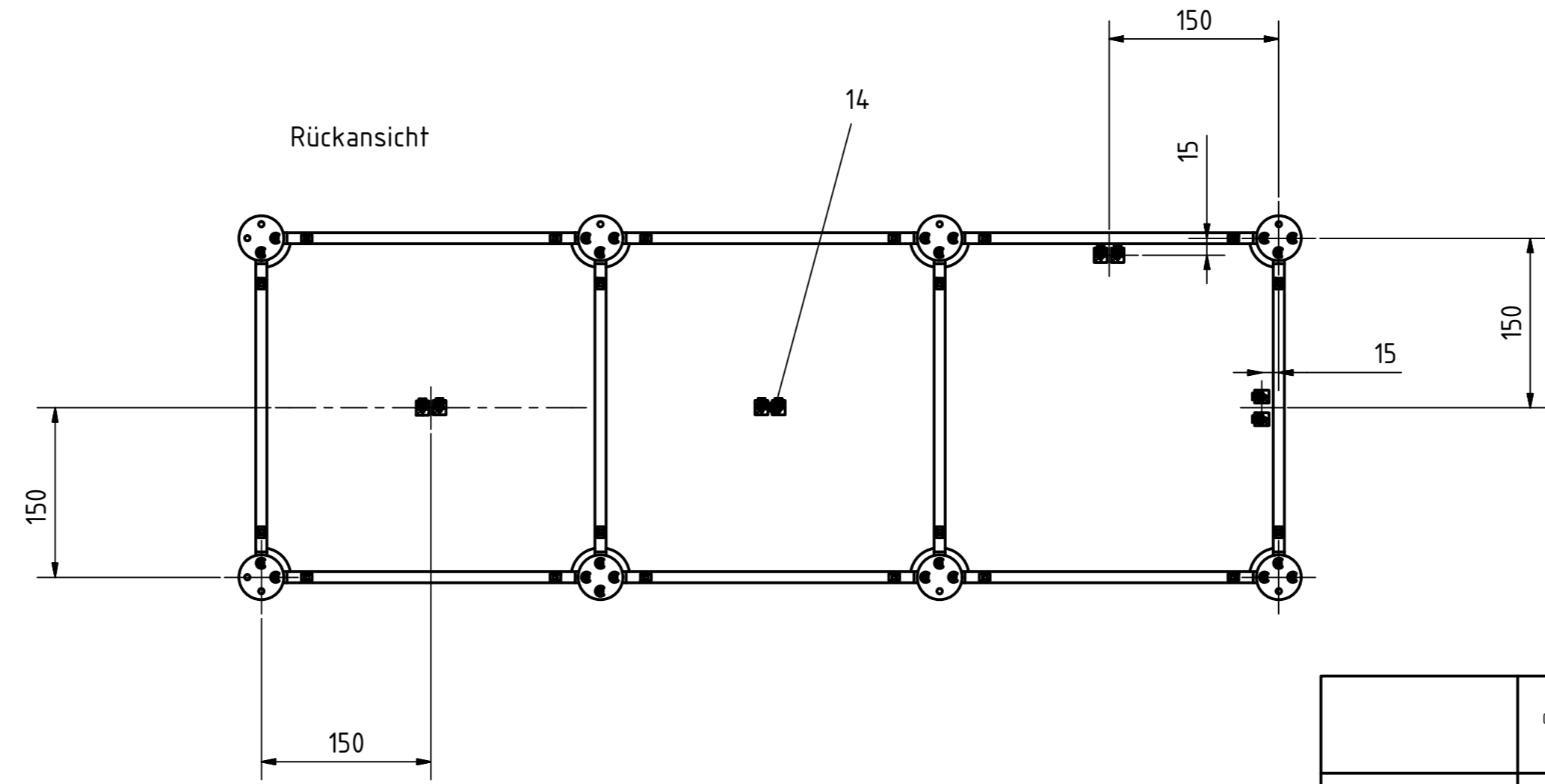
Blech in Stab verklebt mit Loctite 3090  
 Artikelnummer: 253.00000A00133

Z (1:1)

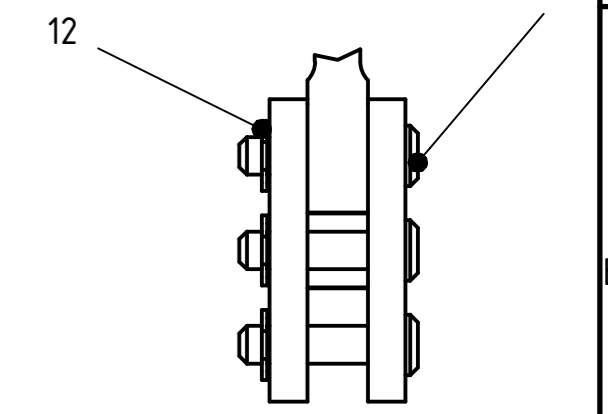


Stab und Knotenscheibe miteinander gebohrt  
 und gerieben: 5H7

Rückansicht

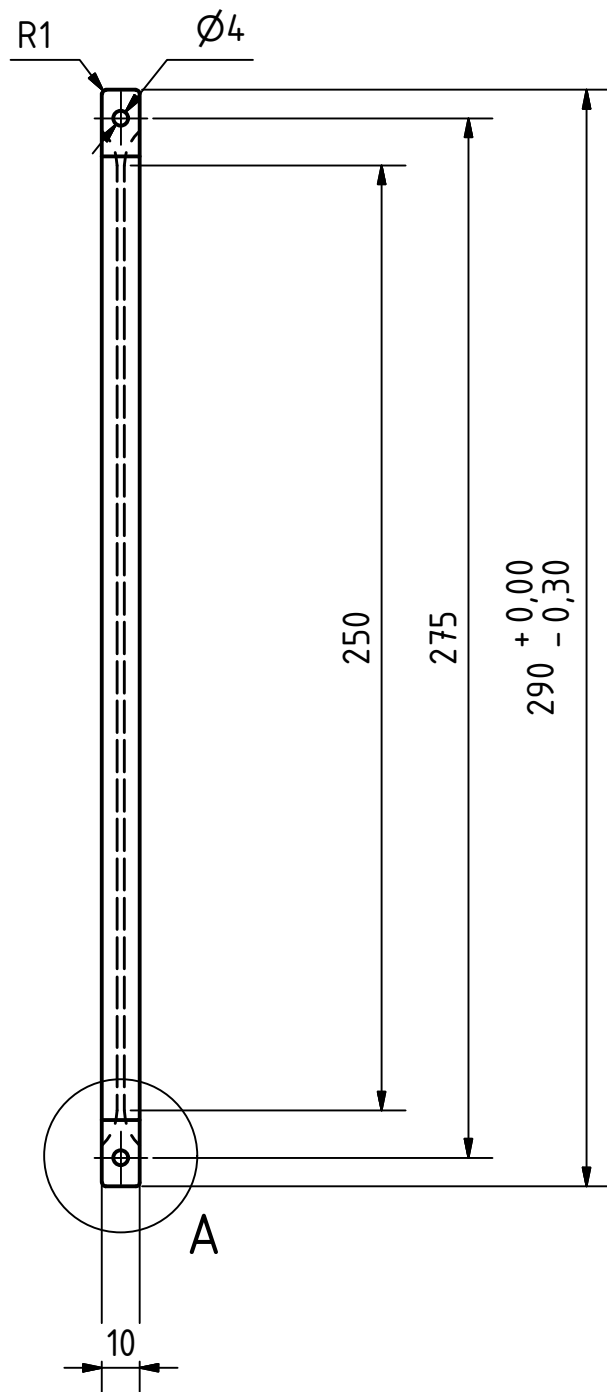


Y (1:1)

