

**Hochschule Ruhr West**  
**Institut Maschinenbau**



**Bachelorarbeit**

zur Erlangung des Grades eines  
Bachelor of Science  
Maschinenbau

**Experimentelle Verzugsmessungen von  
ausgesteiften Baufeldern**

Eingereicht bei

Erstprüfer: Prof. Dr. -Ing. Christian Ludwig

Zweitprüferin: Larissa Schönfeld (M.Sc.)

von

Name Eldin Glogić

Heinrichstr. 24

45470 Mülheim an der Ruhr

eldin.glogic@stud.hs-ruhrwest.de

Matrikelnummer: 10001271

Bearbeitungszeit-  
raum: 14.03.2022 - 06.06.2022

# Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit



HOCHSCHULE RUHR WEST  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit

für: Eldin Glogic  
Matr.-Nr.: 10001271

### Experimentelle Verzugsmessungen von ausgesteiften Beulfeldern

Imperfektionen sind ein maßgebender Einflussfaktor bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen, welche bei der Herstellung von Stahlbauteilen entstehen. Bei der Produktion geschweißter Konstruktionen ergeben sich unerwünschte geometrische (z. B. Verzug) und strukturelle (z. B. Eigenspannungen) Imperfektionen. Im Rahmen der Nachweisführung stabilitätsgefährdeter Bauteile sind diese zwingend zu berücksichtigen. Eine korrekte Abbildung der Imperfektionen ist daher besonders bei einer FE-Simulation maßgebend.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen Kleinteilversuche an längsausgesteiften Beulfeldern durchgeführt werden. Dabei stehen die Herstellung der geschweißten Plattenbauteilen sowie die Messung von geometrischen Imperfektionen im Vordergrund. Zur Messung und Erfassung von geometrischen Imperfektionen sind geeignete Messverfahren zu wählen. Gleichzeitig soll eine Übersicht der einzelnen Messungen in Abhängigkeit der vorgegebenen Parameter erstellt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zu vergleichen und nach Literatur und Normung zu bewerten.

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

- kurze Vorstellung und Erläuterung von geometrischen Imperfektionen in Literatur und Normen
- Vorstellung geeigneter Messverfahren (mindesten vier) und Auswahl von mindestens zwei Verfahren für die Versuchsmessung
- Erstellung einer geeigneten Schweißanweisung inkl. Schweißfolgeplan
- Herstellung von ausgesteiften Plattenbauteilen in Form von maßstabsgetreue Kleinteilversuche
  - o 2 geometrisch unterschiedliche Bauteile mit Flachlängssteifen
  - o 2 geometrisch unterschiedliche Bauteile mit Trapezlängssteifen
- Verzugsmessung (Form und Stichmaß) mithilfe eines optischen Messsystems (Limes 3D) sowie eine Auswahl und Prüfung von mindestens einem weiteren Messverfahren (Messungen erfolgen jeweils nach jeder Längssteife)
- Darstellung und Dokumentation von gemessenen geometrischen Imperfektionen inkl. Erläuterung auftretender Effekte
- Gegenüberstellung (Form und Stichmaß) und Bewertung (Abweichungen) zwischen gemessenen geometrischen Imperfektionen und den geometrischen Imperfektionen nach Literatur und Normen

## Inhaltsübersicht

1	Einleitung .....	1
2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
3	Theoretische Grundlagen .....	3
4	Vorstellung der gewählten Messverfahren .....	8
5	Schweißanweisung und Schweißfolgeplan .....	17
6	Herstellungsprozess von ausgesteiften Beulfeldern .....	20
7	Experimentelle Verzugsmessungen der Steifen .....	29
8	Gegenüberstellung und Bewertung mit Literatur und Norm .....	45
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	48
	Literaturverzeichnis .....	50
	Anhang A: Messwerte für Validierung der Beulmessung .....	52
	Anhang B: Simulation der Flachlängssteife .....	56
	Anhang C: Verworfenne Schweißfolgen .....	58
	Anhang D: Baugruppenzeichnungen (Flachlängssteifen).....	63
	Anhang E: Baugruppenzeichnungen (Trapezlängssteifen).....	65
	Anhang F: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 1).....	67
	Anhang G: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 2).....	70
	Anhang H: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 3).....	79
	Anhang I: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 4).....	83
	Anhang J: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 1).....	87
	Anhang K: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 2).....	91
	Anhang L: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 3).....	95
	Anhang M: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 4).....	99
	Anhang N: Graphische Auswertung der Messung mit dem Laserscanner	103

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit .....</b>	<b>II</b>
<b>Inhaltsübersicht.....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>	<b>2</b>
<b>3 Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>3</b>
3.1 Vorstellung und Erläuterung von Imperfektionen .....	3
3.1.1 Geometrische Imperfektionen .....	3
3.1.2 Beulformen.....	4
3.1.3 Beulfelder .....	6
3.2 Stand der Technik und der Nachweis von Plattenbeulen.....	6
3.3 Definition und Anwendung von Steifen.....	7
<b>4 Vorstellung der gewählten Messverfahren .....</b>	<b>8</b>
4.1 Limes 3D .....	8
4.1.1 Experimentelle Vorversuche mit dem Limes 3D Messsystem.....	11
4.1.1.1 Vorversuch 1 .....	11
4.1.1.2 Vorversuch 2 .....	13
4.2 3D Laserscanner.....	16
4.3 Konventionelle Messverfahren .....	16
<b>5 Schweißanweisung und Schweißfolgeplan .....</b>	<b>17</b>
5.1 Schweißanweisung .....	17
5.2 Schweißfolgeplan.....	18
<b>6 Herstellungsprozess von ausgesteiften Beulfeldern .....</b>	<b>20</b>
6.1 Herstellung von zwei geometrisch unterschiedlichen Bauteilen mit Flachlängssteifen .....	20
6.1.1 Fertigungszeichnung der Flachlängssteifen zu Versuch 1 .....	21
6.1.2 Herstellungsprozess Versuch 1.....	21
6.1.3 Fertigungszeichnung der Flachlängssteifen zu Versuch 2 .....	22
6.1.4 Herstellungsprozess Versuch 2.....	23

6.2	Herstellung von zwei geometrisch unterschiedlichen Bauteilen mit Trapezlängssteifen .....	25
6.2.1	Fertigungszeichnung der Trapezlängssteifen zu Versuch 3 .....	25
6.2.2	Herstellungsprozess Versuch 3 .....	26
6.2.3	Fertigungszeichnung der Trapezlängssteifen zu Versuch 4 .....	27
6.2.4	Herstellungsprozess Versuch 4 .....	28
<b>7</b>	<b>Experimentelle Verzugsmessungen der Steifen .....</b>	<b>29</b>
7.1	Vorüberlegungen für plausible Messgegenüberstellungen .....	29
7.1.1	Messdurchführung .....	29
7.2	Messung mit Limes 3D .....	30
7.2.1	Messwerte .....	30
7.2.1.1	Versuch 1 (Messwerte der Flachlängssteifen) .....	31
7.2.1.2	Versuch 2 (Messwerte der Flachlängssteifen) .....	32
7.2.1.3	Versuch 3 (Messwerte der Trapezlängssteifen) .....	33
7.2.1.4	Versuch 4 (Messwerte der Trapezlängssteifen) .....	34
7.3	Messung mit selbstgewähltem Messmittel (Laserscanner) .....	35
7.3.1	Messwerte .....	35
7.3.1.1	Versuch 1 (Messwerte der Flachlängssteifen) .....	35
7.3.1.2	Versuch 2 (Messwerte der Flachlängssteifen) .....	36
7.3.1.3	Versuch 3 (Messwerte der Trapezlängssteifen) .....	36
7.3.1.4	Versuch 4 (Messwerte der Trapezlängssteifen) .....	36
7.4	Messung mit direktem konventionellen) Messmitteln (Tiefenmessschieber, Messlineal, Winkelmesser und Wasserwaage, etc.) .....	37
7.4.1	Messwerte .....	37
7.4.1.1	Versuch 1 (Messwerte der Flachlängssteifen) .....	37
7.4.1.2	Versuch 2 (Messwerte der Flachlängssteifen) .....	38
7.4.1.3	Versuch 3 (Messwerte der Trapezlängssteifen) .....	39
7.4.1.4	Versuch 4 (Messwerte der Trapezlängssteifen) .....	40
7.5	Diskussion und Auswahl des am geeignetsten Messverfahren .....	41
7.6	Gegenüberstellung und Bewertung der Messverfahren .....	44
<b>8</b>	<b>Gegenüberstellung und Bewertung mit Literatur und Norm .....</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>48</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>50</b>
	<b>Anhang A: Messwerte für Validierung der Beulmessung .....</b>	<b>52</b>
	<b>Anhang B: Simulation der Flachlängssteife .....</b>	<b>56</b>
	<b>Anhang C: Verworfenne Schweißfolgen .....</b>	<b>58</b>
	<b>Anhang D: Baugruppenzeichnungen (Flachlängssteifen) .....</b>	<b>63</b>
	<b>Anhang E: Baugruppenzeichnungen (Trapezlängssteifen) .....</b>	<b>65</b>

---

<b>Anhang F: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 1).....</b>	<b>67</b>
<b>Anhang G: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 2).....</b>	<b>70</b>
<b>Anhang H: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 3).....</b>	<b>79</b>
<b>Anhang I: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 4).....</b>	<b>83</b>
<b>Anhang J: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 1).....</b>	<b>87</b>
<b>Anhang K: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 2).....</b>	<b>91</b>
<b>Anhang L: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 3).....</b>	<b>95</b>
<b>Anhang M: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 4).....</b>	<b>99</b>
<b>Anhang N: Graphische Auswertung der Messung mit dem Laserscanner</b>	<b>103</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beulformen und deren Erscheinungshäufigkeiten in %.....	5
Abbildung 2:	Beulformen der Vorverformungen.....	5
Abbildung 3:	Interpretationsmöglichkeiten nach Zizza.....	6
Abbildung 4:	Bildkorrelationssystem mit 3 Kameras.....	9
Abbildung 5:	Feines Speckle-Muster für Messungen im Nahbereich.....	10
Abbildung 6:	Grobes Speckle-Muster für Messungen im Fernbereich.....	10
Abbildung 7:	Einstellung des Triangulationswinkels.....	10
Abbildung 8:	Simulation von Beulung der Grundplatte auf Papier.....	12
Abbildung 9:	Auswertung der Beulung.....	12
Abbildung 10:	Simulation von der Bewegung der Flachlängssteife.....	13
Abbildung 11:	Auswertung der Flachlängssteife.....	14
Abbildung 12:	3D-Auswertung der Flachlängssteife.....	14
Abbildung 13:	Graphische Darstellung der Verdrehung der Steife.....	15
Abbildung 14:	Auswertung der exportierten STL-Dateien in Cloudcompare.....	15
Abbildung 15:	Vorbereitung der Schweißnähte.....	20
Abbildung 16:	Fertigungszeichnung Flachlängssteife Versuch 1.....	21
Abbildung 17:	Verzug der Grundplatte nach Herstellung der zweiten Steife.....	21
Abbildung 18:	Fertige Herstellung Plattenbauteil des ersten Versuchs.....	22
Abbildung 19:	Fertigungszeichnung Flachlängssteife Versuch 2.....	22
Abbildung 20:	Verzug der Grundplatte nach Herstellung der zweiten Steife.....	23
Abbildung 21:	Festeinspannung des Plattenbauteils.....	24
Abbildung 22:	Fertige Herstellung Plattenbauteil aus Versuch 2.....	25
Abbildung 23:	Fertigungszeichnung Trapezlängssteife Versuch 3.....	26
Abbildung 24:	Verzug der Grundplatte nach Herstellung der zweiten Steife.....	26
Abbildung 25:	Fertige Herstellung Plattenbauteil aus Versuch 3.....	27
Abbildung 26:	Fertigungszeichnung Trapezlängssteife Versuch 4.....	27
Abbildung 27:	Verzug der Grundplatte nach Herstellung der zweiten Steife.....	28
Abbildung 28:	Fertige Herstellung Plattenbauteil aus Versuch 4.....	28
Abbildung 29:	Messreihenfolge der Außenkanten.....	30
Abbildung 30:	Beulform an Kante 1.....	31
Abbildung 31:	Beulform an Kante 2.....	31
Abbildung 32:	Beulform an Kante 3.....	31
Abbildung 33:	Beulform an Kante 4.....	31
Abbildung 34:	Beulform an Kante 1.....	32
Abbildung 35:	Beulform an Kante 2.....	32
Abbildung 36:	Beulform an Kante 3.....	32
Abbildung 37:	Beulform an Kante 4.....	32
Abbildung 38:	Beulform an Kante 1.....	33
Abbildung 39:	Beulform an Kante 2.....	33
Abbildung 40:	Beulform an Kante 3.....	33

---

Abbildung 41:	Beulform an Kante 4 .....	33
Abbildung 42:	Beulform an Kante 1 .....	34
Abbildung 43:	Beulform an Kante 2 .....	34
Abbildung 44:	Beulform an Kante 3 .....	34
Abbildung 45:	Beulform an Kante 4 .....	34
Abbildung 46:	Graphischer Verlauf der Messwerte in Längsrichtung (V1) nach Steife 4 .....	38
Abbildung 47:	Graphischer Verlauf der Messwerte in Querrichtung (V1) nach Steife 4 .....	38
Abbildung 48:	Graphischer Verlauf der Messwerte in Querrichtung (V2) nach Steife 4 .....	39
Abbildung 49:	Graphischer Verlauf der Messwerte nach Gurtanbringung .....	40
Abbildung 50:	Graphischer Verlauf der Messwerte nach der Plattenbauteilherstellung .....	40
Abbildung 51:	Graphischer Verlauf der Messwerte nach Gurtanbringung .....	41
Abbildung 52:	Graphischer Verlauf der Messwerte nach der Plattenbauteilherstellung .....	41



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Versuchsinformationen und -parameter .....	17
Tabelle 2:	Übersicht der durchzuführenden Messzustände .....	29
Tabelle 3:	Stichmaße aus Versuch 1 .....	31
Tabelle 4:	Stichmaße aus Versuch 2 .....	32
Tabelle 5:	Stichmaße aus Versuch 3 .....	33
Tabelle 6:	Stichmaße aus Versuch 4 .....	34
Tabelle 7:	Stichmaße aus Versuch 1 (inkl. lokale Beulungen) .....	35
Tabelle 8:	Stichmaße aus Versuch 2 (inkl. lokale Beulungen) .....	36
Tabelle 9:	Stichmaße aus Versuch 3 (inkl. lokale Beulungen) .....	36
Tabelle 10:	Stichmaße aus Versuch 4 (inkl. lokale Beulungen) .....	37
Tabelle 11:	Stichmaße und Verdrehwinkel der Steifen aus Versuch 1 nach Plattenbauteilherstellung .....	38
Tabelle 12:	Stichmaße und Verdrehwinkel der Steifen aus Versuch 2 nach Plattenbauteilherstellung .....	38
Tabelle 13:	Stichmaße aus Versuch 3 .....	39
Tabelle 14:	Winkelverzug der Trapezlängssteife aus Versuch 3 .....	40
Tabelle 15:	Stichmaße aus Versuch 4 .....	41
Tabelle 16:	Winkelverzug der Trapezlängssteife aus Versuch 4 .....	41
Tabelle 17:	Bewertungstabelle der angewendeten Messverfahren .....	44
Tabelle 18:	Herstellungstoleranzen für ausgesteifte Beulfelder nach der DIN EN 1090-2 .....	45
Tabelle 19:	Berechnete Herstellungstoleranzen für die Versuche 1 bis 4 .....	45
Tabelle 20:	Stichmaß-Abweichungen gegenüber der Norm .....	46

## Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional	
3D	dreidimensional	
bzw.	beziehungsweise	
bspw.	beispielsweise	
CAD	Computer Aided Design	<i>Computergestützte Konstruktion</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung	
DVS	Deutscher Verband für Schweißen e.V.	
EN	europäische Normen	
etc	et cetera	und die übrigen Dinge
FEM	Finite Elemente Methode	
ggf.	gegebenenfalls	
i. d. R.	In der Regel	
insb.	insbesondere	
ISO	International Organization for Standardization	<i>Internationale Organisation für Normung</i>
MAG	Metall-Aktivgas (-schweißen)	
max.	Maximum	
MEQ	Methode der effektiven Quer- schnitte	
min.	Minimum	
MRS	Methode der reduzierten Span- nungen	
o.g.	oben genannt	
STL	Standard Triangle Language	
u.a.	unter anderem	
u.g.	unten genannt	
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	

## Symbolverzeichnis

<u>Kurzzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
	m	Länge in Meter
	mm	Länge in Millimeter
	$\mu\text{m}$	Länge in Mikrometer
	g	Gewicht in Gramm
$\Delta$	mm	größte gemessene Stichmaß über die Steifenlänge
I	A	elektrische Stromstärke
U	V	elektrische Spannung

# 1 Einleitung

Der Stahlbau und Bauteile aus Stahl sind in der heutigen Welt unentbehrlich. Neben der Verwendung von Stahl und Stahlträgern im Brückenbau, werden zum Beispiel Stahlträger, in unterschiedlichen Formen und Variationen für die Bereiche Beton-, Anlagen-, Industrie-, aber auch Maschinenbau verwendet.

Die Verbindung dieser Erzeugnisse aus Stahl, die in verschiedenen Profilen vorliegen, wird unter Einsatz diverser Möglichkeiten realisiert. Dabei wird in der DIN 8580 zwischen folgenden Verbindungsmöglichkeiten unterschieden:

- unlösbare Verbindungen, wie z.B. Schweißverbindungen,
- lösbare Verbindungen, wie z.B. Schraubverbindungen,
- bedingt lösbare Verbindungen, wie z.B. Nietverbindungen.[1]

Im Stahlbau werden Verbindungen hauptsächlich geschweißt, wobei hier zwischen Schweißen in der Vorfertigung und Schweißen auf der Baustelle bzw. der Montage unterschieden wird. In der Regel werden die Bauteile, bevor diese auf die Baustelle gelangen, in der Vorfertigung oder der Werkstatt hergestellt. Während der Montage wiederum werden in der Regel die gering beanspruchten Verbindungen, oder wenn Baustellennähte unvermeidbar sind [2], geschweißt.

Gemäß der DIN 1910-100 [3] wird das Schweißen bei dem zwei oder mehr Teile unter Anwendung von Wärme und/oder Druck sowie mit oder ohne Schweißzusatz miteinander verbunden werden als Fügeprozess definiert.

Durch den schweißtechnisch bedingten Wärmeeinfluss auf den Werkstoff, entstehen Imperfektionen. Diese Imperfektionen beschreiben unerwünschte Abweichungen der Bauteile und werden unterschieden zwischen [4]:

- geometrische Imperfektionen
- strukturelle Imperfektionen
- geometrische Ersatzimperfektionen

Im Prozess der Nachweisführung von stabilitätsgefährdeten Bauteilen sind diese Imperfektionen zwingend zu berücksichtigen, da diese einen maßgebenden Einflussfaktor auf das Tragverhalten von Bauteilen darstellen können.

Im Rahmen dieser Studienarbeit sollen Kleinteilversuche an längsausgesteiften Beulfeldern durchgeführt werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt hierbei auf der Herstellung der geschweißten Plattenbauteile und der Messung der entstehenden geometrischen Imperfektionen.

## 2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Neben der Herstellung von geschweißten Plattenbauteilen ist das Ziel dieser Arbeit die Untersuchung und Eignungsprüfung von verschiedenen Messverfahren für Messungen der geometrischen Imperfektionen in den Beulfeldern. Zur Herstellung dieser Plattenbauteile werden dünne Stahlbleche (S355J2+N Stahl), mit einer Materialstärke zwischen 3 mm und 4 mm verwendet. Im Zuge dieser Ausarbeitung werden insgesamt vier ausgesteifte Plattenbauteile (in Kapitel 6 genauer beschrieben) hergestellt, wobei sich diese in ihrer geometrischen Form voneinander unterscheiden. Es werden zwei Bauteile mit Flächenlängssteifen und zwei Bauteile mit Trapezlängssteifen hergestellt. Anschließend wird der Verzug mit dem optischen Messsystem Q400 der Firma Limes Messtechnik und Software GmbH aus Krefeld gemessen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird das optische Messsystem, welches vorgegeben ist, mit weiteren Messverfahren verglichen. Weitere Messverfahren werden in der vorliegenden Ausarbeitung vorgestellt und die Messergebnisse der angewendeten Systeme im Zuge dieser Arbeit verglichen. Hier finden nicht nur händisch-konventionelle Messverfahren, sondern auch berührungslose Messverfahren Anwendung. Anschließend findet die Auswahl eines geeigneten Messverfahrens statt.

Eingeteilt ist die vorliegende Arbeit dabei in neun Kapitel. In Kapitel 2 wird die Zielsetzung dieser Arbeit beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 3 die theoretischen Grundlagen dargestellt. In diesem Kapitel werden unter anderem geometrische Imperfektionen vorgestellt und erläutert, sowie der Stand der Technik und der Nachweis von Plattenbeulen behandelt. Die Definition von Flächenlängs- und Trapezlängssteifen schließt dieses Kapitel ab. Die Betrachtung der gewählten Messverfahren, für die Messung der entstehenden geometrischen Imperfektionen, findet in Kapitel 4 statt. In Kapitel 5 werden die Schweißanweisung und der Schweißfolgeplan, welche für den Herstellungsprozess aus Kapitel 6 erforderlich sind, beschrieben. Im Anschluss dazu, wird in Kapitel 7 der Verzug der hergestellten Bauteile gemessen. Im Zuge der experimentellen Untersuchungen an den Bauteilen werden die erhaltenen Messwerte in diesem Kapitel aufgenommen. Des Weiteren werden in diesem Kapitel auch die gemessenen Imperfektionen dargestellt und dokumentiert. Außerdem werden abschließend in Kapitel 7 die gewählten Messverfahren tabellarisch gegenübergestellt und unter Einbeziehung von Erfahrungswerten miteinander verglichen. Darauf aufbauend, werden in Kapitel 8 die gemessenen Werte mit den Daten aus Literatur und Norm gegenübergestellt. Der Zukunftsausblick und das Fazit in Kapitel 9 schließen diese Ausarbeitung ab.

## 3 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen von (geometrischen) Imperfektionen beschrieben.

### 3.1 Vorstellung und Erläuterung von Imperfektionen

Als Imperfektionen werden herstellungs- bzw. fertigungsbedingte (unerwünschte) Abweichungen der Bauteile von dem Sollzustand bezeichnet. Diese Imperfektionen werden entsprechend der DIN EN 1993-1-5 [4] zwischen den folgenden Kategorien unterschieden:

- geometrische Imperfektionen
- strukturelle Imperfektionen
- geometrische Ersatzimperfektionen (in diesen werden die Effekte von strukturellen und geometrischen Imperfektionen berücksichtigt)

Es ist zu beachten, dass diese Arbeit die geometrischen Imperfektionen thematisiert. Die strukturellen Imperfektionen werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

#### 3.1.1 Geometrische Imperfektionen

Geometrische Imperfektionen beschreiben alle Abweichungen zum geometrischen Sollzustand. Wesentliche geometrische Imperfektionen sind bspw. Maßabweichungen und Vorverformungen oder auch Vorbeulen im Zuge des Herstellungsprozesses von Stahlbauteilen. Hier kann exemplarisch die Stahlblechherstellung durch Warmwalzen herangeführt werden. In der DIN EN 10029 [6] werden die Toleranzen von Stahlblechen definiert, dennoch stellt eine (Maß-)Toleranz der Nenndicke des Stahlblechs eine variierende Blechdicke, auf die Länge des Bleches gesehen, dar. Die Stahlbauteile, welche im Zuge dieser Ausarbeitung hergestellt werden, basieren auf Grundplatten mit einer Soll-Blechdicke von 3 mm und 4 mm. Folglich können Abweichungen von - 0,3 mm bis hin zu + 0,7 mm vorhanden sein, welche zwar nach [6] im Toleranzbereich liegen, aber dennoch geometrische Imperfektionen darstellen. Weitere geometrische Imperfektionen können in anschließenden Bearbeitungsprozessen von Stahlbauteilen entstehen. Hier spielt die Herstellung von Flachlängssteifen und Trapezlängssteifen eine große Rolle. Zum Fügen der Steifen wird auf Schweißen zurückgegriffen, wobei die Gefahr besteht, dass an den Schweißnähten Unregelmäßigkeiten auftreten können. Hierbei entstehen durch den Wärmeeintrag geometrische Imperfektionen in Form von Beulverformungen (ausgebeultes Blech)

an den hergestellten Plattenbauteilen. Diese Imperfektionen können durch Anwendung von verschiedenen Messverfahren erfasst und für die Analyse und Bewertung realer Bauwerke verwendet werden.

Für die Erfassung von geometrischen Imperfektionen steht eine Vielzahl von Messmitteln zur Verfügung. Neben klassischen Messmitteln, zu denen Messlineale, Wasserwaagen, Maßbänder, Richtscheite und Maurerschnüre gehören, können auch optische Messsysteme, wie Laserscanner, Messkameras und Fotogrammetrie verwendet werden. Im Zuge der Erfassung von geometrischen Imperfektionen, steht die Qualität der Messergebnisse in direkter Abhängigkeit von dem gewählten Messverfahren. Verwendet man beispielsweise Messlineale oder Maßbänder für die Erfassung von geometrischen Imperfektionen kann der Blickwinkel auf die Skalierung zu unterschiedlichen und ungenauen Messergebnissen führen (Parallaxenfehler). Daher sind solche Messsysteme zur Messung von geometrischen Imperfektionen nur bedingt geeignet. Die Verwendung von modernen optischen Messsystemen, wie Laserscanner eignen sich hier aufgrund ihrer reproduzierbaren Genauigkeit besser. Ein weiterer Vorteil von Laserscannern ist, dass im Nachgang der Messung ein 3D-Modell basierend auf den aufgenommenen Punktwolken [8] erzeugt werden kann. Diese Funktion kann in anderen Anwendungen für das Reverse Engineering eine interessante Rolle einnehmen.

In der DIN EN 1090-2 [7] werden, unter Berücksichtigung der Beanspruchungsrichtung, Grenzwerte für die Fertigungstoleranzen festgelegt. Die genaue Bewertung und Gegenüberstellung zwischen den gemessenen Imperfektionen mit den geometrischen Imperfektionen aus Literatur und Norm, erfolgt in Kapitel 8 „Gegenüberstellung und Bewertung“.

### **3.1.2 Beulformen**

Um die Beulform der geometrischen Imperfektionen in der Praxis zu bestimmen, haben sowohl Knabenschuh [10] als auch Fischer [9] in den Jahren 1981 und 1989 Messungen an Brücken durchgeführt. Knabenschuh hat hier die Schrumpfungen der Schweißnähte an den Längssteifen als den bedeutenden Einfluss auf die Größe der Imperfektion und auf die Verformung, festgelegt. Fischer teilt diese Erkenntnis, zusätzlich erkennt Fischer, dass sich die Beulform in vier verschiedene Formen einteilen lässt. Abbildung 1 veranschaulicht die Beulformen in Längsrichtung und die prozentuale Häufigkeit ebendieser.

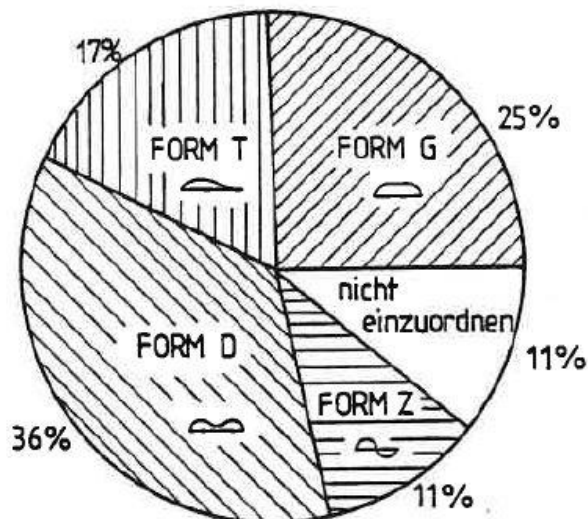


Abbildung 1: Beulformen und deren Erscheinungshäufigkeiten in % [9, S.38]

Fischer ist im Zuge seiner Ausarbeitung auch auf Vorverformungen bzw. Vorbeulen der Grundbleche eingegangen und hat hierzu sechs mögliche Formen graphisch dargestellt. Abbildung 2 veranschaulicht die möglichen Formen der Vorbeulen.

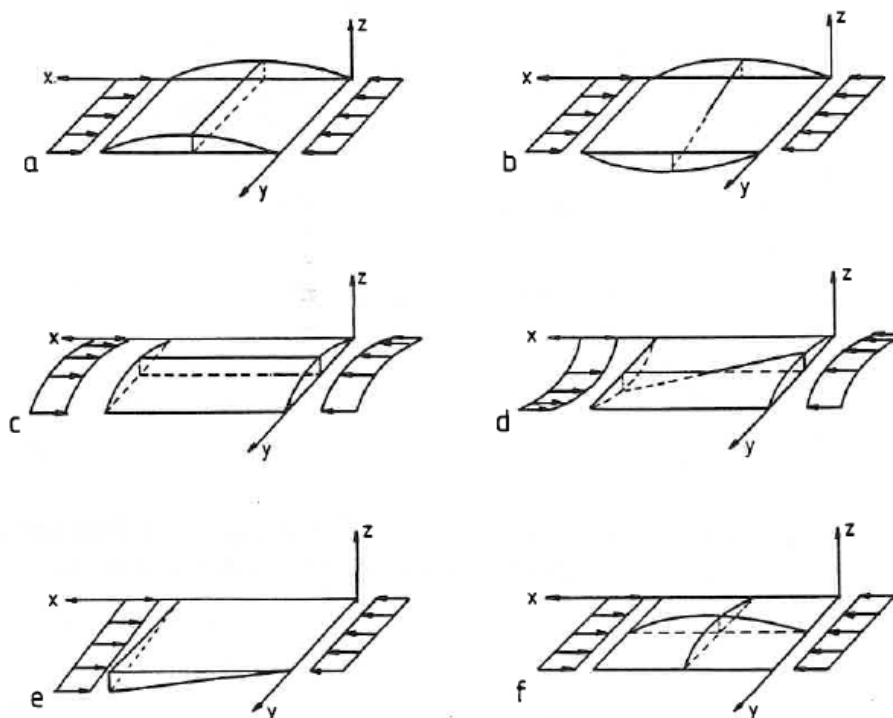


Abbildung 2: Beulformen der Vorverformungen [9, S. 5]

Komplementär dazu hat Zizza [17] im Zuge seiner Untersuchungen die Erkenntnis erlangt, dass die Position der maximalen Amplitude (in Querrichtung) der Imperfektion auf drei Interpretationsmöglichkeiten hindeuten kann. Diese Interpretationsmöglichkeiten sind in der nachfolgenden Abbildung 3 zu sehen.



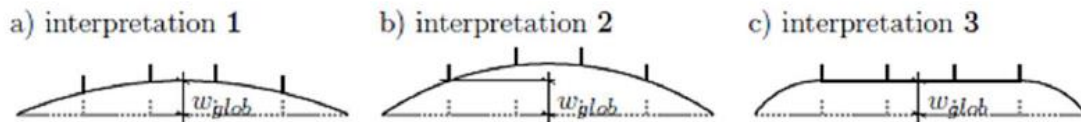


Abbildung 3: Interpretationsmöglichkeiten nach Zizza [17, S.118]

Im weiteren Zuge seiner Ausarbeitung ist die Wahl auf die Variante C gefallen, da es zwischen dieser Variante und den Laborversuchen Zizza's die größten Übereinstimmungen gegeben hat

### 3.1.3 Beulfelder

Blechfelder, welche einer Beulgefahr unterliegen werden Beulfelder genannt. Im Wesentlichen werden diese Beulfelder folgendermaßen beschrieben [11]:

- **Einzelfeld:**  
Einzelfelder sind unversteifte Beulfelder zwischen den (Längs-)Steifen
- **Teilfeld:**  
Teilfelder sind längs- oder unversteifte Beulfelder zwischen Quersteifen und Längsrändern des Gesamtbeulfeldes
- **Gesamtbeulfeld:**  
Gesamtbeulfelder sind versteifte bzw. unversteifte Beulfelder zwischen Längs- und Querrändern

Im Zuge der Aufgabenstellung dieser Ausarbeitung, liegt der Schwerpunkt auf der Betrachtung von ausgesteiften Beulfeldern. Die Betrachtung von Einzelfeldern bzw. unausgesteiften Beulfeldern wird nicht berücksichtigt.

## 3.2 Stand der Technik und der Nachweis von Plattenbeulen

Entsprechend der DIN EN 1993-1-5 [4] können Plattenbeulen mit drei Verfahren nachgewiesen werden. Zwei dieser Arten beruhen auf einer Nachweisberechnung von Hand, wohingegen die dritte Methode ein rein computergestütztes Berechnungswerkzeug ist.

- **Methode der effektiven Querschnitte (MEQ)**  
Diese Vorgehensweise der Nachweisführung geschieht von Hand und wird in den Kapiteln 4 bis 7 in der Norm definiert.
- **Methode der reduzierten Spannungen (MRS)**  
Diese Vorgehensweise ist die zweite Nachweisführung von Hand und wird in Kapitel 10 in der Norm definiert. Diese Methode wird in Österreich verwendet.
- **Finite Elemente Methode (FEM)**

Die Finite Elemente Methode ist ein reines computergestütztes Berechnungswerkzeug und wird im Anhang C der Norm definiert.

### **3.3 Definition und Anwendung von Steifen**

Gemäß der DIN EN 1993-1-5 [4], können Beulfelder durch Steifen versteift werden. Durch diesen Vorgang wird die Tragfähigkeit des Bauteils erhöht. Steifen, welche in Richtung der Längsränder angebracht werden, werden Längssteifen genannt. Die vorliegende Arbeit thematisiert die Herstellung von Flachlängs- und Trapezlängssteifen.

## 4 Vorstellung der gewählten Messverfahren

Um den Verzug an ausgesteiften Beulfeldern zu messen, steht eine Vielzahl von Messmitteln und Messverfahren zur Verfügung. Im Folgenden werden vier Verfahren vorgestellt, welche für die Verzugsmessung der Plattenbauteile im Zuge der Bearbeitung dieser Ausarbeitung gewählt werden. Eines dieser Messverfahren, Limes 3D, ist in der Aufgabenstellung der Abschlussarbeit vorgegeben, während die restlichen Messverfahren frei gewählt worden sind. Es ist zu beachten, dass lediglich das vorgegebene Messverfahren im nachfolgenden Schritt detaillierter beschrieben wird. Die restlichen Messverfahren werden in einem geringeren Detaillierungsgrad beschrieben, da ansonsten der Rahmen der Arbeit zu weit gefasst werden würde.

### 4.1 Limes 3D

Das optische Messverfahren Q400 der Firma Limes Messtechnik und Software GmbH aus Krefeld basiert auf einer digitalen Bildkorrelation. Im Rahmen der Aufgabenstellung ist dieses optische Messverfahren für die Verzugsmessungen vorgegeben. Im Wesentlichen wird das Messverfahren zur Messung von Verformungen eingesetzt. Das System besteht aus mindestens zwei Kameras, welche in einer bestimmten Anordnung zueinander Aufnahmen der Werkstücke machen. Die Kameras beschreiben den Speicher des Messsystems, wobei für die Auswertung der Messungen ebenfalls eine Messsoftware notwendig ist. Verwendet wird hierbei die Software „Istra4D“ der Firma Dantec Dynamics GmbH aus Ulm. Mittels dieser können sowohl lokale als auch komplette 3D-Deformationsanalysen generiert werden. Dieser Vorgang geschieht durch digitale Bildkorrelation. Aufgrund der komplexen Messung werden leistungsstarke Rechner benötigt, um die rechenintensiven Messauswertungen zu generieren.

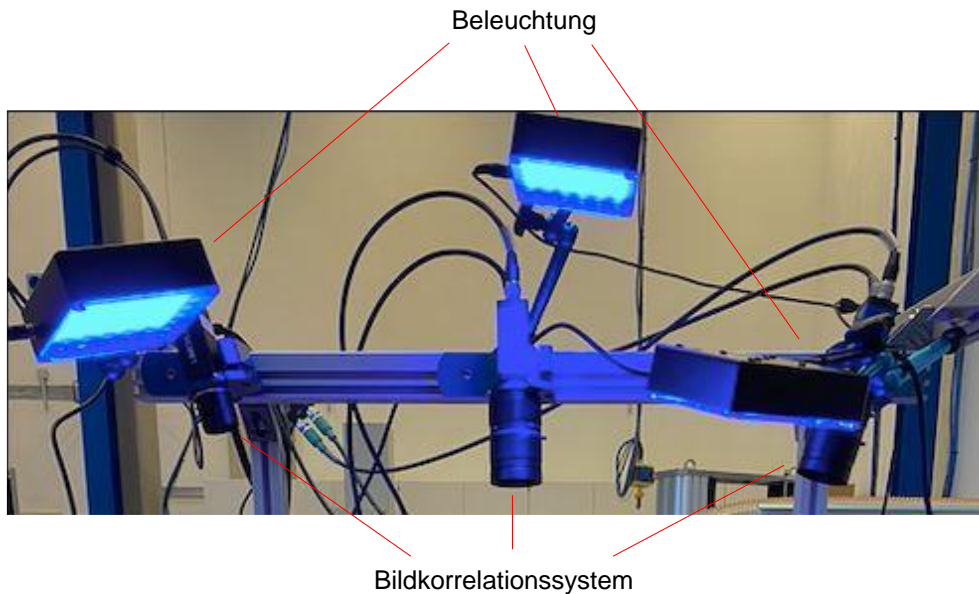


Abbildung 4: Bildkorrelationssystem mit 3 Kameras

Unter Verwendung der Kameras können Messfelder in Größenbereiche von  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  bis hin zu  $10 \times 10 \text{ m}^2$  erfasst werden [13]. Zunächst erfolgt eine Kalibrierung des Systems, um qualitative Messungen zu erhalten. Neben einer Kalibrierung spielen zwei weitere Eigenschaften eine wichtige Rolle: Einerseits die ordnungsgemäße Umsetzung eines Speckle-Musters (Punkte-Muster) und andererseits die Ausrichtung des Triangulationswinkels zwischen den Kameras. Bevor die Speckle-Musterung aufgetragen wird, wird die Oberfläche des Werkstücks weiß matt lackiert, um eine diffuse Reflektion des einfallenden Lichts zu erhalten. Anschließend kann das Speckle-Muster (Abbildung 5) aufgetragen werden. Hierbei wird zwischen feinen und groben Speckle-Mustern unterschieden. Während feine Speckle-Muster bei Nahaufnahmen bzw. Messungen im Nahbereich verwendet werden, finden grobe Speckle-Muster bei Fernaufnahmen bzw. Messungen im Fernbereich, ihre Verwendung (Abbildung 6).



Abbildung 5: Feines Speckle-Muster für Messungen im Nahbereich



Abbildung 6: Grobes Speckle-Muster für Messungen im Fernbereich

Nachdem das Speckle-Muster aufgetragen ist, muss der richtige Triangulationswinkel zwischen den Kameras hergestellt werden. Dieser soll laut Herstellerangaben im Bereich von  $15^\circ$  bis  $60^\circ$  liegen.

Abbildung 7 veranschaulicht die Darstellung des Triangulationswinkels  $\alpha^*$ . In der Abbildung beschreibt  $h$  die (Arbeits-)Höhe zwischen Messobjekt und Kameras,  $d$  den Abstand der beiden äußeren Kameras und  $\alpha$  den gesuchten Triangulationswinkel.

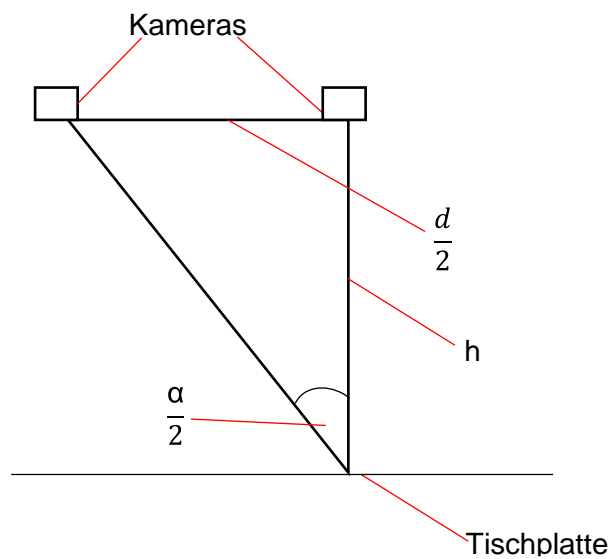


Abbildung 7: Einstellung des Triangulationswinkels

Mit folgender Formel wird der Triangulationswinkel  $\alpha$  anschließend berechnet:

$$\alpha^* = \frac{a}{2} = \arctan\left(\frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}}\right) = \arctan\left(\frac{d/2}{h}\right) \quad (1)$$

Anschließend kann die Kalibrierung des Systems durchgeführt werden. Das Kamerasystem muss nach jeder Änderung der Kameraausrichtung, des Triangulationswinkels oder der Arbeitshöhe erneut kalibriert werden. Für die Messung der Imperfektionen an den Flachlängs- und den Trapezlängssteifen reicht jedoch eine Kalibrierung vorab aus, da im Zuge der Herstellung der Steifen die Kameraausrichtung nicht geändert wird. Dadurch kann eine Kalibrierung für alle Versuchsmessungen verwendet werden. Die Auswertung der gemessenen Daten erfolgt über die Software, wobei in dieser die relevanten Faktoren und Kenngrößen individuell angepasst werden können. Für die Verzugsmessungen der ausgesteiften Beulfelder wird zunächst ein Referenzbild gemacht, welches den Zustand 0 beschreibt. Nach dem Anfertigen eines Flachlängs- oder Trapezlängssteifen, wird ein weiteres Bild aufgenommen, welches den Zustand 1 beschreibt. In der Software können beide Zustände miteinander verglichen werden.

