



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

## **Bachelorarbeit**

Juliane Jahnke

# **Umformbarkeit eines Metallgewirks in thermoplastischer Matrix am Beispiel der Herstellung von Kabelhaltern**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Juliane Jahnke**

**Umformbarkeit eines Metallgewirks in  
thermoplastischer Matrix am Beispiel der  
Herstellung von Kabelhaltern**



Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Maschinenbau/Entwicklung und Konstruktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Center of Maritime Technologies e.V.  
Projekt FAUSST<sup>1</sup>  
Bramfelder Str. 164  
22305 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Stöver (HAW Hamburg, IPT)  
Zweitprüfer: Dr. Lars Molter (CMT)

Abgabedatum: 04.06.2018

---

<sup>1</sup>Gefördert durch IGF (Nr. 18785BG) und  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

# **Zusammenfassung**

**Juliane Jahnke**

## **Thema der Bachelorthesis**

Umformbarkeit eines Metallgewirks in thermoplastischer Matrix am Beispiel der Herstellung von Kabelhaltern

## **Stichworte**

Thermoplast, Umformung, Metallgewirk, Faserverbund, Leichtbau, Halter, Halbzeug, Schweißen

## **Kurzzusammenfassung**

In dieser Arbeit wird die Umformbarkeit eines Halbzeugs mit einer thermoplastischen Matrix und einer Verstärkung aus gewirkten Stahlfasern untersucht. Das Halbzeug wird zunächst unter Laborbedingungen erzeugt. Anschließend wird es erhitzt und mit Hilfe verschiedener Verfahren umgeformt. Das langfristige Ziel ist dabei die Herstellung von schweißbaren Leichtbau-Kabelhaltern im Hinblick auf die Massenfertigung. Die Erzeugung solcher Halterelemente ist realistisch.

## **Title of the paper**

Formability of a metallic knitted fabric embedded in a thermoplastic matrix through the example of the production of cable holders

## **Keywords**

Thermoplastic, forming, metal fabric, fiber composite, light weight, holder, semi-finished product, welding

## **Abstract**

The main case of this report is the forming of a semi-finished product with a thermoplastic matrix that is reinforced by knitted steel wires. The product is produced under laboratory conditions. Afterwards it is heated and formed in different processes. The long-term goal is the mass production of cable holders that are lightweight and can be weld. A production of such holders is realistic.

## Vorwort und Danksagung

Die Ausarbeitung dieser Thesis, insbesondere durch die aufwendigen Versuche, wurde nur durch die Hilfe und Unterstützung vieler möglich.

Insbesondere möchte ich Prof. Stöver und Herrn Remmers dafür danken, dass sie es mir ermöglicht haben, die Räumlichkeiten und Gerätschaften des Instituts für Umformtechnik an der HAW so intensiv zu nutzen, wie es nötig war. Die ausführlichen Gespräche und Diskussionen haben mir zudem sehr geholfen. Prof. Schäfer hat mich ebenfalls durch Material und Beratung unterstützt, wofür ich ihm meinen Dank aussprechen möchte.

Des Weiteren gilt mein Dank dem Center of Maritime Technologies e.V. (CMT), wo der Grundstein für diese Arbeit gelegt wurde. Die intensive Beschäftigung mit FAUSST und dem Thema Leichtbau hat erst die Idee zu meinem Thema aufgebracht. Besonders dankbar bin ich dabei Dr. Rafael-Luterbacher, der mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mich dazu gebracht hat, meine Arbeit immer wieder zu hinterfragen. Auch Dr. Lars Molter möchte ich für seine Unterstützung danken.

Gegenüber der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle GmbH möchte ich ebenfalls meinen Dank ausdrücken. Dort konnte ich auf das Wissen und die Technik zurückgreifen, die für die Schweißversuche im Zuge dieser Arbeit notwendig waren.

Abschließend danke ich meiner Familie dafür, dass sie mir den Rücken frei gehalten hat, wenn es brenzlich wurde und ich doch länger im Labor saß, als geplant. Ohne sie und die kritischen Fragen zum Inhalt meiner Arbeit, hätte ich mich nicht so intensiv mit der Thematik auseinandersetzen können.