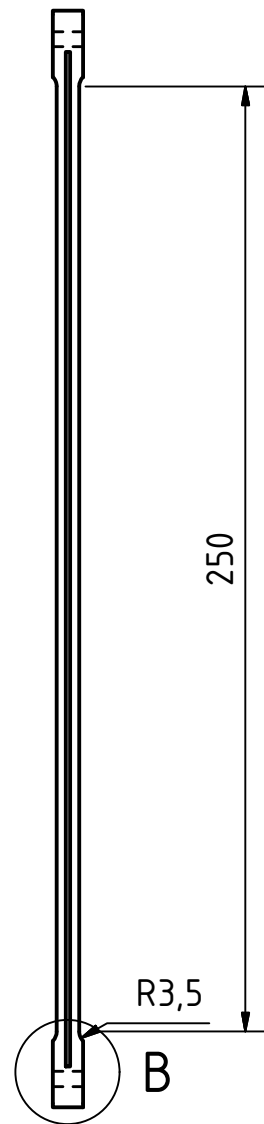
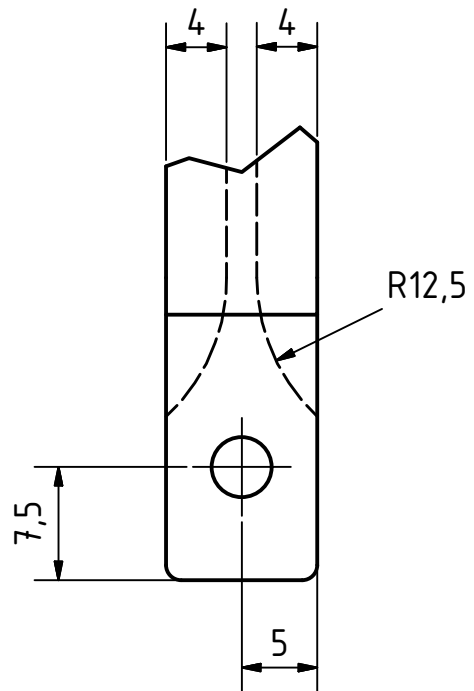


H: Die Knotenscheiben die der Verbindung mit Rahmen oder Kraffteinleitung dienen,  
 müssen ebenfalls aufgebohrt und in 5H7 gerieben werden

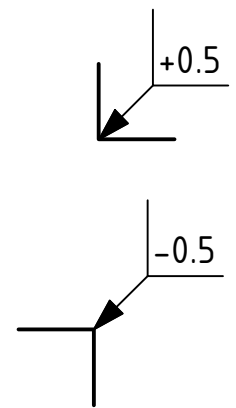
Allgemeintoleranz General tolerances ISO 2768-m		Kanten Edges ISO 13715	Maßstab Scale Material:
Gezeichnet Drawn	Datum Date 25.04.2016	Name Name Benhammou	SFT
Geprüft Checked			709.00000A00819
Norm Status			SE110.98.00.01.000
 <small>GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampweg 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany          Phone: +4940-670854-0, Fax: +4940-670854-42</small>			1 A2



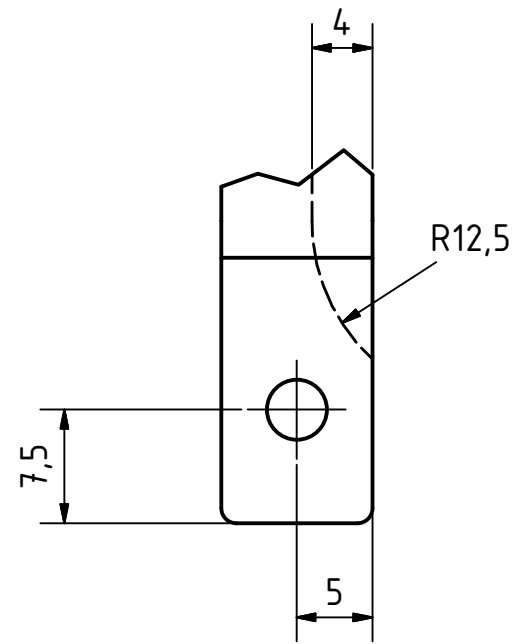
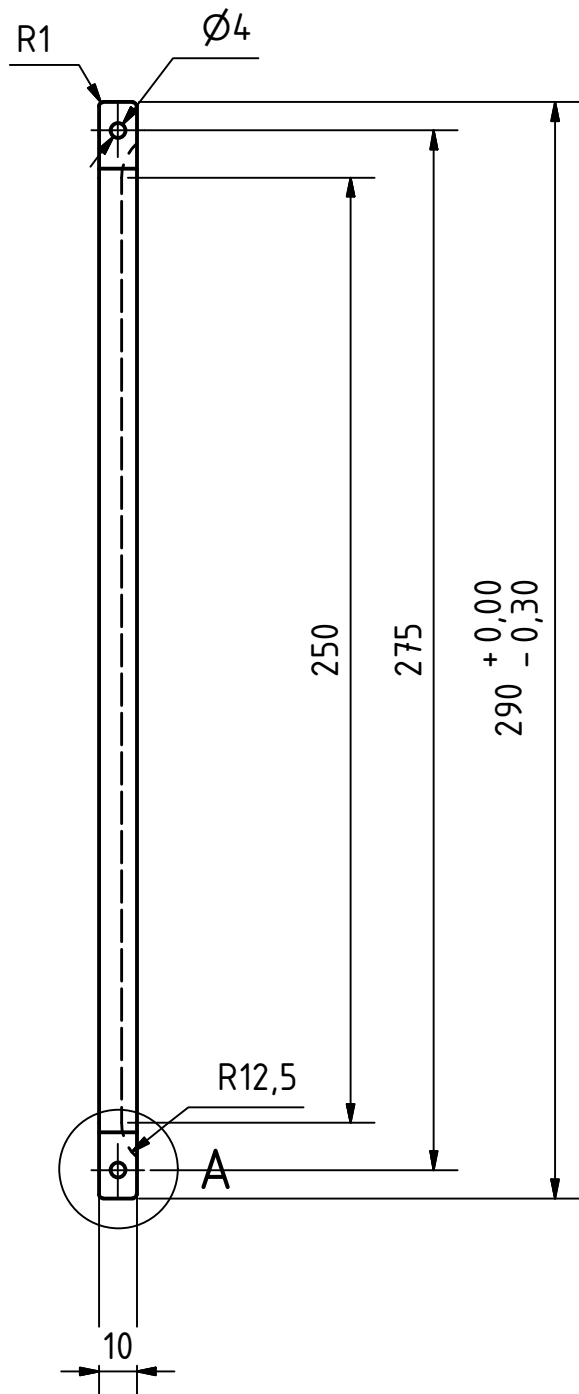
A ( 2 : 1 )



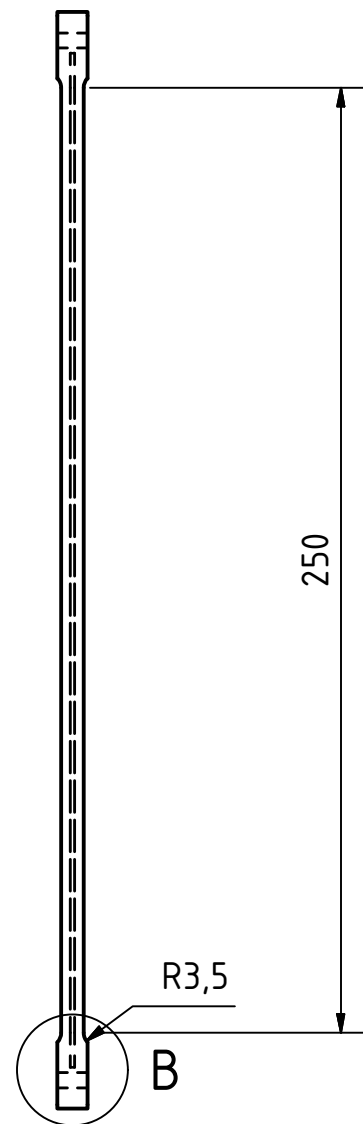
B ( 2 : 1 )