#### **4.1.1 Experimentelle Vorversuche mit dem Limes 3D Messsystem**

Um die Eignung des Limes-Systems für die Verzugsmessung an ausgesteiften Beulfeldern zu überprüfen, sind Vorversuche durchgeführt worden. In zwei voneinander unabhängigen Versuchsreihen wurde zum einen die Beulung auf der Grundplatte und zum anderen der Verzug von Flachlängssteifen simuliert. Als Testobjekt wurde für beide Versuchsreihen DIN A4 Papier genutzt. In Vorversuch 1 simuliert das Papier eine Grundplatte. Im Vorversuch 2 simuliert das Papier eine Flachlängssteife. Im Zuge der Simulationen ist jeweils eine Messvorrichtung gebaut worden, welche mit einem Koordinatensystem versehen wurde, um eine Messwiederholbarkeit und eine -reproduzierbarkeit gewährleisten zu können. Zusätzlich ist für beide Versuchsreihen ein Stahlstab, mit der Masse  $m = 30 \text{ g}$  verwendet worden. Mit diesem Stahlstab ist eine reproduzierbare Belastung der erzeugten Grundplatte bzw. der erzeugten Steife gewährleistet worden.

##### **4.1.1.1 Vorversuch 1**

Die Abbildung 8 veranschaulicht die Simulation der Beulung der Grundplatte mit dem Stahlstab bei 140 mm.

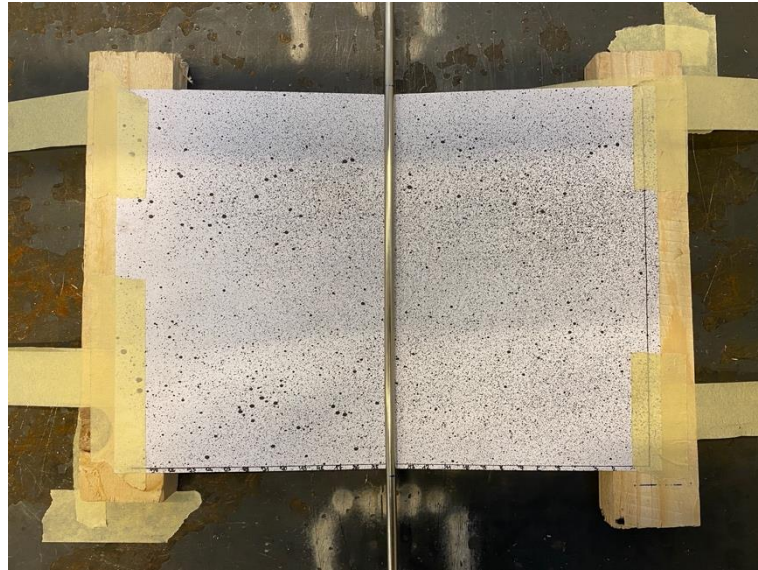


Abbildung 8: Simulation von Beulung der Grundplatte auf Papier

Die nachfolgende Abbildung 9 zeigt die Auswertung der Software zu Abbildung 8. Zur Auswertung in der Software „Istra 4“ wurde die „Displacements Z / mm“ gewählt, welche die Ausdehnung bzw. die Verschiebung in z-Richtung in mm darstellt. Mit dieser Einstellung kann die Beulung gemessen werden.

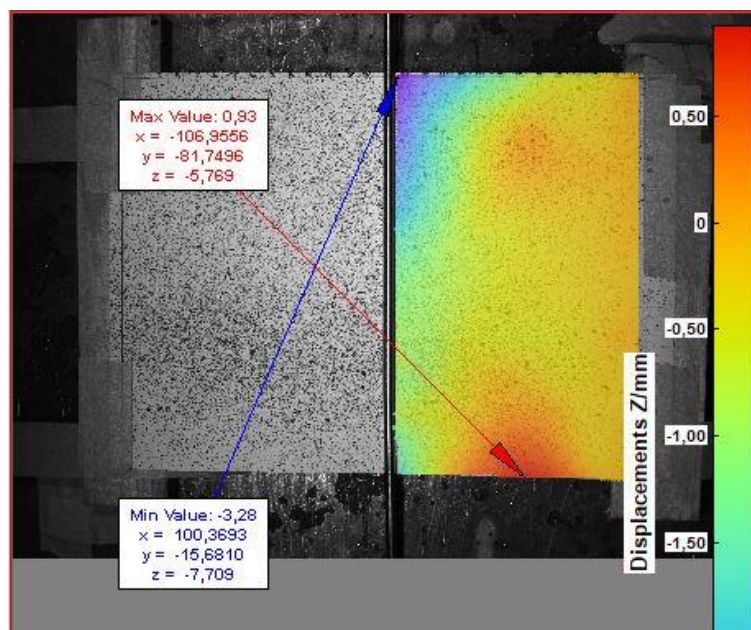


Abbildung 9: Auswertung der Beulung

Die ausgegebenen Werte in z-Richtung sind negativ, da das Messsystem mit einem „Rechte-Hand-Koordinatensystem“ rechnet. Um die ausgegebenen Werte zu prüfen und um diese zu validieren, wurden für jede Versuchsreihe fünf Messreihen durchgeführt. Neben der grafischen Darstellung der Messreihen ist auch der Mittelwert



gebildet worden. Um die Messwerte auf ihre Genauigkeit zu prüfen, wurde die Absenkung des Papiers mit einem Lineal gemessen. Auch hier sind fünf Messreihen durchgeführt worden. Die graphische Darstellung dieser Messergebnisse befindet sich im Anhang A. Die Versuchsreihen und -ergebnisse deuten darauf hin, dass die Beulung der Grundplatte mit dem Limes-Messsystem ermittelt werden kann.

#### 4.1.1.2 Vorversuch 2

Um zu validieren, ob das Limes-Messsystem für die Messung der Verdrehung der Steifen geeignet ist, sind auch für diesen Fall Vorversuche durchgeführt worden. Hierfür wurde eine Flachlängssteife aus Papier gefaltet und mit einer selbstgebauten Druckvorrichtung punktuell bewegt. Diese Bewegung simuliert die Drehbewegung der Steife während des Schweißens. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Simulation der Bewegung der Flachlängssteife auf Papier.

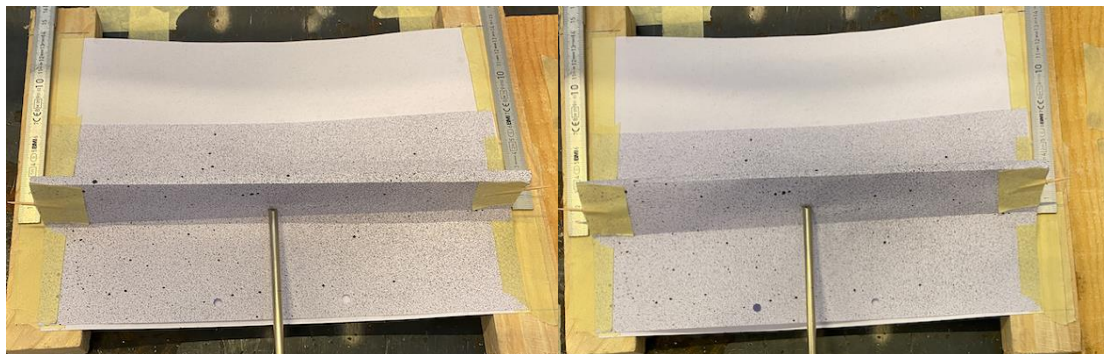


Abbildung 10: Simulation von der Bewegung der Flachlängssteife

Im Zuge der Simulation aus Abbildung 10 wurden mit dem Limes-Messsystem ebenfalls zwei Bilder aufgenommen und miteinander verglichen. Die linke Abbildung zeigt den Zustand 0. Dieser zeigt den Augenblick, an dem der Stab die Steife berührt, diese aber nicht bewegt. Im Gegensatz dazu zeigt die rechte Abbildung den Zustand 1. Hierbei wird die Steife nun bewegt. Die Auswertung der beiden Aufnahmen wird in Abbildung 11 dargestellt, wobei auch hier als Ausgabe die Kenngröße „Displacements Z / mm“ gewählt worden ist. Bei einer schmalen Stegbreite ( $\leq 2$  mm) der Steife muss für eine reguläre Messung der Steifenbewegung, die Steife „künstlich“ vergrößert werden. Die „künstliche“ Vergrößerung der Steife ist in Anhang B zu sehen. Für die Flachlängssteifen, welche im Zuge dieser Ausarbeitung hergestellt werden, muss die Stegbreite nicht künstlich vergrößert werden, da die Stege der Flachlängssteifen Stegbreiten von 3 mm bis 4 mm aufweisen.



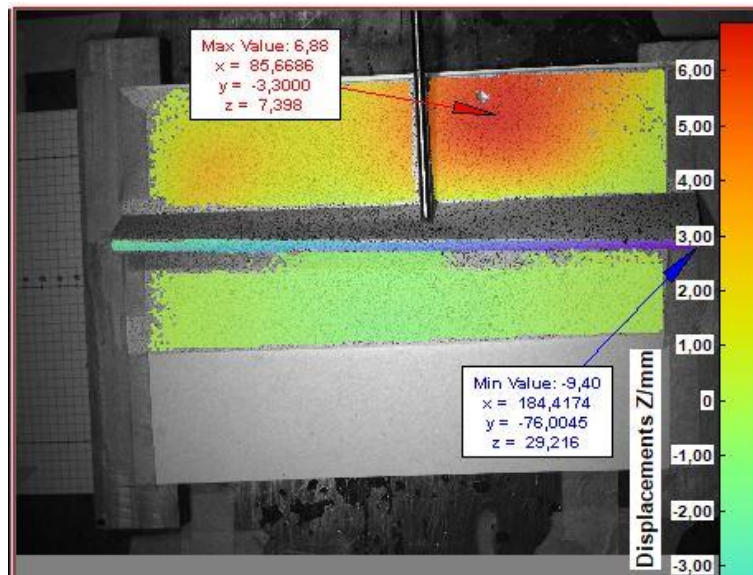


Abbildung 11: Auswertung der Flachlängssteife

Die Auswertungen in Abbildung 11 können sowohl in der Software als Graph dargestellt werden oder die Referenzbilder können als 3D-Netz im STL-Format exportiert werden. Letzteres wird genutzt, um diese in externe Netzverarbeitungssoftwares miteinander zu vergleichen. Im Zuge dieser Ausarbeitung sind beide Varianten durchgeführt und die Ergebnisse auf Plausibilität miteinander verglichen worden. Die Ergebnisse stimmen grundsätzlich überein. Dieser Punkt deutet daraufhin, dass mit dem Limes-Messsystem, neben der Beulung der Grundplatte, auch die Bewegung der Steife gemessen werden kann.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 12 und Abbildung 13) veranschaulichen die Auswertungen aus der „Istra4D“ Software. Die Abbildung 12 zeigt die 3D-Auswertung der Flachlängssteife mit dem „Rechte-Hand-Koordinatensystem“ [13].

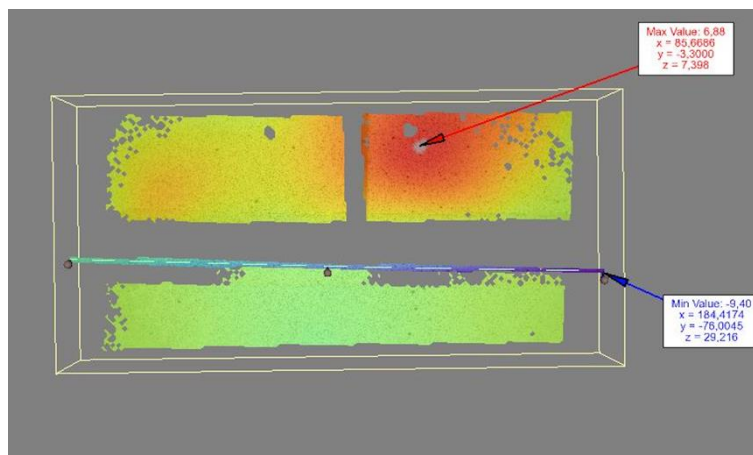


Abbildung 12: 3D-Auswertung der Flachlängssteife

Die Abbildung 13 zeigt die graphische Darstellung der Verdrehung der Steife.

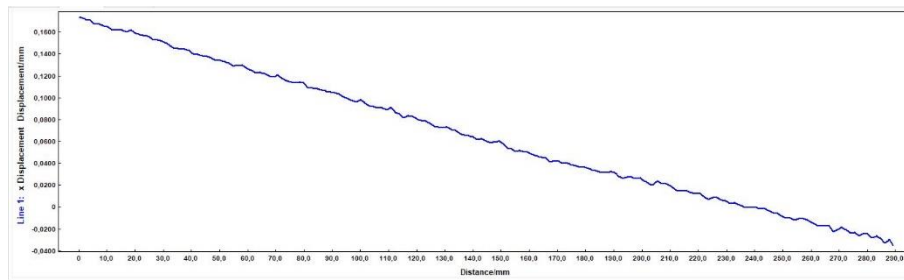


Abbildung 13: Graphische Darstellung der Verdrehung der Steife

In dieser Auswertung ist auf der x-Achse die Länge der Steife in mm zu sehen, die y-Achse beschreibt die Verdrehung bzw. die Bewegung der Steife in z-Richtung. Um die Werte zu validieren sind STL-Auswertungen durchgeführt worden.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die STL-Auswertung beider Referenzbilder in einer externen Netzverarbeitungssoftware.

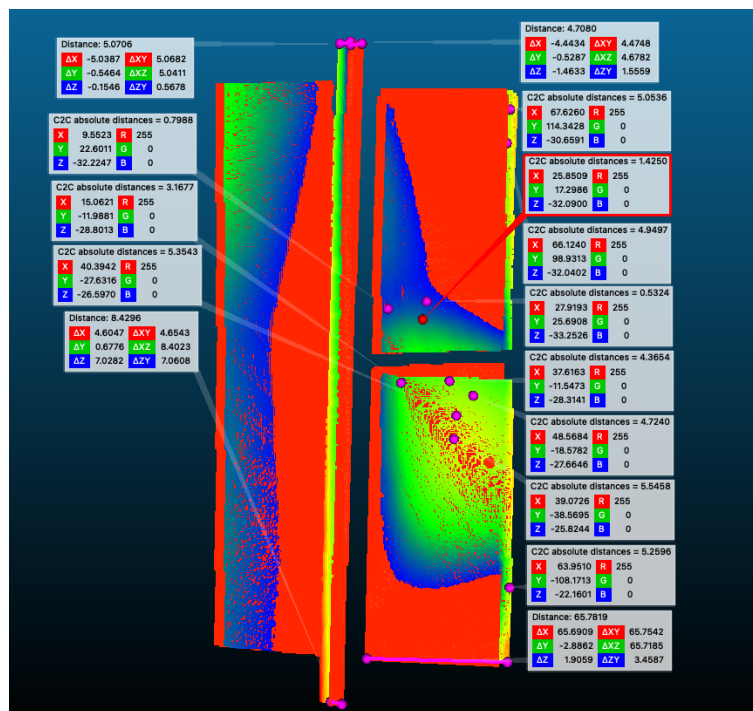


Abbildung 14: Auswertung der exportierten STL-Dateien in Cloudcompare

Die ausgegebenen Messwerte in der Software stimmen größtenteils mit den Werten aus den experimentellen Vorversuchen überein. Die beiden Programme „Cloudcompare“ und „MeshLab“ eignen sich für die STL-Auswertungen besonders, da beide neben der Lieferung von verwertbaren Ergebnissen auch als Freeware frei zugänglich sind. Beide Programme generieren aus den exportierten STL-Dateien Punktwolken, welche sich gegenüberstellen und miteinander vergleichen lassen. In Abbildung 14 sind zwei Flächlängssteifen-Modelle zu sehen. Die rote Flächlängssteife beschreibt den Zustand 0. Die grüne Flächlängssteife beschreibt den Zustand 1. Hier kann bspw. mit der Funktion „P2P-Distance“ die Point to Point Distance, zu

Deutsch Punkt zu Punkt Entfernung ausgegeben werden. Eine weitere Möglichkeit Abstände in der Software zu messen, nennt sich „C2C-Distance“ die Cloud to Cloud Distance, zu Deutsch: Wolke zu Wolke Entfernung. Mit dieser Möglichkeit wird der Abstand zwischen zwei gewählten Wolken ausgegeben. Abbildung 14 veranschaulicht die STL-Auswertung bzw. die Gegenüberstellung beider Wolken, in der Free-ware „Cloudcompare“ der französischen Firma „Télécom Paris“.

## 4.2 3D Laserscanner

Als zweites optisches Messmittel wurde der „EinScan HX“ Laserscanner der Firma „Shining 3D Tech. Co., Ltd.“ aus Guangzhou in China verwendet. Mit diesem Laserscanner werden Oberflächeninformationen des Objektes aufgenommen und ein digitaler Zwilling abgeleitet. Der Laser erfasst hierbei die Oberfläche und bildet diese als Punktwolke bzw. als Netz ab. Das verwendete Gerät bietet dem Nutzer zwei Modi zur Auswahl und weist laut Hersteller eine Genauigkeit von 0,04 mm im Laserscan- und 0,05 mm im Punktemodus auf [14]. Im Laserscan-Modus wird mit Hilfe eines Laserstrahls, welcher von der Oberfläche des Werkstücks reflektiert und über die Empfangsoptik aufgenommen wird, vermessen. Für die Nutzung im Laserscan-Modus müssen sogenannte Targets auf die Werkstück-Oberfläche angebracht werden. Da diese allerdings im Zuge des Schweißprozesses verbrennen, wurde das Gerät lediglich im Rapidscan-Modus verwendet. In diesem Modus werden Punktwolken der Werkstückoberfläche erfasst [8]. Diese Punktwolken lassen sich in verschiedenen Datei-Formaten exportieren und vergleichen bzw. auswerten. Auch hier wurde das STL-Format als Export-Format gewählt. Da namenhafte Konzerne und Firmen in der Industrie besonders in der Qualitätssicherung solche Laserscanner verwenden, wird die Eignung zur Verzugsmessung an ausgesteiften Beulfeldern angenommen.

## 4.3 Konventionelle Messverfahren

Neben der Verzugsmessung von ausgesteiften Plattenbeulen mit dem Limes-Messsystem und der Messung mit dem Laserscanner, können Beulungen und Verzüge mit Hilfe von Handaufmaß gemessen werden. Bei diesem (direkten) Messverfahren wird unter Verwendung von „konventionellen“ Messmitteln, zu denen bspw. Wasserwaagen, Messlineale, Winkelmesser oder Maßbänder gehören, unmittelbar am Objekt gemessen. Die Messgenauigkeit ist im Vergleich zu den o.g. Messverfahren erheblich geringer, dennoch funktionieren die Messmittel auch in ungünstigsten Bedingungen und sind kostengünstig erhältlich. In dieser Ausarbeitung sind neben einer Wasserwaage auch ein Haarlineal, ein Gliedermaßstab, ein Tiefenmessschieber und ein Winkelmesser verwendet worden.

## 5 Schweißanweisung und Schweißfolgeplan

Bevor der wesentliche Teil dieser Ausarbeitung, die Herstellung von Flachlängs- und Trapezlängssteifen beginnt, werden im Vorfeld vereinfachte Schweißanweisungen und Schweißfolgepläne erstellt. Die Versuche 1 bis 4 sind in der Aufgabenstellung dieser Ausarbeitung vorgegeben. Die Konstruktionszeichnungen dieser Versuche, sind in Kapitel 6 näher beschrieben.

### 5.1 Schweißanweisung

Die folgende vereinfachte Schweißanweisung gilt für die Herstellung für alle vier Versuche dieser Ausarbeitung. Die folgenden Kenngrößen und Einstellungen sind mittels diverser experimenteller Vorversuche an diversen Stahlproben ermittelt worden. (Anmerkung: In der industriellen Fertigung werden u. U. andere Schweißparameter verwendet.) Für die Herstellung der Flachlängs- und Trapezlängssteifen wird das Metall-Aktivgasschweißen-Verfahren (MAG) mit der Kennnummer 135 verwendet. Eine weitere Einstellung am Schweißgerät ist die des Pulsschweißens. Die eingestellte Stromstärke beträgt für die Versuche 1 und 2 (dünnere Materialstärken) jeweils 70 A und die eingestellte Spannung beträgt 22,9 V. Für die Versuche 3 und 4 (dickere Materialstärke) beträgt die eingestellte Stromstärke 72 A. Die eingestellte Spannung liegt hier bei 23 V.

Für die Herstellung der ausgesteiften Beulfelder sind folgende Maße vorgegeben:

Tabelle 1: Versuchsinformationen und -parameter

	<u>Versuch 1</u>	<u>Versuch 2</u>	<u>Versuch 3</u>	<u>Versuch 4</u>
<b><u>Flach-/Trapez-</u> <u>längssteife</u></b>	Flachlängs- steife	Flachlängs- steife	Trapezlängs- steife	Trapezlängs- steife
<b><u>Zeichnungs-</u> <u>Nr.:</u></b>	10001271-01	10001271-02	10001271-03	10001271-04
<b><u>Stärke Grund-</u> <u>platte (mm):</u></b>	3	4	4	3
<b><u>Stegdicke</u> <u>(mm):</u></b>	6	4	--	--
<b><u>Trapezstärke</u> <u>(mm):</u></b>	--	--	2	2
<b><u>Nahtform:</u></b>	Kehlnat (FW)	Kehlnat (FW)	Kehlnat (FW)	Kehlnat (FW)

## 5.2 Schweißfolgeplan

In der Praxis gibt es verschiedene Möglichkeiten, um dem Biege- bzw. Beulverzug von beulgefährdeten Blechen entgegenzuwirken. Hier gibt es u.a. Maßnahmen, welche sowohl vor als auch nach dem Schweißen getroffen werden können. Vor dem Schweißen können große Bleche „vorgekrümmt“ oder fest eingespannt werden. Diese Maßnahme hat den Effekt, dass durch den schweißtechnisch-bedingten Wärmeeinfluss die Werkstücke während des Schweißens bzw. im Abkühlprozess nach dem Schweißen in die gewünschte Position gebracht werden und die Vorkrümmung somit rückgängig gemacht wird [12]. Das Vorkrümmen von großen Blechen erfolgt über die Verwendung von (Spann-)Gurten. Während des Schweißens gilt es die Schweißstromstärke so gering wie möglich zu halten und mit einer möglichst hohen Schweißgeschwindigkeit zu schweißen. Auch ist es in der Praxis nicht unüblich, dass Bleche in Vorrichtungen fest eingespannt werden, welche über einen Mechanismus mit einer zusätzlichen Wärmeabfuhr verfügen. Nach dem Schweißen gibt es einige Möglichkeiten den Schweißverzug zu richten. Das Kalt- bzw. Warmrichten (insb. Flammrichten) findet die häufigste Anwendung. Eine weitere Maßnahme ist die Verwendung von profilierten Blechen anstelle von ebenen Blechen. Die vorangegangenen Maßnahmen werden verwendet, um die Beulung gering zu halten. Diese Maßnahmen werden im Zuge dieser Ausarbeitung als gegeben angenommen und nicht näher betrachtet.

Im Vorfeld der in Kapitel 5.1 genannten Vorversuche sind vier verschiedene Varianten für einen geeigneten Schweißfolgeplan entstanden. Im Verlauf der Vorversuche ist die Auswahl auf einen finalen Schweißfolgeplan gefallen, da mit dieser Schweißfolge der geringste Verzug in den Vorversuchen entstanden ist. Die drei verworfenen Schweißanweisungen sind im Anhang C wiederzufinden. Außerdem wird beachtet, dass es sich bei den Versuchen um Maßstabsversuche handelt und der schweißtechnisch-bedingte Verzug auf ein Minimum gehalten werden soll. Dadurch entsprechen die hier gewählten Schweißfolgen nicht den Schweißfolgen für Bauteile im natürlichen Maßstab.

Folgend einige Informationen und Hinweise:

1. Allgemeines:

Der folgende Schweißfolgeplan ist verbindlich für die Herstellung der ausgesteiften Plattenbauteile. Hierunter fällt die Herstellung aller Flachlängs- und Trapezlängssteifen.

2. Schweißverfahren:

Metall-Aktivgasschweißen (MAG/135).

Anwendung: Schweißen aller Kehlnähte für die Plattenbauteil-Herstellung.

### 3. Schweißnahtvorbereitung:

Die Schweißkanten müssen frei von Feuchtigkeit und Verunreinigungen wie Rost, Lack, Fett, etc. sein. Die Schweißnaht-Position wird vor dem Auftragen des Speckle-Musters abgeklebt, um einen Stromfluss gewährleisten zu können.

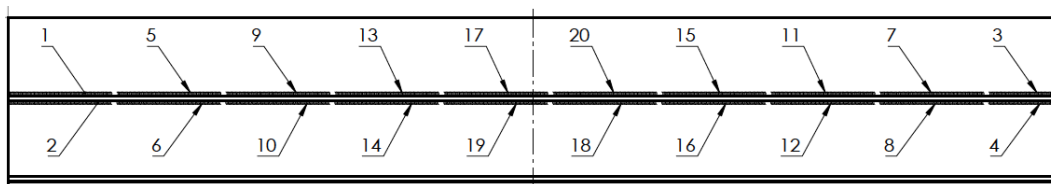
### 4. Schweißen:

Heftschweißungen: Die Fixierung der Einzelteile erfolgt durch zwei Heftschweißungen an den jeweiligen Außenkanten.

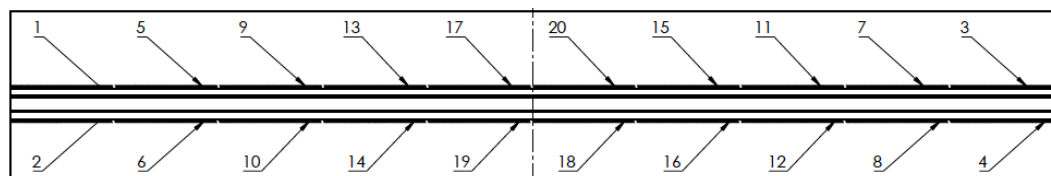
### 5. Schweißfolge:

Die Schweißfolge (alternierend / Pilgerschrittverfahren) ist zu beachten. Diese Schweißfolge gilt ausschließlich für die Herstellung der Steifen, die im Zuge dieser Ausarbeitung hergestellt werden. Diese gewählte Schweißfolge führt zu einer Abkühlung und Verzugsreduzierung der Plattenbauteile im Zuge des Herstellungsprozesses. Die Länge der Schweißnähte beträgt jeweils 100 mm.

Die folgende Schweißfolge gilt für alle Flachlängssteifen mit den Zeichnungsnummern: 10001271-01 und 10001271-02



Die folgende Schweißfolge gilt für alle Trapezlängssteifen mit den Zeichnungsnummern: 10001271-03 und 10001271-04



## 6 Herstellungsprozess von ausgesteiften Beulfeldern

Neben der Messung ist die Herstellung von ausgesteiften Beulfeldern der zweite große Bestandteil dieser Ausarbeitung. Bevor die Herstellung ebendieser beginnen kann, müssen vorab Fertigungszeichnungen erstellt werden. Nachdem der Schweißfolgeplan, die grobe Schweißanweisung und die Fertigungszeichnungen erstellt worden sind, beginnt die Herstellung der Bauteile. Hier ist zu beachten, dass für alle Grundplatten (der Versuche V1- V4) Vorkehrungen (s. Anhang D) vor dem Schweißen getroffen werden müssen. Diese Vorkehrungen betreffen hauptsächlich die anschließende Messung mit dem vorgegebenen Limes-Messsystem. Da mit diesem Messverfahren die Bauteile mit einem Speckle-Muster versehen werden müssen (siehe Kapitel 4.2 „Limes 3D“), werden die Schweißstellen an der Grundplatte vorher abgeklebt, wie in Abbildung 15 zu sehen ist. Dieser Schritt ist erforderlich für eine saubere Durchführung der Schweißnaht [15].

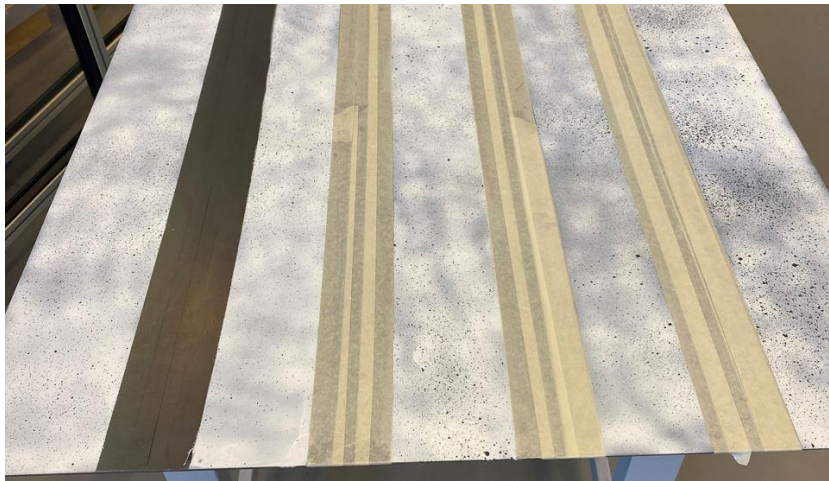


Abbildung 15: Vorbereitung der Schweißnähte

Für die Herstellung der Plattenbauteile muss zwingend folgende Reihenfolge beachtet werden:

1. Schweißnahtpositionen abkleben
2. Steifen per Heftschweißung fixieren
3. (Flach- bzw. Trapez-) Längssteife herstellen

### 6.1 Herstellung von zwei geometrisch unterschiedlichen Bauteilen mit Flachlängssteifen

Die beiden Versuche V1 und V2 beziehen sich auf die Herstellung von Flachlängssteifen. Diese unterschieden sich in den Abmessungen der verwendeten Grundplatten, der Steglängen und der Stegbreiten.



### 6.1.1 Fertigungszeichnung der Flachlängssteifen zu Versuch 1

Abbildung 16 zeigt die Fertigungszeichnung des ersten Versuchs. Diese ist hierbei verkleinert dargestellt. Die Zeichnung im Originalformat ist im Anhang D zu finden.

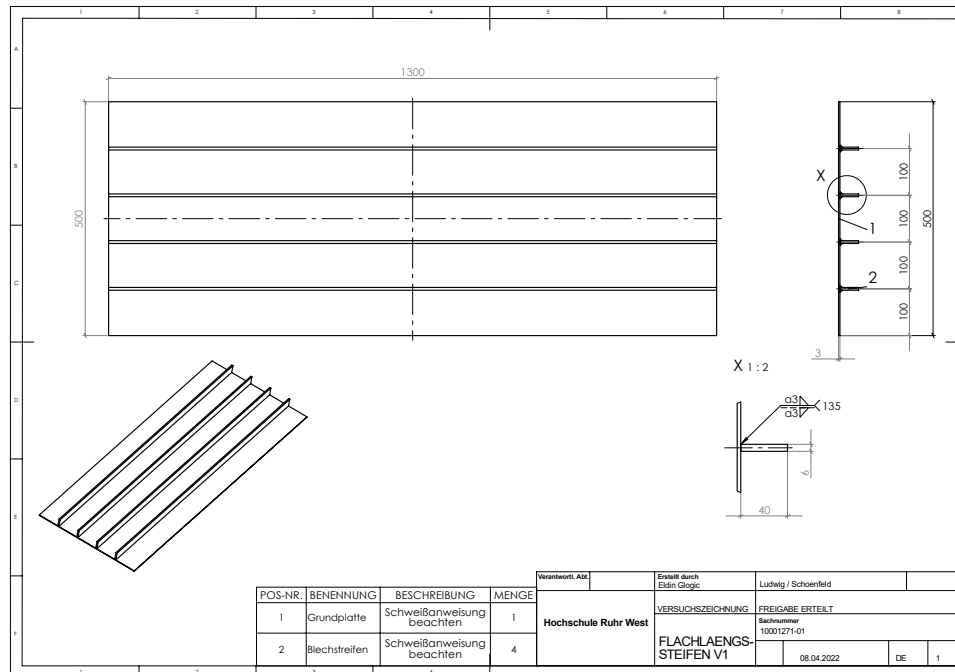


Abbildung 16: Fertigungszeichnung Flachlängssteife Versuch 1

### 6.1.2 Herstellungsprozess Versuch 1

In Versuch V1 sind die Flachlängssteifen der Reihe nach (von links nach rechts) verschweißt worden. Im Zuge dieser Art der Herstellung sind große Verzüge und Beulungen im Grundblech entstanden, sodass bereits nach Schweißung der zweiten Steife die weitere Herstellung negativ beeinflusst wurde. Abbildung 17 veranschaulicht dieses Phänomen des Verzugs der Grundplatte. Erkennbar ist, dass sich die Grundplatte durch den Verzug in die Vertikale gebogen hat. Um den Versuch dennoch wie geplant zu beenden, musste die Grundplatte auf dem Schweißtisch fest eingespannt werden, da ansonsten das Abschließen des Herstellungsprozess unmöglich gewesen wäre. Die Schweißnahtdicke  $a$  beträgt 2,6 mm.

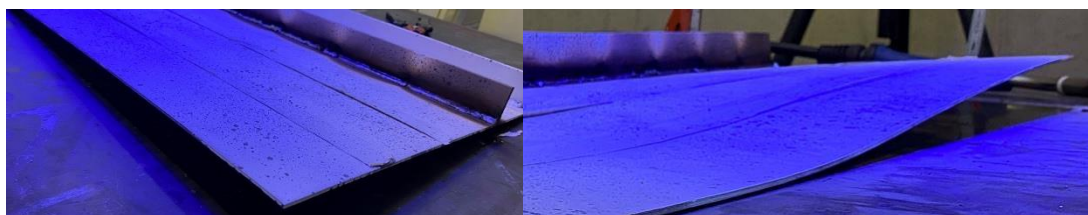


Abbildung 17: Verzug der Grundplatte nach Herstellung der zweiten Steife



Das fertige Plattenbauteil ist in der anschließenden Abbildung zu sehen und weist große Verformungen auf, welche sowohl in Längs- als auch in Querrichtung gehen.



Abbildung 18: Fertige Herstellung Plattenbauteil des ersten Versuchs

### 6.1.3 Fertigungszeichnung der Flachlängssteifen zu Versuch 2

Abbildung 19 zeigt die Fertigungszeichnung des zweiten Versuchs, diese ist hierbei verkleinert dargestellt. Die Zeichnung im Originalformat ist im Anhang D zu finden.

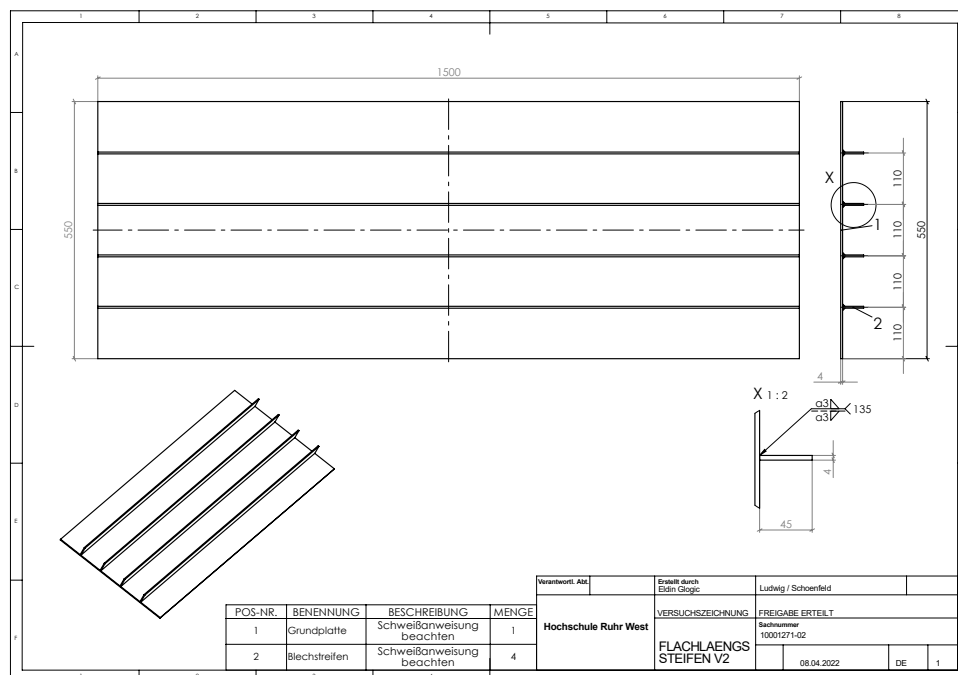


Abbildung 19: Fertigungszeichnung Flachlängssteife Versuch 2

### 6.1.4 Herstellungsprozess Versuch 2

Um den Verzug aus Versuch 1 nicht erneut bei der Herstellung der Flachlängssteifen für Versuch 2 hervorzurufen, wurden in diesem Versuch die Steifen von innen nach außen verschweißt. Ziel bei dieser gewählten Vorgehensweise ist es, den Wärmeeintrag nach außen abzuführen. Des Weiteren ist hier eine andere Schweißfolge verwendet worden. Für die Anbringung der Steifen 1 bis 3 ist, im Gegensatz zu Versuch 1, die verworfene Schweißfolge (Anhang C 1) verwendet worden. Diese zunächst ausgeschlossene Schweißfolge ist gewählt worden, um den Verzug im Schweißvorgang möglichst gering zu halten, da mit dieser Schweißfolge der Wärmeeintrag von der Mitte auf die Außenseite des Plattenbauteils getragen wird.

Die nachfolgende Abbildung 20 veranschaulicht, dass eine anders gewählte Schweißfolge und eine andere Reihenfolge der Anbringung der Steifen (von innen nach außen) keinen positiven Effekt auf den Verzug bzw. Beulung der Grundplatte mit sich bringt. Die Beulung bzw. der Verzug der Grundplatte nimmt eine ähnliche Beul- bzw. Verzugsgröße an, wie in Versuch 1. Die Schweißnahtdicke  $a$  beträgt 3,4 mm.

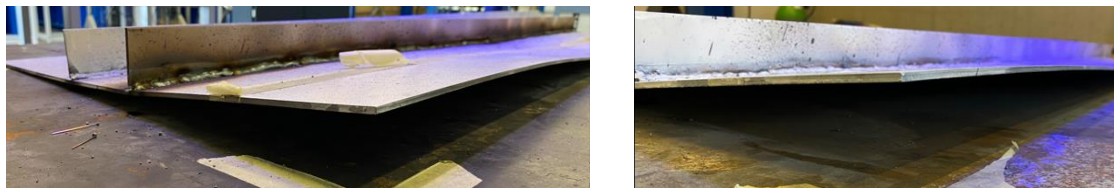


Abbildung 20: Verzug der Grundplatte nach Herstellung der zweiten Steife

Für die Anbringung der dritten Steife musste eine Einspannvorrichtung, aus Vierkantrohren, U-Profilen und Schraubzwingen hergestellt werden. Auch hier ist die dritte Steife mit der Schweißfolge aus Kapitel 5.2 angebracht worden. Der einzige Unterschied zu der Schweißfolge aus dem o.g. Kapitel ist, dass die Schweißnahtlänge auf 50 mm reduziert worden ist. Hier wurde explizit darauf geachtet, dass ein Abkühlen der Schweißnähte auf unter  $100^{\circ}\text{C}$  erfolgt ist, bevor die nächste Schweißnaht verschweißt wurde. Abbildung 21 veranschaulicht die Festeinspannung der Plattenbauteils.