**Inhaltsverzeichnis**

I. Abkürzungsverzeichnis ..... vi

II Glossar..... vii

III. Tabellenverzeichnis ..... viii

IV. Abbildungsverzeichnis ..... ix

V. Formel- und Symbolverzeichnis ..... xi

**1 Einleitung..... 1**

**1.1 Hintergrund ..... 1**

**1.2 Forschungsziel ..... 2**

**2 Stand der Technik..... 3**

    2.1 Kabelhalter ..... 3

    2.2 Kunststoffe: Thermoplaste..... 5

        2.2.1 Polypropylen ..... 6

        2.2.2 Polyamid..... 7

        2.2.3 Vergleich PP mit PA ..... 8

    2.3 Faserverbundkunststoffe ..... 9

    2.4 Formgebung von Faserverbundkunststoff ..... 10

        2.4.1 Urformen: Spritzgießen ..... 10

        2.4.2 Warmumformen: Stempelumformen ..... 12

        2.4.3 Vergleich Spritzgießen mit Warmumformen ..... 13

    2.5 Schweißtechnik ..... 13

**3 Lösungsansatz ..... 16**

**4 Das Halbzeug ..... 18**

    4.1 Bestandteile ..... 18

    4.2 Aufbau ..... 19

    4.3 Fügeverbindung..... 20

**5 Herstellung MeTHa..... 22**

    5.1 Materialauswahl..... 22

    5.2 Prozessauswahl ..... 23

    5.3 Laminieren..... 25

        5.3.1 Vorversuche ..... 25

        5.3.2 Laminieren der Halbzeuge ..... 35

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>6</b>	<b>Umformversuche .....</b>	<b>41</b>
6.1	Versuchsaufbau .....	41
6.1.1	Probenkörper .....	41
6.1.2	Werkzeuge.....	45
6.2	Durchführung .....	47
6.2.1	Umformung an der Presse .....	47
6.2.2	Händische Umformung .....	55
6.2.3	Zugversuch .....	59
<b>7</b>	<b>Auswertung .....</b>	<b>65</b>
7.1	Herstellung des Laminats .....	65
7.2	Bewertung der Proben .....	66
7.3	Verzug.....	69
7.4	Kristallstruktur.....	71
7.5	Verarbeitung .....	72
7.5.1	Trennen .....	72
7.5.2	Umformen .....	73
<b>8</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>76</b>
8.1	Zusammenführung der Erkenntnisse .....	76
8.2	Ausblick .....	78
<b>VI.</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>80</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>82</b>

### I. Abkürzungsverzeichnis

FVK	<i>Faserverbundkunststoff</i>
HZ	<i>Halbzeug</i>
KS	<i>Kunststoff(e)</i>
PA	<i>Polyamid</i>
PP	<i>Polypropylen</i>
SN	<i>Schweißnaht</i>
VV	<i>Vorversuch</i>
WZ	<i>Werkzeug</i>

### II. Glossar

- FAUSST - (Faserverbund und Stahl Standardverbindung) Forschungsprojekt der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF 18785BG) und des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, durchgeführt vom Center of Maritime Technologies e.V. und Partnerunternehmen, welches sich mit der Methodenentwicklung für die Erzeugung einer standardisierbaren Verbindung von Stahl- und Faserverbundelementen befasst. Die Verbindung besteht aus einer oder mehreren Lagen des FAUSST-Gewirkes, welches auf eine Stahlplatte, den sogenannten Verbinder geschweißt wird. FAUSST wird als Halbzeug betrachtet und kann auf der Bandseite mit Faserverbundbauteilen duroplastisch laminiert werden. Auf der Seite des Verbinders ist FAUSST schweißbar. [1]
- FAUSST-Band - Hybrides Gewirk mit einem metallischen und einem Glasfaseranteil, bestehend aus drei Zonen (rein Stahl, Mischgewirk aus Glasfaser und Stahlgarn, rein Glasfaser), welches zur Erzeugung von FAUSST notwendig ist
- MeTHa - (Metall Thermoplast Halbzeug) An FAUSST angelehntes Halbzeug mit thermoplastischer Matrix und Verstärkung aus Stahlgewirk, welches symmetrisch an Stahlbleche, angeschweißt ist.
- Gewirk - Industriell hergestellte Maschenware, bei dessen Erzeugung mehrere verschiedene Fadensysteme verwendet werden