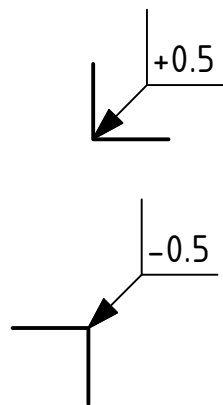
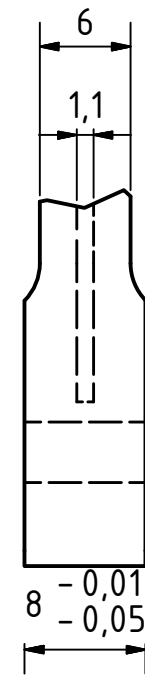
	Allgemeintoleranz General tolerances ISO 2768-m	Kanten Edges ISO 13715	Maßstab Scale		
			Material: 3.3535 AlMg3		
	Gezeichnet Drawn	Datum Date	Name Name	Stab Mitte 474.06353A00100	
	Geprüft Checked	20.04.2016	Wedel		
	Norm Status				
	<b>gunt</b> HAMBURG			SE110.98.10.01.002	1
	GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampring 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany Phone: +4940-670854.0, Fax: +4940-670854.42				A3



A ( 2 : 1 )

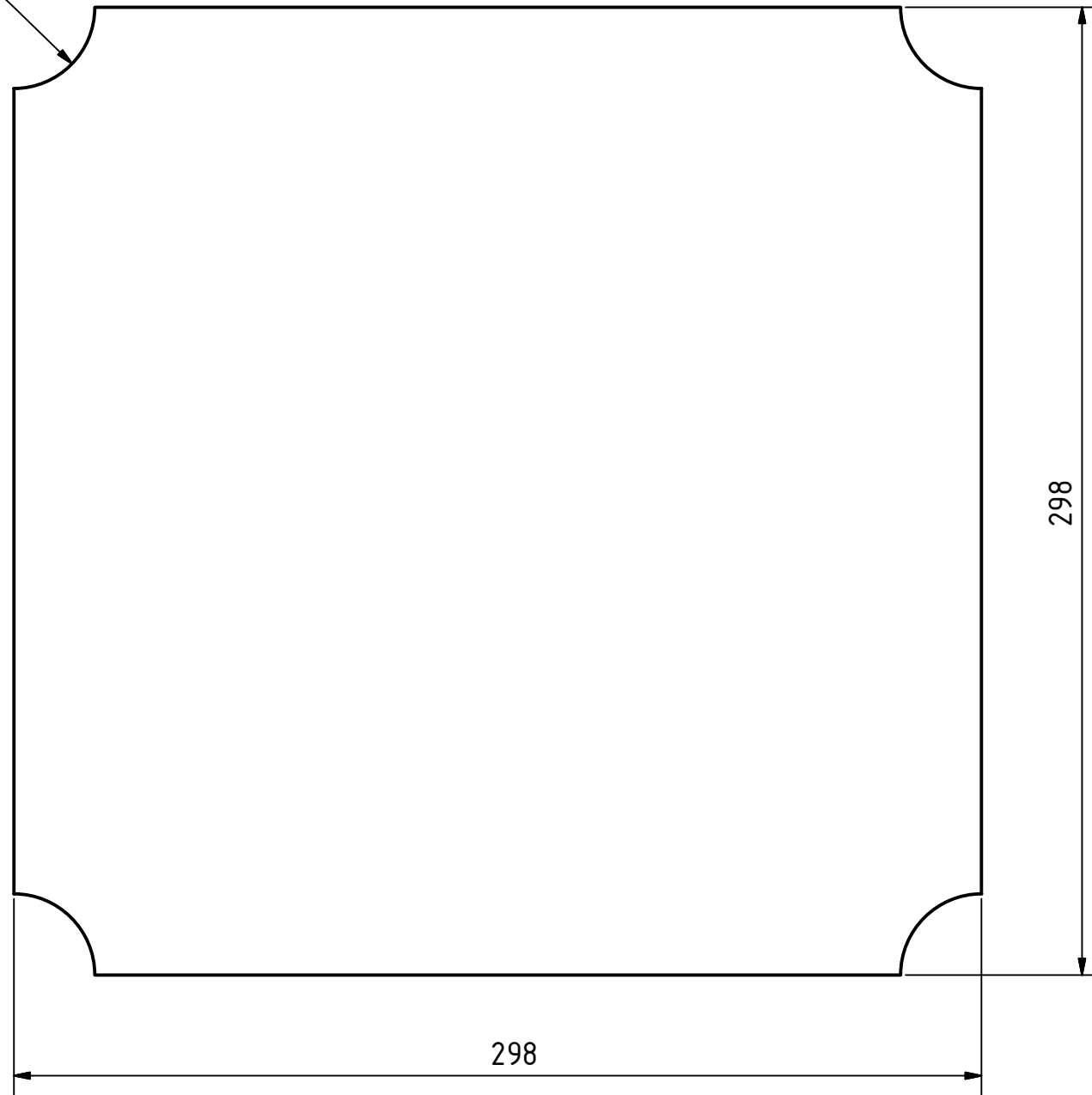


B ( 2 : 1 )



Allgemeintoleranz General tolerances ISO 2768-m		Kanten Edges ISO 13715		Maßstab Scale	
				Material: 3.3535 AlMg3	
Gezeichnet Drawn		Datum Date	Name Name	Stab Rand 474.06353A00101	
Geprüft Checked		20.04.2016	Wedel		
Norm Status					
 <small>GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampring 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany Phone: +4940-670854.0, Fax: +4940-670854.42</small>				SE110.98.10.01.003	
				1 A3	

R25



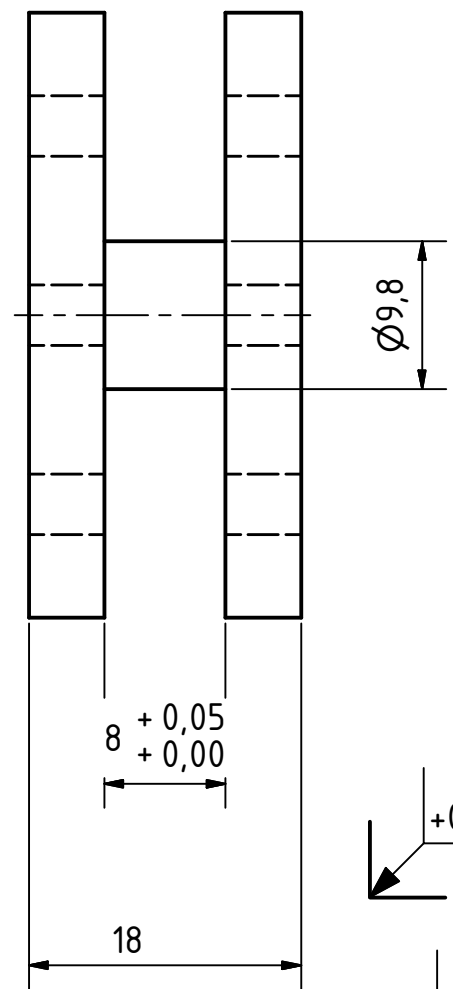
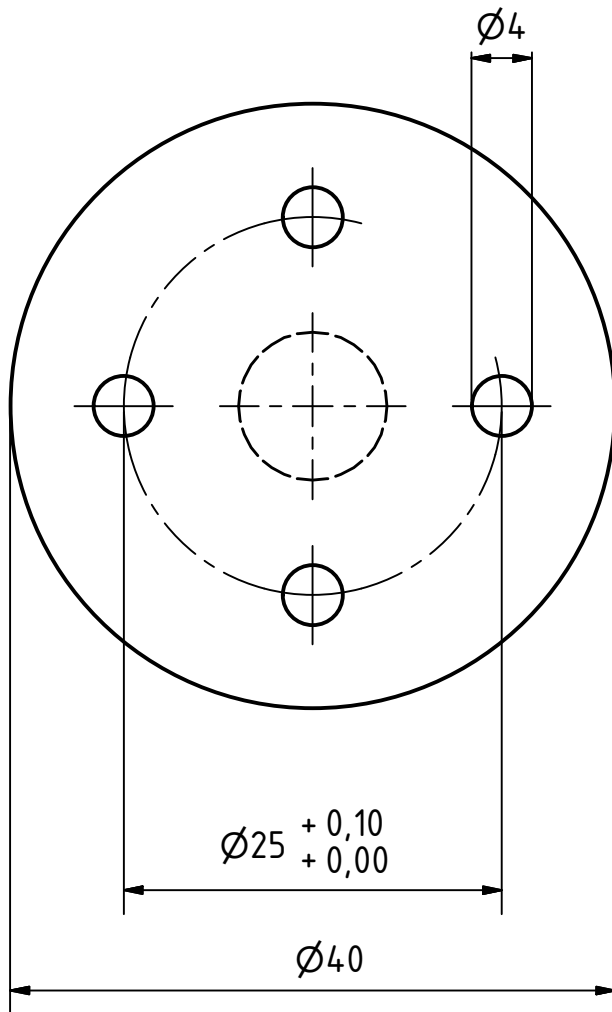
0,8