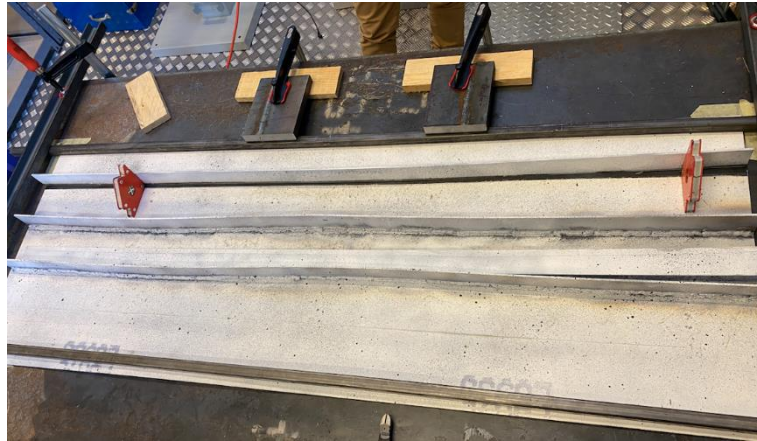


Abbildung 21: Festeinspannung des Plattenbauteils

Nachdem unter Anwendung der o.g. Einspannvorrichtung die dritte Steife verschweißt wurde, ist im Fügeprozess der vierten Steife, aus Gründen der Praktikabilität, auf die weitere Verwendung der Einspannvorrichtung verzichtet worden, da der Platzmangel den Schweißvorgang erheblich erschwert hat. Hier ist an der äußeren Längsseite ein Gurt angeschweißt worden. Dieser Gurt, auch Flansch genannt, nimmt die Biegebelastung der Grundplatte auf. Das hat zur Folge, dass die Biegung bzw. der Verzug der Grundplatte verringert wird. Durch diesen Schritt wird gewährleistet, dass der entstandene Spalt zwischen Grundplatte und Flachlängssteife reduziert wird. Diese Methode findet insbesondere im Brückenbau Anwendung [16]. Für die Anbringung dieser Flachlängssteife ist die ursprüngliche Schweißfolge aus Kapitel 5.2 gewählt worden. Das fertige Plattenbauteil aus Versuch 2, inklusive des angebrachten Gurtes, ist in der nachfolgenden Abbildung 22 zu sehen.



Abbildung 22: Fertige Herstellung Plattenbauteil aus Versuch 2

## 6.2 Herstellung von zwei geometrisch unterschiedlichen Bauteilen mit Trapezlängssteifen

Die Versuche V3 und V4 beziehen sich auf die Herstellung von Trapezlängssteifen. Sie unterscheiden sich in den Abmessungen der verwendeten Grundplatten und der Trapezlängen.

### 6.2.1 Fertigungszeichnung der Trapezlängssteifen zu Versuch 3

Abbildung 23 zeigt die Fertigungszeichnung des zweiten Versuchs, diese ist hierbei verkleinert dargestellt. Die Zeichnung im Originalformat ist im Anhang E zu finden.

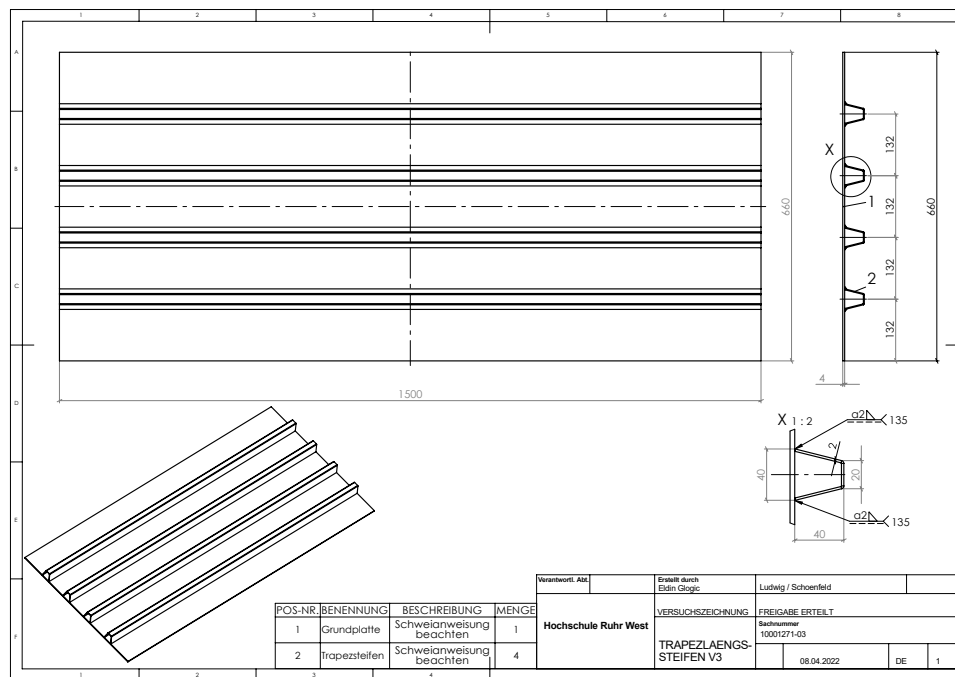


Abbildung 23: Fertigungszeichnung Trapezlängssteife Versuch 3

### 6.2.2 Herstellungsprozess Versuch 3

Um den Verzug in Versuch 3 gering zu halten, sind Gurte auf die Längskanten der Grundbleche geschweißt worden. Als Schweißfolge ist zudem die Schweißfolge aus Kapitel 5.2 verwendet worden. Die nachfolgende Abbildung 24 veranschaulicht, dass die Anbringung der Gurte einen positiven Einfluss auf den Verzug der Grundplatte und die anschließende Anbringung der restlichen Trapezsteifen nimmt. Zwar weist die Grundplatte einen Verzug auf, dennoch nimmt dieser nicht die Form aus den Versuchen 1 und 2 an. In den Versuchen 1 und 2 wäre die weitere Steifen-Montage ohne Zuhilfenahme von Spannvorrichtungen unmöglich gewesen. Die Schweißnahtdicke  $a$  beträgt 3,4 mm.

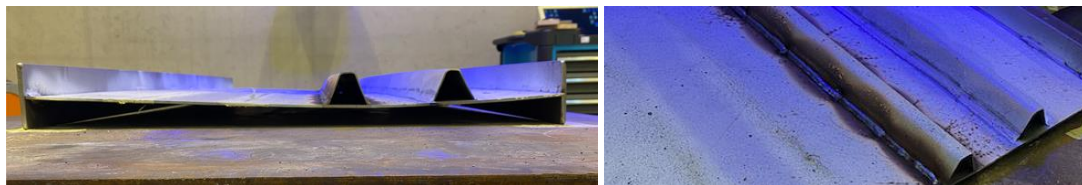


Abbildung 24: Verzug der Grundplatte nach Herstellung der zweiten Steife

In Abbildung 24 lässt sich der positive Effekt, bedingt durch die Montage der Gurte an den Längskanten sehen. Die Grundplatte nimmt zwar einen Verzug an, dieser Verzug ist allerdings deutlich kleiner als der Verzug der Grundplatten der Versuche V1 und V2 nach Fertigstellung der zweiten Steife. Abbildung 25 zeigt die Fertigstellung von Versuch 3 auf.





Abbildung 25: Fertige Herstellung Plattenbauteil aus Versuch 3

### 6.2.3 Fertigungszeichnung der Trapezlängssteifen zu Versuch 4

Abbildung 26 zeigt die Fertigungszeichnung des zweiten Versuchs, diese ist hierbei verkleinert dargestellt. Die Zeichnung im Originalformat ist im Anhang E zu finden.

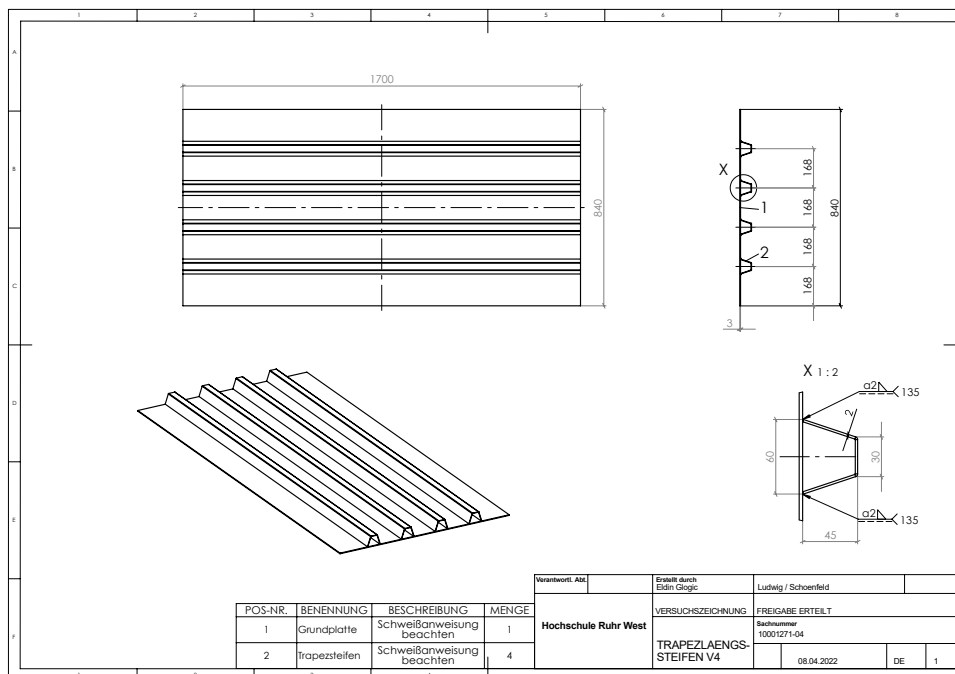


Abbildung 26: Fertigungszeichnung Trapezlängssteife Versuch 4

#### 6.2.4 Herstellungsprozess Versuch 4

Für die Herstellung dieses Versuchs wurden, wie in Versuch 3, Gurte an die Längskanten der Grundbleche geschweißt, um den positiven Effekt aus dem vorangegangenen Versuch auch hier zu erhalten. Als Schweißfolge wurde auch hier die Schweißfolge aus Kapitel 5.2 gewählt. Die Schweißnahtdicke  $a$  beträgt 3,4 mm.

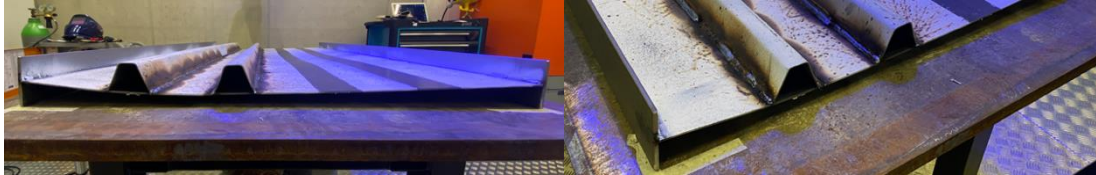


Abbildung 27: Verzug der Grundplatte nach Herstellung der zweiten Steife

In Versuch 4 lässt sich, wie in Versuch 3, ein positiver Einfluss auf den Verzug in Längsrichtung erkennen. Die Grundplatte nimmt zwar einen Verzug in Längsrichtung an, dieser Verzug wurde allerdings, durch den Einsatz der Gurte, gering gehalten. Dieser Verzug ist in Abbildung 27 zu erkennen. Abbildung 28 veranschaulicht die fertige Plattenbauteilherstellung aus Versuch 4.

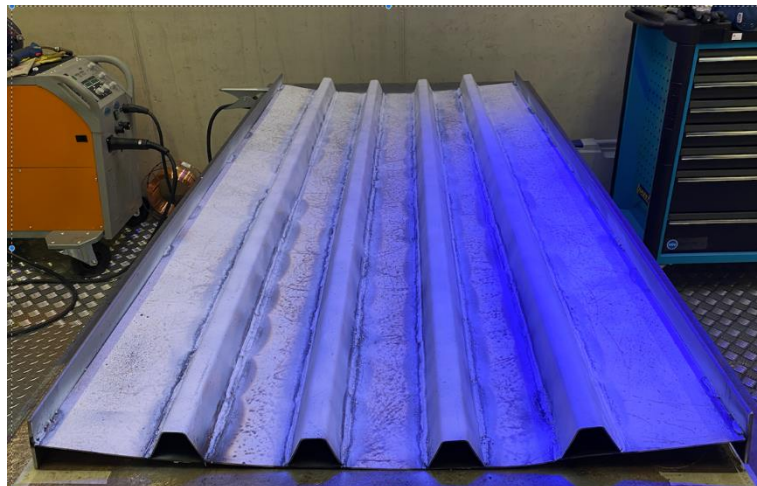


Abbildung 28: Fertige Herstellung Plattenbauteil aus Versuch 4

## 7 Experimentelle Verzugsmessungen der Steifen

In diesem Kapitel wird mit Hilfe der in Kapitel 4 vorgestellten Messverfahren der Verzug der hergestellten Beulfelder gemessen.

### 7.1 Vorüberlegungen für plausible Messgegenüberstellungen

Um die Eignung sämtlicher Messverfahren für die Verzugsmessung von ausgesteiften Beulfeldern zu prüfen und die erhaltenen Messergebnisse miteinander vergleichen zu können, wird folgende Durchführung der Messungen realisiert.

#### 7.1.1 Messdurchführung

Zu Beginn der Messung werden zunächst die Maße der Grundplatten für alle Versuche gemessen. Hierbei werden, unter Verwendung der aus Kapitel 4 beschriebenen Messsysteme, die (Außen-)Maße genommen, um ggf. fertigungs- bzw. lagerungsbedingte Vorbeulen zu identifizieren [12]. Diese Abmessungen der Grundplatten beschreiben den Zustand 0. Nachdem die Maße der Grundplatten erfasst worden sind, wird die Steife (Flachlängs- bzw. Trapezlängssteife) durch Heftschweißungen fixiert. Diese Zustandsaufnahme beschreibt den Zustand 1. Nach dem Schweißvorgang wird dieser Zustand erneut aufgenommen. Dieser beschreibt den Zustand 2. Die Zustandsaufnahmen Zustand 1 und Zustand 2 werden nach Herstellung von jeder der vier Steifen wiederholt, sodass für jedes erstellte Plattenbauteil jeweils viermal die Zustände 1 und 2, aufgenommen werden. Diese Zustände können im Nachgang miteinander verglichen und ausgewertet werden. Es werden lediglich die Stichmaße der Gesamtfelder aufgelistet.

Folgende Zustände sind folglich im Zuge der Verzugsmessung zu beachten:

Tabelle 2: Übersicht der durchzuführenden Messzustände

<b>Zustand 0:</b>	Abmessungen der Grundplatten im Auslieferungszustand
<b>Zustand 1:</b>	Abmessung der Grundplatte nach Heftung der jeweiligen Steife
<b>Zustand 2:</b>	Abmessung der Grundplatte nach Herstellung der jeweiligen Steife

Nur durch Beachtung dieser Schritte kann eine gleichmäßige Messung gewährleistet werden, da hierbei schrittweise der temperaturbedingte Verzug, in Form von geometrischen Imperfektionen (Beulung und Steifendrehung), erfasst wird. Folgende Daten werden im Zuge der Messung erfasst:

- geometrische Daten (Abmessungen, Abweichungen, etc.)
- Fehlererkennung (Vorbeulen der Grundplatte, Verzug nach Herstellung, etc.)



Anhand der zuvor beschriebenen Messdurchführung werden die Messungen mit den in Kapitel 7 beschriebenen Messverfahren durchgeführt:

- Limes 3D in Kapitel 7.2
- Laserscanner in Kapitel 7.3
- Messung mit direkten Messmitteln in Kapitel 7.4

Die nachfolgenden Messwerte beschreiben die Messergebnisse der Messungen unter Verwendung der Messmittel. Hierbei muss beachtet werden, dass bei allen Grundblechen die Beulung der Außenkante gemessen wird. Die nachfolgende Abbildung 29 veranschaulicht die Messreihenfolge der Außenkanten. Der Nullpunkt ist ebenfalls für alle Messungen der gleiche, damit eine Gegenüberstellung der gemessenen Werte gewährleistet werden kann.



Abbildung 29: Messreihenfolge der Außenkanten

## 7.2 Messung mit Limes 3D

Mit Hilfe dieser Messmethode sind alle vier Versuche vermessen worden. Ziel war es, sowohl die Beulung der Grundplatte, als auch die Drehung der Steife zu erfassen.

### 7.2.1 Messwerte

Nachfolgend werden lediglich die Messergebnisse der Stichmaß-Messungen der Grundplatte vor und nach Anbringung der Gurte sowie nach Fertigstellung des kompletten Plattenbauteils tabellarisch dargestellt. Die Auswertungen dieser Ergebnisse werden in Kapitel 8 diskutiert. Hierunter fallen zum einen die Bewertung der Abweichungen und zum anderen der Vergleich vom Stichmaß und der der Beulform, unter Zuhilfenahme der Literatur und normativer Grundlagen, statt.

### 7.2.1.1 Versuch 1 (Messwerte der Flachlängssteifen)

Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt die experimentell ermittelten Stichmaße aus Versuch 1, unter Anwendung des vorgegebenen Messsystems Limes-3D. Hier muss verdeutlicht werden, dass es sich hier jeweils um den größten gemessenen Stich ( $\Delta$ ) über die Steifenlänge handelt. Die ausführlichen Messwerte und graphischen Auswertungen sind in Anhang J zu finden.

Tabelle 3: Stichmaße aus Versuch 1

Versuch 1	Grundplatte Stichmaß (mm):	Herstellung Steife 4 Stichmaß (mm):
Kante 1 (Längsseite):	3,1 mm	10,48 mm
Kante 2 (Querseite):	2,9 mm	19,54 mm
Kante 3 (Längsseite):	2,6 mm	13,37 mm
Kante 4 (Querseite):	1,1 mm	20,34 mm

Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen die graphischen Darstellungen der Beulform nach Herstellung aller Steifen in Versuch 1. Diese Graphiken sind im Limes-3D Messsystem erzeugt worden.

Die Graphen veranschaulichen lediglich die Form der Beulung, aus vier verschiedenen Bezugskanten (Außenkanten 1 bis 4). Die Beulform wird von der Höhe der Beulung (y-Richtung) über die jeweilige Kantenlänge (x-Richtung) dargestellt.

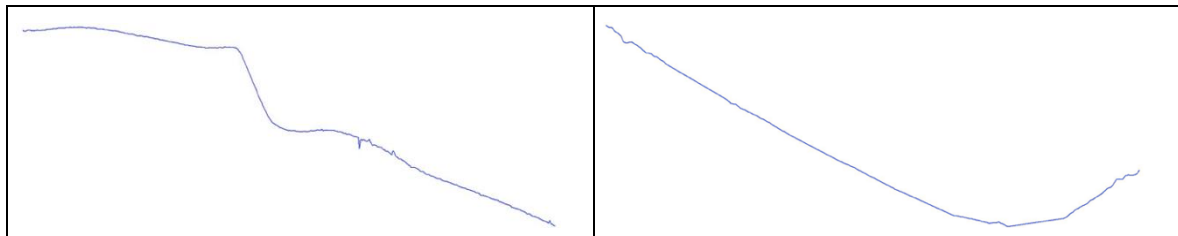


Abbildung 30: Beulform an Kante 1

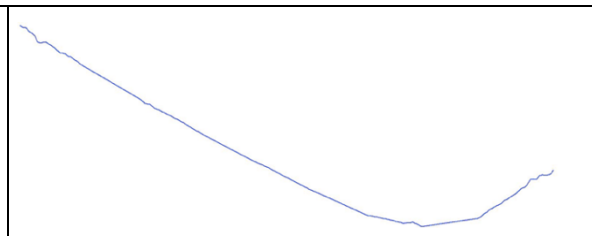


Abbildung 31: Beulform an Kante 2

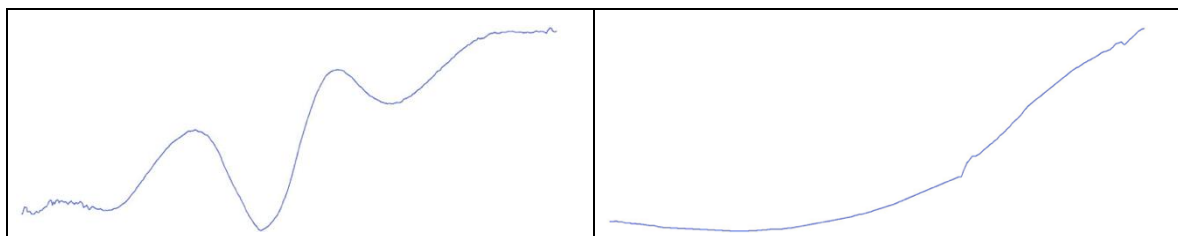


Abbildung 32: Beulform an Kante 3

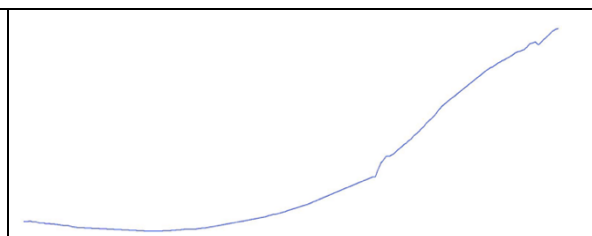


Abbildung 33: Beulform an Kante 4

### 7.2.1.2 Versuch 2 (Messwerte der Flachlängssteifen)

Die nachfolgende Tabelle 4 stellt die experimentell ermittelten Stichmaße aus Versuch 2 dar. Auch hier sind die Ergebnisse und die Beulformen im Limes-3D Messsystem erzeugt worden. Hier gilt ebenfalls, dass es sich um den größten gemessenen Stich ( $\Delta$ ) über die Steifenlänge handelt. Die ausführlichen Messwerte und die Gegenüberstellung der Beulformen in den verschiedenen Zuständen sind in Anhang K zu finden.

Tabelle 4: Stichmaße aus Versuch 2

Versuch 2	Grundplatte Stichmaß (mm):	Herstellung Steife 4 Stichmaß (mm):
Kante 1 (Längsseite):	2,75 mm	40,91 mm
Kante 2 (Querseite):	1,04 mm	42,65 mm
Kante 3 (Längsseite):	2,68 mm	48,89 mm
Kante 4 (Querseite):	3,21 mm	43,94 mm

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die graphischen Darstellungen der Beulform aus vier verschiedenen Bezugskanten (Außenkanten 1 bis 4) nach Herstellung aller Steifen in Versuch 2. Diese Graphiken sind im Limes-3D Messsystem erzeugt worden. Die Beulform wird von der Höhe der Beulung (y-Richtung) über die jeweilige Kantenlänge (x-Richtung) dargestellt.

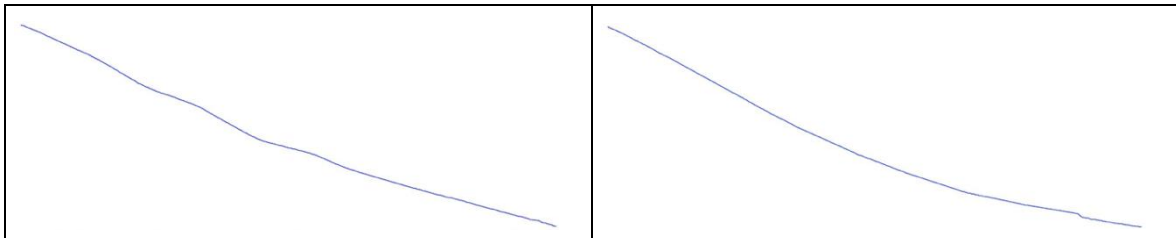


Abbildung 34: Beulform an Kante 1

Abbildung 35: Beulform an Kante 2

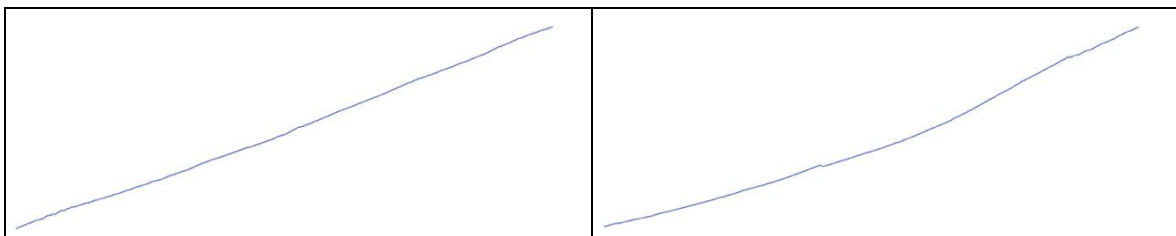


Abbildung 36: Beulform an Kante 3

Abbildung 37: Beulform an Kante 4

### 7.2.1.3 Versuch 3 (Messwerte der Trapezlängssteifen)

Bei diesem Versuch ist eine andere Messreihenfolge gewählt worden. Dieser Schritt ist unvermeidbar gewesen, da der hohe Mess- und Auswerteaufwand und der daraus resultierende Zeitaufwand zu hoch gewesen wären. Zunächst wurde die Grundplatte ohne jegliche Änderungen gemessen. Anschließend wurde die Grundplatte nach Anbringen der Gurte gemessen und zuletzt die Grundplatte nach Fertigstellung von allen vier Steifen gemessen. Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt die Messwerte der größten Stichmaße ( $\Delta$ ) für Versuch 3. Hier sind drei Messreihen aufgeführt. Die ausführlichen Messergebnisse sind in Anhang L zu finden.

Tabelle 5: Stichmaße aus Versuch 3

Versuch 3	Grundplatte Stichmaß (mm):	Grundplatte nach Anbringung der Gurte Stichmaß (mm):	Herstellung Steife 4 Stichmaß (mm):
Kante 1 (Längsseite):	2,96 mm	2,05 mm	5,09 mm
Kante 2 (Qu- erseite):	1,53 mm	1,02 mm	29,72 mm
Kante 3 (Längsseite):	2,02 mm	2,01 mm	5,48 mm
Kante 4 (Qu- erseite):	1,1 mm	0,97 mm	30,37 mm

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die graphischen Darstellungen der Beulform aus vier verschiedenen Bezugskanten (Außenkanten 1 bis 4) nach Fertigstellung von Versuch 3. Diese Graphiken sind im Limes-3D Messsystem erzeugt worden. Die Beulform wird von der Höhe der Beulung (y-Richtung) über die jeweilige Kantenlänge (x-Richtung) dargestellt.

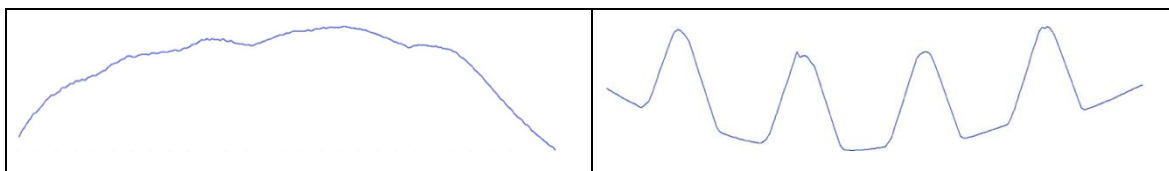


Abbildung 38: Beulform an Kante 1

Abbildung 39: Beulform an Kante 2

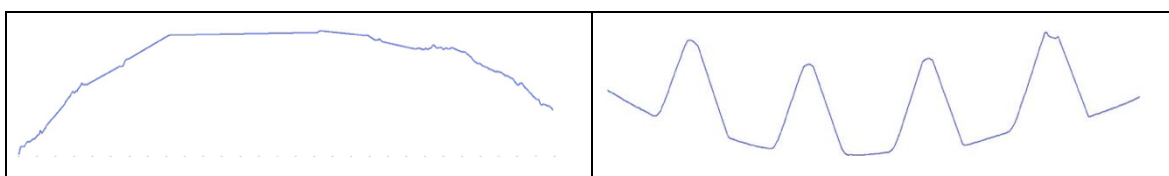


Abbildung 40: Beulform an Kante 3

Abbildung 41: Beulform an Kante 4

Die „Ausschweifungen“ in Abbildung 39 und Abbildung 41 stellen die Trapeze, welche auf die Grundplatte geschweißt worden sind, dar und sind nicht mit in die Bemessung der Stichmaße eingeflossen.

#### 7.2.1.4 Versuch 4 (Messwerte der Trapezlängssteifen)

Dieser Versuch bedient sich der gleichen Messreihenfolge, wie der Versuch zuvor. Die nachfolgende Tabelle 6 veranschaulicht die Messwerte der größten Stichmaße über die Steifenlänge ( $\Delta$ ) für den Versuch 4. Hier sind erneut drei Messreihen aufgeführt. Die ausführlichen Messergebnisse sind in Anhang M zu finden.

Tabelle 6: Stichmaße aus Versuch 4

Versuch 3	Grundplatte Stichmaß (mm):	Grundplatte nach Anbringung der Gurte Stichmaß (mm):	Herstellung Steife 4 Stichmaß (mm):
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	4,82 mm	3,76 mm	35,87 mm
<b>Kante 2 (Qu- erseite):</b>	2,5 mm	3,15 mm	49,78 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	4,78 mm	3,48 mm	32,74 mm
<b>Kante 4 (Qu- erseite):</b>	2,59 mm	4,55 mm	32,98 mm

Die anschließenden Abbildung 42 bis Abbildung 45 zeigen die graphischen Darstellungen der Beulform aus vier verschiedenen Bezugskanten (Außenkanten 1 bis 4) nach Fertigstellung von Versuch 4. Diese Graphiken sind im Limes-3D Messsystem erzeugt worden. Die Beulform wird von der Höhe der Beulung (y-Richtung) über die jeweilige Kantenlänge (x-Richtung) dargestellt.

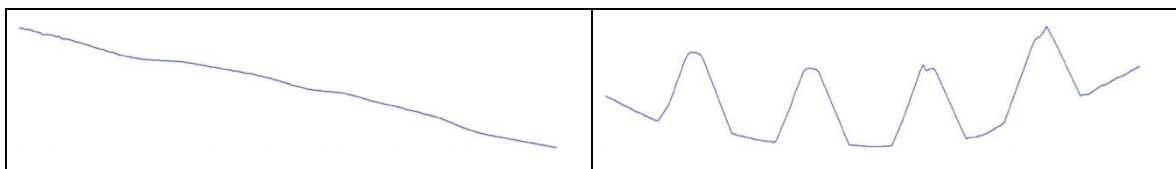


Abbildung 42: Beulform an Kante 1



Abbildung 43: Beulform an Kante 2

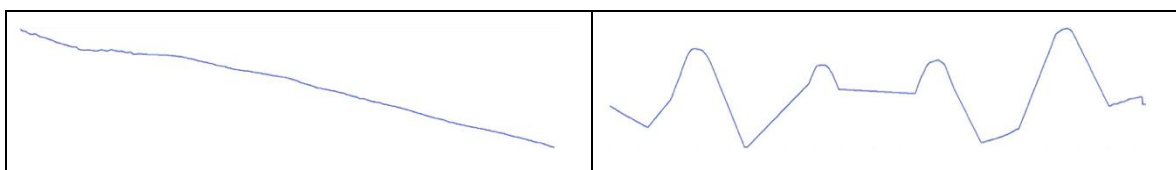


Abbildung 44: Beulform an Kante 3

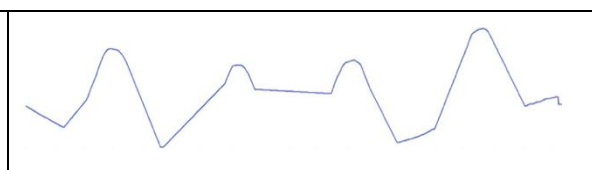


Abbildung 45: Beulform an Kante 4

Auch hier in den Abbildung 43 und Abbildung 45 sind „Ausschweifungen“ zu sehen. Diese Ausschweifungen stellen die angeschweißten Trapeze dar und sind in der Bemessung der Stichmaße nicht mit eingeflossen.

### 7.3 Messung mit selbstgewähltem Messmittel (Laserscanner)

Analog zu der vorangegangenen Methode sind auch mit der vorliegenden Methode alle vier Versuche nach jeder Steifenherstellung erfasst worden. Zusätzlich erfasst wurden hierbei die Beulung der Grundplatte und die daraus resultierende Drehung der Steife.

#### 7.3.1 Messwerte

Die nachfolgenden Messwerte beschreiben die Messergebnisse der Messungen auf Basis des Laserscanners. Da die Möglichkeit mit Hilfe des Laserscanners gegeben ist, sowohl globale auch lokale Beulfelder zu erfassen, fließen in der Nachfolgenden Übersicht auch die Stichmaße ( $\Delta$ ) der (unausgesteiften) Einzelfelder mit ein. (Diese sind im Zuge der Aufgabenstellung nicht explizit gefordert, dennoch werden sie der Vollständigkeit halber aufgeführt.). Die Auswertungen und die Gegenüberstellung von Form und Stichmaß erfolgt in Kapitel 8. Aufgrund der Tatsache, dass für jeden Versuch jeweils vier Steifen angebracht worden sind, weist jedes Plattenbauteil jeweils fünf Einzelfelder auf. In den Versuchen 3 und 4, konnte mit der Anwendung des Laserscanners darüber hinaus die Beulung an den Längsseiten, trotz Anbringung von Gurten, ermittelt werden

##### 7.3.1.1 Versuch 1 (Messwerte der Flachlängssteifen)

Tabelle 7 zeigt die Messwerte der Stichmaße nach der Plattenbauteilherstellung aus Versuch 1, unter Anwendung des Laserscanners. Die graphischen Darstellungen der Beulformen sind im Anhang N wiederzufinden

Tabelle 7: Stichmaße aus Versuch 1 (inkl. lokale Beulungen)

Versuch 1	Herstellung Steife 4 Stichmaß (mm):	Einzelfeldbetrachtung (lokale Beulungen)	Stichmaß (mm):
Kante 1 (Längsseite):	14,45 mm	Einzelfeld 1:	14,45 mm
Kante 2 (Querseite):	19,87 mm	Einzelfeld 2:	19,87 mm
Kante 3 (Längsseite):	14,27 mm	Einzelfeld 3:	16,89 mm
Kante 4 (Querseite):	20,01 mm	Einzelfeld 4:	20,01 mm
-	-	Einzelfeld 5:	19,35 mm

### 7.3.1.2 Versuch 2 (Messwerte der Flachlängssteifen)

Tabelle 8 beinhaltet die Messwerte der Stichmaße nach der Plattenbauteilherstellung aus Versuch 2. Die graphischen Darstellungen der Beulformen für diesen Versuch, sind ebenfalls im Anhang N wiederzufinden.

Tabelle 8: Stichmaße aus Versuch 2 (inkl. lokale Beulungen)

Versuch 2	Herstellung Steife 4 Stichmaß (mm):	Einzelfeldbetrachtung (lokale Beulungen)	Stichmaß (mm):
Kante 1 (Längsseite):	38,74 mm	Einzelfeld 1:	38,74 mm
Kante 2 (Querseite):	24,65 mm	Einzelfeld 2:	28,64 mm
Kante 3 (Längsseite):	33,71 mm	Einzelfeld 3:	19,27 mm
Kante 4 (Querseite):	38 mm	Einzelfeld 4:	28,92 mm
-	-	Einzelfeld 5:	24,96 mm

### 7.3.1.3 Versuch 3 (Messwerte der Trapezlängssteifen)

Tabelle 9 umfasst die Messwerte der Stichmaße aus dem dritten Versuch, nach der Plattenbauteilherstellung. Wie auch in den Versuchen zuvor, gilt hier auch, dass die graphischen Darstellungen der Beulformen im Anhang N zu finden sind.

Tabelle 9: Stichmaße aus Versuch 3 (inkl. lokale Beulungen)

Versuch 3	Herstellung Steife 4 Stichmaß (mm):	Einzelfeldbetrachtung (lokale Beulungen)	Stichmaß (mm):
Kante 1 (Längsseite):	6,26 mm	Einzelfeld 1:	10,93 mm
Kante 2 (Querseite):	27,67 mm	Einzelfeld 2:	22,15 mm
Kante 3 (Längsseite):	8,59 mm	Einzelfeld 3:	24,92 mm
Kante 4 (Querseite):	24,92 mm	Einzelfeld 4:	20,57 mm
-	-	Einzelfeld 5:	9,68 mm

### 7.3.1.4 Versuch 4 (Messwerte der Trapezlängssteifen)

Tabelle 10 beinhaltet die Messwerte der Stichmaße aus dem vierten Versuch, nach der Plattenbauteilherstellung. Die graphischen Darstellungen der Beulformen sind im Anhang n zu finden.

Tabelle 10: Stichmaße aus Versuch 4 (inkl. lokale Beulungen)

Versuch 4	Herstellung Steife 4 Stichmaß (mm):	Einzelfeldbetrachtung (lokale Beulungen)	Stichmaß (mm):
Kante 1 (Längsseite):	4,34 mm	Einzelfeld 1:	19,66 mm
Kante 2 (Querseite):	38,28 mm	Einzelfeld 2:	42,07 mm
Kante 3 (Längsseite):	5,95 mm	Einzelfeld 3:	49,44 mm
Kante 4 (Querseite):	49,44 mm	Einzelfeld 4:	40,94 mm
-	-	Einzelfeld 5:	25,23 mm

## 7.4 Messung mit direktem konventionellen) Messmitteln (Tiefenmessschieber, Messlineal, Winkelmesser und Wasserwaage, etc.)

Unter Verwendung dieser Messmethode sind die Versuche V1 und V2 nach der in Kapitel 7.1.1 genannten Messdurchführung gemessen worden. Bei den Versuchen V3 und V4 ist eine kürzere Messdurchführung gewählt worden. Dieser Schritt ist unumgänglich gewesen, da der zeitliche (Mehr-) Aufwand deutlich über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen würde. Bei den Versuchen V3 und V4 sind jeweils die Abmessung der Grundplatte vor dem Schweißen (Zustand 0) und anschließend der Verzug der Grundplatte nach Anbringung der Gurte und nach Herstellung der vierten Steife gemessen worden. In den Versuchen V3 und V4 sind die Abmessungen nach den jeweiligen Heftschweißungen nicht aufgenommen worden. In diesen Versuchen konnte ebenfalls lediglich der Verzug in Querrichtung gemessen werden, da aufgrund der angebrachten Gurte an den Längsseiten der Verzug in Längsrichtung händisch nicht ermittelt werden kann.

### 7.4.1 Messwerte

Die nachfolgenden Messwerte beschreiben die Messergebnisse der Messungen von Hand. Die Auswertungen und die Gegenüberstellung von Form und Stichmaß, mit der Literatur und Norm, erfolgt in Kapitel 8.

#### 7.4.1.1 Versuch 1 (Messwerte der Flachlängssteifen)

Tabelle 11 stellt die experimentell ermittelten größten Stichmaße ( $\Delta$ ) und den Verdrehwinkel der Steifen aus Versuch 1 nach Herstellung aller vier Steifen dar. Die vollständigen Messwerte sind in Anhang F wiederzufinden.



Tabelle 11: Stichmaße und Verdrehwinkel der Steifen aus Versuch 1 nach Plattenbauteilherstellung

Vers. 1:	Stichmaße (mm)	Verdrehwinkel	$\Phi$ bei 0 mm:	$\Phi$ bei 600 mm:	$\Phi$ bei 1300 mm:
Kante 1:	8,64	Steife 1:	90 °	89 °	90 °
Kante 2:	21,93	Steife 2:	89 °	-	89 °
Kante 3:	11	Steife 3:	87 °	-	87 °
Kante 4:	18,96	Steife 4:	86 °	89 °	89 °

Die beiden nachfolgenden Graphiken (Abbildung 46 und Abbildung 47) veranschaulichen den Verlauf aller Messwerte aus Versuch 1. Die x-Achse beschreibt die Kantenlänge, die y-Achse die Höhe der Beulung.

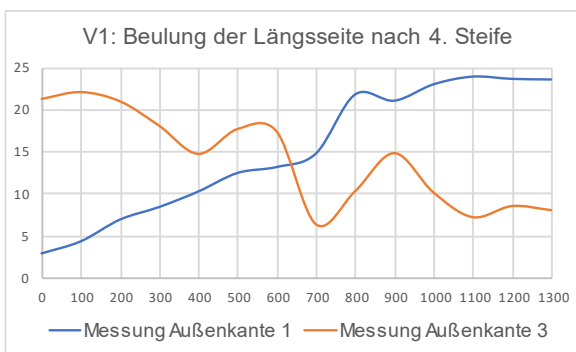


Abbildung 46: Graphischer Verlauf der Messwerte in Längsrichtung (V1) nach Steife 4

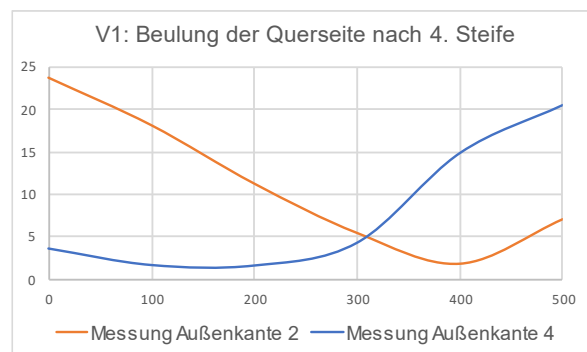


Abbildung 47: Graphischer Verlauf der Messwerte in Querrichtung (V1) nach Steife 4

#### 7.4.1.2 Versuch 2 (Messwerte der Flachlängssteifen)

Tabelle 12 veranschaulicht die Messergebnisse aus Versuch 2 nach Herstellung der vierten Steife. In diesem Versuch ist nach jeder Anbringung einer Steife der Abstand der Grundplatte zur Tischplatte gemessen worden. Diese Messwerte und die kompletten graphischen Darstellungen der Beulform sind in Anhang G zu finden.