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Eigenschaften PP und PA (6 und 66) im Vergleich mit jeweiligem Preis [9] [10] .....	8
Tabelle 2 Vergleich von Spritzgießen und Warmumformen .....	13
Tabelle 3 Eigenschaften des verwendeten PP-Granulats [20].....	22
Tabelle 4 Stückliste für Laminierform .....	24
Tabelle 5 Masse der verwendeten Gewichte .....	24
Tabelle 6 Vor- und Nachteile des gewählten Laminierprozesses .....	24
Tabelle 7 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Vorversuch 1 .....	27
Tabelle 8 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Vorversuch 2.....	30
Tabelle 9 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Vorversuch 3.....	33
Tabelle 10 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Vorversuch 4.....	35
Tabelle 11 Zusammenfassung der Parameter der Vorversuche .....	35
Tabelle 12 Parameter beim Laminieren der Halbzeuge .....	36
Tabelle 13 Kategorisierung der Fasereinbettung in die Matrix.....	43
Tabelle 14 Bewertung der Kristallstruktur der Matrix .....	43
Tabelle 15 Bewertung der Proben für Umformung in der Presse .....	44
Tabelle 16 Durchschnittliche Paneeldicke im Vergleich zu der berechneten .....	45
Tabelle 17 Parameter und Konfiguration der Proben bei Umformversuchen an Presse .....	49
Tabelle 18 Bewertungsmatrix für pressend umgeformte Proben.....	51
Tabelle 19 Beurteilung der umgeformten Proben.....	52
Tabelle 20 Markante Punkte der Kurvenverläufe im Spannungs-Dehnungsdiagramm .....	64
Tabelle 21 Bewertungsranking der Einflusskriterien in die Probenbewertung .....	66
Tabelle 22 Bewertung der umgeformten Proben anhand der Beurteilungskriterien.....	67
Tabelle 23 Vergleich der Kristallstruktur stark rissiger Proben vor und nach Umformen.....	71

IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Kabelbefestiger aus PA der Firma Förch GmbH [3]..... 3  
Abbildung 2 Kabelschelle TYP 1 von Adolf Würth GmbH & Co. KG [4]..... 4  
Abbildung 3 Kabelhänger [5]..... 4  
Abbildung 4 Kabelrinne gerade und gebogen [5] ..... 4  
Abbildung 5 Schematische Darstellung der Kunststoffklassen mit ihren Eigenschaften ..... 5  
Abbildung 6 Schematische Darstellung der Kristallstrukturen von Polymeren [7] ..... 6  
Abbildung 7 Grundstruktur von Polyamiden aus einem Ausgangsstoff [8]..... 7  
Abbildung 8 Grundstruktur von Polyamiden aus zwei Ausgangsstoffen [8] ..... 7  
Abbildung 9 Herstellung von Organo-Blech [11]..... 10  
Abbildung 10 Schematischer Verfahrensablauf beim Spritzgießen [12] ..... 11  
Abbildung 11 Prozessablauf beim Stempelumformverfahren [13] ..... 12  
Abbildung 12 Fertigungsverfahren mit Schwerpunkt auf Fügen durch Schweißen [15] ..... 14  
Abbildung 13 Schematischer Aufbau einer Widerstandsrollennahtschweißmaschine [18] ... 15  
Abbildung 14 Hierarchie der MeTHa-Bestandteile ..... 16  
Abbildung 15 Prinzipskizze zur Herstellung und Umformung von MeTHa ..... 16  
Abbildung 16 Skizze mit Koordinatensystem von MeTHa ..... 17  
Abbildung 17 Stahlgewirk mit Steh- und Maschenfäden ..... 18  
Abbildung 18 Einseitig durchgängig geschweißtes Halbzeug mit Bemaßung in mm ..... 19  
Abbildung 19 Schematischer Aufbau der Schweißung von Gewirk und Blech ..... 20  
Abbildung 20 Halbseitig geschweißte Elemente aus Blech und Gewirk ..... 20  
Abbildung 21 Punktschweißen von Gewirk mit Blech..... 21  
Abbildung 22 Widerstandsrollennahtschweißen von MeTHa..... 21  
Abbildung 23 Prinzipieller Aufbau der Schmelzform mit Granulat..... 23  
Abbildung 24 Prinzipieller Aufbau der Schmelzform mit Schmelze..... 23  
Abbildung 25 Trockenschrank MCP FD 240 ..... 25  
Abbildung 26 Aufbau Vorversuch 1 ..... 26  
Abbildung 27 Laminat aus Vorversuch 1..... 27  
Abbildung 28 Aufbau Vorversuch 2 mit Gewirk ohne Granulat..... 27  
Abbildung 29 Aufbau Vorversuch 2 mit Gewirk mit Granulat ..... 28  
Abbildung 30 Mit Gewichten beschwerter Vorversuchsaufbau 2 im Ofen..... 28  
Abbildung 31 Laminat ohne Gewirk aus Vorversuch 2..... 29  
Abbildung 32 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 2 (Draufsicht) ..... 29  
Abbildung 33 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 2 (Seitenansicht)..... 29  
Abbildung 34 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 2 (Bodenansicht) ..... 30  
Abbildung 35 Aufbau Vorversuch 3 mit Gewirk mit Granulat ..... 31  
Abbildung 36 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 3 (Draufsicht) ..... 32  
Abbildung 37 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch (Seitenansicht)..... 32  
Abbildung 38 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 3 (Bodenansicht) ..... 32  
Abbildung 39 Detailansicht Fasereinbettung bei Laminat aus Vorversuch 3 ..... 33  
Abbildung 40 Laminiertes Paneel aus Vorversuch 4 (Draufsicht) ..... 34  
Abbildung 41 Laminiertes Paneel aus Vorversuch 4 (Bodenansicht) ..... 34  
Abbildung 42 Detailansicht Fasereinbettung bei Paneel aus Vorversuch 4 ..... 34  
Abbildung 43 Alle laminierten Halbzeuge nebeneinander aufgereiht..... 35  
Abbildung 44 Paneel VV4 ..... 36  
Abbildung 45 Paneel V01.1..... 37  
Abbildung 46 Paneel V02.1..... 37  
Abbildung 47 Paneel V02.2..... 37  
Abbildung 48 Paneel V03.1..... 38