+0.3

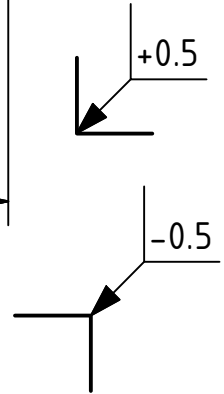
-0.3

Laserzuschnitt!  
Blech muß eben und absolut kratzerfrei sein!

	Allgemeintoleranz General tolerances ISO 2768-m	Kanten Edges ISO 13715	Maßstab Scale	
			Material: 3.3535 AlMg3	
	Gezeichnet Drawn	Datum Date	Name Name	Blech 460.00063A00321
	Gepüft Checked		Wedel	
	Norm Status			
	<b>gunt</b> HAMBURG		SE110.98.10.01.004	1 A3
<small>GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampring 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany Phone: +4940-670854.0, Fax: +4940-670854.42</small>				



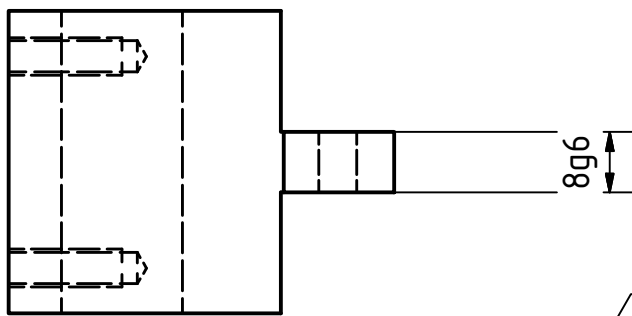
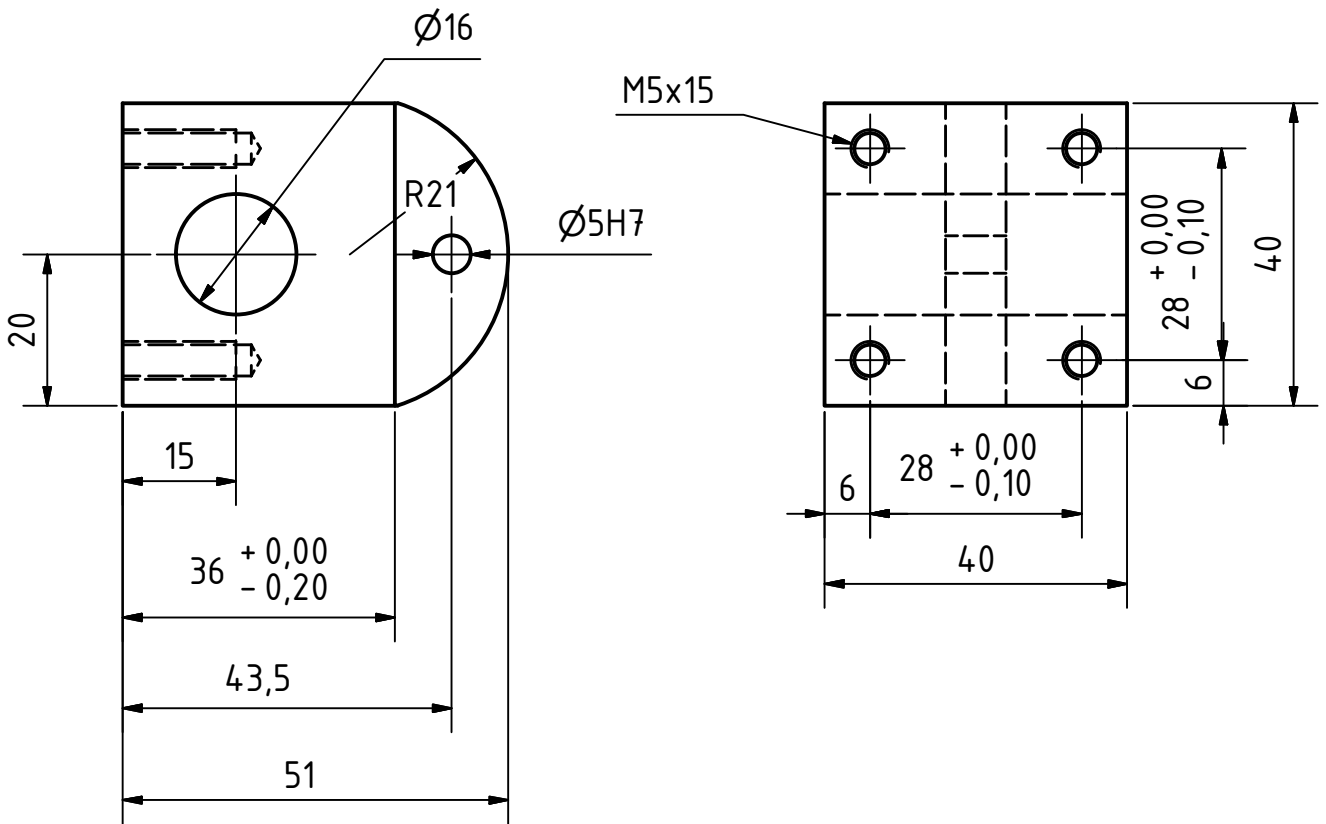
E0/EV1  
Rz16



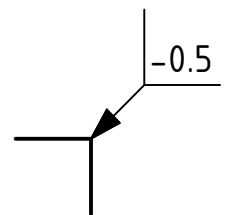
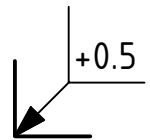
2	01.06.2016	Maß 8mm geändert	Wedel
1	04.05.2016	Dicke geändert	Wedel
NR.	DATUM	ÄNDERUNG	BEARBEITER

REVISIONSVERLAUF

Allgemeintoleranz General tolerances ISO 2768-m		Kanten Edges ISO 13715		Maßstab Scale	Material: 3.3535 AlMg3
Gezeichnet Drawn		Datum Date	Name Name	Knotenscheibe 404.00223A00100	
Geprüft Checked		27.04.2016	Wedel		
Norm Status					
<p>GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampring 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany Phone: +4940-670854.0, Fax: +4940-670854.42</p>				SE110.98.10.01.001	1
					A4