Tabelle 12: Stichmaße und Verdrehwinkel der Steifen aus Versuch 2 nach Plattenbauteilherstellung

Vers. 2:	Stichmaße (mm)	Verdrehwinkel	$\Phi$ bei 0 mm:	$\Phi$ bei 600 mm:	$\Phi$ bei 1300 mm:
Kante 1:	nicht messbar	Steife 1:	90 °	89 °	90 °
Kante 2:	33	Steife 2:	89 °	-	89 °
Kante 3:	nicht messbar	Steife 3:	87 °	-	87 °
Kante 4:	62	Steife 4:	86 °	89 °	89 °

Abbildung 48 veranschaulicht die Beulform anhand der gemessenen Messwerte in Querrichtung. Die Werte in Längsrichtung sind aufgrund des angebrachten Gurtes nicht messbar gewesen.

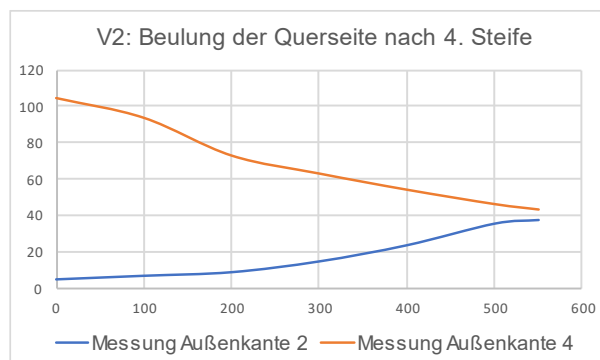


Abbildung 48: Graphischer Verlauf der Messwerte in Querrichtung (V2) nach Steife 4

### 7.4.1.3 Versuch 3 (Messwerte der Trapezlängssteifen)

Für Versuch 3 ist eine andere Messreihenfolge gewählt worden. Auch hier ist wie vorangegangen, dieser Schritt aufgrund des großen Mess- und daraus resultierenden Zeitaufwands unumgänglich gewesen. Für Versuch 3 wurde zunächst die Grundplatte gemessen. Anschließend wurde die Grundplatte nach Anbringung der beiden Gurte und nach Herstellung aller vier Trapezsteifen gemessen. In den Versuchen V3 und V4 wird lediglich der Verzug der Grundplatte in Querrichtung erfasst. Die händische Messung des Verzugs in Längsrichtung, ist wie im Versuch zuvor, aufgrund der angeschweißten Gurte nicht möglich gewesen. Tabelle 13 zeigt die erfassten größten Stichmaße ( $\Delta$ ) aus Versuch 3 zum einen nach Anbringung der Gurte an den Längsseiten und zum anderen nach Fertigstellung aller Trapezlängssteifen.

Tabelle 13: Stichmaße aus Versuch 3

Vers. 3:	Stichmaße (mm) nach Gur- tanbringung	Stichmaße (mm) nach Plat- tenbauteil - Herstellung
Kante 1:	nicht messbar	nicht messbar
Kante 2:	0,1	35
Kante 3:	nicht messbar	nicht messbar
Kante 4:	0,2	33

Die Abbildung 49 und Abbildung 50 veranschaulichen die Beulform in Querrichtung, einerseits nach Gurtanbringung und andererseits nach Fertigstellung des Plattenbauteils aus Versuch 3.

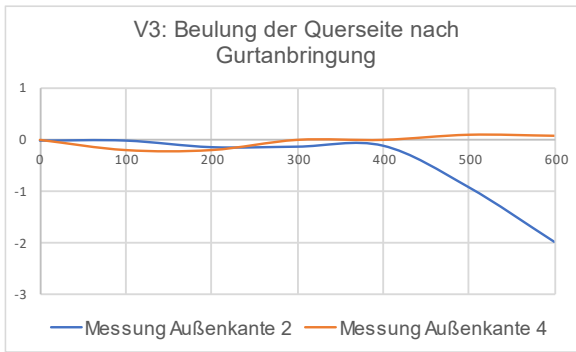


Abbildung 49: Graphischer Verlauf der Messwerte nach Gurtanbringung

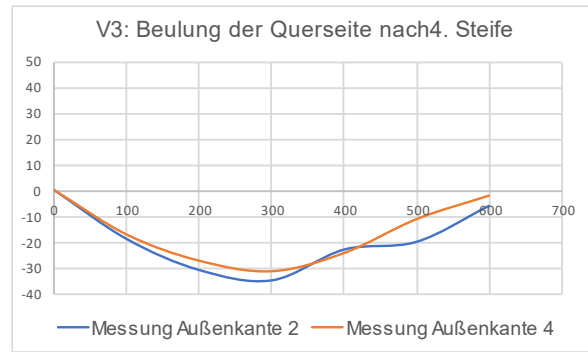


Abbildung 50: Graphischer Verlauf der Messwerte nach der Plattenbauteilherstellung

Um den Winkel der Trapezdrehung zu ermitteln, sind punktuelle Messungen von beiden Seiten der jeweiligen Trapezlängssteife durchgeführt worden. Hierbei ist der Mittelwert gebildet worden. Im Anschluss dazu ist die Differenz zum Soll-Winkel gebildet worden. Hier muss allerdings beachtet werden, dass diese Werte wenig aussagekräftig sind, da die Trapeze im Zuge der Herstellung mit Einspannvorrichtungen auf die Grundplatte eingespannt wurden. Das führte dazu, dass sich die ursprünglichen Trapeze verbogen haben.

Tabelle 14 beinhaltet die Messwerte des Winkelverzugs der Steifen. Im Anhang H ist die komplette Messübersicht und die Messreihenfolge für die Ermittlung des Winkelverzugs der Trapeze zu sehen.

Tabelle 14: Winkelverzug der Trapezlängssteife aus Versuch 3

$\Phi$ soll = 104,5 °	$\bar{X}$ - Verzug Seite 1 (°)	$\bar{X}$ - Verzug Seite 2 (°)
Steife 1:	-6,3	-7,9
Steife 2:	-4,5	-5,7
Steife 3:	-3,1	-3,7
Steife 4:	-8,5	-7,9

#### 7.4.1.4 Versuch 4 (Messwerte der Trapezlängssteifen)

Auch für diesen Versuch ist dieselbe Messreihenfolge wie in Versuch 3 gewählt worden. Hier gilt, wie auch zuvor, dass die vollständigen Messwerte im Anhang, hier Anhang I, zu finden sind.

Tabelle 15 und Tabelle 16 beinhalten die Messergebnisse aus Versuch 4. In diesem Versuch wurden die Grundplatten nach Anbringung der Gurte und nach Fertigstellung des kompletten Plattenbauteils gemessen. Tabelle 16 zeigt den Winkelverzug der Trapezlängssteifen.

Tabelle 15: Stichmaße aus Versuch 4

Vers. 4:	Stichmaße (mm) nach Gur- tanbringung	Stichmaße (mm) nach Plat- tenbauteil - Herstellung
Kante 1:	nicht messbar	nicht messbar
Kante 2:	0,29	49,94
Kante 3:	nicht messbar	nicht messbar
Kante 4:	0,26	36,19

Die Abbildung 51 und Abbildung 52 skizzieren die Beulform in Querrichtung, zum einen nach Gurtanbringung und zum anderen nach Fertigstellung des Plattenbau-  
teils aus Versuch 4.

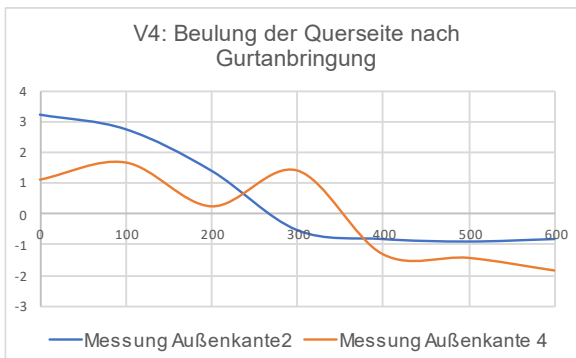


Abbildung 51: Graphischer Verlauf der Messwerte nach Gurtanbringung

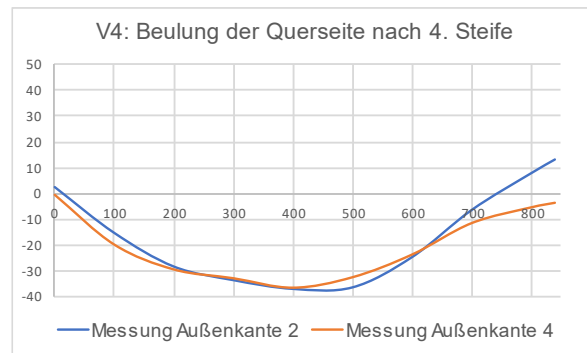


Abbildung 52: Graphischer Verlauf der Messwerte nach der Plattenbauteilherstellung

Tabelle 16: Winkelverzug der Trapezlängssteife aus Versuch 4

$\Phi$ soll = 109,5 °	$\bar{X}$ -Verzug Seite 1 (°)	$\bar{X}$ - Verzug Seite 2 (°)
Steife 1:	-2,3	-9,9
Steife 2:	-3,3	-0,5
Steife 3:	-1,5	-0,5
Steife 4:	-5,9	-3,9

## 7.5 Diskussion und Auswahl des am geeignetsten Messverfahren

Das Limes-3D Messsystem bringt viele Vorteile mit sich. Neben der Möglichkeit komplexe Geometrien zu messen, sind auch 360°-Messungen möglich. Daher kann dieses System für eine Vielzahl unterschiedlicher Messanwendungen zum Einsatz kommen. Die zugehörige Software „Istra 4D“ bietet dem Anwender verschiedene

Methoden zur Auswertung an. Hier können bspw. Graphen, welche die Deformation anzeigen, erstellt werden. Mit dieser Funktion kann bspw. die Beulform ausgegeben werden. Ein solcher Graph ist in Abbildung 38 zu sehen. Unter Verwendung einer 1 Megapixel-Kamera, liegt die Genauigkeit dieses Messsystems bei 0,01 Pixel (das entspricht einer Genauigkeit von 1  $\mu\text{m}$  bei 1 Megapixelkamera und einem Messfeld von 100 mm x 100 mm) [13]. Ein weiterer Vorteil dieses Messsystems ist, dass man die Messergebnisse in verschiedene Formate exportieren kann. Hier können besonders die Exportformate ASCII und STL herangezogen werden und in anderen Softwares weiterverarbeitet werden. Gerade die Möglichkeit zum Export im STL-Format bietet dem Anwender ein breites Spektrum an Anwendungs- und Weiterverarbeitungsmöglichkeiten.

Zu den Nachteilen dieses Messsystems zählen neben den hohen Anschaffungskosten auch die „komplexe“ Ausrichtung des Triangulationswinkels. Bei einer Anwendung von mind. zwei Kameras muss zwingend gewährleistet werden, dass alle Kameras einen gemeinsamen Brennpunkt haben. Der Kalibrierungsprozess, vor allem ab der Nutzung von 3 Kameras, ist komplizierter, da sichergestellt werden muss, dass die Kalibrierplatte gleichermaßen von allen Kameras erkannt wird. Ein weiterer großer Nachteil, speziell für diese Aufgabenstellung ist, dass das aufgetragene Speckle-Muster während dem Schweißen verbrennt und ein neu aufgetragenes Speckle-Muster vom System nicht mehr erkannt wird. Somit kann keine Mustererkennung mehr gewährleistet werden und die hieraus resultierende Verformungsmessung ist nichtig. Ein zusätzliches Ausschlusskriterium dieser Messmethode ist, speziell für die Aufgabenstellung dieser Ausarbeitung, dass gleichzeitig ein großes Bildfeld gegeben ist, die Stege der Flachlängssteifen verhältnismäßig klein sind und die Auflösung der Kameras nicht besonders hoch ist. Daher ist dieses Messsystem nicht besonders für die Aufgabenstellung dieser Ausarbeitung geeignet. Zwar kann dieses Messsystem als „geometrisches“ Messverfahren zur Messung der Grundplatten „zweckentfremdet“ werden, um diese im Nachgang miteinander zu vergleichen, dennoch gibt es gerade für diese Anwendung kostengünstigere Methoden. Eine reine Beulmessung der Grundplatte bspw. kann von Hand mit direkten Messmitteln und Handaufmaß getätigt werden. Außerdem handelt es sich hierbei nicht um ein mobiles Messsystem. Es ist daher für Außeneinsätze, speziell für die Analyse von Beulfeldern im Brückenbau, ungeeignet. Gerade die Tatsache, dass die Messung der Verdrehwinkel der Steifen, sogar unter Laborbedingung nicht funktioniert, deutet darauf hin, dass dieses Messverfahren für Verzugsmessungen an ausgesteiften Beulfeldern ungeeignet ist.

Die Messung mit dem EinScan HX Laserscanner bringt viele Vorteile mit sich. Neben der Tatsache, dass viele verschiedene Objekte mit verschiedener Form messbar sind, spricht die hohe (Mess-) Genauigkeit für dieses Messsystem. Die Herstellerangabe bzgl. der Genauigkeit beträgt 0,04 mm im Laser- und 0,05 mm im Punktemodus. Gerade die Genauigkeit von 0,05 mm im Punktemodus, konnte im Zuge dieser Ausarbeitung belegt werden, da sämtliche Messungen im Punkte- und nicht im Lasermodus, getätigt wurden. Auch die Auswahl an verschiedenen Exportformaten ist ein weiterer Vorteil dieses Messsystems. Neben STL-Dateien können auch OBJ-Dateien exportiert werden. Diese beiden Dateiformate sind besonders für das Reverse Engineering und Rapid Prototyping interessant, da mit Hilfe dieser Formate, binnen kürzester Zeit ein physisches Bauteil oder eine Baugruppe hergestellt werden kann. Ein weiterer großer Vorteil dieser Methode ist die Handlichkeit, die einfache Handhabung und die Möglichkeit mobil auf Außeneinsätzen Messungen durchführen zu können.

Zu den Nachteilen dieses Verfahrens gehört, dass Rechner mit leistungsstarken Graphikkarten und Prozessoren (CAD-Rechner) notwendig sind, da die Dauer der Auswertung in direkter Abhängigkeit zu der Leistung des verwendeten Rechners steht. Ein weiterer Nachteil ist, dass die exportierten STL- bzw. OBJ-Dateien eine enorme Dateigröße aufweisen. (im Bereich von 350 bis 750 Megabyte). Unter Anwendung dieses Messsystems werden Oberflächeninformationen des Objektes aufgenommen und ein digitaler Zwilling abgeleitet. Mit Hilfe dieses digitalen Zwillings lässt sich ein Oberflächenvergleich, zwischen der aufgenommenen Oberfläche und einer ursprünglichen CAD-Datei der Baugruppe, durchführen. Hier können verschiedene Punkte abgegriffen und untersucht werden. Für ebendiese Auswertungen sind verschiedene Softwares notwendig, welche ein gewisses Grundwissen in 3D-Modellierung voraussetzen.

Mit der Verwendung von konventionellen, direkten Messgeräten wie Messlinealen, Tiefenmessschiebern, Wasserwaagen und Winkelmessern (Handaufmaß) lassen sich geometrische Imperfektionen ebenfalls bestimmen. Dieses Messverfahren bringt eine Vielzahl von Vor- allerdings auch von Nachteilen mit sich. Neben den günstigen Anschaffungskosten und der Tatsache, dass diese Messmittel überall erhältlich sind, kommt die Flexibilität dieses Messverfahrens hinzu. Mit diesen Messverfahren kann bspw. unter ungünstigen Bedingungen und Witterungsverhältnissen gearbeitet werden. Das einfache Handling spricht ebenfalls für dieses Messverfahren. Zudem ist für die Auswertung von direkten Messmitteln keine besondere Hard- bzw. Software notwendig. Das Aufmaß erfolgt lediglich von Hand. Neben diesen Vorteilen gibt es einige Nachteile für dieses Messverfahren. Die Messgenauigkeit ist von dem Vermesser abhängig. Eine Änderung des Blickwinkels bspw. auf die

Skalierung des Maßbandes, führt zu einer anderen Wahrnehmung des Ergebnisses. Des Weiteren sind mit diesen Messmitteln nur grobe Messungen im Millimeter-Bereich möglich. Ein weiterer Nachteil dieser Messmittel ist, dass diese regelmäßig kalibriert werden müssen und empfindlich auf direkte äußere Einflüsse, wie z.B. einen Sturz, reagieren. Der vermeintliche Nachteil, dass Messungen nur im groben Millimeter-Bereich möglich sind, ist für die Beulmessung an ausgesteiften Beulfeldern allerdings ausreichend, da hier geometrische Imperfektionen im Millimeter-Bereich entstehen.

## 7.6 Gegenüberstellung und Bewertung der Messverfahren

Nachfolgend werden die verwendeten Messverfahren gegenübergestellt und miteinander verglichen. Die nachfolgende Bewertung der verwendeten Messverfahren bezieht sich nur auf die Erfahrungswerte im Zuge dieser Ausarbeitung und der vorgegebenen Aufgabenstellung. Folgende Bewertung ergibt sich für die Messmittel:

Tabelle 17: Bewertungstabelle der angewendeten Messverfahren

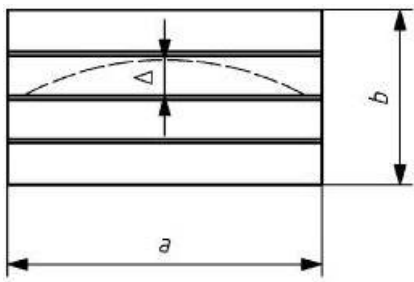
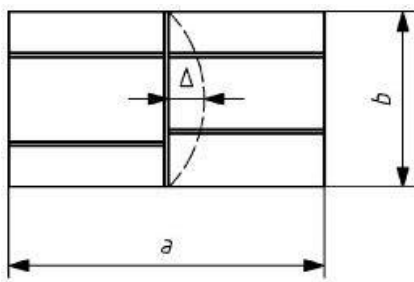
Verwendung	Limes	Laserscanner	Handaufmaß
Messvorbereitung	-	++	++
Messaufbau	-	++	++
Messdurchführung	++	+	o
Auswertung	o	+	++
Flexibilität / Handling	o	++	++
Auflösung	++	++	-
Genauigkeit	++	++	o
Anwendungsbereich	+	++	++
Messnachbereitung	o	+	++

Die Symbole der vorangegangenen Tabelle geben folgendes Bewertungsschema wieder: ++ = sehr gut; + = gut; o = befriedigend; - = ausreichend

## 8 Gegenüberstellung und Bewertung mit Literatur und Norm

In diesem Kapitel werden sowohl die Stichmaße als auch die Beulformen, welche im Zuge der praktischen Herstellung der Plattenbauteile entstanden und in Kapitel 7 enthalten sind, mit den Grenzmaßen und Beulformen aus der Norm und der Literatur verglichen. In diesem Kapitel wird explizit Bezug auf die geometrischen Imperfektionen genommen. Die strukturellen Imperfektionen wurden im Zuge dieser Ausarbeitung nicht gemessen. In dieser Auswertung werden lediglich die Stichmaße der Gesamtfelder berücksichtigt. Eine Betrachtung der (unausgesteiften) Einzelfelder wird nicht berücksichtigt. Die Herstellungstoleranzen von ausgesteiften Beulfeldern werden in der DIN EN 1090-2 [7] klar definiert. Tabelle 18 beinhaltet die Herstellungstoleranzen für ausgesteifte Beulfelder:

Tabelle 18: Herstellungstoleranzen für ausgesteifte Beulfelder nach der DIN EN 1090-2 [7]

Längsdruck:	Querdruck:
	
$\Delta = \pm a / 400$ $\Delta = \pm b / 400$	$\Delta = \pm a / 400$ $\Delta = \pm b / 400$

Mit den Herstellungstoleranzen aus der DIN EN 1090-2 ergeben sich für die Versuche 1 bis 4 folgende Herstellungstoleranzen:

Tabelle 19: Berechnete Herstellungstoleranzen für die Versuche 1 bis 4

Versuch:	Längsseite	Querseite:
Versuch 1:	3,25 mm	1,25 mm
Versuch 2:	3,75 mm	1,375 mm
Versuch 3:	3,75 mm	1,65 mm
Versuch 4:	4,25 mm	2,1 mm

Auf Grundlage der Toleranzwerte aus Tabelle 19 ergeben sich die in Tabelle 20 dargestellten Abweichungen.



Tabelle 20 beinhaltet die jeweilige Abweichung zum normativen Absolutmaß als Faktor und besitzt somit keine Einheit.

Tabelle 20: Stichmaß-Abweichungen gegenüber der Norm

Außen- kante:	Limess:	Laserscan:	Handaufmaß:
	Versuch 1:		
1	3,22	4,45	2,66
2	15,63	15,9	17,54
3	4,11	4,39	3,38
4	16,27	16,01	15,17
	Versuch 2:		
1	10,91	10,33	-
2	31,02	25,2	24
3	13,04	8,99	-
4	31,96	27,64	45,09
	Versuch 3:		
1	1,36	1,67	-
2	18,01	16,77	21,21
3	1,46	2,29	-
4	18,41	15,1	20
	Versuch 4:		
1	8,44	1,02	-
2	23,7	18,23	23,78
3	7,7	1,4	-
4	15,7	23,54	17,23

Die Herstellungstoleranzen aus der DIN EN 1090-2 werden nicht eingehalten. Die Stichmaße überschreiten die normativen Vorgaben erheblich. Viele der gemessenen Abweichungen überschreiten die Grenzwerte der Norm um mehr als den Faktor 10. Da hier lediglich die geometrischen Imperfektionen aufgenommen worden sind, die DIN EN 1993-1-5 [4] allerdings vorgibt, dass neben den geometrischen auch die strukturellen Imperfektionen berücksichtigt werden müssen, kann unter Umständen der nicht erfasste Einfluss der strukturellen Imperfektionen ausschlaggebend für die großen Abweichungen gegenüber der Norm sein.

Anhand der erhaltenen Beulformen, welche im Zuge der Plattenbauteilherstellung aus den Versuchen 1 bis 4 entstanden sind, kann sowohl in Längs- als auch in Querrichtung eine Form angenommen werden. In Kapitel 3 sind die Beulformen von Knabenschuh (Längsrichtung) und Zizza (Querrichtung) vorgestellt worden. Die tatsächlich erfassten Beulformen sind in Kapitel 7 dargestellt. Darüber hinaus wird in der DIN EN 1993-1-5 [4] im Anhang C ein sinusförmiger Verlauf in allen Richtungen angegeben.

Nach Auswertung der entstandenen Beulformen, kann für alle Versuche in Längsrichtung eine Sinusform (Fischer Form D [9] und Anhang C der DIN EN 1993-1-5 [4]) angenommen werden. Da die Form in Querrichtung unbekannt ist, hat Zizza eine mögliche Trapezform für die Querrichtung angegeben. Die Gültigkeit dieser Trapezform ist allerdings im Zuge der Plattenbauteilherstellung widerlegt worden. Anders als in Zizzas Ausarbeitungen, sind im Zuge dieser Ausarbeitung zwei verschiedene Beulformen für die Querrichtung entstanden. In den ersten beiden Versuchsreihen (Versuch 1 und 2) nimmt die Beulform in Querrichtung einen sinusförmigen Verlauf an. Für die Versuchsreihen 3 und 4 ist in Querrichtung näherungsweise die Beulform einer gestauchten, nach oben geöffneten Parabel zu erkennen.

Die Vorbeulen der Grundbleche sind Zuge dieser Ausarbeitung ebenfalls erfasst worden (diese sind in den Anhängen J bis M ersichtlich). Alle vier Grundbleche haben vor der Plattenbauteilherstellung Vorbeulen aufgewiesen. Die Form dieser Vorbeulen entspricht der Form b der Vorbeulen in Fischers Bericht [9, S.6].

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es Kleinteilversuche an längsausgesteiften Beulfeldern durchzuführen. Hierfür sind Plattenbauteile hergestellt und die entstandenen Imperfektionen anschließend gemessen worden. Im Zuge der Messungen sind verschiedene Messsysteme verwendet und anschließend miteinander verglichen worden. Abschließend sind die experimentell ermittelten Messwerte (insbes. Form und Stichmaß der geometrischen Imperfektionen), unter Zuhilfenahme der Literatur und normativer Grundlagen ausgewertet worden.

Diese Arbeit zeigt, dass sich eine Vielzahl von verschiedenen Messmitteln für den Nachweis von Plattenbeulen und geometrischen Imperfektionen eignen. Im Zuge dieser Ausarbeitung sind drei Messsysteme verwendet worden. Auf Grund der Tatsache, dass sich die entstandenen Beulungen im Zuge der Plattenbauteilherstellung im makroskopischen Bereich befinden, lassen sich diese ausreichend präzise mit konventionellen Messmitteln untersuchen. Die Verwendung des vorgegebenen Limes-Messsystems kommt für diese Aufgabenstellung nur bedingt infrage. Zwar lassen sich viele Parameter visuell darstellen, dennoch kann für diese Aufgabenstellung die eigentliche Funktionsweise dieses Messsystems aufgrund der Hitzeunbeständigkeit des benötigten Speckle-Musters nicht verwendet werden. Die Verwendung des Laserscanners ist für diese Aufgabenstellung gut geeignet, da mit Hilfe des Laserscanners sämtliche Beulungen aufgenommen und ausgewertet werden können. Ein weiterer Vorteil des Laserscanners ist die Möglichkeit des mobilen Einsatzes. Mit diesem können im Gegensatz zum Limes-Messsystem, Plattenbauteile ortsunabhängig und von beliebiger Größe auf geometrische Imperfektionen untersucht werden. Die experimentelle Untersuchung der geometrischen Imperfektionen der Plattenbauteile ergab, dass zwei der drei verwendeten Messverfahren für die Messung der geometrischen Imperfektionen gut geeignet sind.

Aus den Erkenntnissen der praktischen Plattenbauteilherstellung ging hervor, dass die Maßstabsversuche nur bedingt auf Bauteile im natürlichen Maßstab und die Norm anwendbar sind. Dem liegt einerseits zu Grunde, dass im Zuge dieser Ausarbeitung, keine Nachbearbeitung der Plattenbauteile, in Form von Kalt- bzw. Warmrichten, stattgefunden hat und sich andererseits der schweißtechnisch bedingte Wärmeeinfluss stärker auf den Verzug der Kleinteilversuche auswirkt als auf reale Plattenbauteile. Die Tatsache, dass in den Versuchen 3 und 4 Gurte in Längsrichtung angeschweißt worden sind und die daraus resultierende Beulung in Längsrichtung aktiv gemindert worden ist, schränken die Vergleichbarkeit der Versuche 1 und 2 mit den Versuchen 3 und 4 zwar ein. Hierdurch wird jedoch zusätzlich die Auswirkung der Gurte auf das Beulverhalten aufgezeigt.

Daher müssen zukünftige Arbeiten untersuchen, inwiefern Maßstabsversuche aussagekräftig sind, da die reduzierte Wärmeabfuhr unter Umständen zu einer signifikanten Abweichung der Größe der Imperfektionen zum Modellmaßstab führen können.

Zudem müssen anschließende Arbeiten untersuchen, welche Auswirkungen nachbearbeitende Maßnahmen, wie z.B. Flammrichten, auf die Vergleichbarkeit der Kleinteilversuche haben. Hierdurch kann gegebenenfalls die Vergleichbarkeit mit der Literatur und Norm erhöht werden.

Für eine zukünftige Messung der Beulung von Plattenbauteilen kann, neben der Anwendung von Laserscannern und Handaufmaß, alternativ auf induktive Messverfahren zurückgegriffen werden. Hier kann bspw. ein Array mit einer Vielzahl von induktiven Sensoren erzeugt werden. Mit diesen Sensoren kann die Beulung erfasst und anschließend ausgewertet werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN 8580:2003-09: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag, Berlin 2003
- [2] W. Lohse, J. Laumann und C. Wolf, Stahlbau 1: Bemessung von Stahlbauten nach Eurocode mit zahlreichen Beispielen, 25., überarb. und akt. Auflage 2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (2016)
- [3] DIN 1910-100:2008-02: Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe – Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005, Beuth Verlag, Berlin 2008
- [4] DIN EN 1993-1-5: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile, Beuth Verlag, Berlin 2019
- [5] VDI 2221 Blatt 2, VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, 2019, Beuth Verlag GmbH
- [6] DIN EN 10029:2010: Warmgewalztes Stahlblech von 3 mm Dicke an – Grenzabmaße und Formtoleranzen, Beuth Verlag, Berlin 2011
- [7] DIN EN 1090-2:2018: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung, Beuth Verlag, Berlin 2018
- [8] Marbs A.: Laserscanning zur dreidimensionalen Objekterfassung: Grundlagen und Anwendungen, FH Mainz, Deutschland,  
(Zugriff am: 07.04.2022, 07:27 Uhr). Verfügbar unter:  
[https://www.ise.kit.edu/rd\\_download/SEB/Kolloquium\\_SEB\\_09-01\\_A.\\_Marbs.pdf](https://www.ise.kit.edu/rd_download/SEB/Kolloquium_SEB_09-01_A._Marbs.pdf)
- [9] Fischer, M.; Grube, R.; Rieger, H.; Wenk, P.: Messung der Vorverformung von beulgefährdeten Stahlblechen mit und ohne Steifen,  
Bericht aus dem Fachgebiet Stahlbau, Universität Dortmund; Dezember 1989
- [10] Knabenschuh, H.: Messung von Imperfektionen an Stahlbrücken,  
Bundesanstalt für Straßenwesen; April 1981
- [11] DIN 18800-3: Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Plattenbeulen. Normenausschuss Bauwesen im DIN (NABau), November 2008
- [12] Hänsch, H.-J.: Eigenspannungen und Formänderungen in Schweißkonstruktionen, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 138, DVS Verlag GmbH, Düsseldorf 2006
- [13] LIMESS Messtechnik und Software GmbH, Krefeld, Deutschland,  
(Zugriff am: 06.05.2022, 10:35 Uhr). Verfügbar unter:  
<https://www.limess.com/de/produkte/q400-bildkorrelation>
- [14] SHINING 3D, Hangzhou, China,  
(Zugriff am: 06.05.2022, 10:49 Uhr). Verfügbar unter:  
<https://www.einscan.com/multifunktionaler-3d-scanner/einscan-hx/>

- 
- [15] V. Schuler und J. Twerdek, Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 6. vollst. überarb. Auflage 2018. Wiesbaden: Springer Vieweg (2018).
  - [16] C. Petersen, Stahlbau: Grundlagen der Berechnung von baulichen Ausbildung von Stahlbauten. 4. vollst. überarb. Auflage 2013. Wiesbaden Springer Fachmedien Wiesbaden (2013).
  - [17] Zizza, A.: Buckling Behavior of Unstiffened and Stiffened Steel Plates under Multiaxial Stress States, Institut für Konstruktion und Entwurf für Stahl-, Holz- und Verbundbau, Universität Stuttgart (2016)

## Anhang A: Messwerte für Validierung der Beulmessung

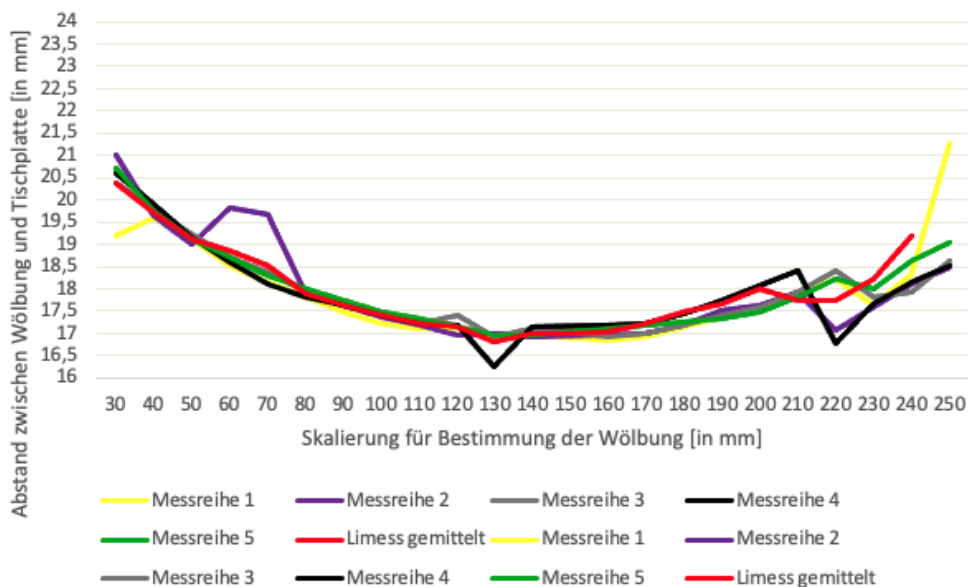


Abbildung A 1: Gegenüberstellung der Beulmesswerte (Limess)

Die Kurven der graphischen Darstellung stellen die Wölbungsform des Papiers, im Zuge der Simulation der Beulung der Grundplatte auf einem DIN A4 Papier dar. Der Verlauf der Graphen entspricht der Wölbungsform des verwendeten Papiers im Zuge der Vorversuche. Der rote Graph beschreibt die gemittelten Werte aus allen gemessenen Werten mit dem Limess-Messsystem. Im Großen und Ganzen stimmen die gemessenen Werte überein. Lediglich deutet die Messreihe 4 auf eine Ausschweifung im Bereich von 130 mm hin. Dem kann zu Grunde liegen, dass während dieser Messung eine Verschiebung des Papiers stattgefunden haben kann. In den Bereichen 0 - 50 mm und 240 - 297 mm können keine Messungen durchgeführt werden, da das Papier in diesen Bereichen auf den Holzbalken, welche für die Erhöhung des Papiers zuständig sind, liegt.

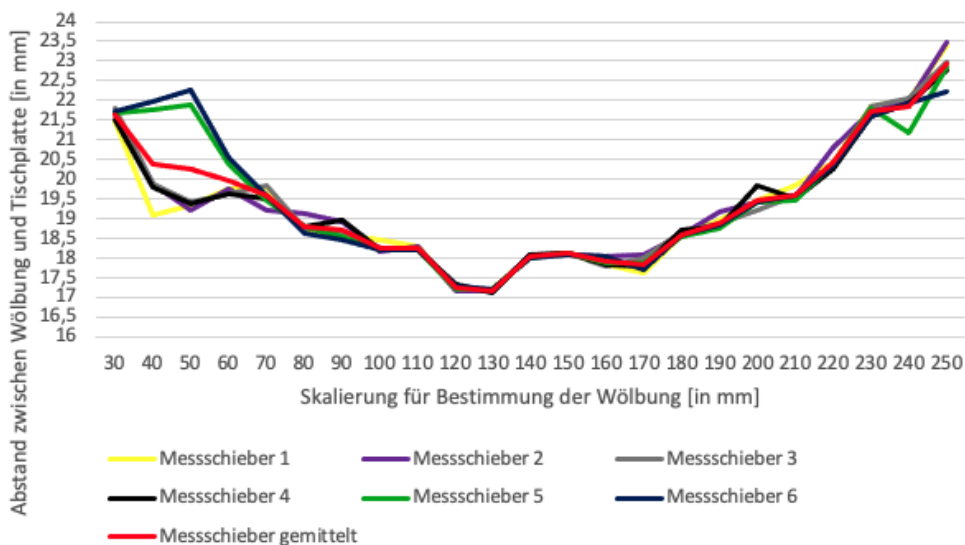


Abbildung A 2: Gegenüberstellung der Beulmesswerte (Messschieber)

Diese graphischen Auswertungen entstammen aus den Messwerten, welche mit einem digitalen Messschieber, gemessen worden sind. Die Kurvenform entspricht in diesem Falle ebenfalls der Wölbungsform des Papiers bei einer Belastung von einem Stahlstift aus 30 g. Auch bei diesen Versuchen können in den Bereichen 0 - 50 mm und 240 - 297 mm keine Messungen durchgeführt werden, da das Papier in diesen Bereichen auf den Holzbalken, welche für die Erhöhung des Papiers zuständig sind, liegt. Innerhalb der Messreihen mit dem digitalen Messschieber, sind minimale Ausschweifungen zu sehen.

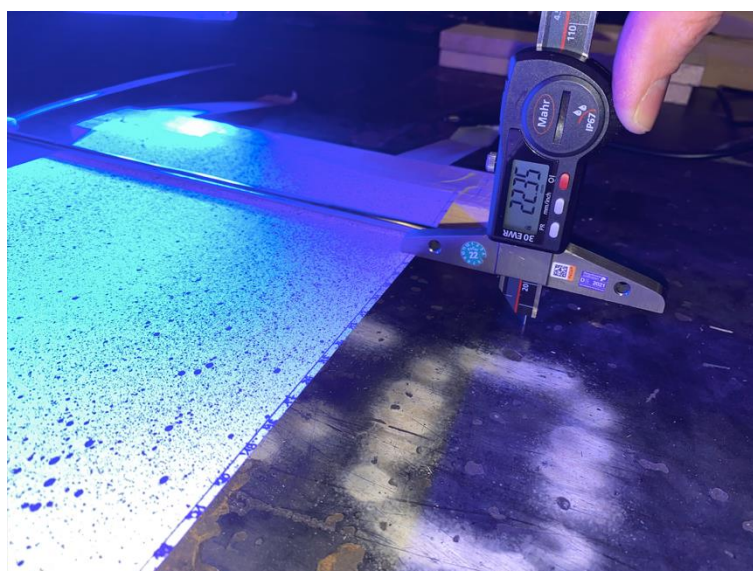


Abbildung A 3: Validierungsmessung mit digitalem Messschieber



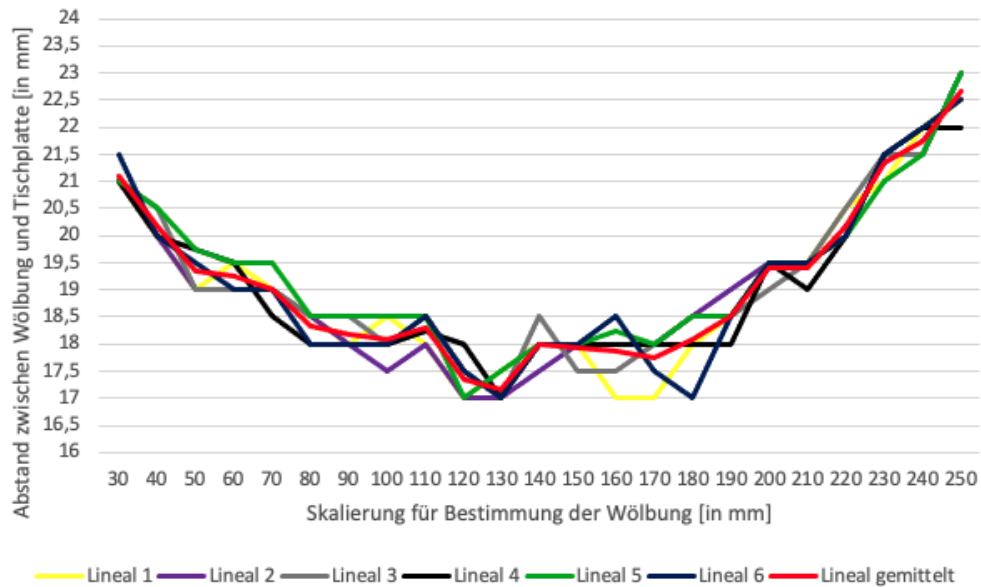


Abbildung A 4: Gegenüberstellung der Beulmesswerte (Lineal)

Die dritte Validierungsmessreihe ist mit einem Stahllineal durchgeführt worden. Die Graphen der Messungen mit dem Stahllineal deuten zwar auf eine Wölbung des Papiers hin, dennoch schweifen die Messreihen untereinander ab. Hier spielen verschiedene Faktoren, wie der Blickwinkel und die Eichung eine wesentliche Rolle und beeinflussen die Messqualität und das Messergebnis direkt. Dieses Messverfahren bringt die meisten Fehlerquellen mit sich.