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 49	Panel V03.2.....	38
Abbildung 50	Panel V04.1.....	38
Abbildung 51	Panel V04.2.....	39
Abbildung 52	Panel V05.1.....	39
Abbildung 53	Panel V06.1.....	39
Abbildung 54	Panel V06.2.....	40
Abbildung 55	Panel V07.1.....	40
Abbildung 56	Exemplarisch mit Probennummern versehenes Panel V04.2 .....	41
Abbildung 57	Zersägen der Paneele zu Probenkörpern.....	42
Abbildung 58	Sieben Probenkörper nebeneinander aufgereiht .....	42
Abbildung 59	Werkzeug mit Stempel der Hydraulikpresse .....	45
Abbildung 60	Zwick Zugmaschine mit angeschlossenen Systemen.....	46
Abbildung 61	Zerbrochene Probe V05.1 I nach Umformung in der Presse .....	47
Abbildung 62	Bei Umformung zerbrochene Probe V04.2 IV in Draufsicht.....	47
Abbildung 63	Bei Umformung zerbrochene Probe V04.2 IV in Bodenansicht .....	48
Abbildung 64	Nach Umformung plastisch verformte und verzogene Probe V06.1 VII.....	48
Abbildung 65	Schematische Darstellung der Position der Proben in der Presse.....	50
Abbildung 66	Ergebnisse der verschiedenen Positionierungen in der Presse .....	50
Abbildung 67	Umgeformte Probe mit Weißbruch .....	53
Abbildung 68	Während der Umformung am Blech abgescherte Probe .....	53
Abbildung 69	Umgeformte Probe mit gerissenen Fäden .....	53
Abbildung 70	Umgeformte Probe mit Einschnürung des Kunststoff durch das Gewirk .....	54
Abbildung 71	Umgeformte Probe mit Weißbruch und Rissen.....	54
Abbildung 72	Umgeformte Probe mit Rissen sowie geringen Fließen des Kunststoff .....	54
Abbildung 73	Während der Umformung abgerissene Probe .....	55
Abbildung 74	Händische Umformung am Schraubstock .....	55
Abbildung 75	Spröde gebrochene Probe V05.1 VII nach händischer Verformung .....	56
Abbildung 76	Händisch umgeformte Probe V05.1 II in Nahaufnahme .....	56
Abbildung 77	Tordierte Probe V04.1 II.....	57
Abbildung 78	Tordierte Probe V05.1 VIII.....	57
Abbildung 79	In Spannbacken eingespannte Probe V03.1 VI während des Erhaltens .....	58
Abbildung 80	Umgeformte und erkaltete Probe V03.1 VI.....	58
Abbildung 81	In Zugmaschine eingespannte Probe a) ohne Blech und b) mit Blech .....	59
Abbildung 82	Zugprobe mit Blech während des Ziehens .....	60
Abbildung 83	Zugprobe ohne Blech im Verlauf des Zugversuchs .....	61
Abbildung 84	Ungelättete Kraft-Zeitkurve aus Zugversuch.....	62
Abbildung 85	Gelättete Kraft-Zeitkurve aus Zugversuch .....	62
Abbildung 86	Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus allen Zugversuchen.....	63
Abbildung 87	Unsauberes, entformtes Laminat.....	65
Abbildung 88	Bewertete Proben in Bezug zu Kristallstruktur und Fasereinbettung .....	68
Abbildung 89	Aufgereichte umgedrehte Proben .....	69
Abbildung 90	Umgeformte Probe erkaltet an Luft.....	70
Abbildung 91	Umgeformte Probe erkaltet im Werkzeug.....	70
Abbildung 92	Umgeformte Probe mit Gewirk oben .....	70
Abbildung 93	Beim Sägen problematischer Bereich .....	72
Abbildung 94	An Blechkante abgescherteter Umformbereich .....	73
Abbildung 95	Umgeformte Probe mit deutlich verschobenem Zugbereich .....	74
Abbildung 96	Prinzipskizze für gerade Kabelrinne aus MeTHa .....	76
Abbildung 97	Herstellung von MeTHa angelehnt an Organo-Blechproduktion .....	77
Abbildung 98	Flowchart: Schritte von MeTHa zur Produktionsreife .....	79

## V. Formel- und Symbolverzeichnis

### Formeln

(1) Berechnung der theoretischen Dicke des Laminats .....	26
(2) Berechnung des Drucks durch Gewichte .....	26
(3) Berechnung der Lastkraft der Gewichte.....	26
(4) Berechnung der Spannung im Zugversuch.....	63
(5) Berechnung des Probenquerschnitts .....	63
(6) Berechnung der Dehnung im Zugversuch .....	63
(7) Berechnung der Dehnung in Prozent.....	63

### Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Dimension</i>
$\alpha$	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/K]
$\varepsilon$	Dehnung	[%]
$\varepsilon_0$	Dehnung	[-]
$\rho$	Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\vartheta$	Temperatur	[°C]
$\vartheta_s$	Starttemperatur	[°C]
$\vartheta_T$	Zieltemperatur	[°C]
A	Fläche	[cm <sup>2</sup> ]
d	Dicke	[mm]
d <sub>r</sub>	Reale Dicke	[cm]
d <sub>t</sub>	Theoretische Dicke	[cm]
F	Kraft	[N]
F <sub>L</sub>	Lastkraft	[N]
F <sub>Z</sub>	Zugkraft	[N]
g	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
L	Länge	[mm]
$\Delta L$	Längenänderung	[mm]
L <sub>0</sub>	Ausgangslänge	[mm]
m	Masse	[kg]
m <sub>g</sub>	Granulatmasse	[g]
m <sub>w</sub>	Masse der Gewichte	[kg]
p	Druck	[mbar]
S <sub>0</sub>	Probenquerschnitt	[mm <sup>2</sup> ]
t	Zeit	[s]
t <sub>h</sub>	Heizzeit	[h]
t <sub>s</sub>	Haltezeit	[min]

## 1 Einleitung

Zu Beginn dieser Arbeit soll in diesem Kapitel ein kurzer Überblick über die Hintergründe zu der Forschungsarbeit gegeben werden.