E0/EV1  
Rz16



Allgemeintoleranz  
General tolerances  
ISO 2768-m

Kanten  
Edges  
ISO 13715

Maßstab  
Scale

Material: 3.3535 AlMg3

Gezeichnet  
Drawn  
Geprüft  
Checked  
Norm  
Status

Datum  
Date  
12.04.2016

Name  
Name  
Wedel

Verbindung Klemmung

480.05223A00103

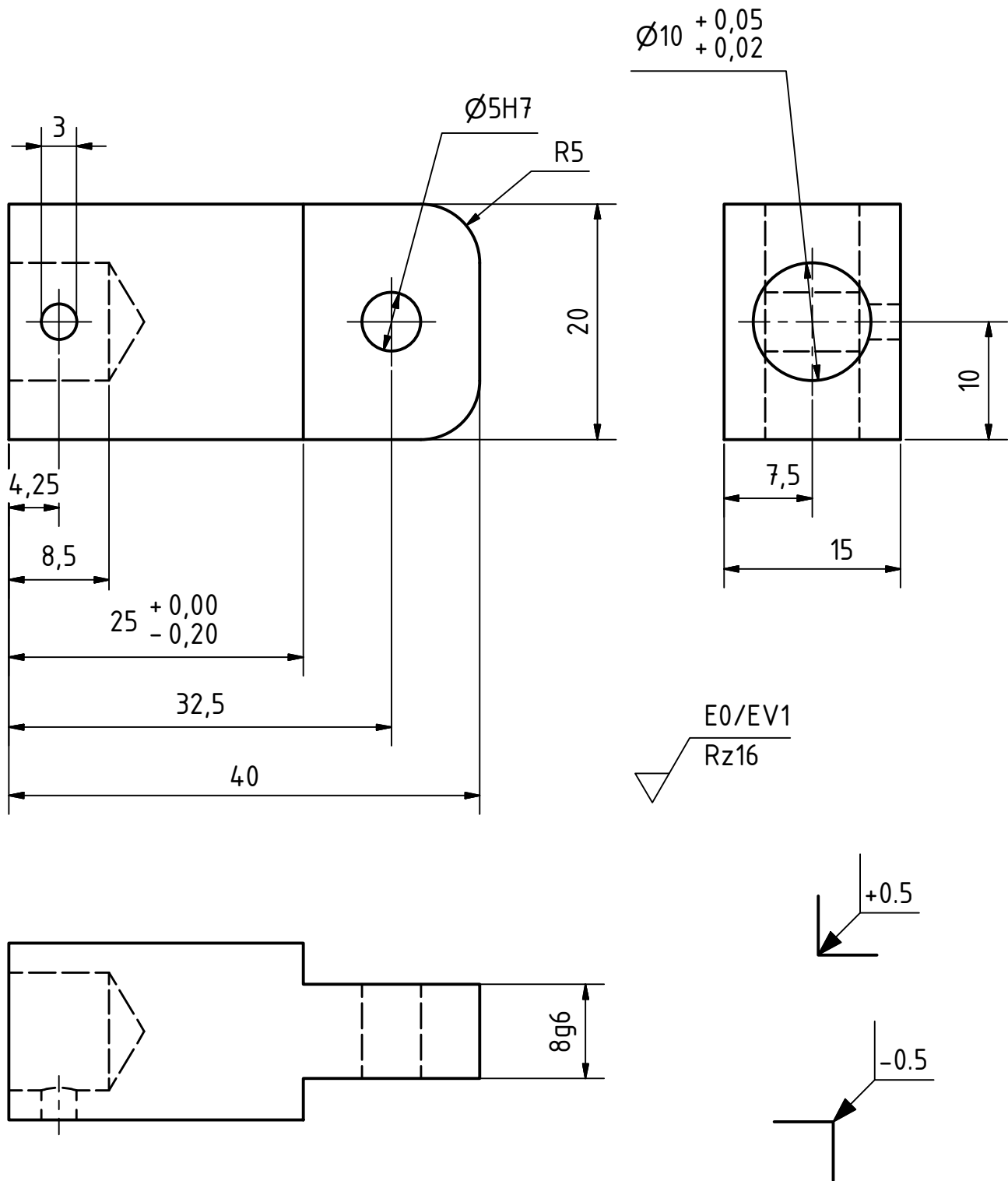
**gunt**  
HAMBURG

GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampring 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany  
Phone: +4940-670854.0, Fax: +4940-670854.42

SE110.98.10.02.001

1

A4



Allgemeintoleranz  
General tolerances  
ISO 2768-m

Kanten  
Edges  
ISO 13715

Maßstab  
Scale

Material: 3.3535 AlMg3

Gezeichnet  
Drawn  
Geprüft  
Checked  
Norm  
Status

Datum  
Date  
12.04.2016

Name  
Name  
Wedel

Verbindung Kraft

480.15123A00102

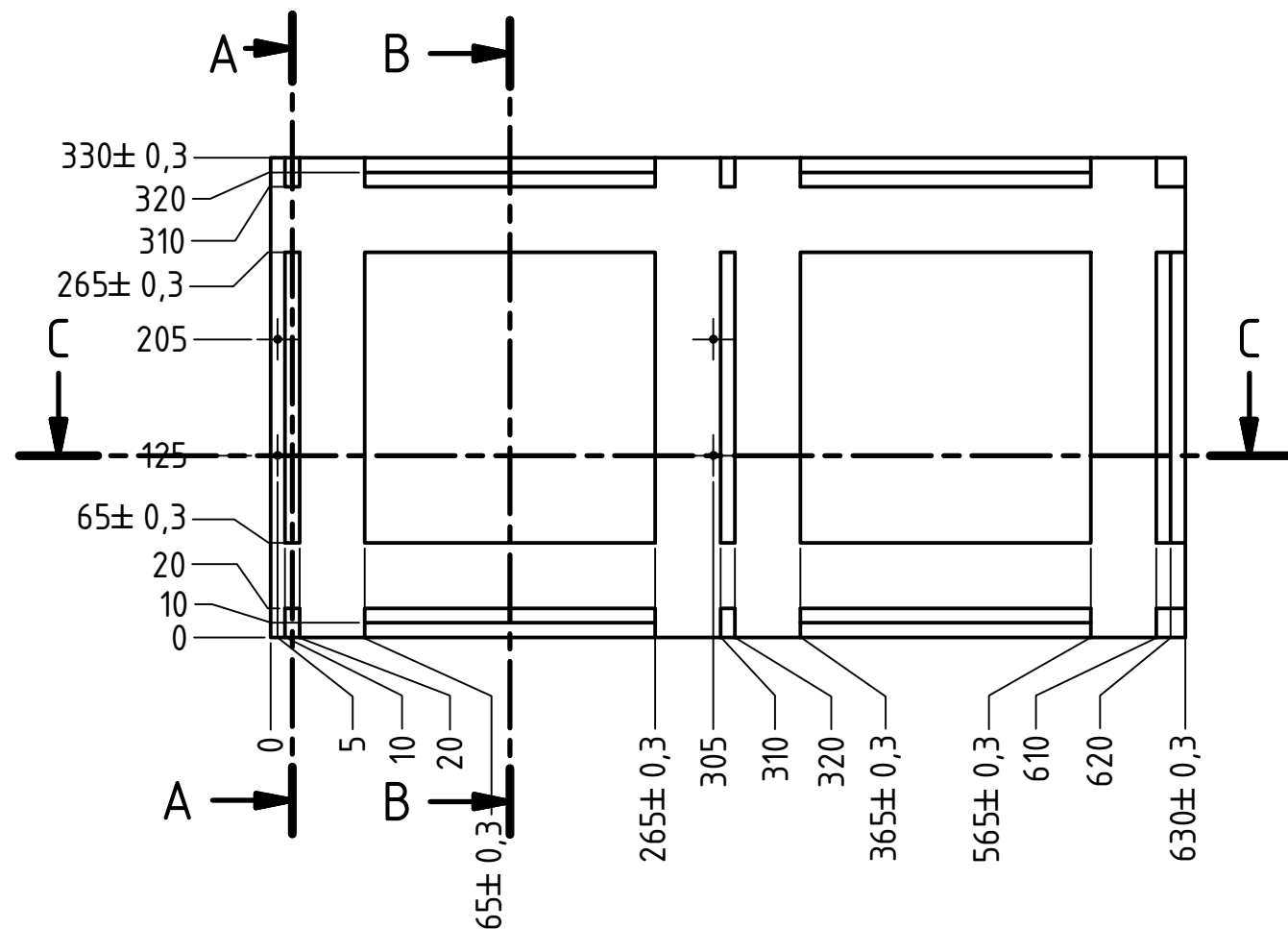
**gunt**  
HAMBURG

GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampring 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany  
Phone: +4940-670854.0, Fax: +4940-670854.42