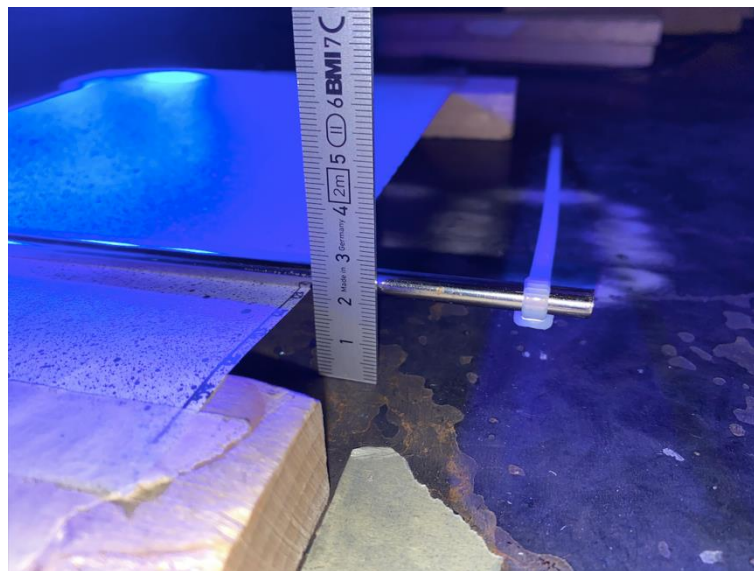


Abbildung A 5: Validierungsmessung mit Stahllineal

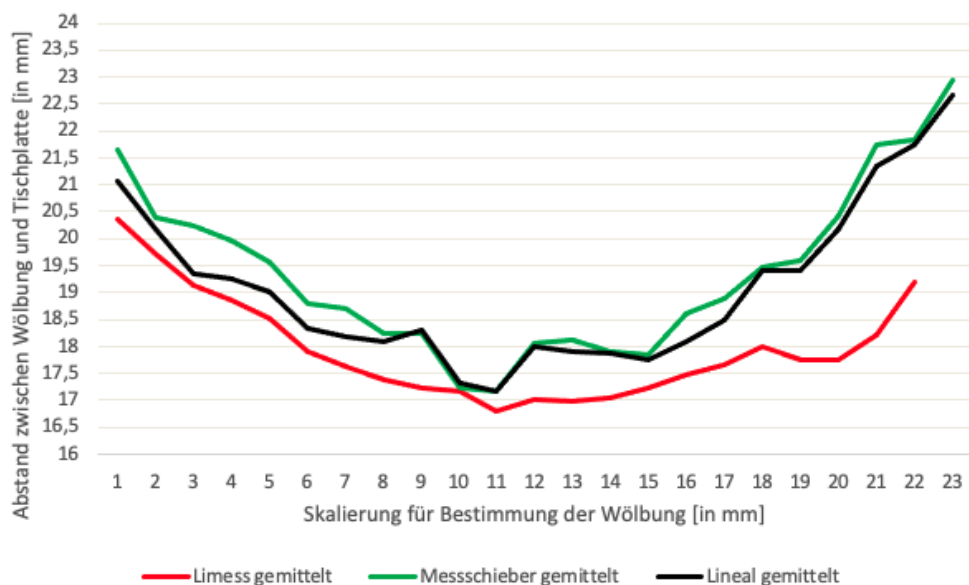


Abbildung A 6: Gegenüberstellung der gemittelten Messwerte

## Anhang B: Simulation der Flachlängssteife



Abbildung B 1: Künstlich-vergrößerte Flachlängssteife (touchieren der Steife)



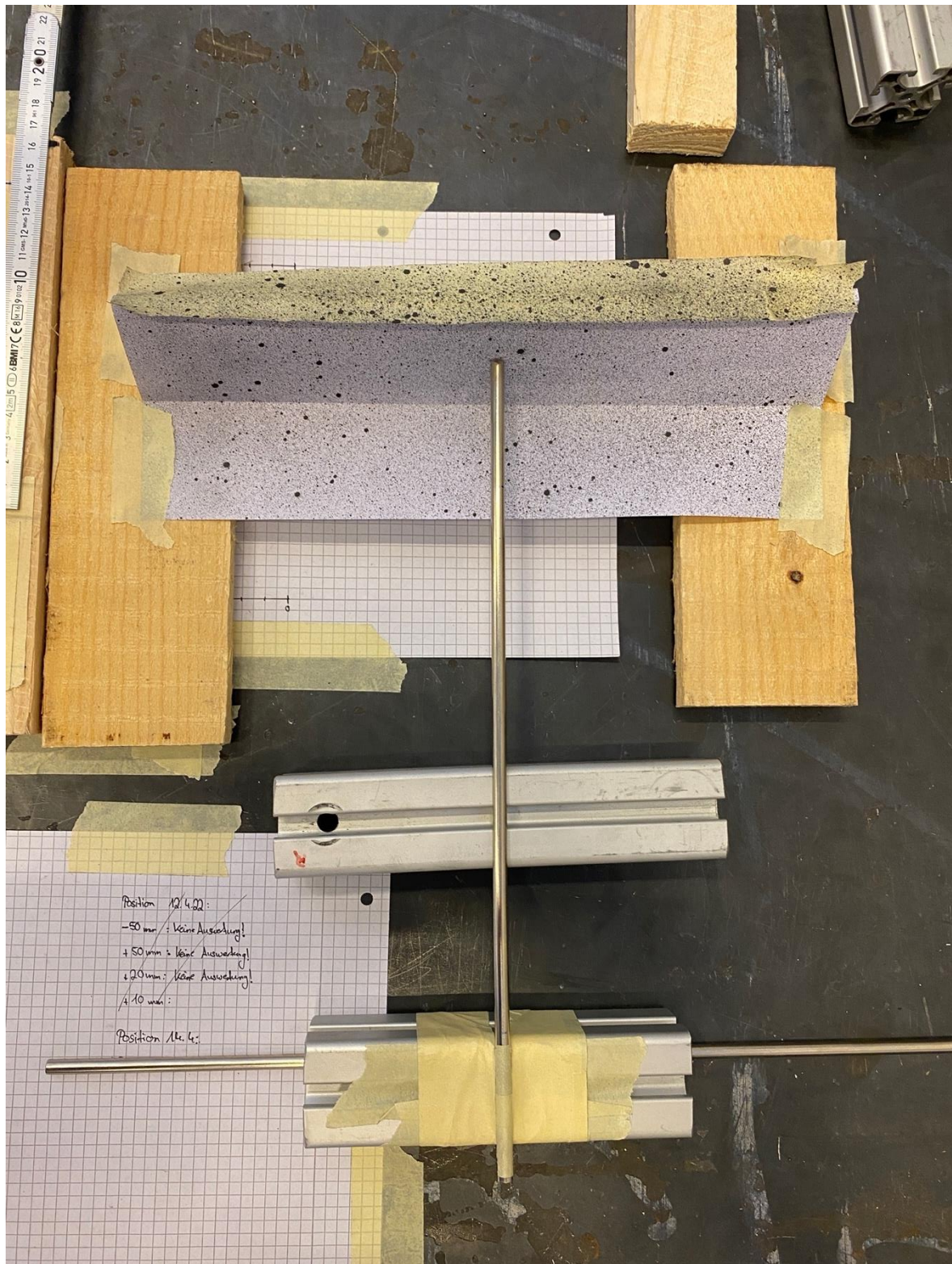


Abbildung B 2: Künstlich-vergrößerte Flachlängssteife (bewegen der Steife)

## Anhang C: Verworfenne Schweißfolgen

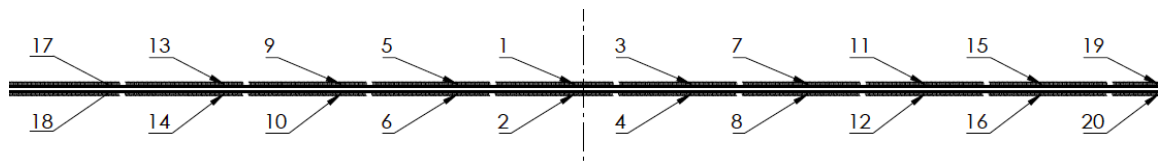


Abbildung C 1: Verworfenne Schweißfolge 1 für Flachlängssteife (von innen nach außen alternierend geschweißt)

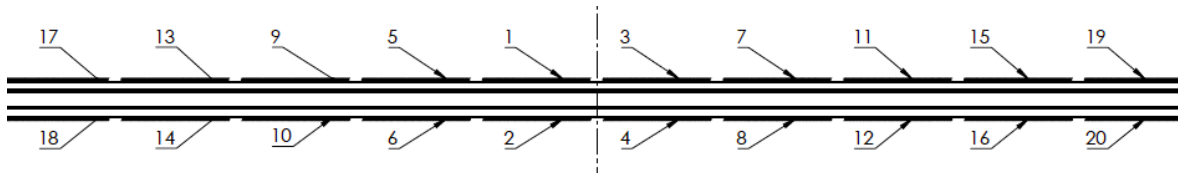


Abbildung C 2: Verworfenne Schweißfolge 1 für Trapezlängssteife (von innen nach außen alternierend geschweißt)

Die beiden verworfenen Schweißfolgen C1 und C2 (von innen nach außen) sind hergestellt worden, um den Wärmeeintrag der Schweißnähe „nach außen zu tragen“. Im Zuge der Vorversuche hat diese Variante nicht die gewünschten Ergebnisse geliefert. Der Verzug war bei diesen Varianten weitaus größer, als zuvor vermutet.



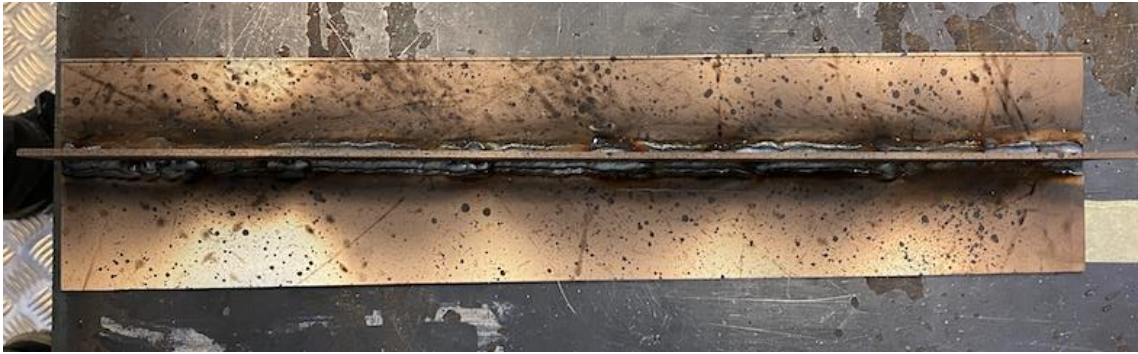


Abbildung C 3: Herstellung einer Flachlängssteife mit der Schweißfolge aus C1



Abbildung C 4: Herstellung einer Flachlängssteife mit der Schweißfolge aus C1



Abbildung C 5: Herstellung einer Flachlängssteife mit der Schweißfolge aus C1

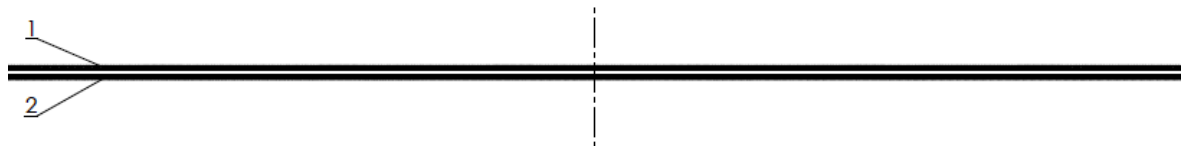


Abbildung C 6: Verworfenne Schweißfolge 2 für Flachlängssteife (durchgezogene Schweißnaht)

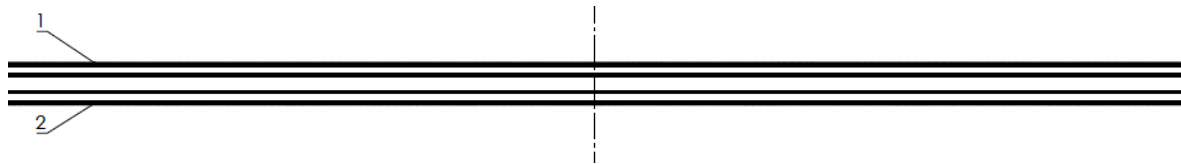


Abbildung C 7: Verworfenne Schweißfolge 2 für Trapezlängssteife (durchgezogene Schweißnaht)

Die beiden verworfenen Schweißfolgen aus C 7 und C 8 (durchgezogene Schweißnaht) sind hergestellt, um die Praxis zu simulieren. In der Praxis werden solche Bauteile mit durchgezogenen Schweißnähten hergestellt. In den Vorversuchen hat diese Schweißfolge nicht das gewünschte Ergebnis geliefert. Im Gegenteil, der Verzug und die Beulung ist in diesem Fall am größten. Das kann dem zugrunde liegen, dass mit Länge der Schweißnaht, der Schweißbrenner unruhiger gehalten wird.



Abbildung C 8: Herstellung einer Flachlängssteife mit der Schweißfolge aus C6



Abbildung C 9: Herstellung einer Flachlängssteife mit der Schweißfolge aus C6





Abbildung C 10: Herstellung einer Flachlängssteife mit der Schweißfolge aus C6

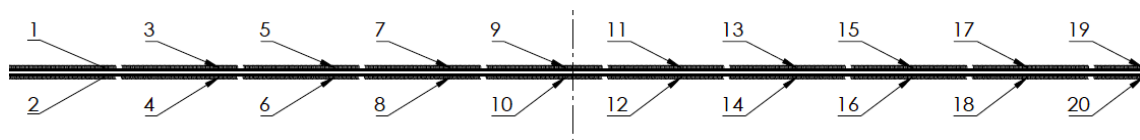


Abbildung C 11: Verworfenne Schweißfolge 3 für Flachlängssteife (alternierend von links nach rechts)

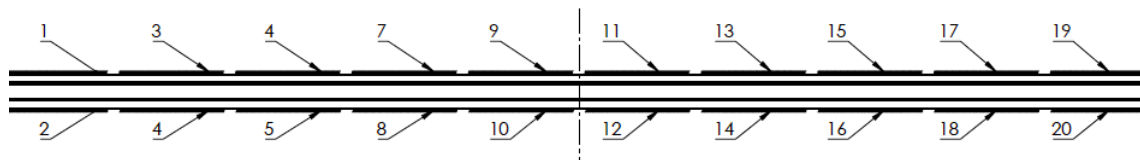
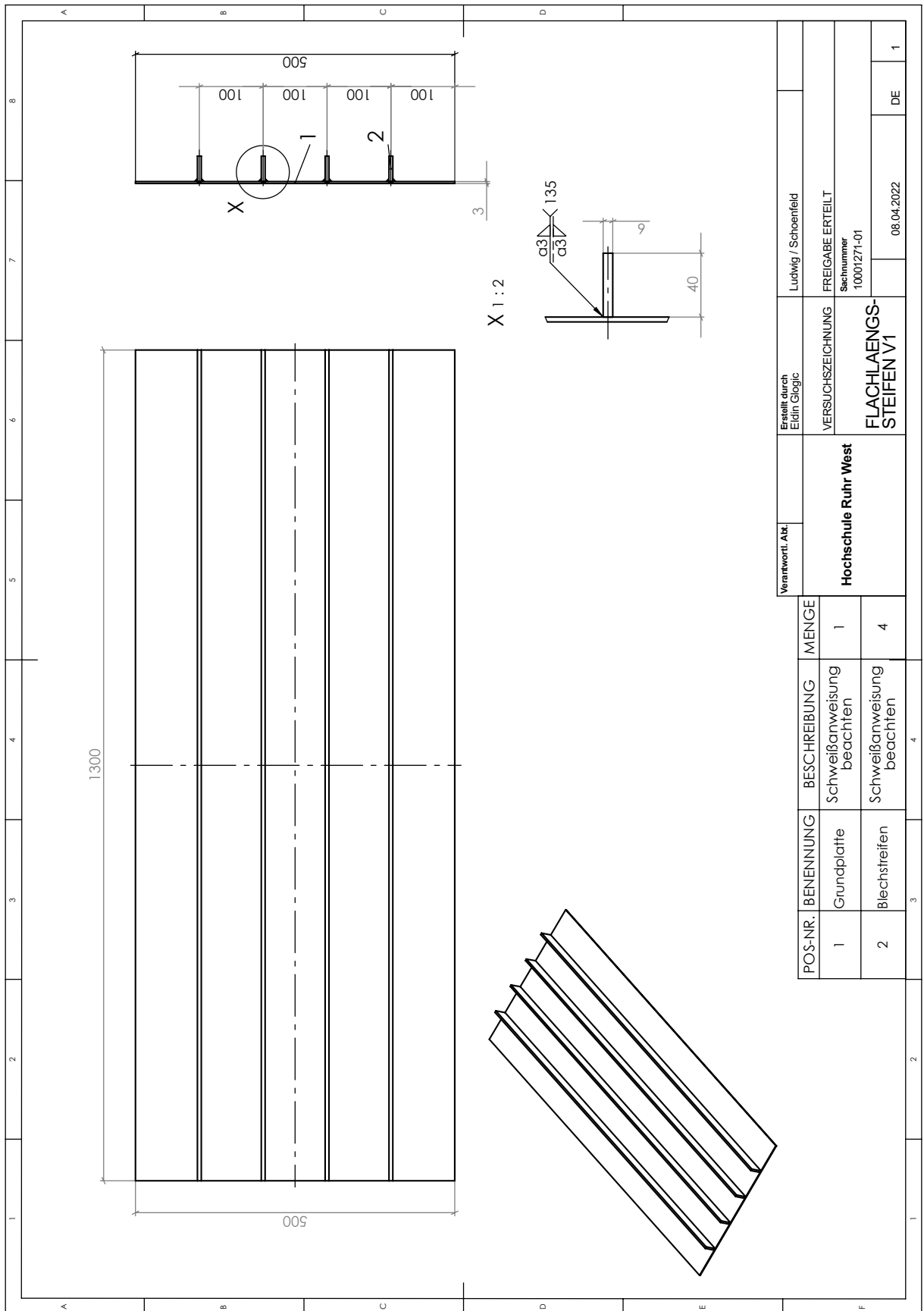


Abbildung C 12: Verworfenne Schweißfolge 3 für Trapezlängssteife (alternierend von links nach rechts)

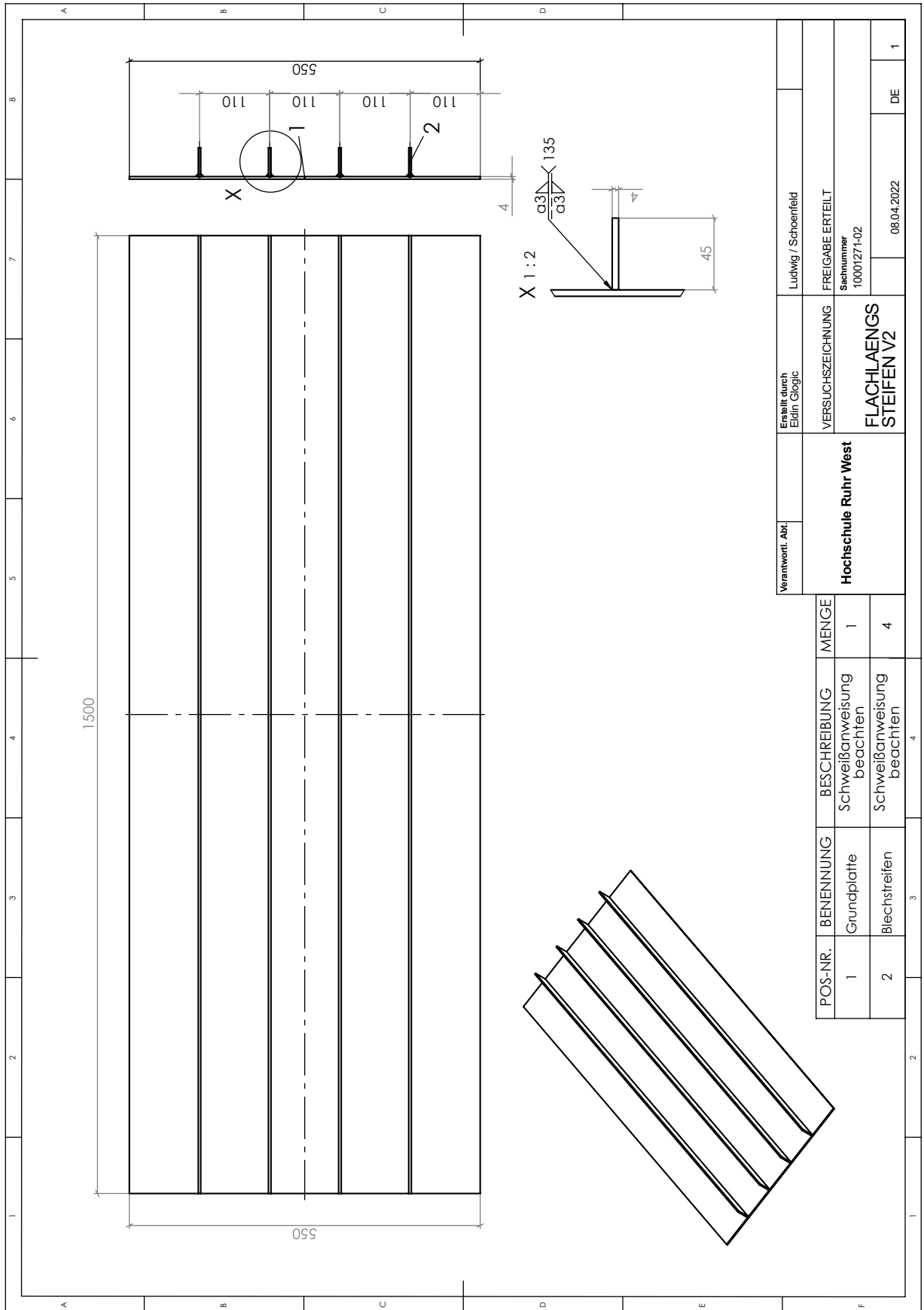
Die Abbildungen C 11 und 12 sind ebenfalls verworfen wurden. Zwar handelt es sich hier um alternierende bzw. unterbrochene Schweißnähte, allerdings wird hier nicht auf der entgegengesetzten Richtung mit dem Schweißvorgang fortgesetzt. Dies hat zur Folge, dass der Wärmeeintrag hier punktuell hochgehalten wird und der Verzug größer ist als bei der durchgezogenen Schweißnaht aus C 6 und C 7.

# Anhang D: Baugruppenzeichnungen (Flachlängssteifen)



X 1 : 2

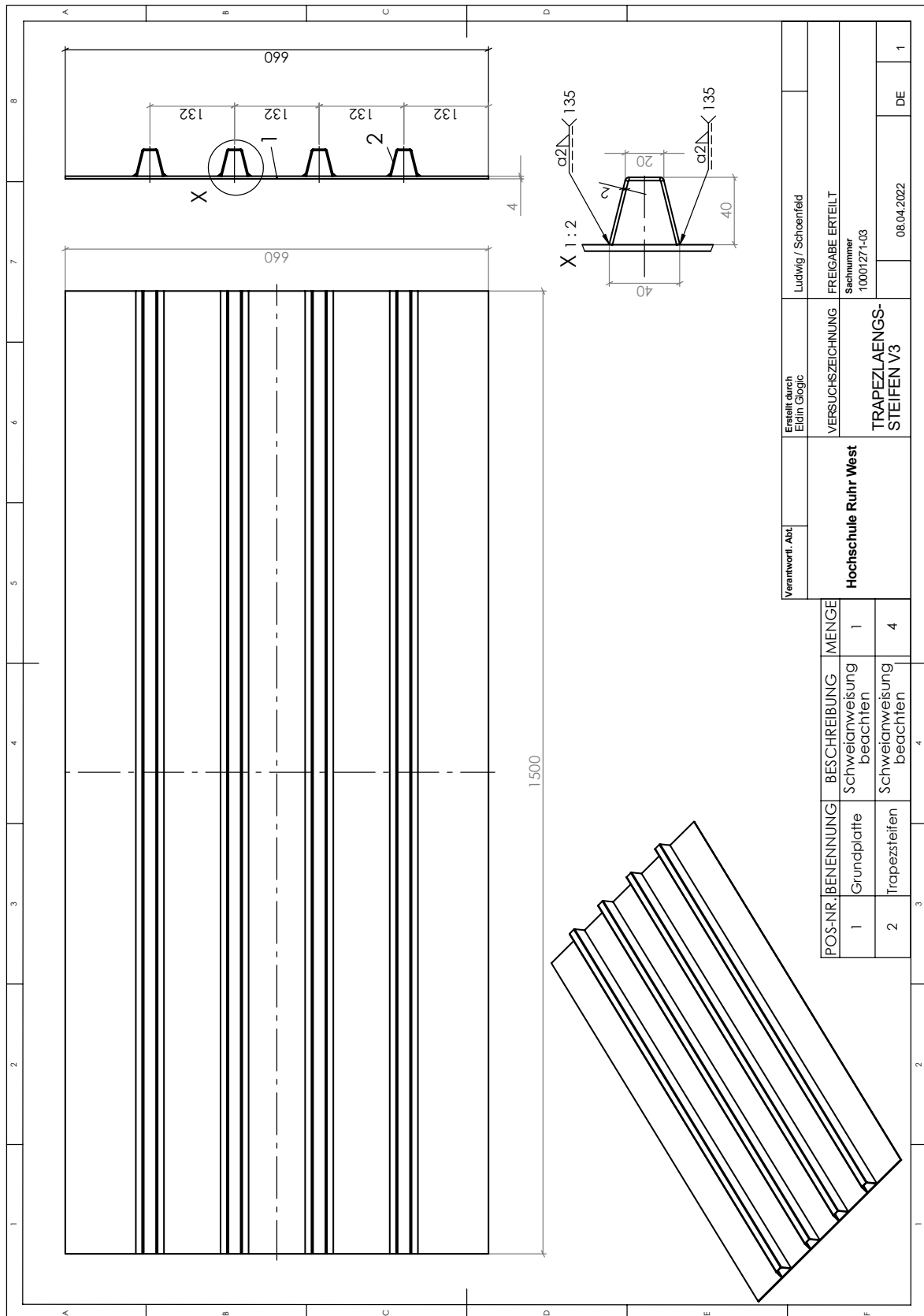
Verantwortl. Abt.		Erstellt durch Eldin Glogic		Ludwig / Schoenfeld	
Hochschule Ruhr West		VERSUCHSZEICHNUNG		FREIGABE ERTEILT	
Menge		Seitennummer		08.04.2022	
1	Grundplatte	1	10001271-01	DE	1
2	Blechstreifen	4			
FLACHLÄNGS- STEIFEN V1					

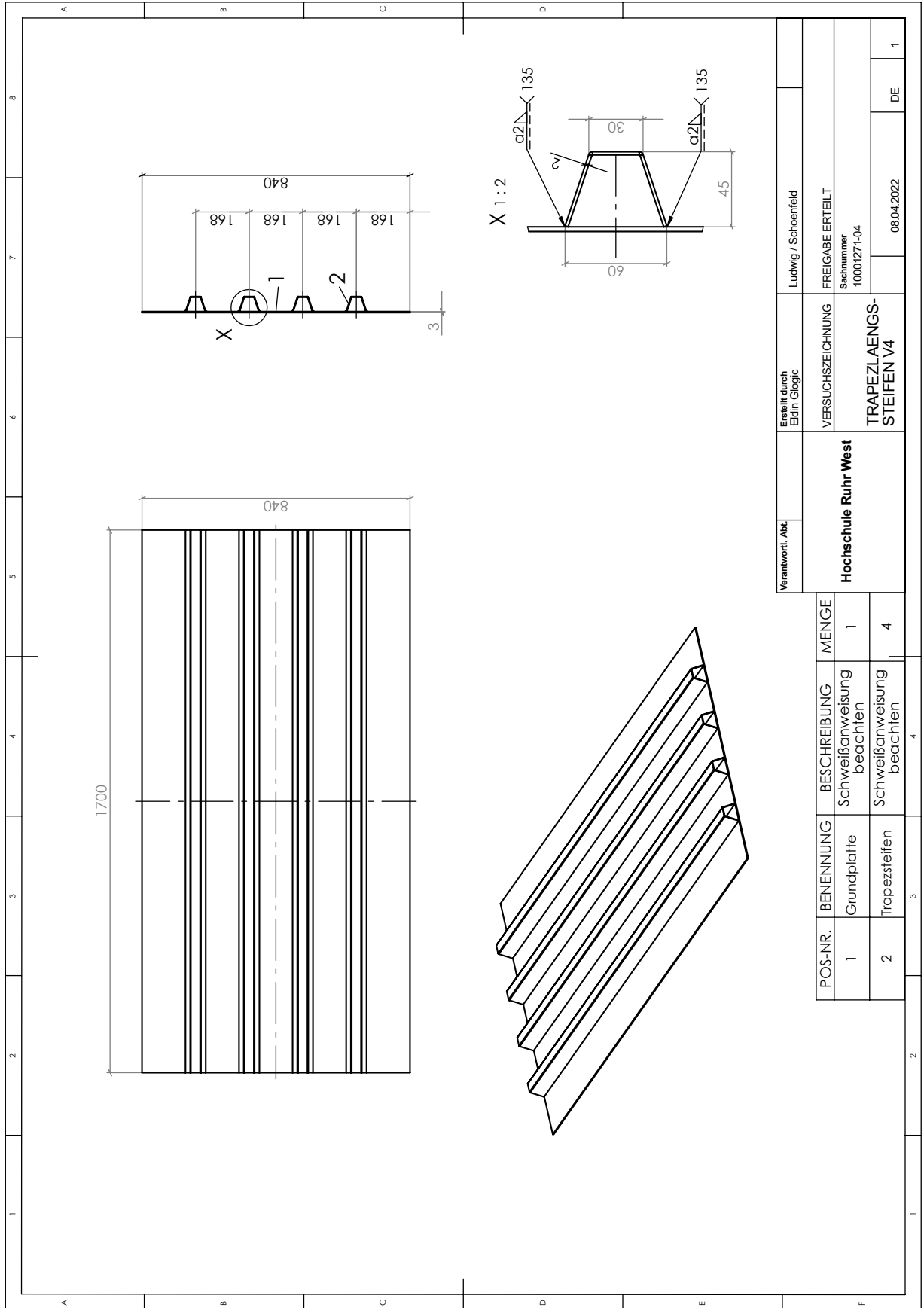


Verantwortl. Abt.	Ersellt durch Eldin Glogic	Ludwig / Schoenfeld
VERSUCHSZEICHNUNG		Freigabe erteilt
Hochschule Ruhr West		Sachnummer 10001271-02
FLACHLAENGS STEIFEN V2		08.04.2022

POS-NR.	BENENNUNG	BESCHREIBUNG	MENGE
1	Grundplatte	Schweißanweisung beachten	1
2	Blechstreifen	Schweißanweisung beachten	4

# Anhang E: Baugruppenzeichnungen (Trapezlängssteifen)





## Anhang F: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 1)

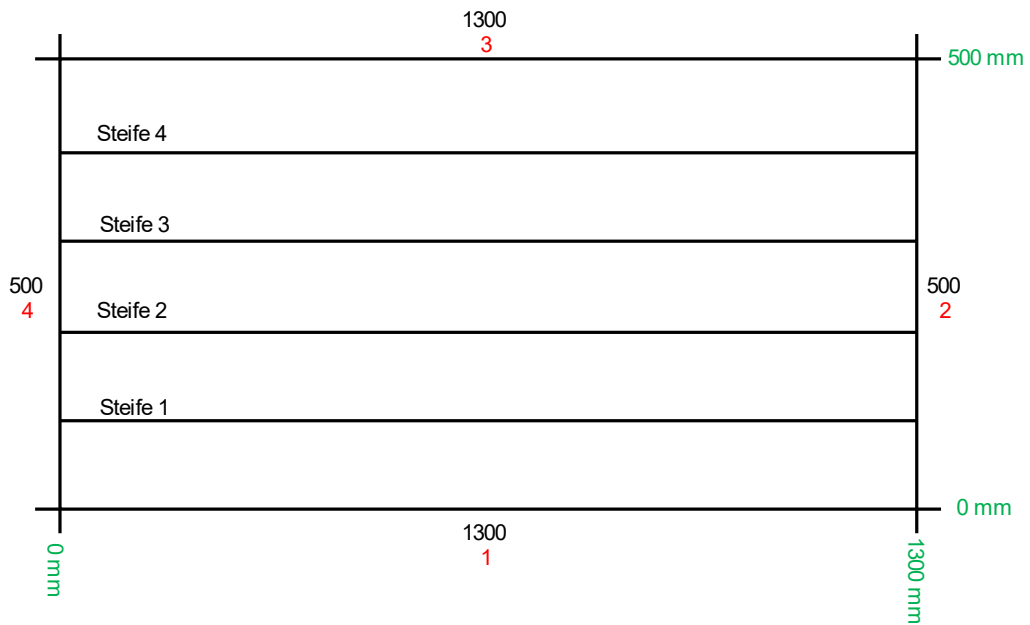


Abbildung F 1: Versuch 1 mit Messreihenfolge und Null- bzw. Endpunkt

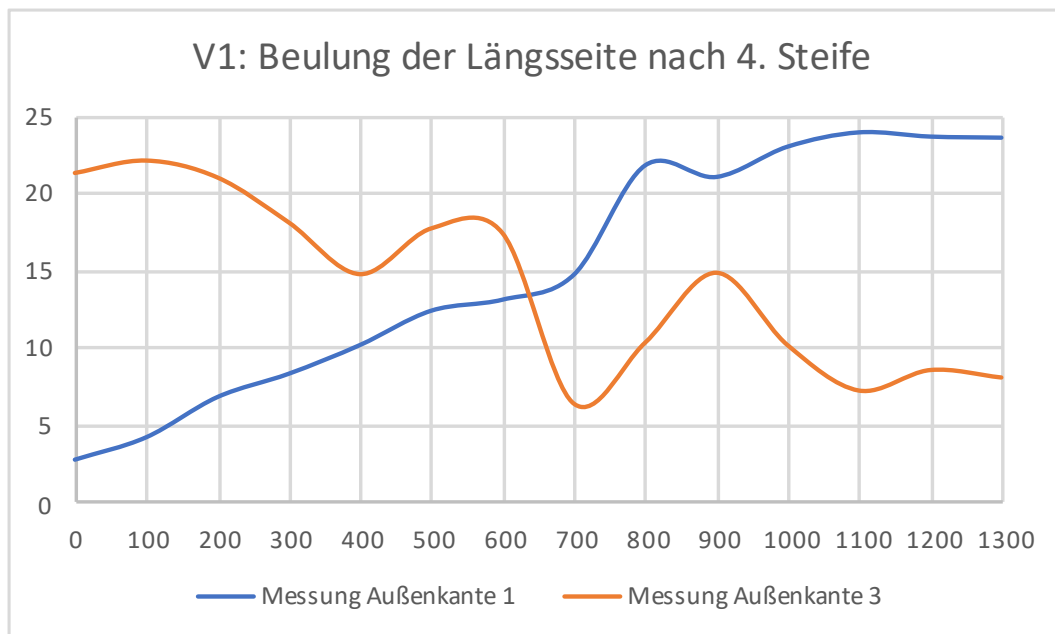


Abbildung F 2: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Längsrichtung nach allen Steifen in Versuch 1

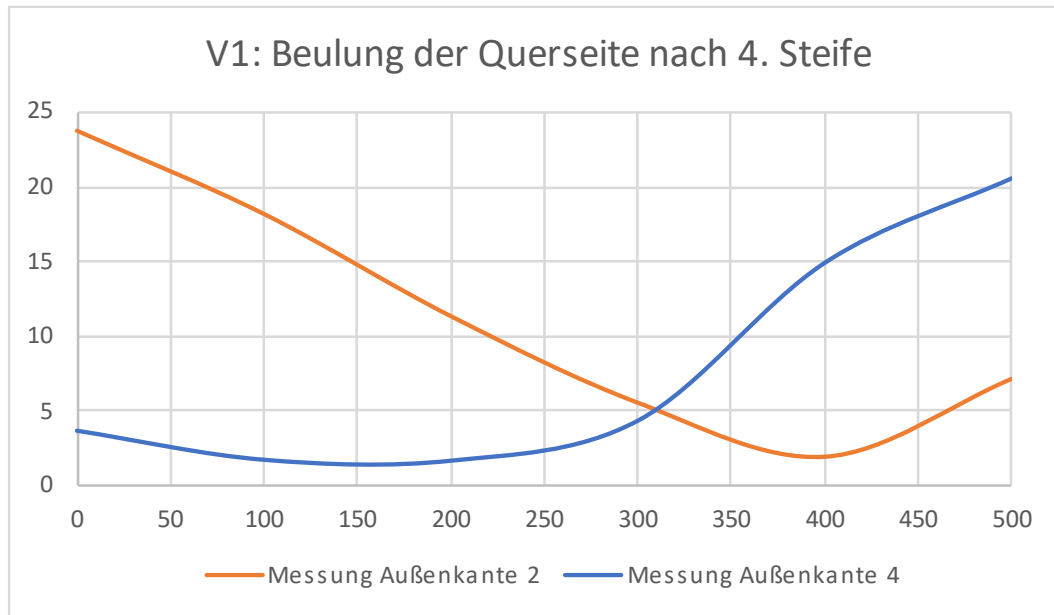


Abbildung F 3: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Querrichtung nach allen Steifen in Versuch 1

Die Abbildungen F 2 und F 3 stellen die erfassten Messergebnisse, aus Tabelle F 1 graphisch dar. Im Zuge der Messungen, ist an jeder Außenkante der Grundplatte, in 100 mm-Schritten, der Abstand zum Tisch gemessen worden. Die Abbildungen F 2 und F 3 und die Tabelle F 1 beinhalten die Messwerte und die Form der Beulung der Grundplatte, nach Anbringung der ersten Längssteife.

Tabelle F 1: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 1

Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
0	2,89	21,27	23,77	3,59
100	4,33	22,07	18,17	1,64
200	6,92	20,98	11,29	1,58
300	8,42	18,08	5,47	4,27
400	10,27	14,74	1,84	14,87
500	12,48	17,69	7,09	20,54
600	13,19	17,39	--	--
700	14,79	6,39	--	--
800	21,83	10,31	--	--
900	21,09	14,83	--	--
1000	23,04	10,16	--	--

Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
1100	23,96	7,23	--	--
1200	23,69	8,55	--	--
1300	23,62	8,07	--	--
Stichmaß	8,64	11	21,93	18,96

Tabelle F 2: Verdrehwinkel  $\Phi$  in  $^{\circ}$  aus Versuch 1

Position (mm):	Verdrehwinkel $\Phi$ der Steife ( $^{\circ}$ ):			
	Steife 1	Steife 2	Steife 3	Steife 4
0	90	89	87	86
100	90	--	--	88
200	89	--	--	88
300	89	--	--	86
400	89	--	--	86
500	88	--	--	88
600	89	--	--	89
700	89	--	--	88
800	90	--	--	87
900	90	--	--	87
1000	90	--	--	84
1100	89	--	--	87
1200	90	--	--	89
1300	90	89	87	89

Die Verdrehwinkel der Steifen 2 und 3 sind auf Grund von Platzmangel zwischen den Steifen händisch nicht erfasst worden.