### 1.1 Hintergrund

In der Industrie wird zunehmend auf Leichtbaumaterialien und -konstruktionen als Ersatz für reine Metallbauteile gesetzt. Dabei besteht immer der Anspruch, diese mit der gleichen Festigkeit bzw. Sicherheit zu konstruieren, wie es bei den traditionellen Fertigungsteilen aus rein metallischen Werkstoffen der Fall ist. Oft ist es allerdings schwer, Bauteile aus Faserverbundkunststoff (FVK) in eine Baugruppe zu integrieren, da eine stoffschlüssige Anbindung nicht realisierbar ist. Alternative Verfahren wie beispielsweise das Kleben werden aufgrund aufwendiger Zertifizierung und Prozessführung, sowie nicht ausreichendem Vertrauen der Technologie gegenüber, in vielen Industriefeldern, wie beispielsweise dem Schiffbau, abgelehnt.

Aus diesem Grund hat das Center of Maritime Technologies e.V. (CMT) das Forschungsprojekt FAUSST (Faserverbund und Stahl Standardverbinder, siehe Kapitel II) ins Leben gerufen, welches sich mit dieser Problematik beschäftigt. In dem Projekt wurde über eine hybride Verbindung, welche sowohl geschweißt als auch laminiert werden kann, die Möglichkeit entwickelt, Leichtbauelemente aus FVK in metallische Konstruktionen einzufügen. [1]

Da FAUSST derzeit nur für Kleinserien und Sonderbauteile mit einer duroplastischen Matrix getestet wurde, stellte sich im Zuge des Projektes die Frage, ob FAUSST durch eine thermoplastische Matrix auch für die Massenproduktion mit einer thermoplastischen Matrix geeignet sein könnte. Die Verbindung von Glasfasern und Thermoplast ist bereits Stand der Technik. Eine Verstärkung aus verwirkten Stahlfasern in einer thermoplastischen Matrix ist dagegen unüblich und soll daher im Hinblick auf die Massenfertigung getestet werden. Dafür wird ein Gewirk aus reinem Stahlband verwendet.

Als typisches Produkt aus der Massenfertigung können Kabelhalter angesehen werden. So wurden beispielsweise in dem größten Kreuzfahrtschiff, der „Oasis of the Seas“ über 5300km Kabelleitungen verbaut [2]. Bei dieser Länge an Kabelleitungen wird eine entsprechend große Menge an Befestigungen benötigt.

In jeder Industriebranche sind für solche Kabelhalter unterschiedliche Systeme im Einsatz. Dennoch haben alle Branchen eine Gemeinsamkeit: Die Befestigung der Halter soll möglichst automatisierbar, gut prüfbar und sicher sein. Diesem Anspruch wird eine Schweißnaht (SN) in jedem Falle gerecht. Die derzeit insbesondere in der Schifffahrt verwendeten Kabelhalter, die geschweißt werden können, entsprechen jedoch nicht dem immer umfassenderen Bestreben nach Leichtbau. Ein Kabelhalter, der sowohl schweißbar als auch leicht ist, könnte dieses Problem lösen.

Ein solcher Halter, mit thermoplastischer Matrix sowie einer Verstärkung aus einem metallischen Gewirk, würde zudem im Brandfall eine zusätzliche Sicherheit bieten. Das Metall hat einen höheren Schmelzpunkt als der Kunststoff und könnte die befestigten Elemente im Notfall auch ohne die Matrix sichern.

## 1.2 Forschungsziel

Vor dem beschriebenen Hintergrund stellt sich die Frage, wie ein Faserverbundhalbzeug aus einer thermoplastischen Matrix und einem Metallgewirk zu fertigen ist, damit daraus Kabelhalter gefertigt werden können. Dieses Halbzeug (HZ) wird MeTHa (Metall Thermoplast Halbzeug) genannt.