SE110.98.10.03.001

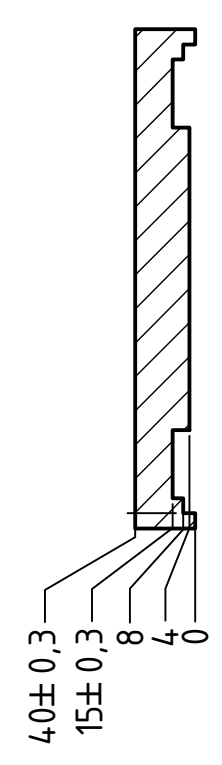
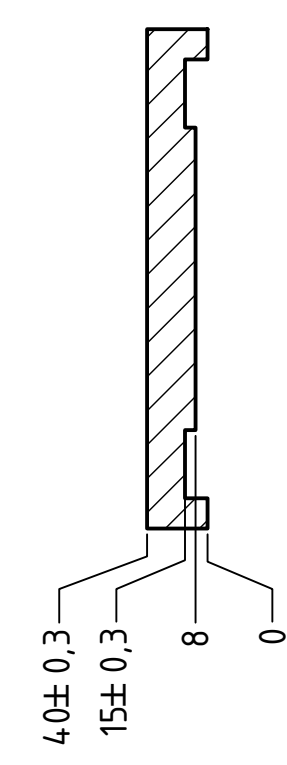
1

A4

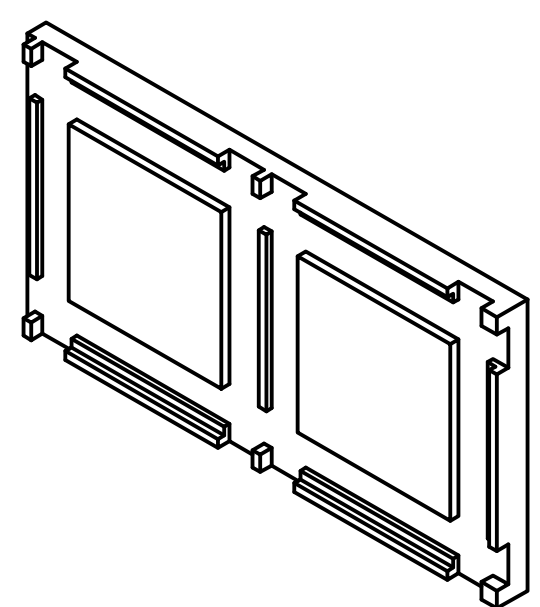
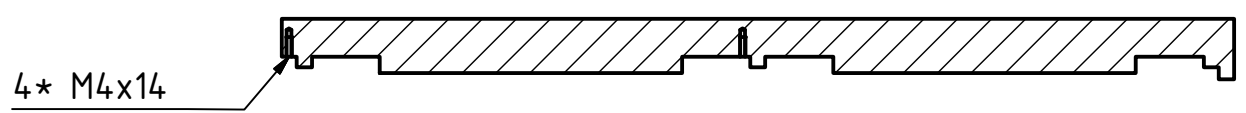


A-A ( 1 : 5 )

B-B ( 1 : 5 )



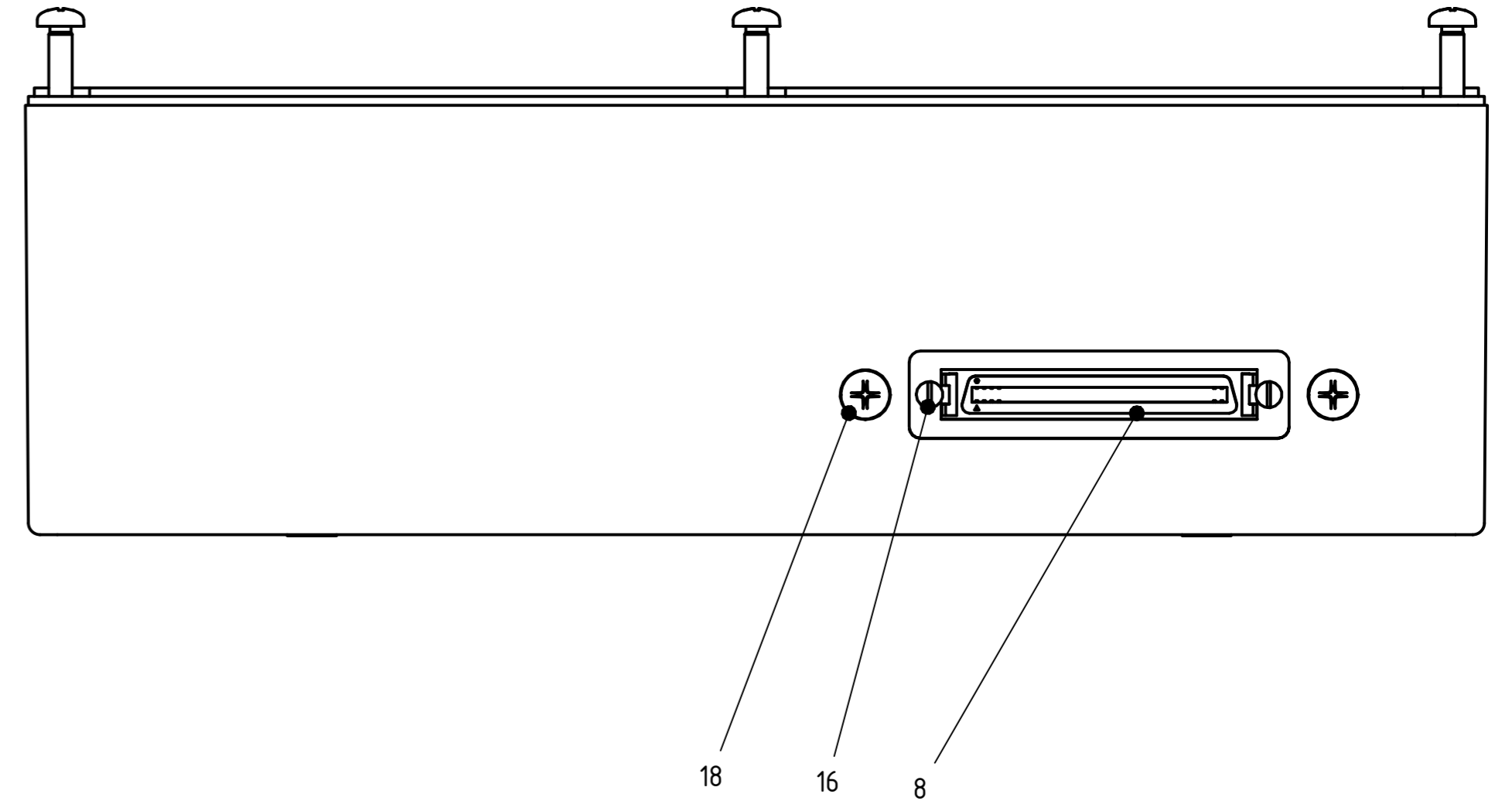
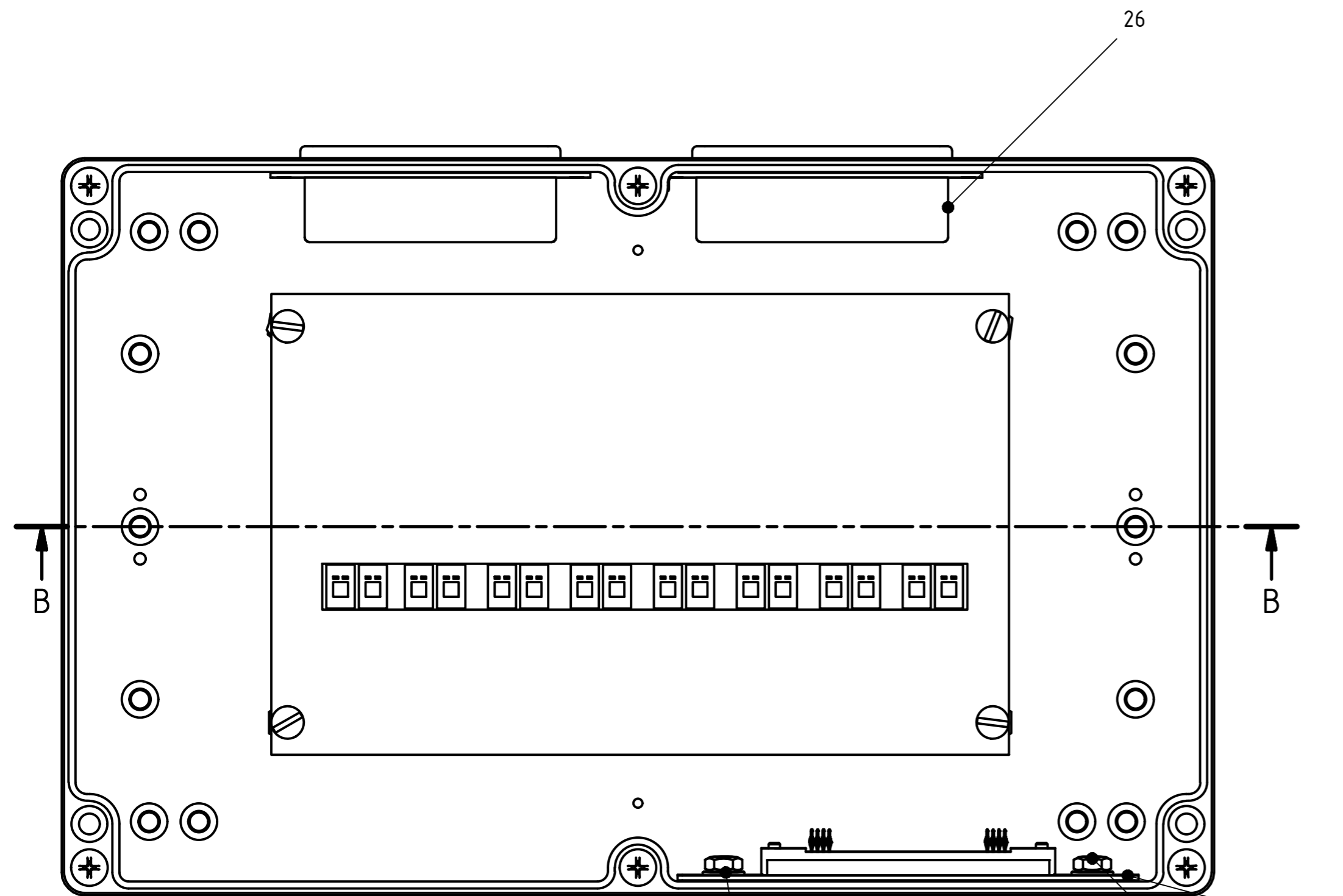
C-C ( 1 : 5 )