## Anhang G: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 2)

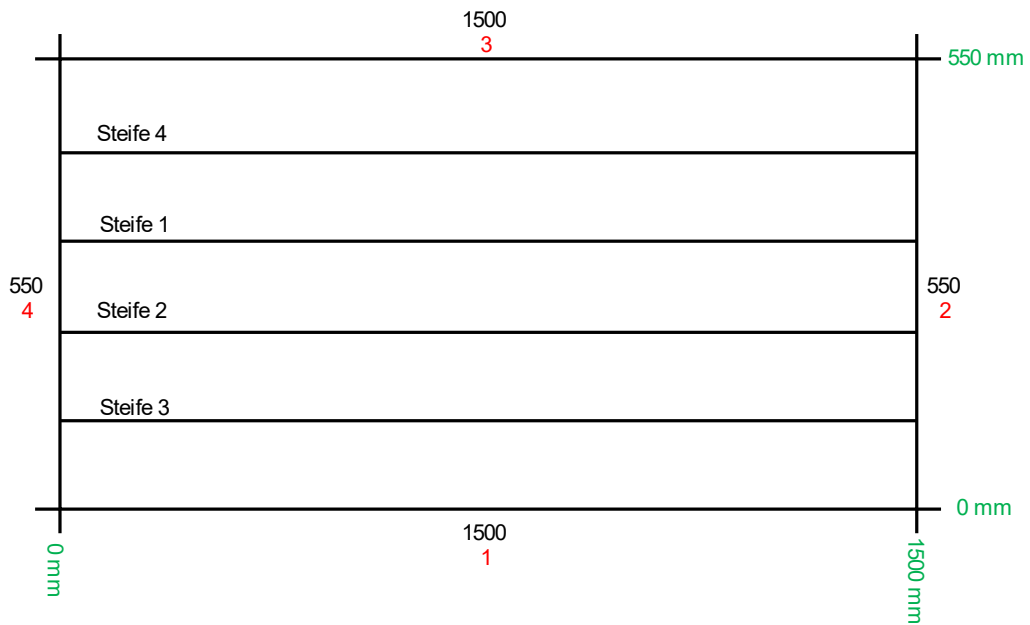


Abbildung G 1: Versuch 2 mit Messreihenfolge und Null- bzw. Endpunkt

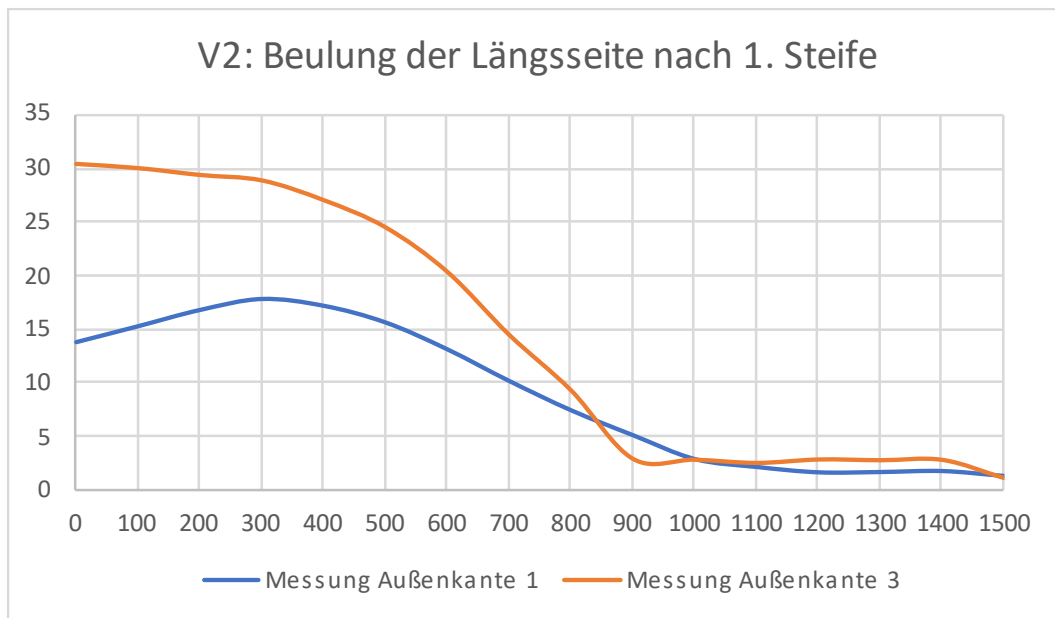


Abbildung G 2: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Längsrichtung nach der ersten Steife in Versuch 2

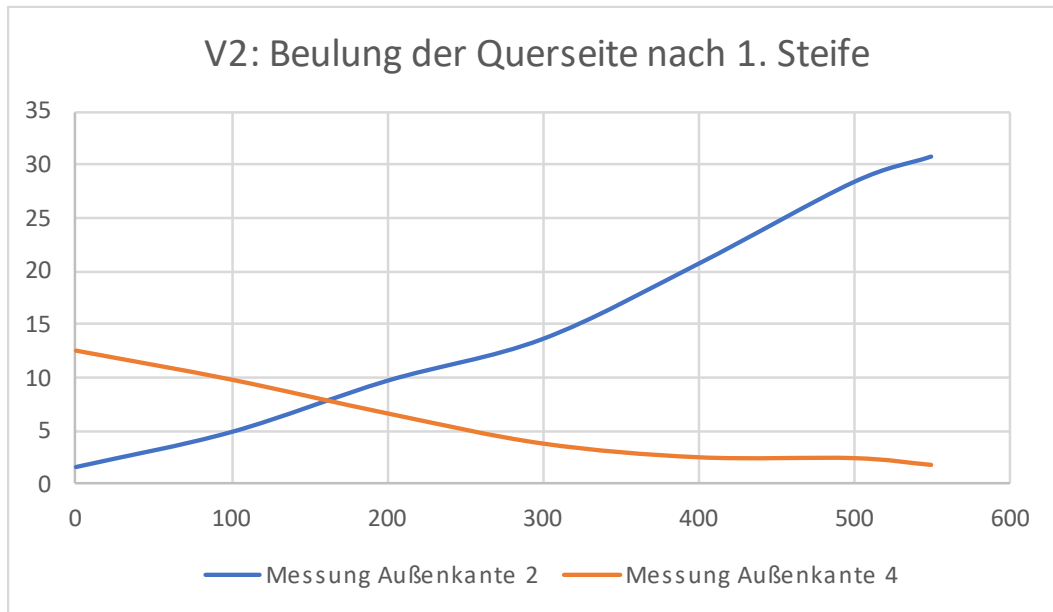


Abbildung G 3: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Querrichtung nach der ersten Steife in Versuch 2

Die Abbildungen G 2 und G 3 stellen die erfassten Messergebnisse, aus Tabelle G 1 graphisch dar. Im Zuge der Messungen ist an jeder Außenkante der Grundplatte, in 100 mm-Schritten, der Abstand zum Tisch gemessen worden. Dieser Vorgang ist nach jeder Längssteife wiederholt worden. Die Abbildungen G 2 und G 3 und die Tabelle G 1 beinhalten die Messwerte und die Form der Beulung der Grundplatte nach Anbringung der ersten Längssteife.

Tabelle G 1: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 2 nach Steife 1

Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
0	13,74	30,44	1,63	12,55
100	15,23	30,05	4,91	9,81
200	16,75	29,41	9,69	6,63
300	17,78	28,9	13,6	3,78
400	17,14	27,06	20,62	2,48
500	15,58	24,52	28,27	2,4
550	--	--	30,67	1,76
600	1306	20,36	--	--
700	10,1	14,48	--	--
800	7,36	9,3	--	--

Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
900	5,06	2,92	--	--
1000	2,8	2,85	--	--
1100	2,06	2,55	--	--
1200	1,56	2,87	--	--
1300	1,59	2,8	--	--
1400	1,68	2,83	--	--
1500	1,22	1,13	--	--
Stichmaß	16,56	29,31	29,04	10,79

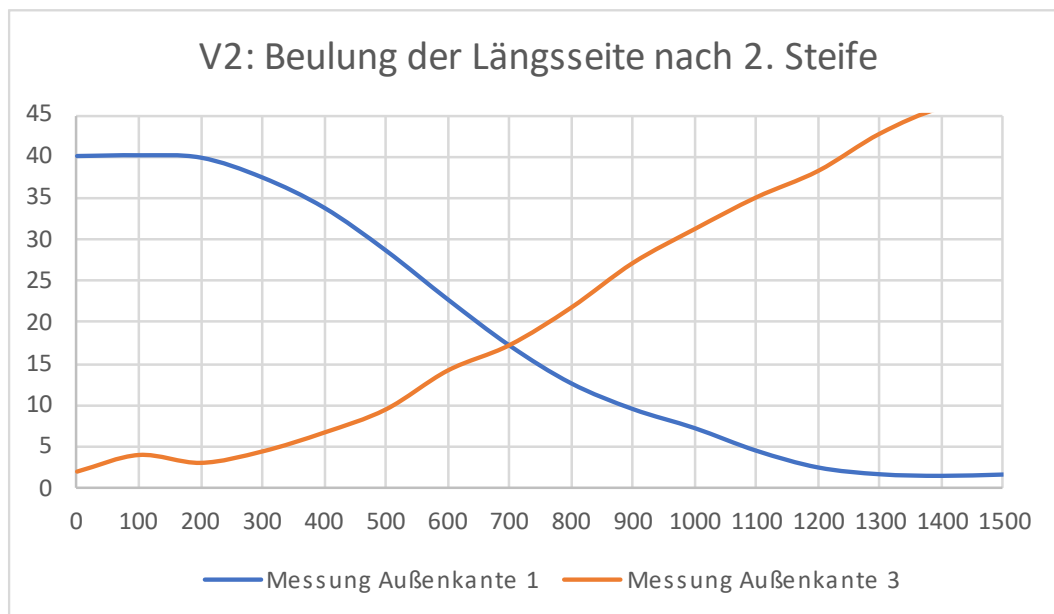


Abbildung G 4: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Längsrichtung nach der zweiten Steife in Versuch 2

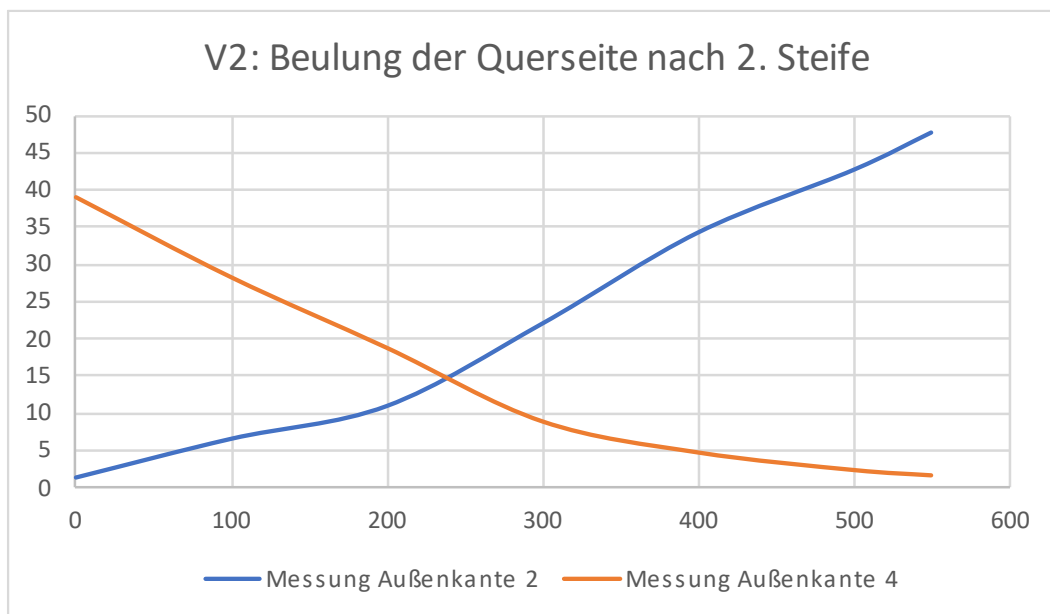


Abbildung G 5: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Querrichtung nach der zweiten Steife in Versuch 2

Die Abbildungen G 4 und G 5 stellen die erfassten Messergebnisse, aus Tabelle G 2 graphisch dar. Im Zuge der Messungen, ist an jeder Außenkante der Grundplatte, in 100 mm-Schritten, der Abstand zum Tisch gemessen worden. Dieser Vorgang ist nach jeder Längssteife wiederholt worden. Die Abbildungen G 4 und G 5 und die Tabelle G 2 beinhalten die Messwerte und die Form der Beulung der Grundplatte nach Anbringung der zweiten Längssteife.

Tabelle G 2: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 2 nach Steife 2

Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
0	39,97	1,93	1,25	39,7
100	40,06	3,93	6,48	28,29
200	39,78	2,98	10,9	18,81
300	37,38	4,36	22,02	8,92
400	33,73	6,63	34,28	4,75
500	28,56	9,43	42,73	2,39
550	--	--	47,77	1,67
600	22,67	14,11	--	--
700	17,1	17,17	--	--
800	12,53	21,7	--	--

Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
900	9,42	27,09	--	--
1000	7,12	31,17	--	--
1100	4,39	35	--	--
1200	2,37	37,18	--	--
1300	1,55	42,68	--	--
1400	1,36	45,8	--	--
1500	1,52	46,74	--	--
Stichmaß	38,54	44,81	47,77	1,57

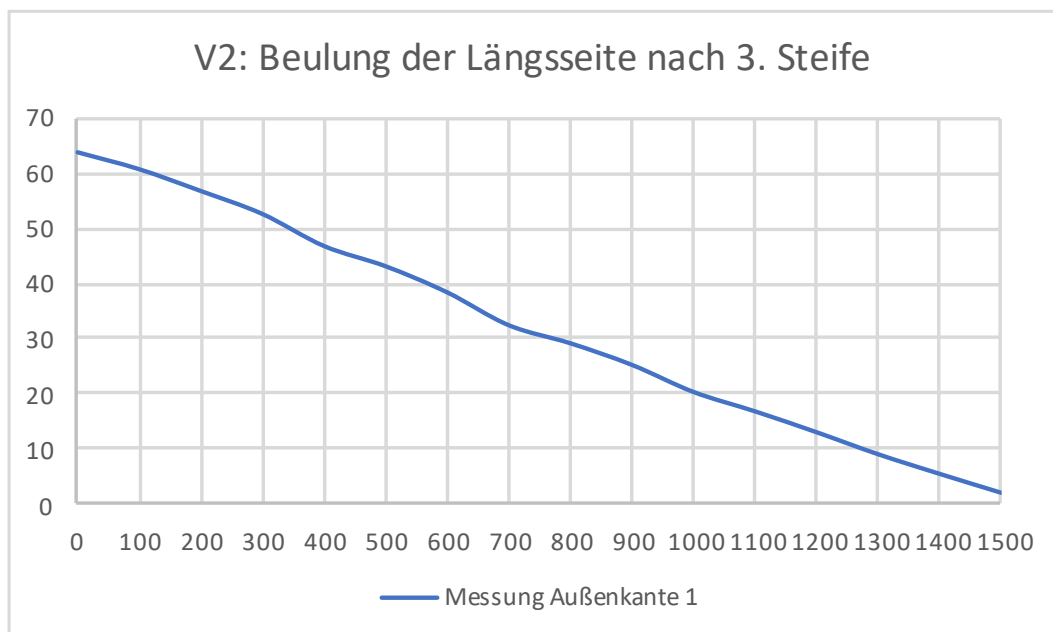


Abbildung G 6: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Längsrichtung nach der dritten Steife in Versuch 2

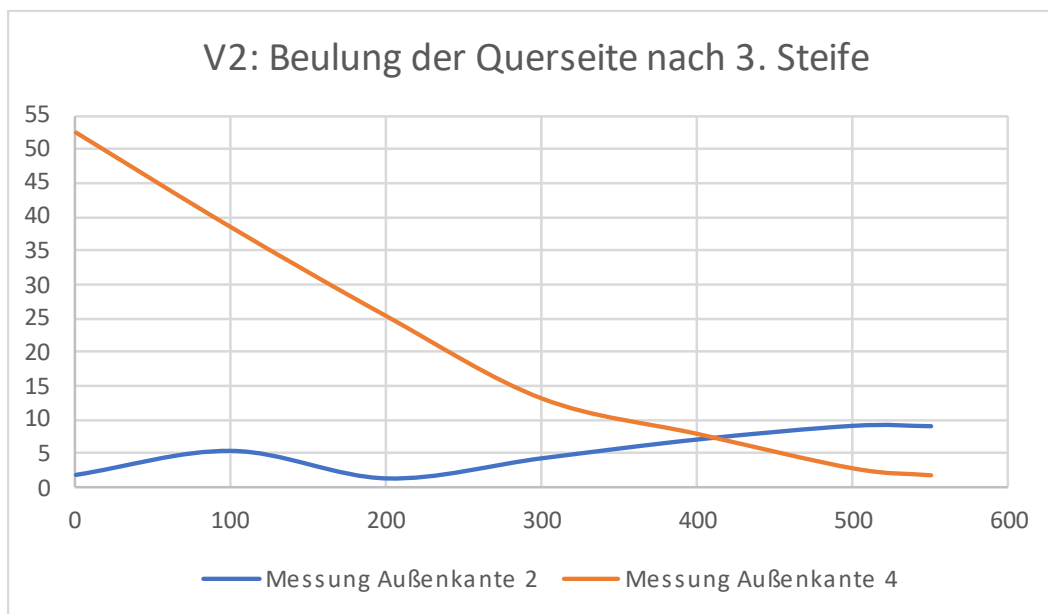


Abbildung G 7: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Querrichtung nach der dritten Steife in Versuch 2

Die Abbildungen G 6 und G 7 stellen die erfassten Messergebnisse, aus Tabelle G 3 graphisch dar. Im Zuge der Messungen ist an jeder Außenkante der Grundplatte, in 100 mm-Schritten, der Abstand zum Tisch gemessen worden. Dieser Vorgang ist nach jeder Längssteife wiederholt worden. Die Abbildungen G 6 und G 7 und die Tabelle G 3 beinhalten die Messwerte und die Form der Beulung der Grundplatte, nach Anbringung der dritten Längssteife. Die Tabelle G 3 beinhaltet die Messwerte aus Versuch 2 nach Anbringung der dritten Steife. Hier muss beachtet werden, dass die Messwerte die an der Außenkante Nummer 3 genommen werden, nicht ermittelt wurden. Hier wurde der Gurt an diese Kante geschweißt, weshalb die Messung von Hand nicht mehr möglich ist. Die Messwerte aus Versuch 2 nach Anbringung der vierten Steife sind ebenfalls nicht ermittelbar. Dies liegt ebenfalls an dem verschweißten Gurt, welcher die Messung von Hand unmöglich macht.

Tabelle G 3: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 2 nach Steife 3

Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
0	63,73	--	1,99	52,38
100	60,66	--	5,48	38,37
200	56,71	--	1,47	25,24
300	52,55	--	4,41	13,1
400	46,74	--	7,14	7,89
500	43,07	--	9,12	2,81
550	--	--	9,06	1,78
600	38,34	--	--	--
700	32,38	--	--	--
800	29,11	--	--	--
900	25,19	--	--	--
1000	20,28	--	--	--
1100	16,76	--	--	--
1200	12,97	--	--	--
1300	8,98	--	--	--
1400	5,42	--	--	--
1500	1,99	--	--	--
Stichmaß	61,71	--	7,65	50,59

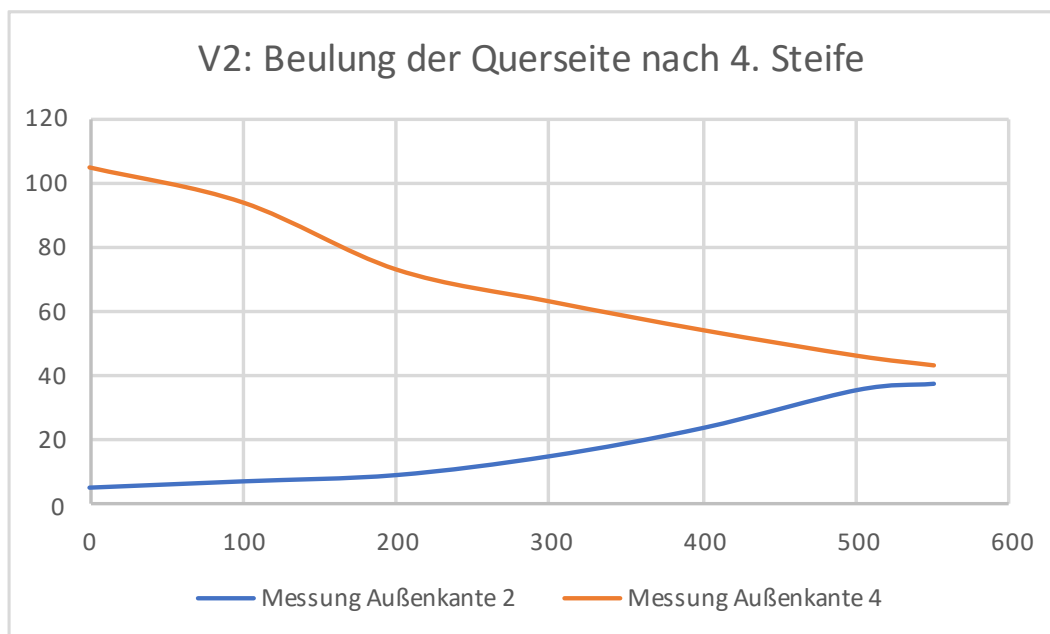


Abbildung G 8: Graphischer Verlauf der Beulung der Grundplatte in Querrichtung nach der vierten Steife in Versuch 2

Die Abbildung G 8 stellt die erfassten Messergebnisse, aus Tabelle G 4 graphisch dar. Im Zuge der Messungen, ist an jeder Außenkante der Grundplatte, in 100 mm-Schritten, der Abstand zum Tisch gemessen worden. Dieser Vorgang ist nach jeder Längssteife wiederholt worden. Die Abbildungen G 8 und G 9 und die Tabelle G 4 beinhalten die Messwerte und die Form der Beulung der Grundplatte nach Anbringung der vierten Längssteife.

Tabelle G 4: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 2 nach Steife 4

Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
0	--	--	5	105
100	--	--	7	94
200	--	--	9	73
300	--	--	15	63
400	--	--	24	54
500	--	--	36	46
550	--	--	38	43
600	--	--	--	--
700	--	--	--	--
800	--	--	--	--



Position (mm):	Abmaß (mm):			
	Pos. 1	Pos. 3	Pos. 2	Pos. 4
900	--	--	--	--
1000	--	--	--	--
1100	--	--	--	--
1500	--	--	--	--
Stichmaß	--	--	33	62

Tabelle G 5: Verdrehwinkel  $\Phi$  in ° aus Versuch 2

Position (mm):	Verdrehwinkel $\Phi$ der Steife (°):			
	Steife 1	Steife 2	Steife 3	Steife 4
0	87	82	88	87
100	88	82	88	--
200	88	82	88	--
300	88	83	88	--
400	89	84	88	--
500	89	84	89	--
600	89	85	89	--
700	89	86	87	--
800	89	86	87	--
900	89,5	88	87	--
1000	90	86	87	--
1100	90	87	87	--
1200	90	87	87	--
1300	90	87	87	--
1400	89,5	86	87	--
1500	90	86	87	89

Der Verdrehwinkel aus Tabelle G 5 der Steife 4 konnte hier im Null- und Endpunkt gemessen werden. Die restlichen Maße sind auf Grund des angebrachten Gurts händisch nicht messbar.

## Anhang H: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 3)

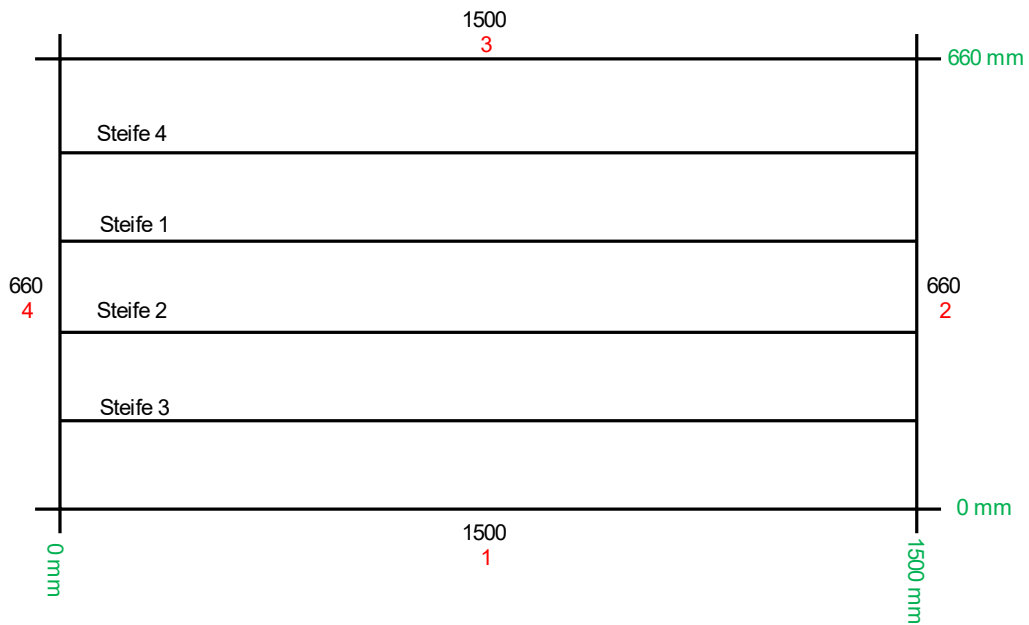


Abbildung H 1: Versuch 3 mit Messreihenfolge und Nullpunkten

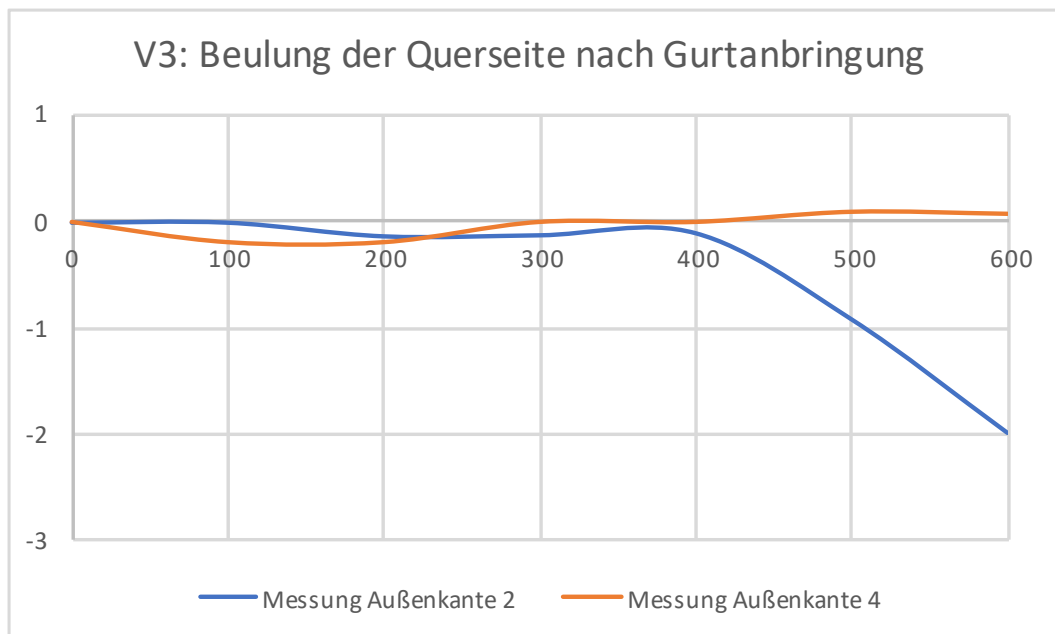


Abbildung H 2: Graphischer Verlauf der Beulung in Querrichtung der Grundplatte nach Anbringung der Gurte in Versuch 3

Die nachfolgende Tabelle H 1 umfasst die Messwerte aus Versuch 3 nach Anbringung der Gurte an den Längsseiten. Hier muss beachtet werden, dass aufgrund der

angebrachten Gurte an den Längsseiten lediglich die Messungen der Querseiten genommen wurde.

Tabelle H 1: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 3 nach Gurtanbringung

Position (mm):	Abmaß (mm):	
	Pos. 2	Pos. 4
0	0	0
100	0	-0,2
200	-0,13	-0,2
300	-0,12	0
400	-0,1	0
500	-0,92	0,1
600	-2	0,08
660	-3	0,02
Stichmaß	0,1	0,2

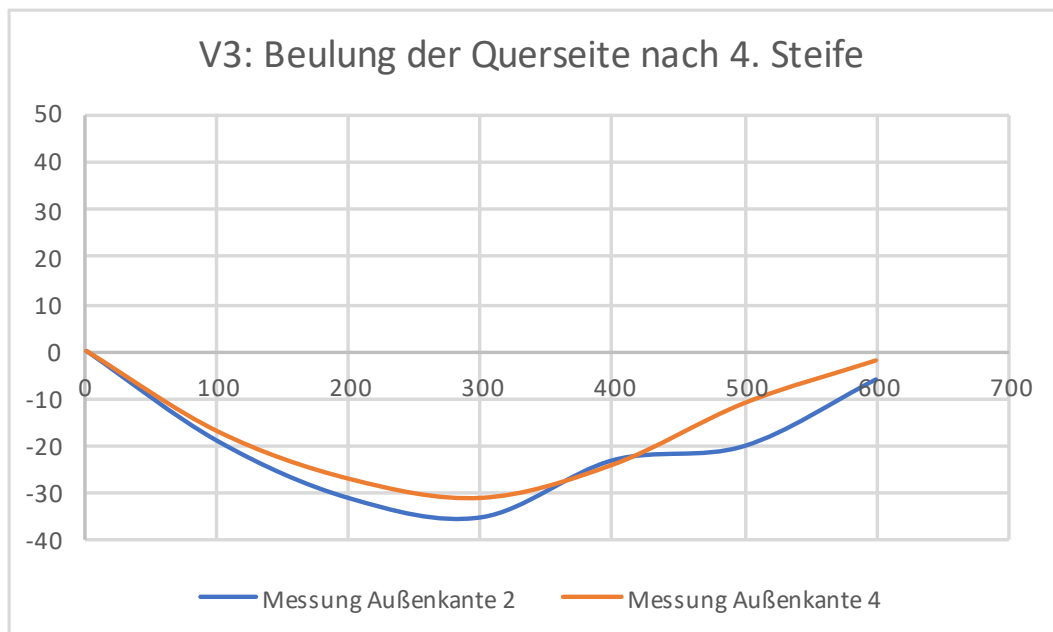


Abbildung H 3: Graphischer Verlauf der Beulung in Querrichtung der Grundplatte nach der vierten Steife in Versuch 4

Die nachfolgende Tabelle H 2 beinhaltet die Messwerte der Beulung der Querseite aus dem Versuch 3, nach der Fertigstellung des Versuchs.

Tabelle H 2: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 3 nach Plattenbauteilherstellung

Position (mm):	Abmaß (mm):	
	Pos. 2	Pos. 4
0	0	0
100	0	-0,2
200	-0,13	-0,2
300	-0,12	0
400	-0,1	0
500	-0,92	0,1
600	-2	0,08
660	-3	0,02
Stichmaß	35	33

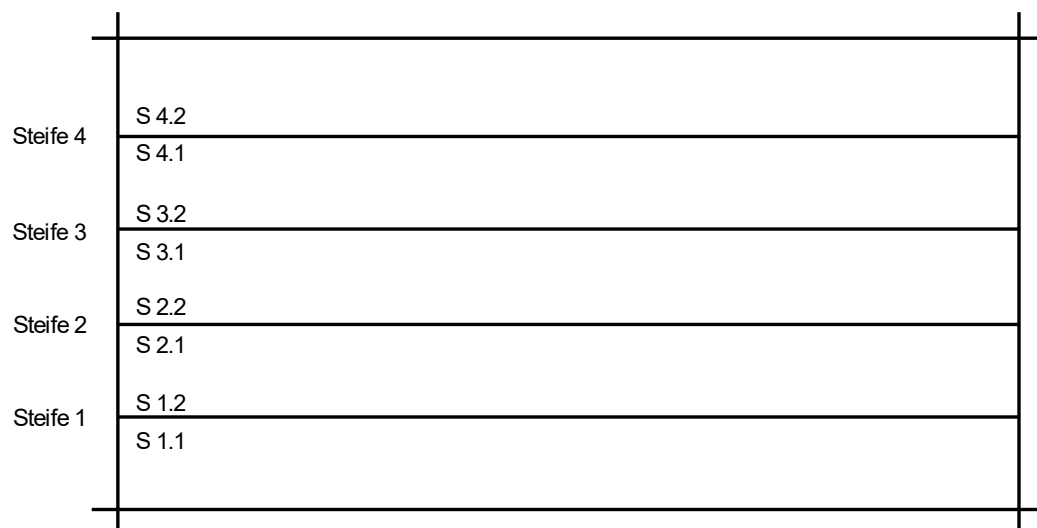


Abbildung H 4: Messreihenfolge des Verdrehwinkels der Trapeze in Versuch 3

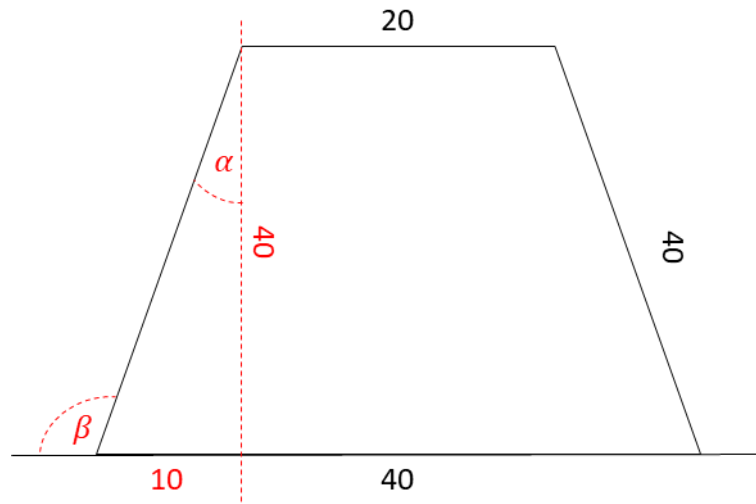


Abbildung H 5: Berechnung des Soll-Winkels in Versuch 3

Mit folgender Formel kann der Soll-Winkel für Versuch 3 berechnet werden:

$$\alpha = \frac{G}{H} = \arcsin\left(\frac{10}{40}\right) = 14,5^\circ$$

$$\Leftrightarrow \beta = 90^\circ + \alpha = 104,5^\circ$$

Tabelle H 3: Verdrehwinkel der Trapeze aus Versuch 3

Position (mm): $\Phi$ soll = $104,5^\circ$	Steifenverzug $\Phi$ der Steife ( $^\circ$ ):			
	1	2	3	4
0	-4,5	0,5	0,5	-7,5
0	-3,5	-4,5	-1,5	-10,5
400	-7,5	-4,5	-2,5	-9,5
400	-9,5	-3,5	-4,5	-6,5
800	-6,5	-5,5	-3,5	-7,5
800	-13,5	-9,5	-4,5	-6,5
1200	-6,5	-5,5	-4,5	-10,5
1200	-7,5	-4,5	-4,5	-9,5
1500	-6,5	-7,5	-5,5	-7,5
1500	-5,5	-6,5	-3,5	-6,5
Mittelwert	-6,3	-4,5	-3,1	-8,5
Mittelwert	-7,9	-5,7	-3,7	-7,9

## Anhang I: Messwerte mit direktem Messverfahren (Handaufmaß von Versuch 4)

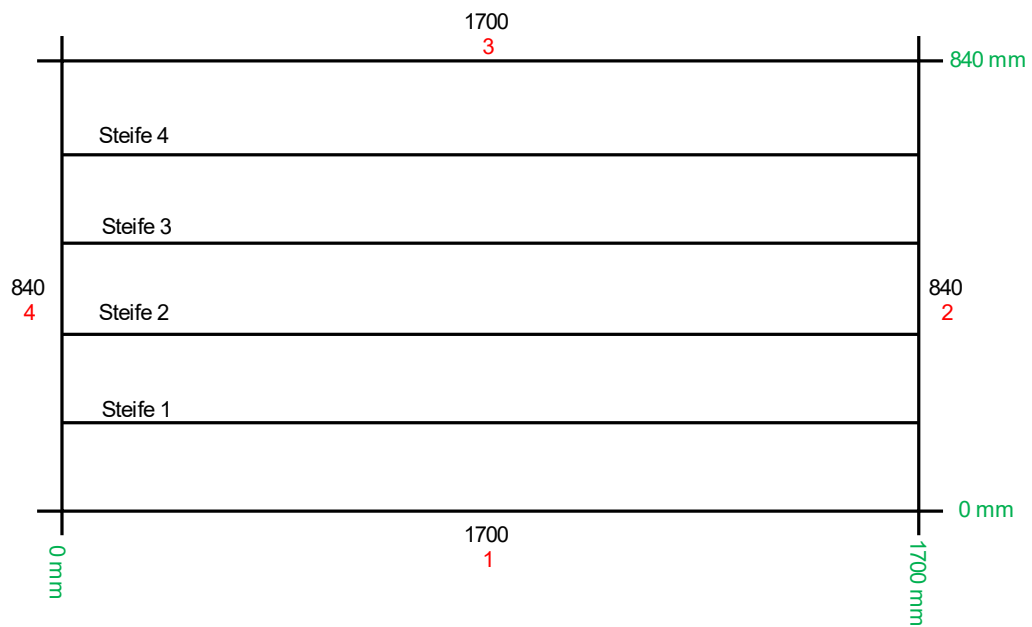


Abbildung I 1: Versuch 4 mit Messreihenfolge und Nullpunkten

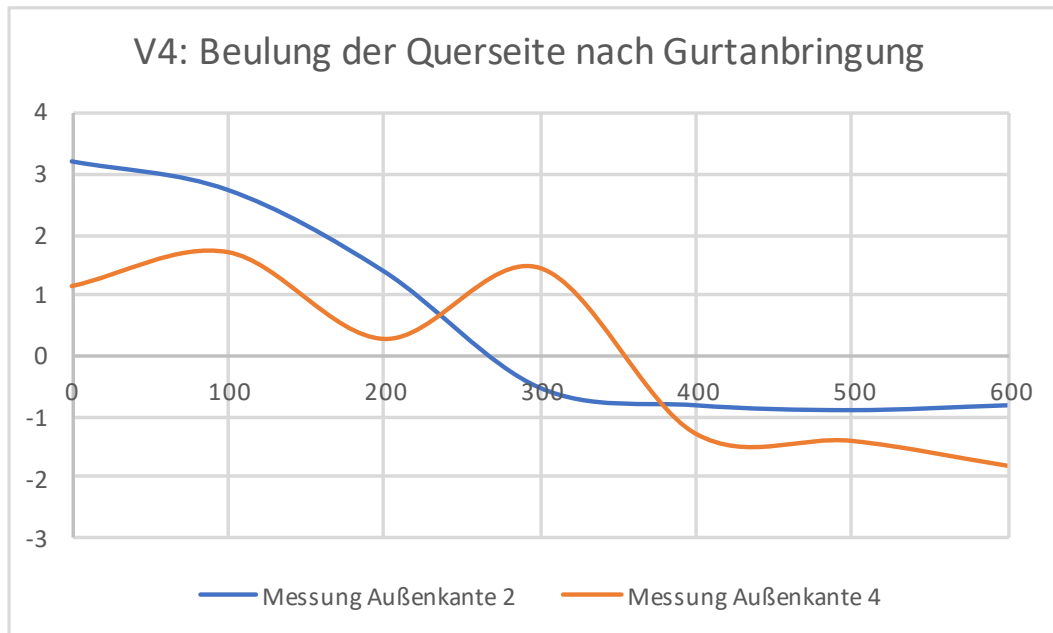


Abbildung I 2: Graphischer Verlauf der Beulung in Querrichtung der Grundplatte nach Anbringung der Gurte in Versuch 4

Die Tabelle I 1 beinhaltet die Messwerte aus Versuch 4 nach Anbringung der Gurte an den Längsseiten. Hier muss beachtet werden, dass aufgrund der Gurte an den Längsseiten lediglich die Messungen der Querseiten genommen wurden.

Tabelle I 1: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 4 nach Gurtanbringung

Position (mm):	Abmaß (mm):	
	Pos. 2	Pos. 4
0	3,21	1,13
100	2,74	1,39
200	1,4	0,26
300	-0,52	1,43
400	-0,81	-1,3
500	-0,89	-1,42
600	-0,81	-1,83
700	-0,65	-1,3
800	-0,11	0,31
840	-0,79	-1,47
Stichmaß	0,29	0,26

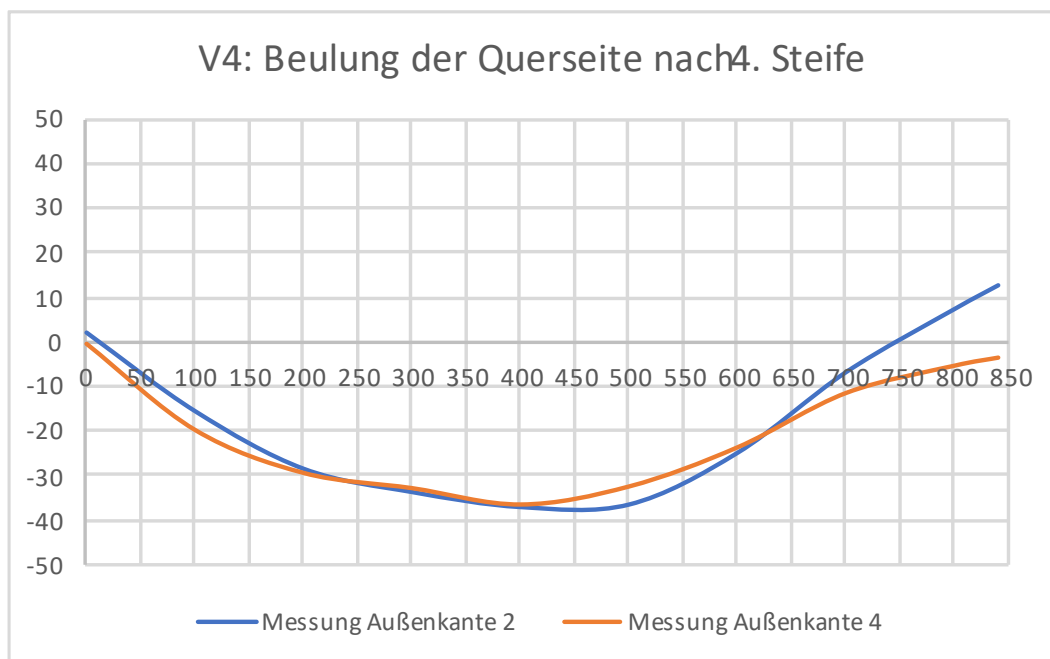


Abbildung I 3: Graphischer Verlauf der Beulung in Querrichtung der Grundplatte nach der vierten Steife in Versuch 4

Die Tabelle I 2 beinhaltet die Messwerte der Beulung der Querseite aus dem Versuch 4, nach Fertigstellung des Versuchs. Hier wurde in 100 mm-Schritten der Abstand der Grundplatte zum Tisch gemessen.