In dieser Thesis soll analysiert werden, welcher Thermoplast für einen derartigen Halter in Frage kommen könnte. Zudem wird erläutert, welches Umformverfahren am besten für den Prozess geeignet ist und unter welchen Parametern umgeformt werden muss, damit Matrix und Gewirk ihren Verbund nicht lösen.

## 2 Stand der Technik

Im Folgenden wird der derzeitige Stand der Technik zu allen, für das Verständnis dieser Thesis erforderlichen, Technologien dargestellt.

### 2.1 Kabelhalter

Zum Befestigen von Kabeln und anderen Leitungen, werden spezielle Elemente benötigt. Die Industrie hat hierfür verschiedene Befestigungen für jedes Anwendungsgebiet entwickelt, so genannte Kabelhalter. Sie werden häufig aus Polyamid (PA) (siehe Kapitel 2.2.2.) im Spritzgussverfahren (siehe Kapitel 2.4.1) hergestellt.

Die Form ist dabei häufig so gewählt, dass der Kabelhalter entweder in eine Bohrung eingeführt werden kann, wo er sich selbstständig verankert oder, sollten Bohrungen aus konstruktiven Gründen nicht möglich sein, die Kabelhalter auch verklebt werden können. Eine weitere Möglichkeit besteht aus einem schweißbaren Stahlhalter. Auch Schrauben können zur Befestigung von Halterelementen dienen. Diese Ausführung wird an dieser Stelle jedoch nicht näher erläutert.

Der in Abbildung 1 gezeigte, selbstklebende Kabelbefestiger der Firma Förch ist unter anderem für die Anwendung im Hochbau bestimmt. Er kann neben Kabeln auch Schläuche, Rohre etc. fixieren. Die Klebefläche haftet nach Angaben des Herstellers auf allen staub- und fettfreien Oberflächen und ermöglicht so die Befestigung der Halter auch an schwer zugänglichen Stellen oder Orten mit wenig Raum, da keine weiteren Hilfsmittel wie Schrauben oder Nieten erforderlich sind. [3]



Abbildung 1 Kabelbefestiger aus PA der Firma Förch GmbH [3]

Im Gegensatz dazu wird für die Installation der Kabelschellen Typ 1, welche selbst verklebend und demontierbar sind (siehe Abbildung 2), ein Bohrloch von 6,5-6,7mm Durchmesser benötigt. Der Kabelhalter wird zusammengedrückt und mit geschlossener Spreizung in die Bohrung eingeführt. Bei Freigabe des Halters spreizt er sich selbstständig auf und verklemt sich in der Bohrung. Konstruktionsbedingt ist dieser Halter jedoch nur an Blechen mit einer Stärke von 0,7-2mm sicher zu befestigen. Er kommt daher vorwiegend in der Automobilindustrie zum Einsatz. [4]



Abbildung 2 Kabelschelle TYP 1 von Adolf Würth GmbH & Co. KG [4]

Im Schiffbau werden üblicherweise einfachere Halter aus Stahl verwendet, die an die Anschlussgeometrie angeschweißt werden. Exemplarisch hierfür sind der Kabelhänger, sowie die Kabelrinne, die in gerader und gebogener Ausführung verwendet wird. (siehe Abbildung 3 & Abbildung 4). [5]

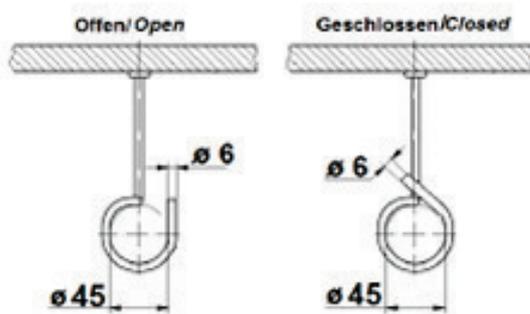


Abbildung 3 Kabelhänger [5]