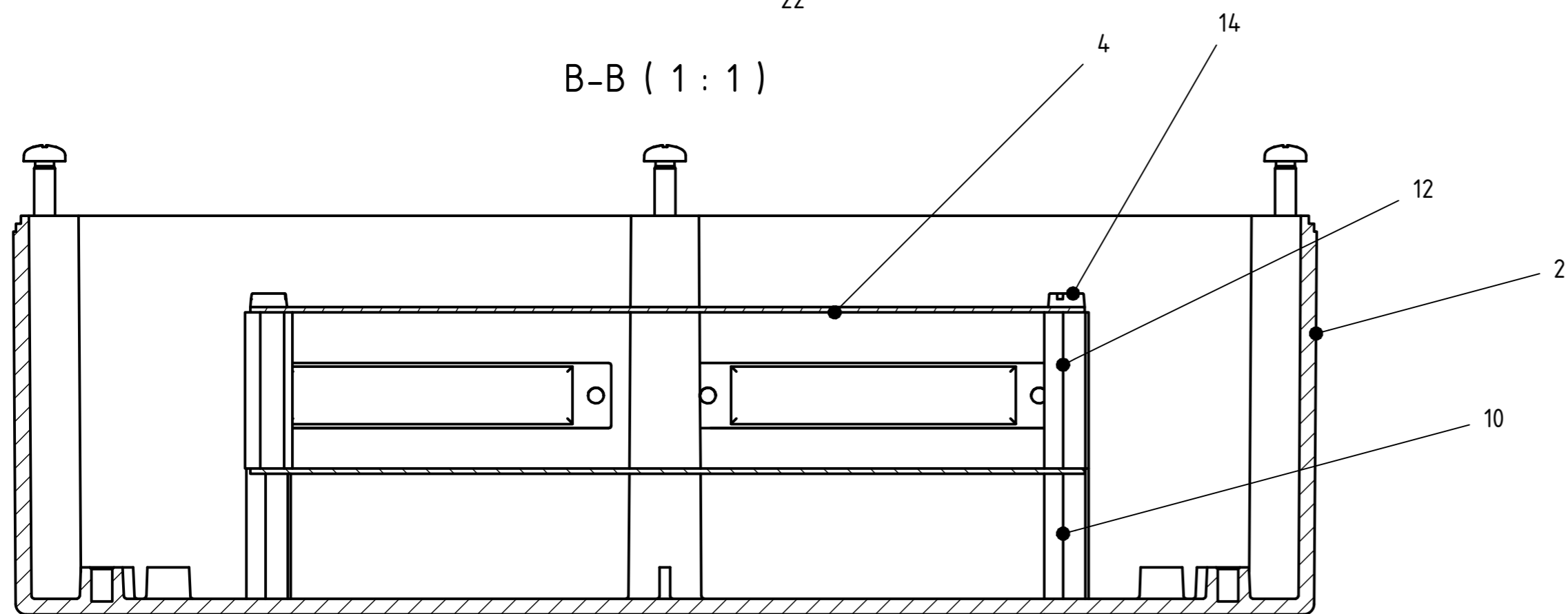
Zulässige Toleranz für alle Maße ± 0,01


Allgemeintoleranz General tolerances ISO 2768-m		Kanten Edges ISO 13715		Maßstab Scale
				Material: 3.3535 AlMg3
Gezeichnet Drawn		Datum Date	Name Name	Grundplatte 460.03173A00100
Geprüft Checked		18.04.2016	Wedel	
Norm Status				
 GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampring 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany Phone: +4940-670854.0, Fax: +4940-670854.42				SE110.98Montage
				1 A3





B-B (1:1)



Allgemeintoleranz General tolerances ISO 2768-m		Kanten Edges ISO 13715	Maßstab Scale Material:
Gezeichnet Drawn	Datum Date 25.05.2016	Name Name Wedel	DMS-Anschlussbox 713.00000A00151
Geprüft Checked			
Norm Status			SE110.98.00.05.000
 <small>GUNT Gerätebau GmbH - Hanskampring 15-17, 22885 Barsbüttel, Germany Phone: +4940-670854-0, Fax: +4940-670854-42</small>			1 A2