Tabelle I 2: Abstand zur Tischplatte und Stichmaße aus Versuch 3 nach Plattenbauteilherstellung

Position (mm):	Abmaß (mm):	
	Pos. 2	Pos. 4
0	2,31	-0,25
100	-15,38	-19,65
200	-28,36	-29,33
300	-33,6	-32,76
400	-36,98	-36,44
500	-36,4	-32,37
600	-24,73	-23,54
700	-6,56	-11,3
800	7,65	-5,16
840	12,96	-3,36
Stichmaß	49,94	36,19



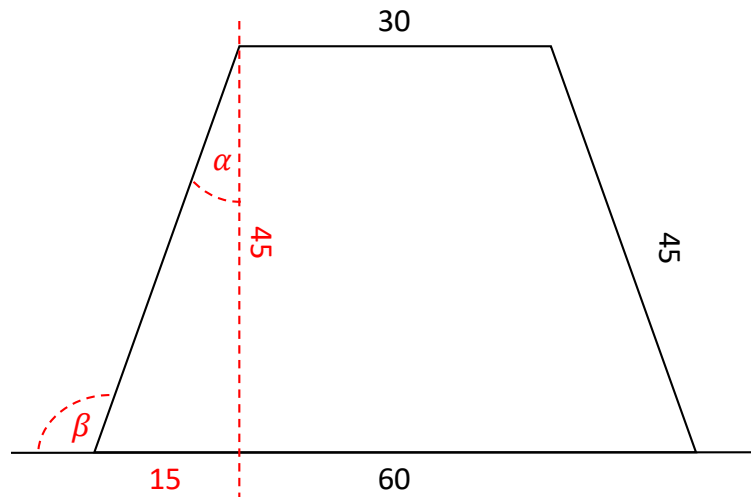


Abbildung I 4: Berechnung des Soll-Winkels in Versuch 4

Mit folgender Formel kann der Soll-Winkel für Versuch 4 berechnet werden:

$$\alpha = \frac{G}{H} = \arcsin\left(\frac{15}{45}\right) = 19,5^\circ$$

$$\Leftrightarrow \beta = 90^\circ + \alpha = 109,5^\circ$$

Tabelle I 3: Verdrehwinkel der Trapeze aus Versuch 3

Position (mm): $\Phi$ soll = $109,5^\circ$	Steifenverzug $\Phi$ der Steife (°):			
	1	2	3	4
0	2,5	-7,5	-1,5	-6,5
0	-4,5	-3,5	-6,5	-6,5
400	-3,5	-7,5	-7,5	-3,5
400	-9,5	-1,5	0,5	-3,5
800	-0,5	-1,5	-0,5	-8,5
800	-6,5	-4,5	4,5	-3,5
1200	-2	0,5	3,5	-4,5
1200	-11,5	1,5	3,5	-1,5
1700	-8	-0,5	-1,5	-6,5
1700	-17,5	-4,5	-4,5	-4,5
Mittelwert	-2,3	-3,3	-1,5	-5,9
Mittelwert	-9,9	-2,5	0,5	-3,9

## Anhang J: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 1)

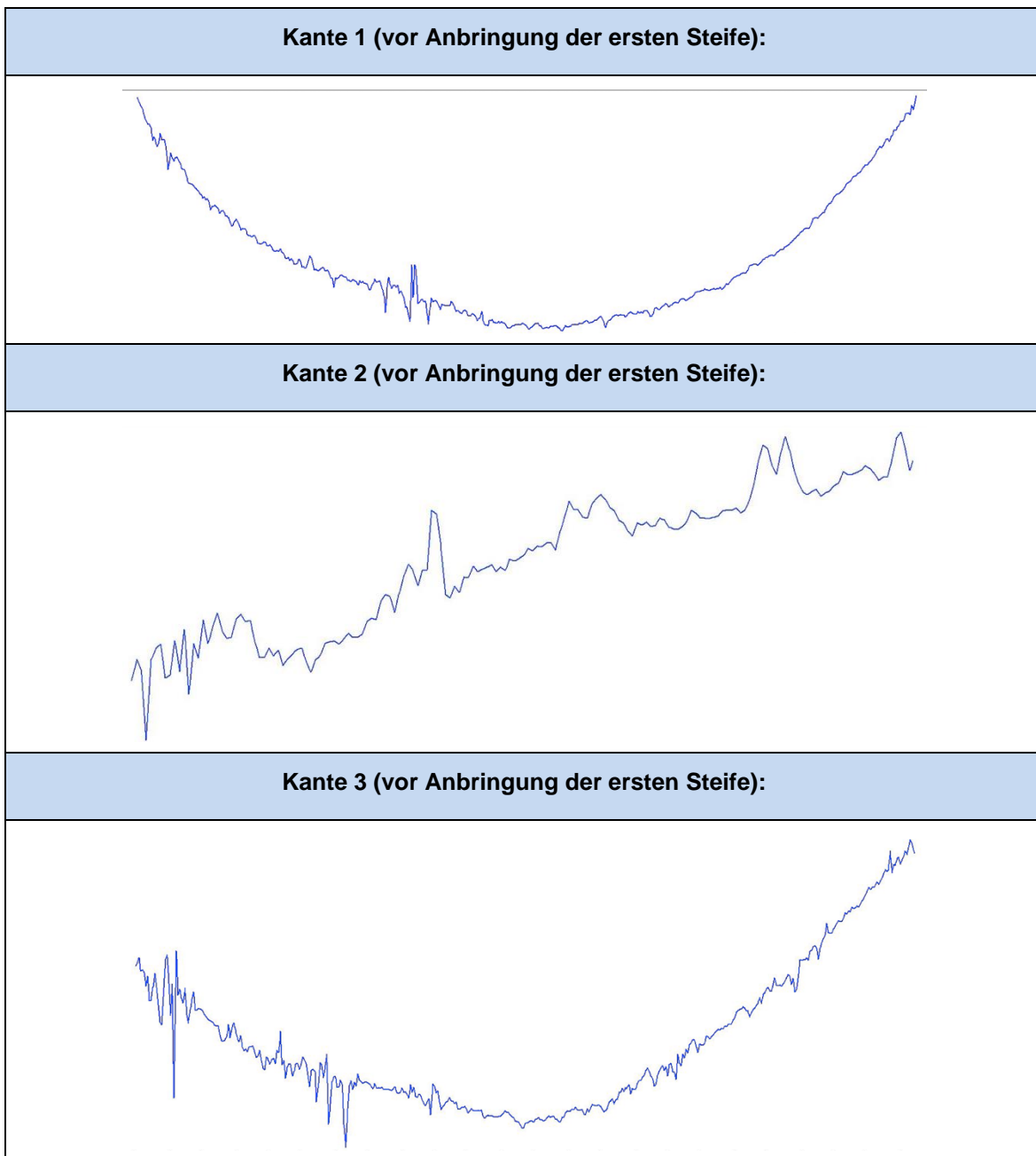
Die nachfolgenden Tabelle J 1 bis Tabelle J 3 zeigen zum einen die Messwerte der Stichtmaße und zum anderen die Form der Beulung (in Quer- und Längsrichtung). Diese Messwerte und Graphiken sind mit Hilfe des Limes-3D Messsystems erstellt worden. Bei den Graphiken handelt es sich explizit nur um die Form der Beulung. Die x-Richtung der Graphiken stellt die Länge der gemessenen Kante, die y-Richtung stellt die Höhe der Beulung, dar.

Tabelle J 1: Stichtmaße aus dem Limes-3D System für Versuch 1

<b><u>Versuch 1:</u></b>	<b>Grundplatte Stichtmaße (Vorbeulen):</b>	
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	3,1 mm	
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	2,9 mm	
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	2,6 mm	
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	1,1 mm	
<b><u>Versuch 1: (Steife 1)</u></b>	<b>Stichtmaße nach Heftschweißung S1:</b>	<b>Stichtmaße nach Fertigstellung S1:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	nicht ausgewertet	5,2 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	nicht ausgewertet	0,25 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	nicht ausgewertet	0,85 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	nicht ausgewertet	2,1 mm
<b><u>Versuch 1: (Steife 2)</u></b>	<b>Stichtmaße nach Heftschweißung S2:</b>	<b>Stichtmaße nach Fertigstellung S2:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	6,3 mm	30,5 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	1,94 mm	21,4 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	3,03 mm	31,4 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	2,24 mm	35,7 mm
<b><u>Versuch 1: (Steife 3)</u></b>	<b>Stichtmaße nach Heftschweißung S3:</b>	<b>Stichtmaße nach Fertigstellung S3:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	10 mm	11 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	8,1 mm	8,1 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	18,76 mm	18,76 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	18,89 mm	29 mm

<b>Versuch 1: (Steife 4)</b>	<b>Stichmaße nach Heftschiweißung S4:</b>	<b>Stichmaße nach Fertigstellung S4:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	nicht ausgewertet	10,48 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	nicht ausgewertet	19,54 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	nicht ausgewertet	13,37 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	nicht ausgewertet	20,34 mm

Tabelle J 2: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, im Ausgangszustand für Versuch 1



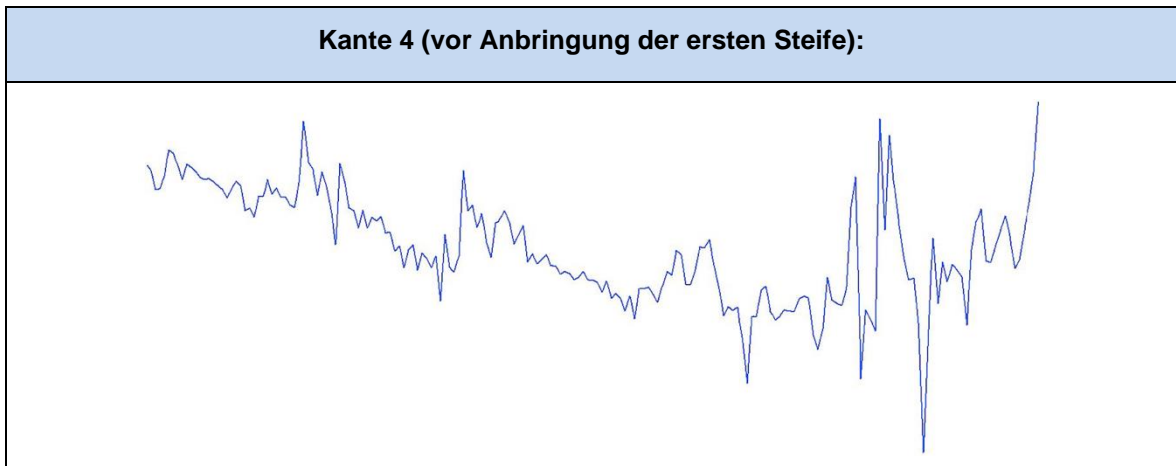
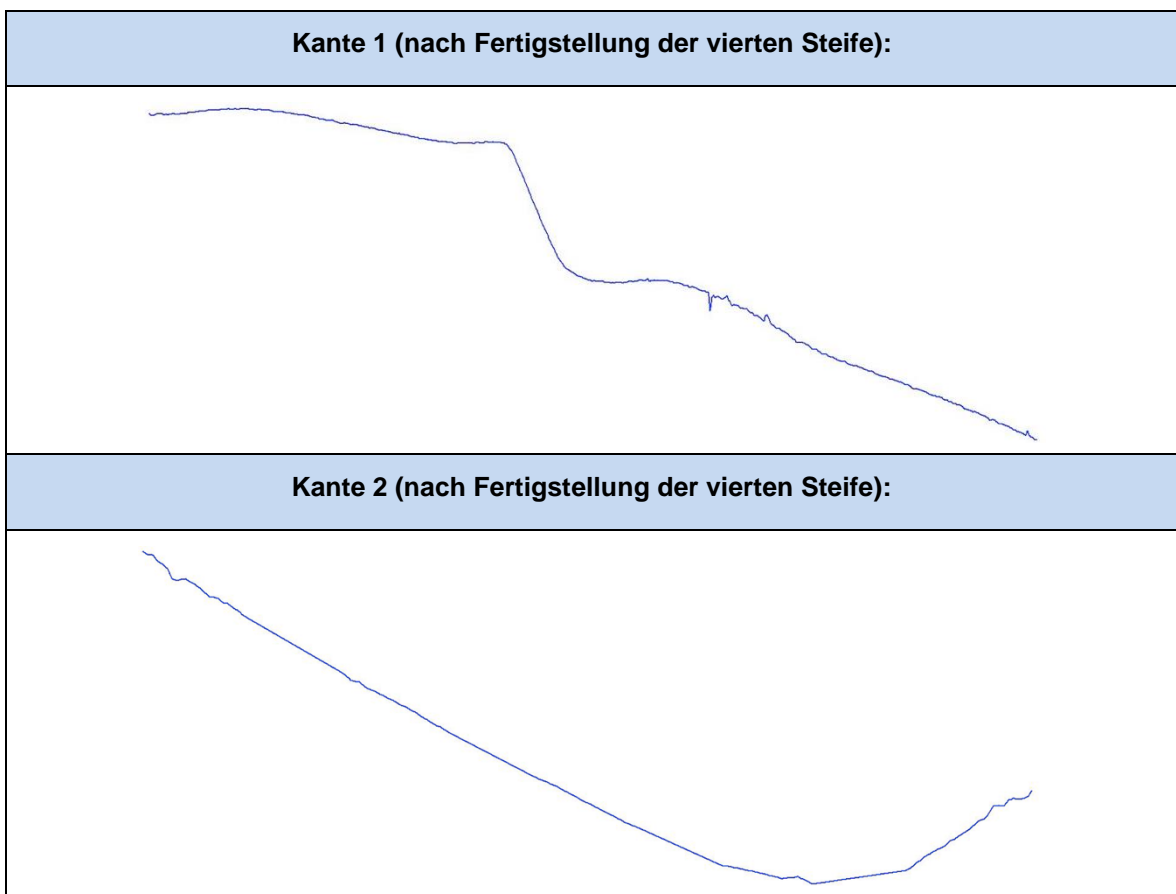
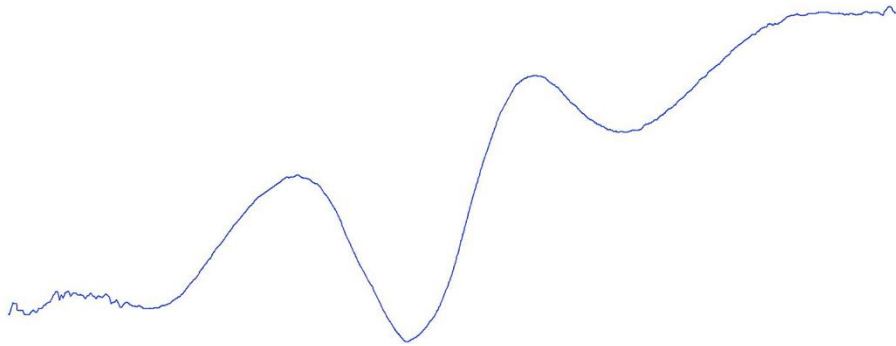


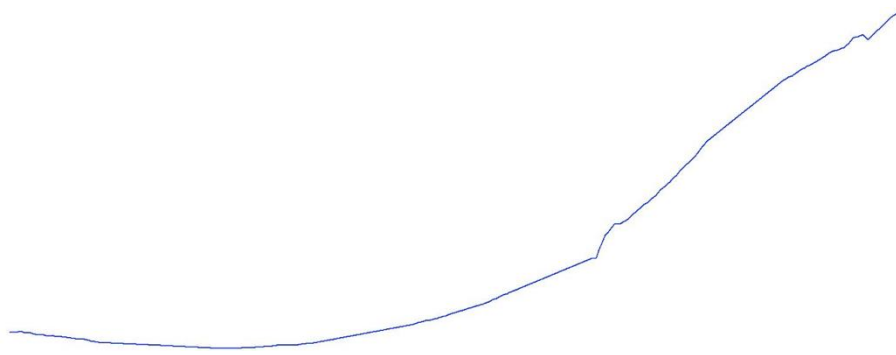
Tabelle J 3: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, nach Steife 4, für Versuch 1



**Kante 3 (nach Fertigstellung der vierten Steife):**



**Kante 4 (nach Fertigstellung der vierten Steife):**



## Anhang K: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 2)

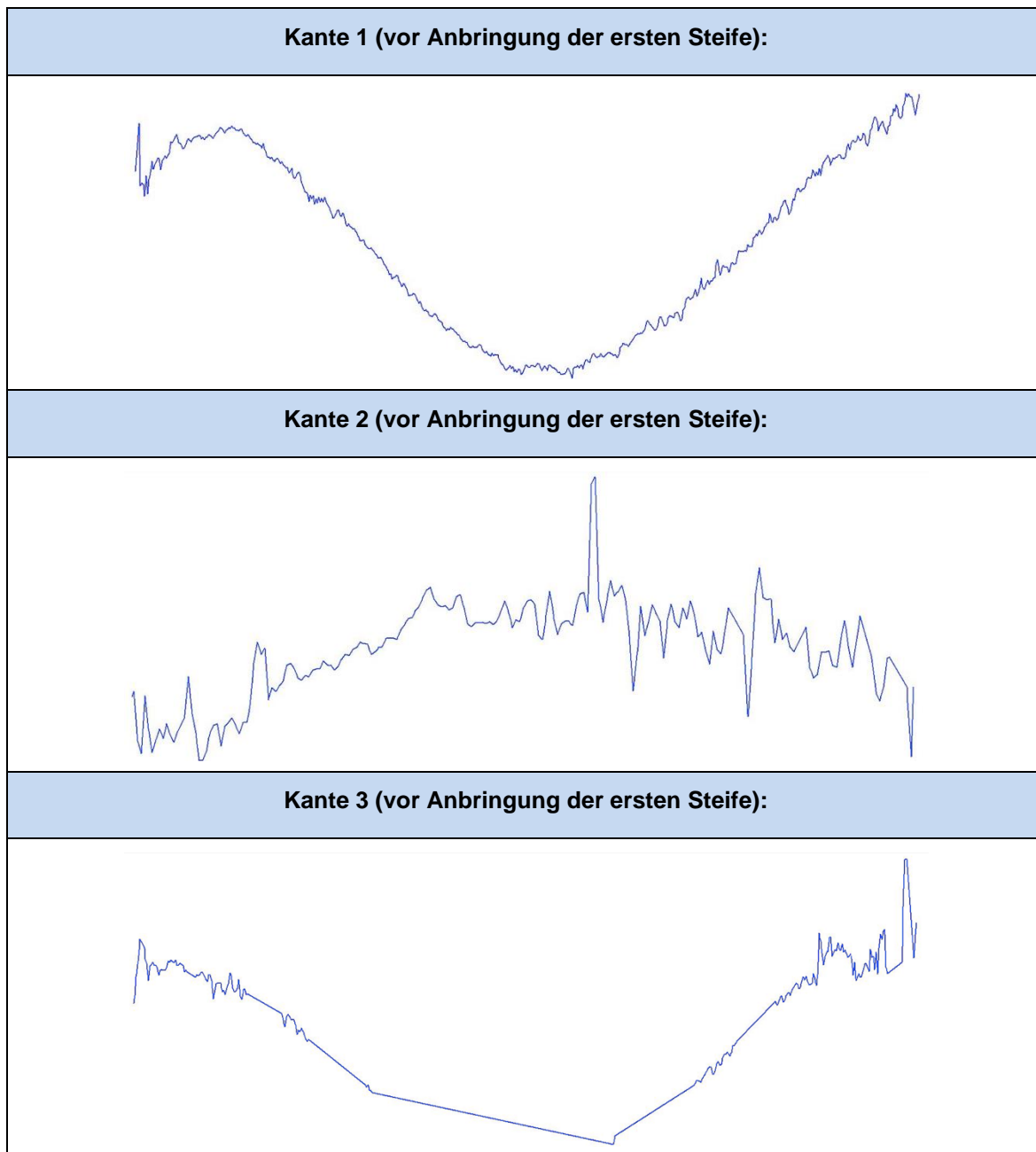
Die nachfolgenden Tabelle K 1 bis Tabelle K 3 zeigen zum einen die Messwerte der Stichmaße und zum anderen die Form der Beulung (in Quer- und Längsrichtung). Diese Messwerte und Graphiken sind mit Hilfe des Limes-3D Messsystems erstellt worden. Bei den Graphiken handelt es sich explizit nur um die Form der Beulung. Die x-Richtung der Graphiken stellt die Länge der gemessenen Kante, die y-Richtung stellt die Höhe der Beulung, dar.

Tabelle K 1: Stichmaße aus dem Limes-3D System für Versuch 2

<b><u>Versuch 2:</u></b>	<b>Grundplatte Stichmaße (Vorbeulen):</b>	
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	2,75 mm	
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	1,04 mm	
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	2,68 mm	
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	3,21 mm	
<b><u>Versuch 2: (Steife 1)</u></b>	<b>Stichmaße nach Heftschweißung S1:</b>	<b>Stichmaße nach Fertigstellung S1:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	2,83 mm	58,16 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	1,96 mm	20,84 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	1,51 mm	19,91 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	2,22 mm	23,47 mm
<b><u>Versuch 2: (Steife 2)</u></b>	<b>Stichmaße nach Heftschweißung S2:</b>	<b>Stichmaße nach Fertigstellung S2:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	12,8 mm	42,38 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	21,87 mm	45,74 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	30,82 mm	44,59 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	20,14 mm	45,41 mm
<b><u>Versuch 2: (Steife 3)</u></b>	<b>Stichmaße nach Heftschweißung S3:</b>	<b>Stichmaße nach Fertigstellung S3:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	nicht ausgewertet	43,24 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	nicht ausgewertet	39,82 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	nicht ausgewertet	34,38 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	nicht ausgewertet	38,74 mm

<b>Versuch 2: (Steife 4)</b>	<b>Stichmaße nach Heftsweißung S4:</b>	<b>Stichmaße nach Fertigstellung S4:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	26,63 mm	40,91 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	23,72 mm	42,65 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	24,32 mm	48,89 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	26,59 mm	43,94 mm

Tabelle K 2: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, im Ausgangszustand für Versuch 2



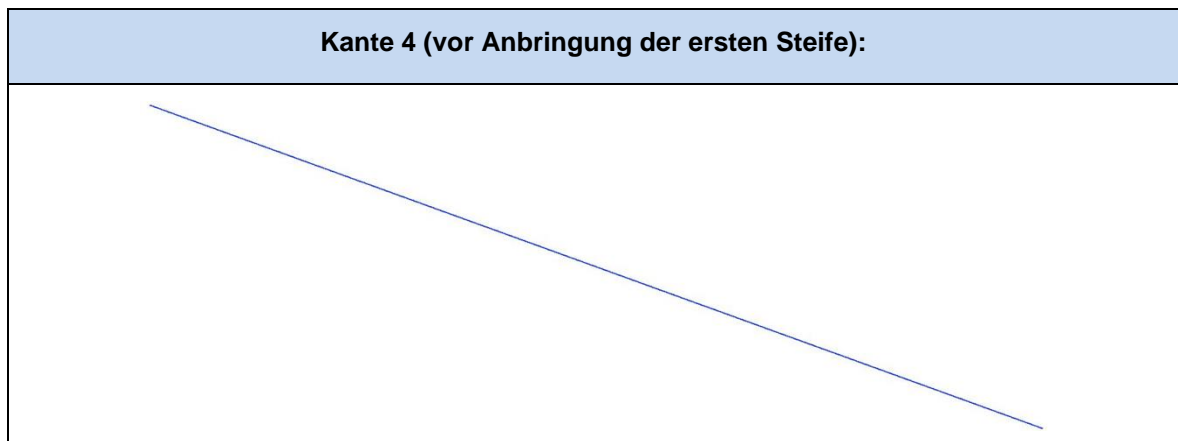
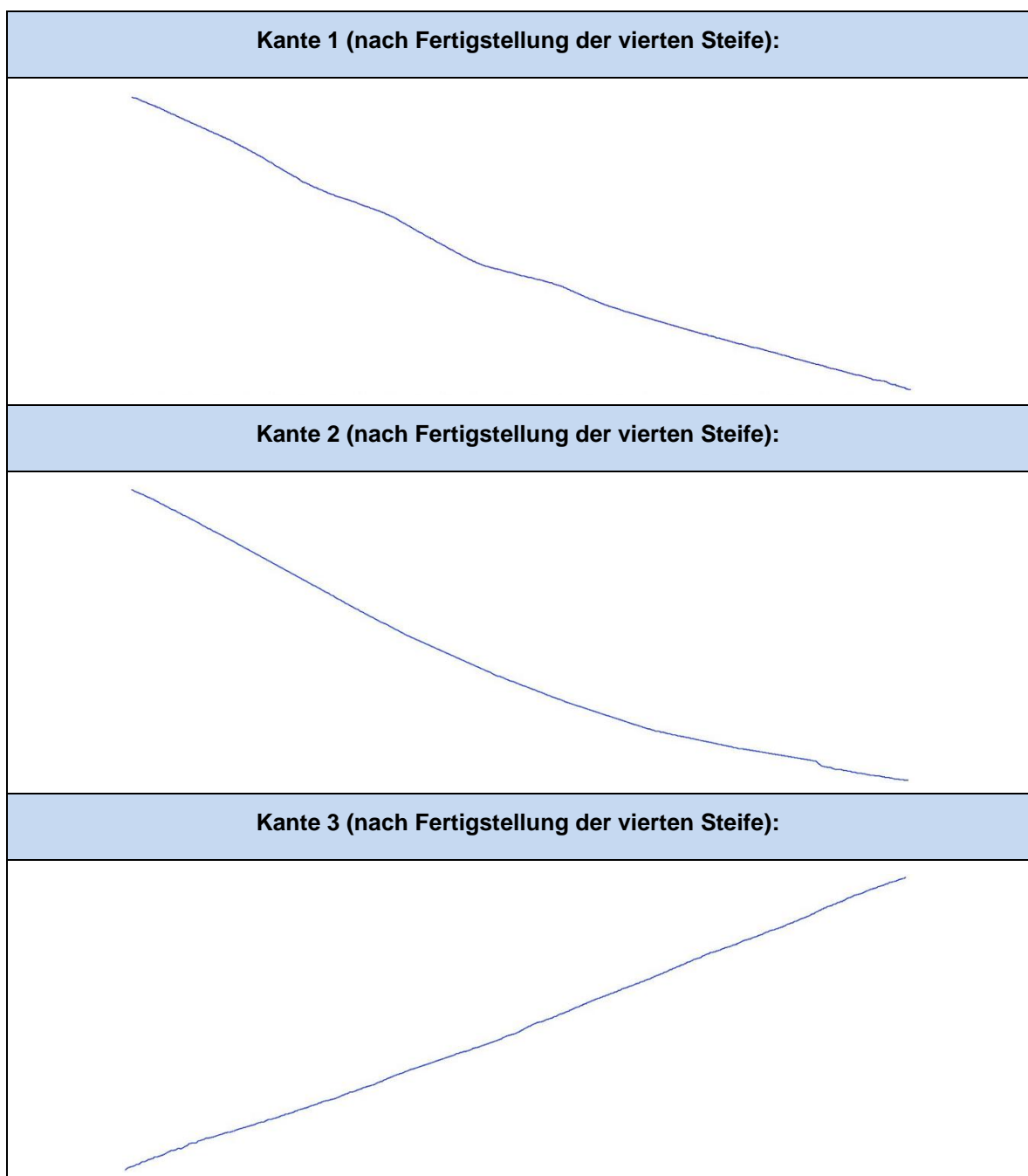
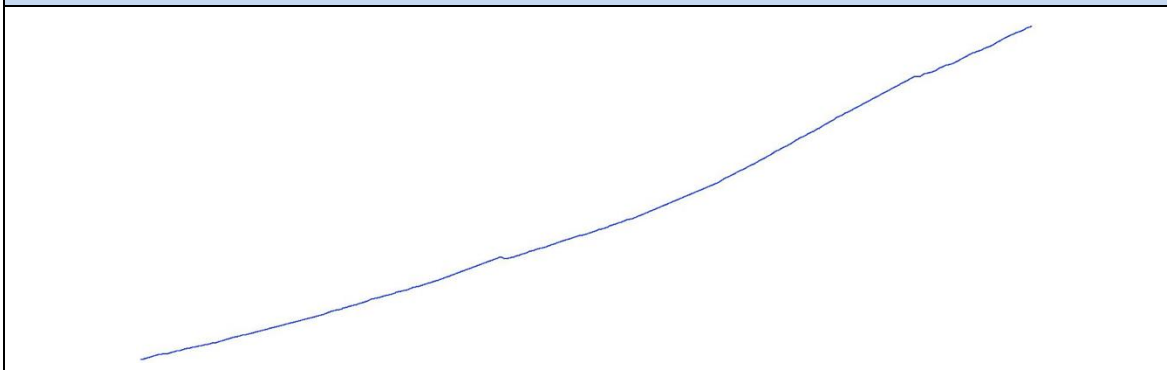


Tabelle K 3: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, nach Steife 4, für Versuch 2





**Kante 4 (nach Fertigstellung der vierten Steife):**



## Anhang L: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 3)

Die nachfolgenden Tabelle L 1 bis Tabelle L 4 zeigen zum einen die Messwerte der Stichmaße und zum anderen die Form der Beulung (in Quer- und Längsrichtung). Diese Messwerte und Graphiken sind mit Hilfe des Limes-3D Messsystems erstellt worden. Bei den Graphiken handelt es sich explizit nur um die Form der Beulung. Die x-Richtung der Graphiken stellt die Länge der gemessenen Kante, die y-Richtung stellt die Höhe der Beulung dar. In diesem Versuch sind drei verschiedene Messungen durchgeführt worden. Zunächst die Messung der Grundplatte vor Anbringung der Gurte, dann die Messung der Grundplatte nach Anbringung der Grundplatte und anschließend die Messung des fertigen Plattenbauteils aus Versuch 3.

Tabelle L 1: Stichmaße aus dem Limes-3D System für Versuch 3

<b><u>Versuch 3:</u></b>	<b>Grundplatte Stichmaße (Vorbeulen):</b>	<b>Grundplatte nach Gurtanbringung:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	2,96 mm	2,05 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	1,53 mm	1,02 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	2,02 mm	2,01 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	1,1 mm	0,97 mm
<b><u>Versuch 3: (Steife 1)</u></b>	<b>Stichmaße nach Heftschiweißung S1:</b>	<b>Stichmaße nach Fertigstellung S1:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	2,48 mm	1,81 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	5,1 mm	5,23 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	2,14 mm	2,35 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	5,18 mm	8,21 mm
<b><u>Versuch 3: (Steife 4)</u></b>	<b>Stichmaße nach Heftschiweißung S4:</b>	<b>Stichmaße nach Fertigstellung S4:</b>
<b>Kante 1 (Längsseite):</b>	nicht ausgewertet	5,09 mm
<b>Kante 2 (Querseite):</b>	nicht ausgewertet	29,72 mm
<b>Kante 3 (Längsseite):</b>	nicht ausgewertet	5,48 mm
<b>Kante 4 (Querseite):</b>	nicht ausgewertet	30,37 mm

Tabelle L 2: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, im Ausgangszustand für Versuch 3

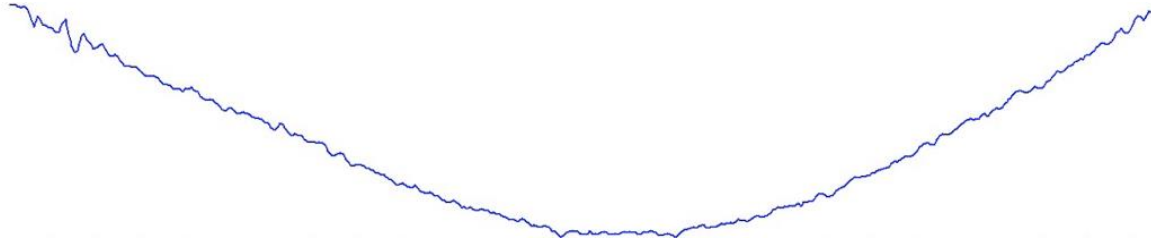
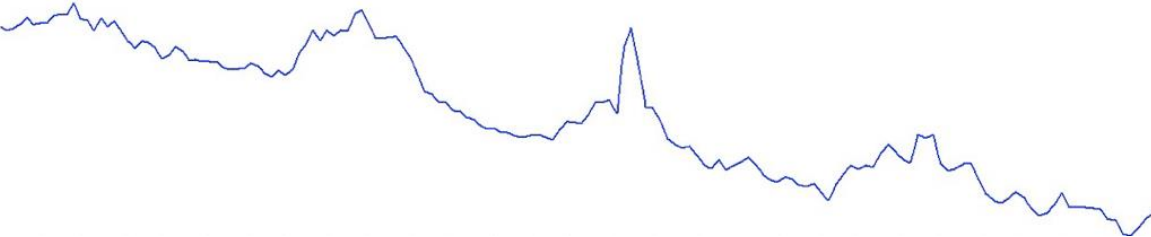
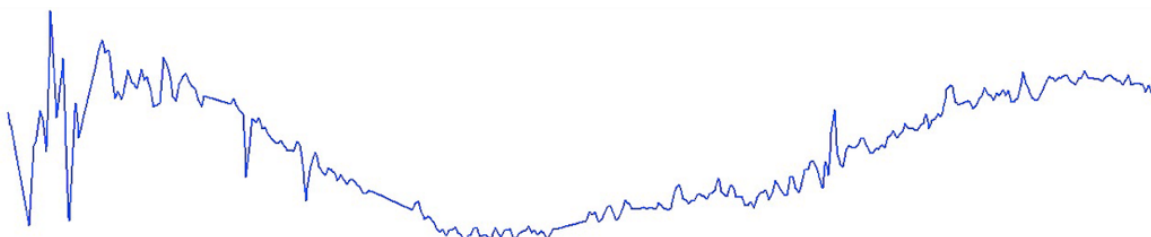

<b>Kante 1 (vor Anbringung der Gurte):</b>

<b>Kante 2 (vor Anbringung der Gurte):</b>

<b>Kante 3 (vor Anbringung der Gurte):</b>

<b>Kante 4 (vor Anbringung der Gurte):</b>


Tabelle L 3: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, nach Gurtanbringung für Versuch 3

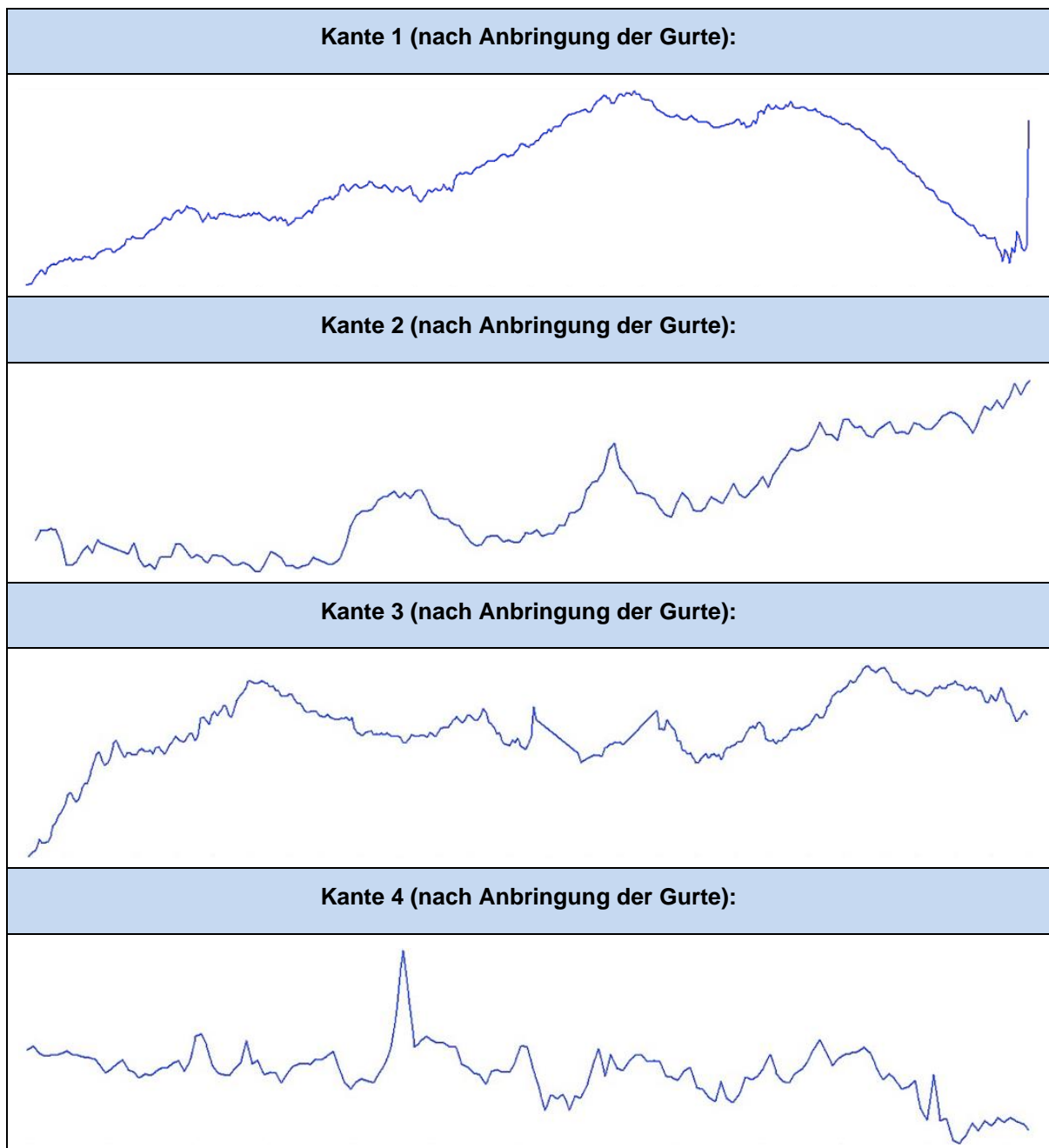
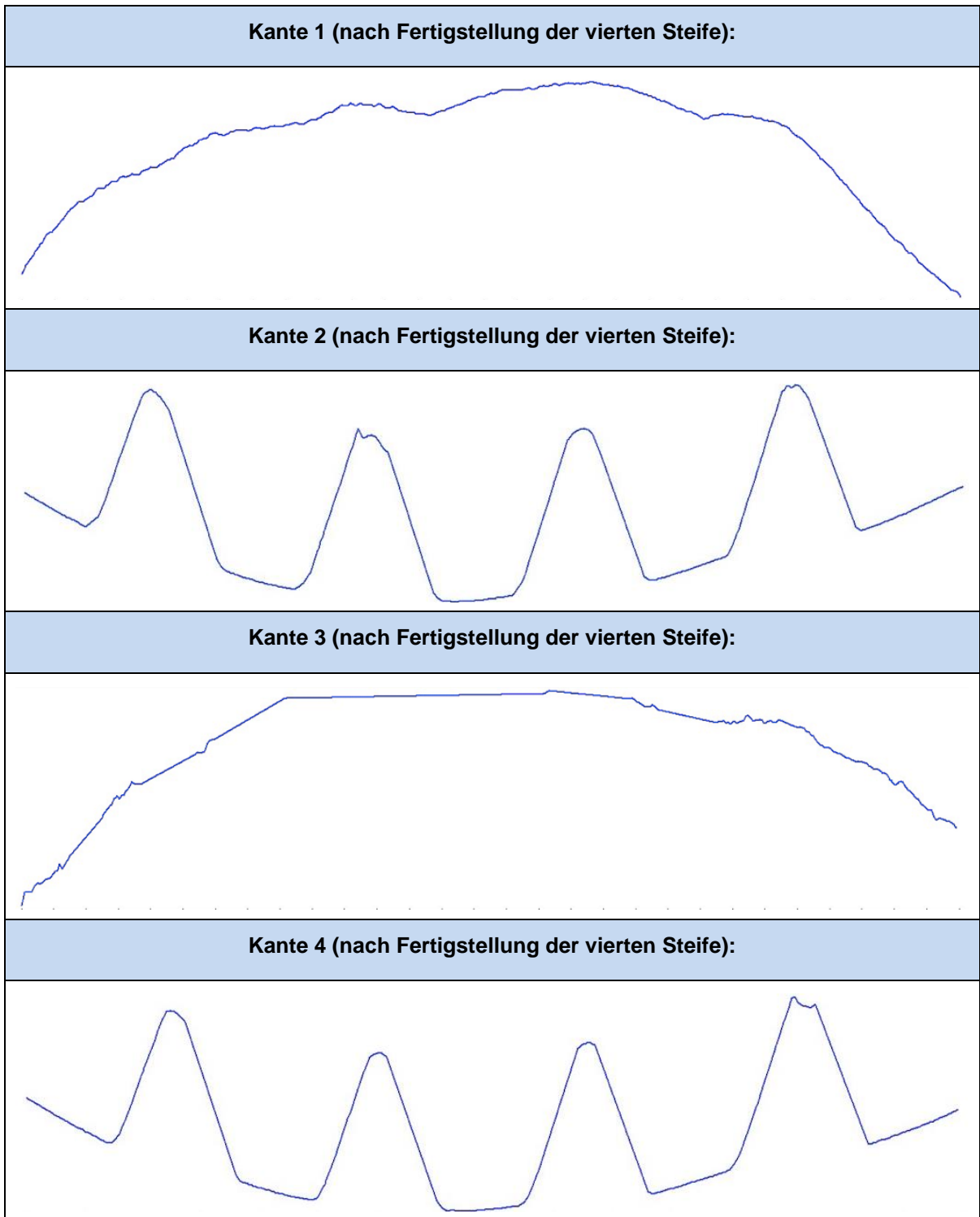


Tabelle L 4: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, nach Steife 4, für Versuch 3



## Anhang M: Messwerte und Graphische Darstellung der Beulformen aus dem Limes-Messsystem (Versuch 4)

Die nachfolgenden Tabelle M 1 bis Tabelle M 4 zeigen zum einen die Messwerte der Stichmaße und zum anderen die Form der Beulung (in Quer- und Längsrichtung). Diese Messwerte und Graphiken sind mit Hilfe des Limes-3D Messsystems erstellt worden. Bei den Graphiken handelt es sich explizit nur um die Form der Beulung. Die x-Richtung der Graphiken stellt die Länge der gemessenen Kante, die y-Richtung stellt die Höhe der Beulung, dar. In diesem Versuch sind drei verschiedene Messungen durchgeführt worden. Zunächst die Messung der Grundplatte vor Anbringung der Gurte, dann die Messung der Grundplatte nach Anbringung der Grundplatte und anschließend die Messung des fertigen Plattenbauteils aus Versuch 3.