## Anhang 5

### Versuch 2

BOX 1		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Kraft in N									
250	UA in mV/V	-0,176	0,007				0,054	0,176	0,129
200	UA in mV/V	-0,141	0,006				0,043	0,141	0,103
150	UA in mV/V	-0,106	0,004				0,032	0,106	0,077
100	UA in mV/V	-0,070	0,003				0,022	0,070	0,052
		1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16
Kraft in N	UA in mV/V			Nullstab	Nullstab				
250	UA in mV/V	-0,115	-0,129			0,115			
200	UA in mV/V	-0,092	-0,103			0,092			
150	UA in mV/V	-0,069	-0,077			0,069			
100	UA in mV/V	-0,046	-0,052			0,046			
BOX 2		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
Kraft in N				Nullstab				Nullstab	
250	UA in mV/V	-0,054	-0,068						0,068
200	UA in mV/V	-0,043	-0,055						0,055
150	UA in mV/V	-0,032	-0,041						0,041
100	UA in mV/V	-0,022	-0,027						0,027
		2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16
Kraft in N	UA in mV/V								
250	UA in mV/V	-0,007	0,054				0,007	0,007	0,054
200	UA in mV/V	-0,006	0,043				0,006	0,006	0,043
150	UA in mV/V	-0,004	0,032				0,004	0,004	0,032
100	UA in mV/V	-0,003	0,022				0,003	0,003	0,022

### Versuch 4

BOX 1		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
	Abstand	x=35	z=35				z=265	x=35	x=265
Lasteinleitung bei x=600mm	Kraft in N	-470,83	29,17				220,83	470,83	279,17
	UA in mV/V	-0,115	0,007				0,054	0,115	0,068
Lasteinleitung bei x=300mm	Kraft in N	-220,83	29,17				220,83	220,83	29,17
	UA in mV/V	-0,054	0,007				0,054	0,054	0,007
		1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16
	Abstand	x=335	x=265	z=35	z=265	x=335			
Lasteinleitung bei x=600mm	Kraft in N	-220,83	-279,17	0,00	0,00	220,83			
	UA in mV/V	-0,054	-0,068	0,000	0,000	0,054			
Lasteinleitung bei x=300mm	Kraft in N	0	-29,17	220,83	29,17	0			
	UA in mV/V	0	-0,007	0,054	0,007	0			
BOX 2		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
	Abstand	x=635	x=565	z=35				z=265	x=565
Lasteinleitung bei x=600mm	Kraft in N	0	-29,17	220,83	0	0	0	29,17	29,17
	UA in mV/V	0	-0,007	0,054	0	0	0	0,007	0,007
Lasteinleitung bei x=300mm	Kraft in N	0	0	0	0	0	0	0	0
	UA in mV/V	0	0	0	0	0	0	0	0
		2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16
	Abstand	x=865	z=35				z=265	x=865	x=635
Lasteinleitung bei x=600mm	Kraft in N	0	0	0	0	0	0	0	0
	UA in mV/V	0	0	0	0	0	0	0	0
Lasteinleitung bei x=300mm	Kraft in N	0	0	0	0	0	0	0	0
	UA in mV/V	0	0	0	0	0	0	0	0

## Anhang 6

### Messwerte Stäbe

#### Versuch 1

Box 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Messwert	-0,144	0,000	0,007	0,023	0,044	0,046	0,151	0,060
Messwert	-0,146	0,002	0,006	0,021	0,043	0,044	0,150	0,060
Messwert	-0,149	-0,001	0,006	0,021	0,043	0,044	0,150	0,061
	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16
Messwert	-0,073	-0,081	0,006	0,001	0,066	0,081	0,085	-0,016
Messwert	-0,071	-0,079	0,005	0,001	0,060	0,080	0,079	-0,021
Messwert	-0,073	-0,082	0,007	-0,001	0,056	0,081	0,082	-0,021
Box 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
Messwert	-0,028	-0,029	0,005	-0,032	-0,005	-0,021	0,005	0,024
Messwert	-0,029	-0,032	0,004	-0,034	-0,007	-0,021	0,005	0,022
Messwert	-0,027	-0,029	0,005	-0,031	-0,005	-0,017	0,002	0,023
	2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16
Messwert	0,000	0,056	0,034	0,034	0,022	?	0,002	0,023
Messwert	0,001	0,055	0,037	0,033	0,022	?	0,001	0,022
Messwert	0,000	0,057	0,035	0,035	0,022	?	0,004	0,021

#### Versuch 2

Box 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Kraft in N								
100	-0,062	-0,001	0,005	0,002	0,009	0,017	0,061	0,017
150	-0,089	-0,001	0,005	0,005	0,013	0,026	0,09	0,029
200	-0,118	-0,001	0,006	0,01	0,022	0,034	0,117	0,044
250	-0,146	-0,001	0,007	0,024	0,044	0,044	0,149	0,061
	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16
Kraft in N								
100	-0,027	-0,031	-0,001	0,002	0,016 ?		0,029	-0,008
150	-0,042	-0,045	0	0,001	0,023 ?		0,043	-0,015
200	-0,057	-0,062	0,002	0,002	0,043 ?		0,054	-0,018
250	-0,076	-0,078	0,006	0,001	0,056		0,082	-0,018
Box 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
Kraft in N								
100	-0,009	-0,009	0,001	0,005	0,011	0,004	0,001	0,006
150	-0,013	-0,013	0,002	0,001	0,012	0,002	0,004	0,013
200	-0,018	-0,02	0,004	-0,005	0,009	-0,001	0,004	0,018
250	-0,026	-0,028	0,006	-0,029	-0,005	-0,015	0,006	0,024
	2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16
Kraft in N								
100	0	0,023	0,011	0,013	0,006 ?		0	0,002
150	0	0,035	0,015	0,02	0,009 ?		0,002	0,006
200	0	0,049	0,022	0,028	0,016 ?		0,002	0,015
250	0,001	0,06	0,034	0,033	0,021 ?		0,002	0,021

### Versuch 3

Box 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Messwert	0,177	0,022	0,018	0,022	0,017	-0,034	-0,138	-0,021
Messwert								
Messwert								
	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16
Messwert	0,114	0,116	-0,005	0,005	-0,035	0,039	-0,063	-0,005
Messwert								
Messwert								
Box 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
Messwert	0,037	0,042	-0,004	-0,117	-0,184	-0,072	0,005	-0,012
Messwert								
Messwert								
	2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16
Messwert	-0,002	-0,044	-0,085	-0,094	-0,039	0,000	0,000	0,000
Messwert								
Messwert								

### Versuch 4

Box 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
250N								
x= 600mm	-0,092	-0,01	0,006	-0,002	0,013	0,046	0,098	0,024
x= 300mm	-0,044	-0,013	0,007	-0,021	-0,005	0,056	0,045	0,004
	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16
250N								
x= 600mm	-0,031	-0,038	0	0,002	0,018	?	0,048	-0,011
x= 300mm	0	-0,004	0,046	0	0	?	0,037	0,018
Box 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
250N								
x= 600mm	0,004	-0,001	0,039	0,016	0,033	0,01	0,002	0,001
x= 300mm	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16
250N								
x= 600mm	0	0	0	0	0	0	0	0
x= 300mm	0	0	0	0	0	0	0	0

### Messwerte Hautfeld

Versuch 1				
Box 1	1.3	1.4	1.5	
Messwert	0,004	0,002	-0,006	
Messwert	0,005	0,004	-0,005	
Messwert	0,004	0,002	-0,005	
Box 2	2.3	2.4	2.5	2.6
Messwert		0,007	0,022	-0,001
Messwert		0,006	0,024	0,000
Messwert		0,005	0,022	-0,002
	2.11	2.12	2.13	2.14
Messwert	0,011	0,031	0,002	
Messwert	0,012	0,031	0,000	
Messwert	0,012	0,029	-0,002	

Versuch 3				
Box 1	1.3	1.4	1.5	
Messwert	0,010	0,017	-0,010	
Messwert	0,009	0,016	-0,010	
Box 2	2.3	2.4	2.5	2.6
Messwert		-0,002	0,005	0,035
Messwert		-0,002	0,004	0,034
	2.11	2.12	2.13	2.14
Messwert	-0,016	-0,028	0,005	
Messwert	-0,015	-0,028	0,005	

Versuch 4				
Box 1	1.3	1.4	1.5	
Messwert	0,005	-0,006	-0,001	
Messwert	0,006	-0,006	0,000	

Box 2	2.3	2.4	2.5	2.6
Messwert		0,006	0,028	-0,002
Messwert		0,005	0,027	-0,005