Tabelle M 1: Stichmaße aus dem Limes-3D System für Versuch 4

<b><u>Versuch 4:</u></b>	<b>Grundplatte Stichmaße (Vorbeulen):</b>
Kante 1 (Längsseite):	4,82 mm
Kante 2 (Querseite):	2,5 mm
Kante 3 (Längsseite):	4,78 mm
Kante 4 (Querseite):	2,59 mm
<b><u>Versuch 4: (Steife 1)</u></b>	<b>Grundplatte nach Gurtanbringung:</b>
Kante 1 (Längsseite):	3,76 mm
Kante 2 (Querseite):	3,15 mm
Kante 3 (Längsseite):	3,48 mm
Kante 4 (Querseite):	4,55 mm
<b><u>Versuch 4:(Steife 4)</u></b>	<b>Stichmaße nach Fertigstellung Steife 4:</b>
Kante 1 (Längsseite):	35,87 mm
Kante 2 (Querseite):	49,78 mm
Kante 3 (Längsseite):	32,74 m
Kante 4 (Querseite):	32,98 mm

Tabelle M 2: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, im Ausgangszustand für Versuch 4

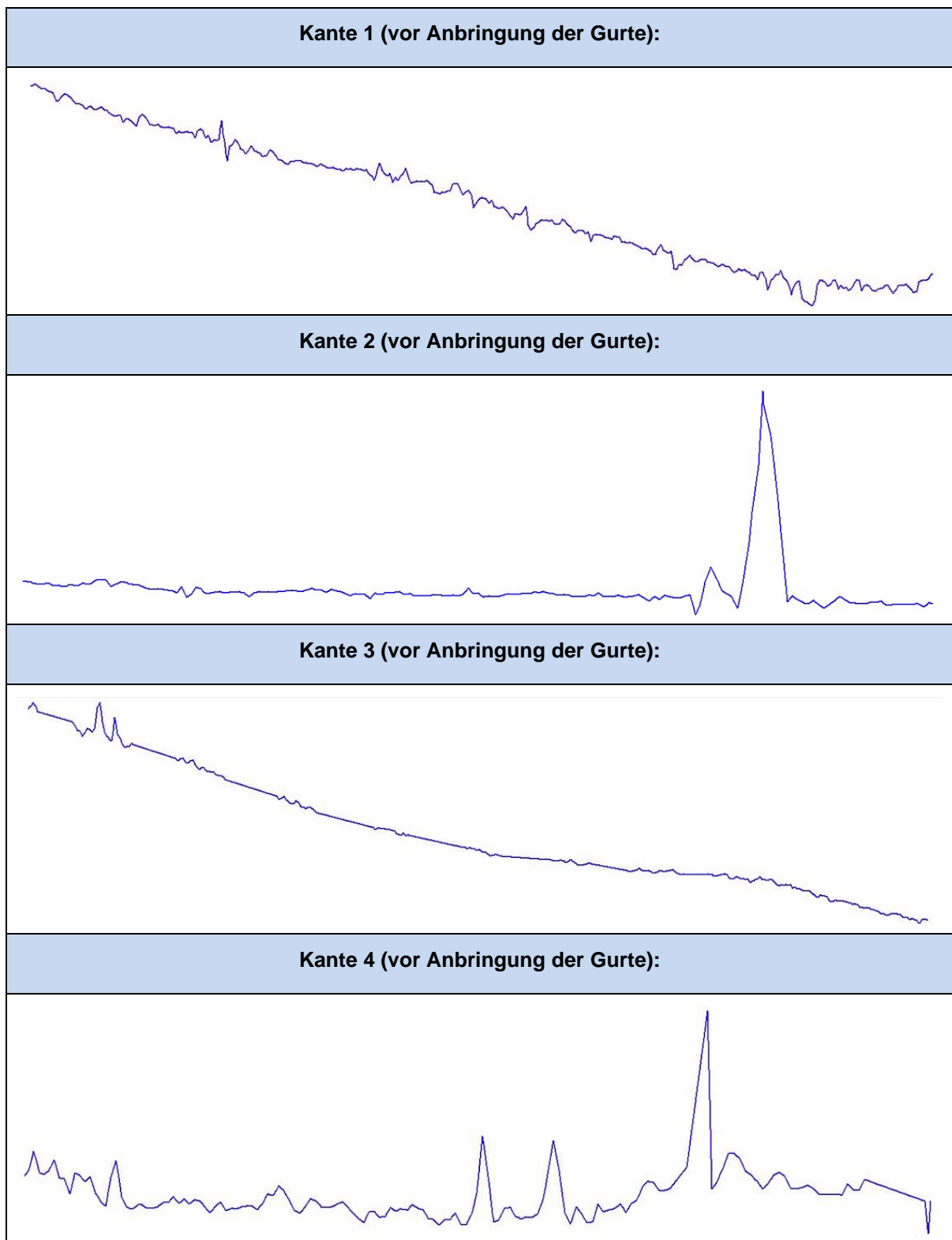


Tabelle M 3: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, nach Gurtanbringung für Versuch 4

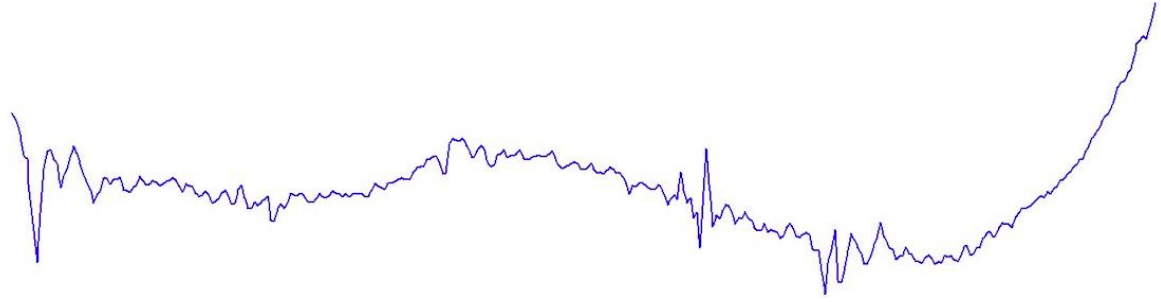
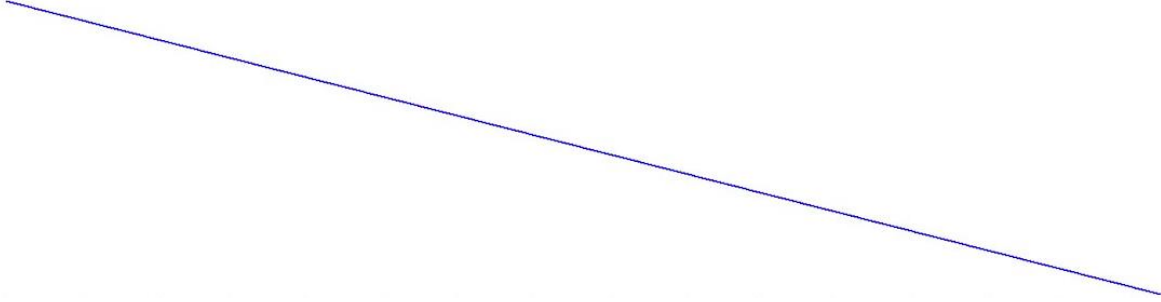
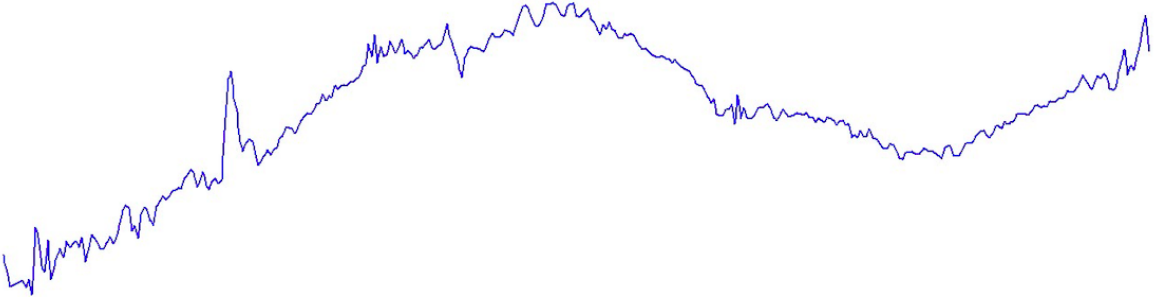
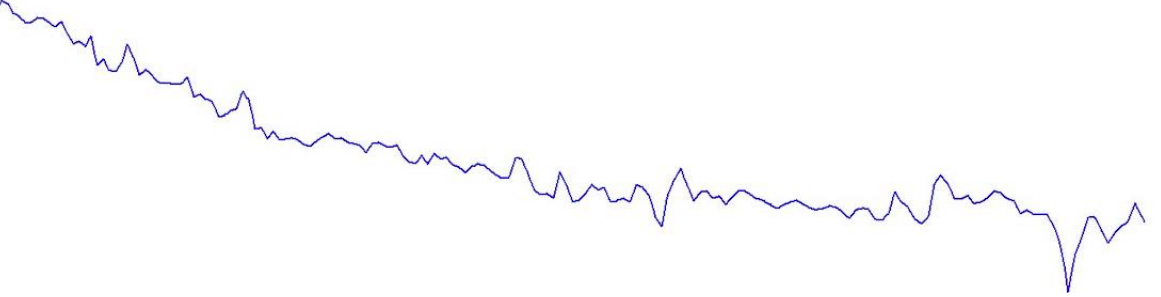
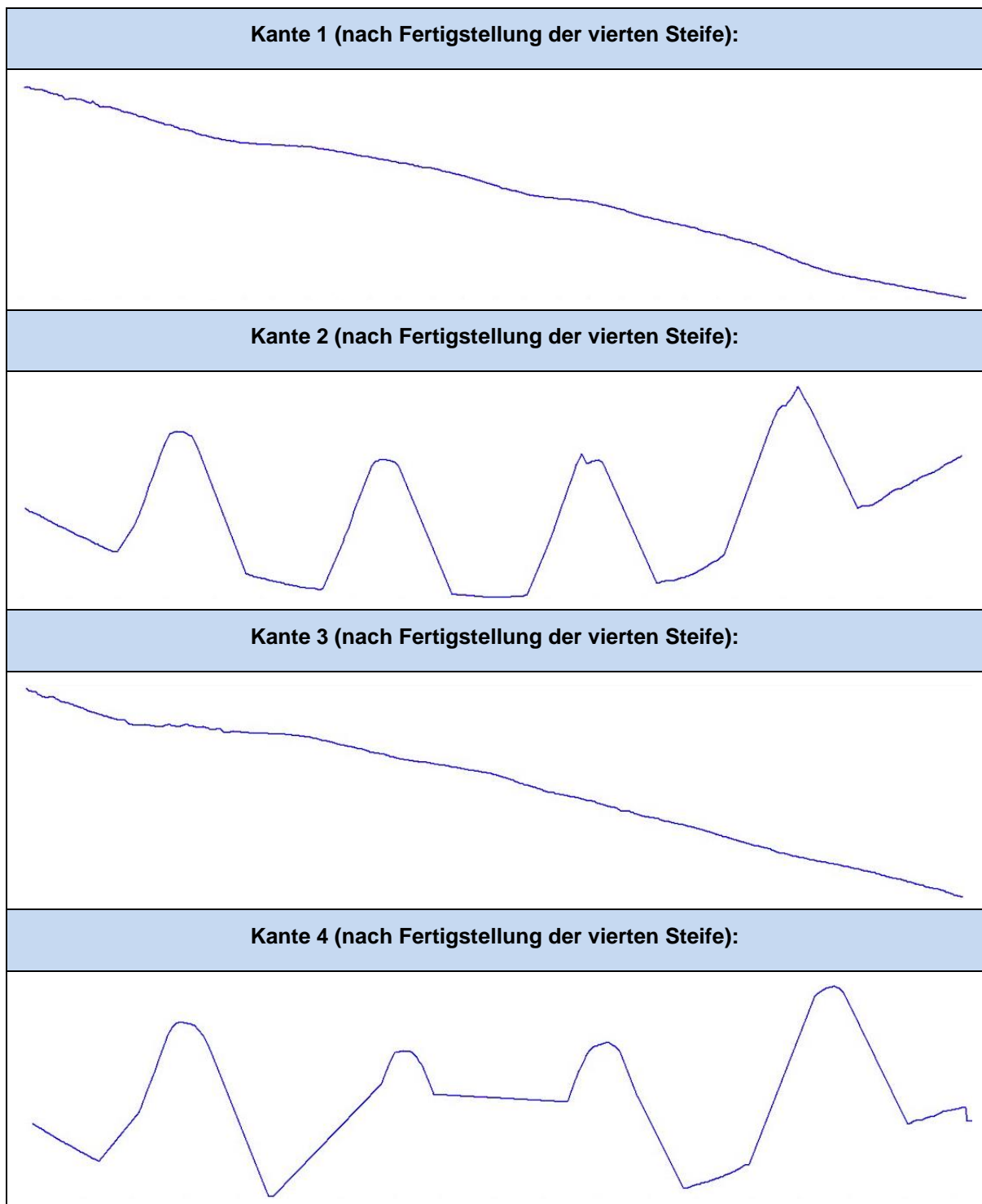
<b>Kante 1 (nach Anbringung der Gurte):</b>

<b>Kante 2 (nach Anbringung der Gurte):</b>

<b>Kante 3 (nach Anbringung der Gurte):</b>

<b>Kante 4 (nach Anbringung der Gurte):</b>




Tabelle M 4: Beulform der Grundplatte, in Längs- und Querrichtung, nach Steife 4, für Versuch 4



## Anhang N: Graphische Auswertung der Messung mit dem Laserscanner

Die nachfolgenden Abbildungen N 1 bis N 8 veranschaulichen zum einen die Beulform einer Querseite der Versuche 1 bis 4 und zum anderen die Ausgabe eines Messergebnisses (in diesem Falls die Ausgabe des Stichmaßes in Längsrichtung). Diese Beulformen sind mit der Software „Cloudcompare“ erstellt worden.

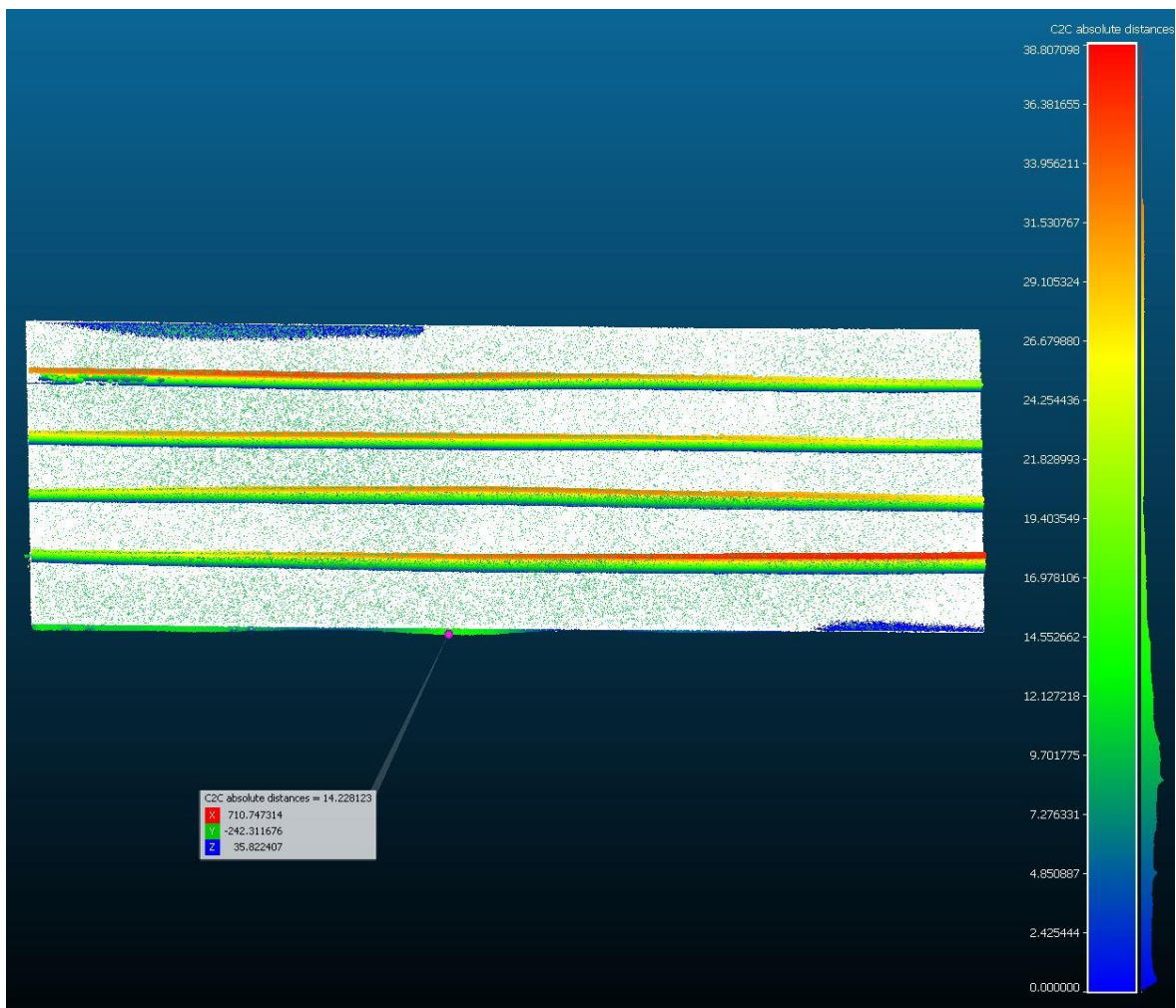


Abbildung N 1: Ausgabe eines Stichmaßes einer Längsseite in Versuch 1 in Cloudcompare

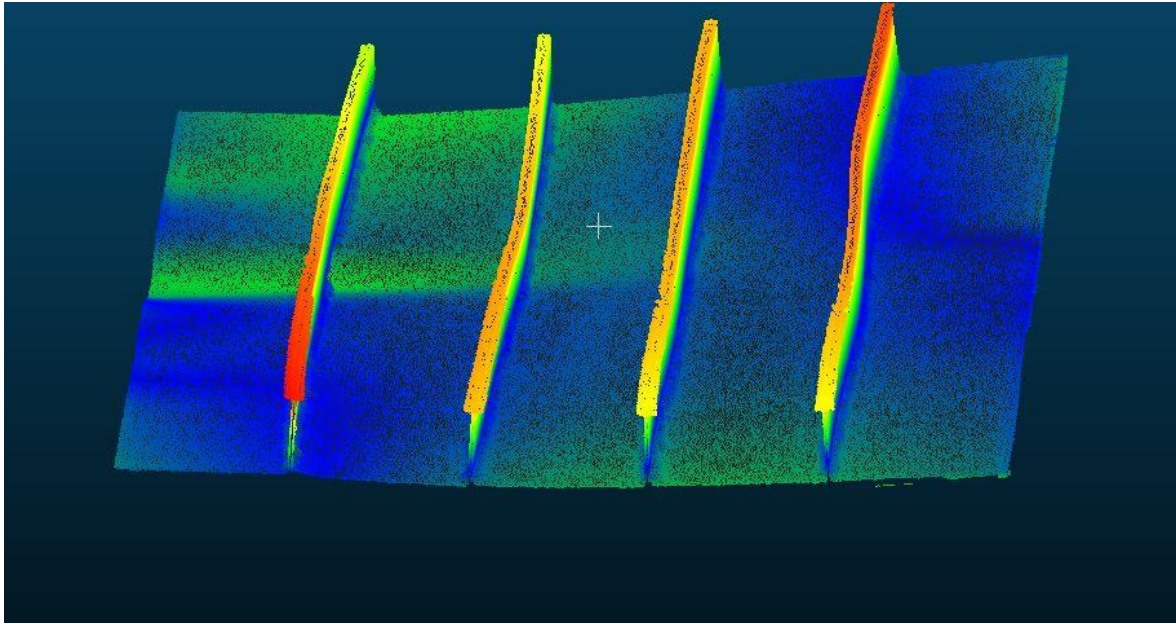


Abbildung N 2: Darstellung der Beulung einer Querseite in Versuch 1 in Cloudcompare

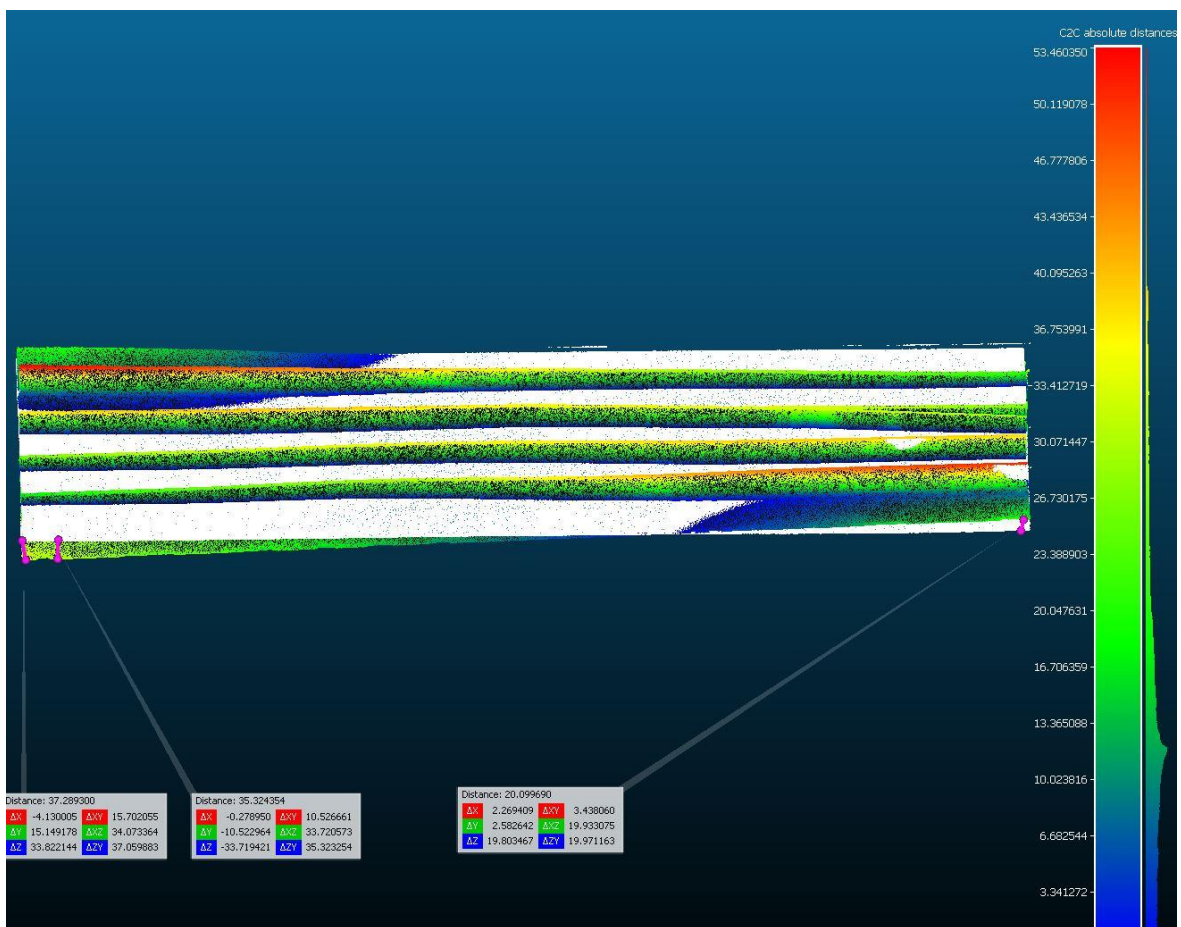


Abbildung N 3: Ausgabe eines Stichmaßes einer Längsseite in Versuch 2 in Cloudcompare



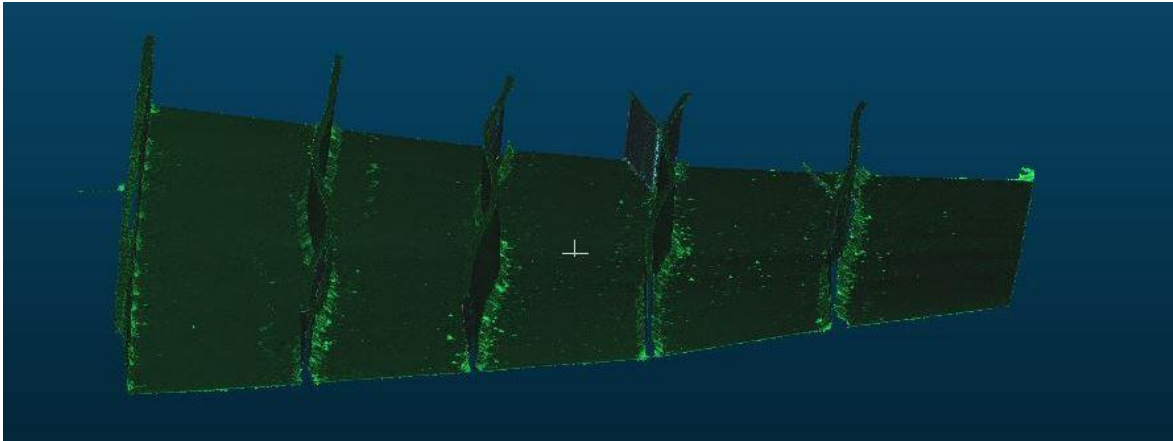


Abbildung N 4: Darstellung der Beulung einer Querseite in Versuch 2 in Cloudcompare

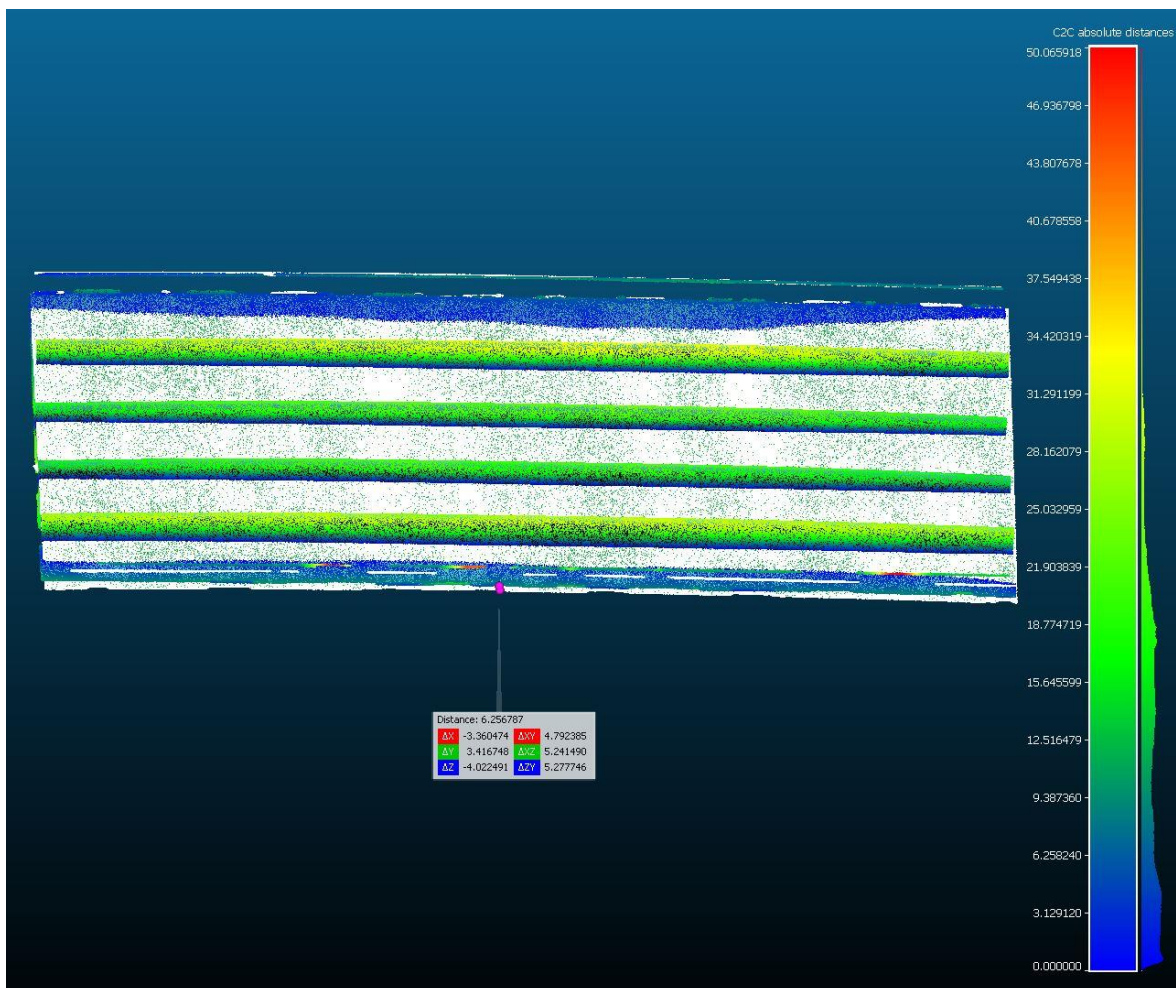


Abbildung N 5: Ausgabe eines Stichmaßes einer Längsseite in Versuch 3 in Cloudcompare

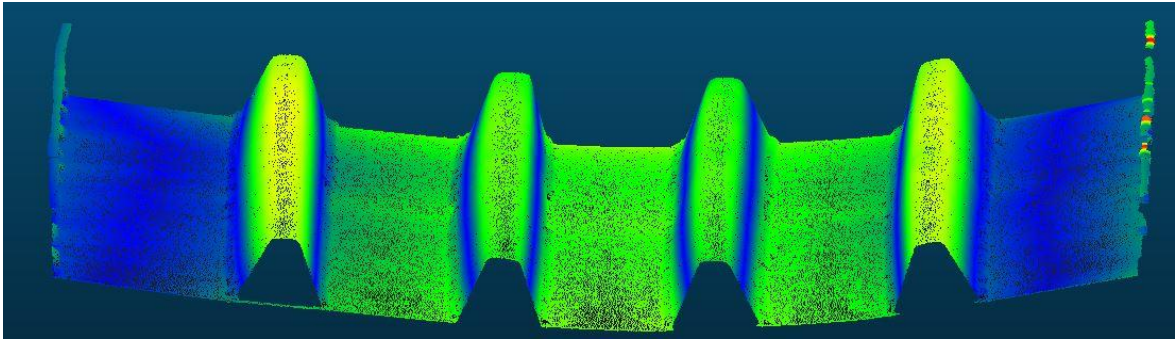


Abbildung N 6: Darstellung der Beulung einer Querseite in Versuch 3 in Cloudcompare

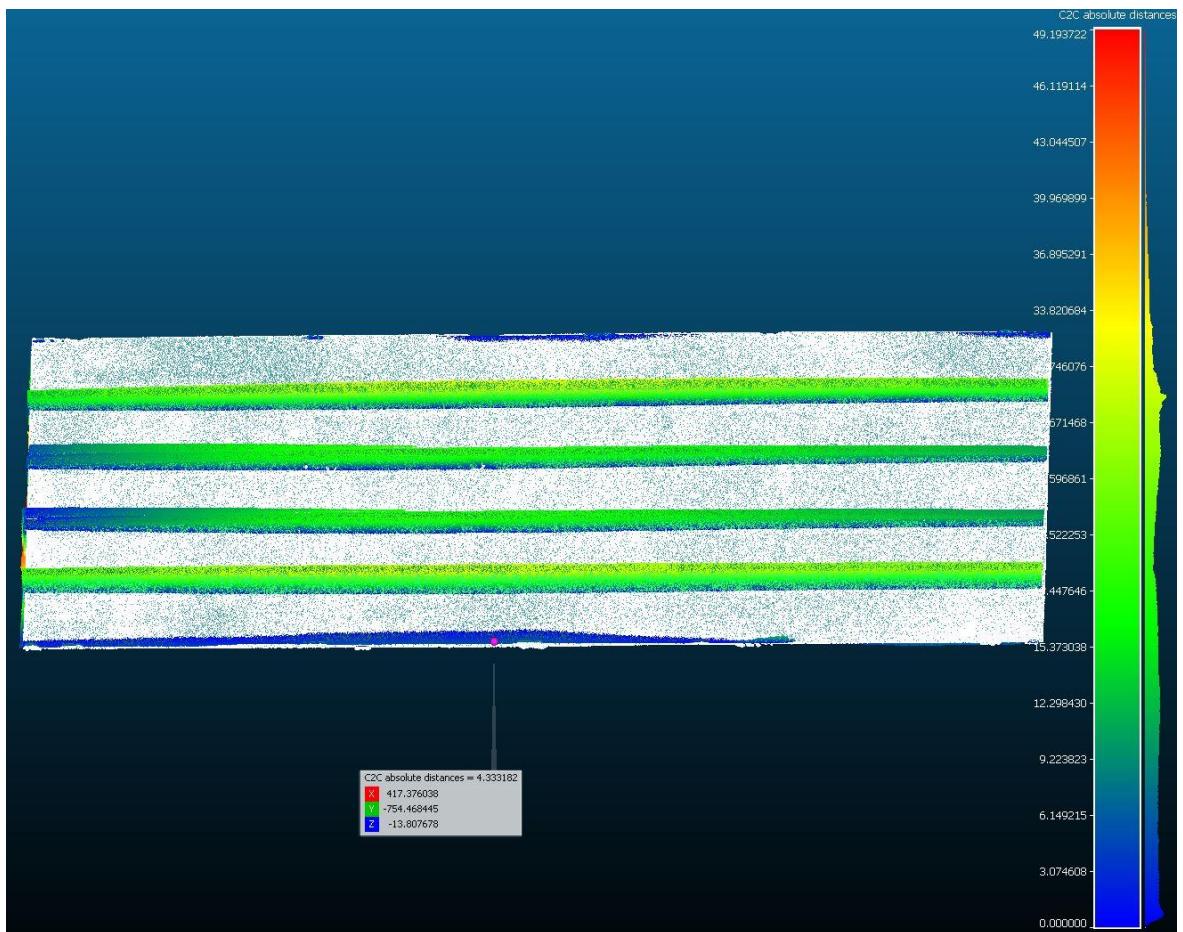


Abbildung N 7: Ausgabe eines Stichmaßes einer Längsseite in Versuch 4 in Cloudcompare

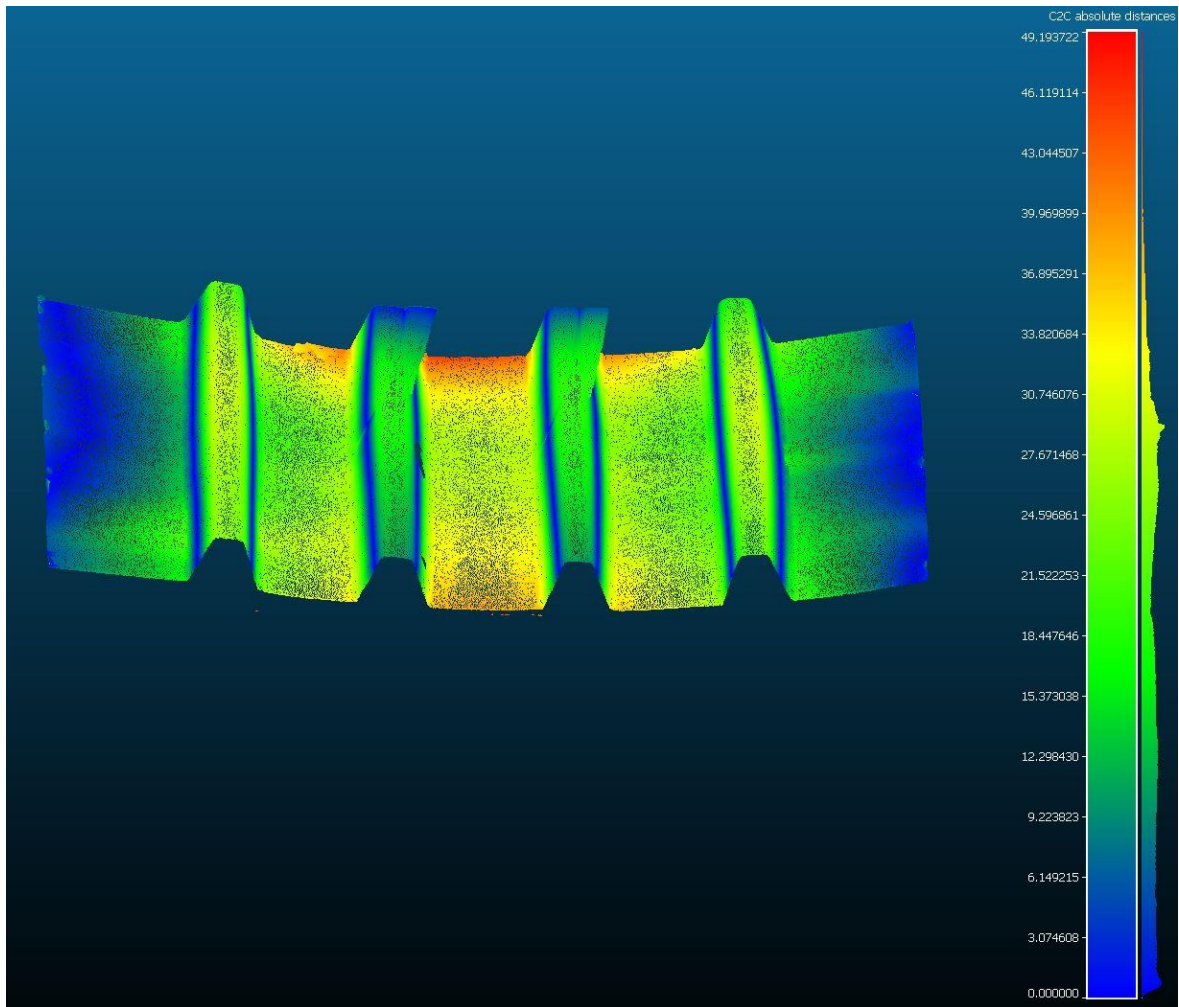


Abbildung N 8: Darstellung der Beulung einer Querseite in Versuch 4 in Cloudcompare

---

## **Eidesstattliche Versicherung**

*Ich versichere, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt, nur die angegebenen Quellen benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

*Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.*

*Mülheim an der Ruhr, den 06.06.2022*

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'M. J. G.', written in a cursive style.