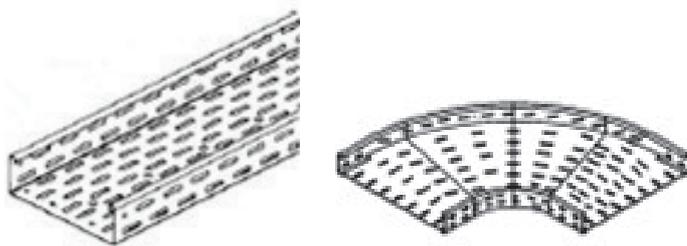


Abbildung 4 Kabelrinne gerade und gebogen [5]

## 2.2 Kunststoffe: Thermoplaste

Kunststoff (KS) ist ein „vollsynthetisch oder durch Umwandlung von Naturprodukten hergestellter Werkstoff, der in vielen verschiedenen Arten und für die verschiedensten Zwecke gebraucht wird“ [6]. Es findet sich in den verschiedensten alltäglichen Anwendungsgebieten wie z.B. (Plastik-)Tüten, Schüsseln, Bechern, Trinkflaschen, Gummibändern und Autoreifen.

Für jede dieser Anwendungen werden verschiedene KS verwendet: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Sie unterscheiden sich sowohl in ihrer Struktur, Herstellung und Verarbeitung, als auch in chemischen und mechanischen Eigenschaften stark voneinander, wie in der nachfolgenden Abbildung 5 deutlich wird:

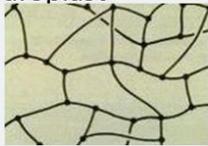
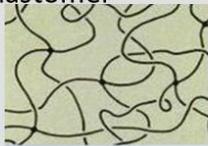
Kunststoffklasse	Eigenschaft	Erklärung
Thermoplast 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beim Erhitzen weich und formbar</li> <li>- Zersetzung erst deutlich später</li> <li>- Bei Einsatztemperatur hart und zäh</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Linear und verzweigt laufende Makromoleküle</li> <li>- Van-der-Waals- und Wasserstoffbrückenbindungen</li> </ul>
Duroplast 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beim Erhitzen formstabil bis zum Zersetzen</li> <li>- Bei Einsatztemperatur hart und spröde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gerade und engmaschig verbundene Molekülketten</li> <li>- Kovalente Bindungen zwischen den Ketten</li> </ul>
Elastomer 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beim Erhitzen formstabil bis zum zersetzen</li> <li>- Bei Einsatztemperatur weich und elastisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verknäulte und weitmaschig verbundene Molekülketten</li> <li>- Wenige, kovalente Bindungen zwischen den Ketten</li> </ul>

Abbildung 5 Schematische Darstellung der Kunststoffklassen mit ihren Eigenschaften

KS können mittels drei verschiedener Verfahren hergestellt werden: Polymerisation, Polyaddition und Polykondensation. Dank moderner Technik ist es möglich, die chemischen Reaktionen, die während der Herstellung ablaufen, gezielt zu steuern und so die Eigenschaften der KS kontrolliert einzustellen. Die genaue Einstellung ihrer technischen und chemischen Eigenschaften erfolgt im Anschluss über so genannte Additive. Dadurch können KS gezielt für jede Anwendung erzeugt werden.

Besonders häufig kommt die Klasse der Thermoplaste zum Einsatz. Dies liegt vor allem an ihrer chemischen Zusammensetzung (siehe Abbildung 5). Aufgrund der schwachen Vernetzung der Molekülketten über Sekundärbindungen (van-der-Waals und Wasserstoffbrückenbindungen) untereinander, sind Thermoplaste aufschmelzbar. Dies ist bei den anderen beiden Klassen nicht der Fall. Bei Energiezufuhr lösen sich die schwachen Verbindungen zwischen den Molekülketten auf und der Thermoplast wird weich und formbar. Bei Entzug von äußerer Energie bilden sich erneut Sekundärbindungen zwischen den Ketten aus und der Thermoplast erhärtet. Ist die Energiezufuhr jedoch zu hoch, werden auch die Molekülketten aufgebrochen und der Thermoplast zerfällt. Eine weitere Möglichkeit, um den Thermoplast wieder formbar zu machen, ist die Lösung in Bädern, die die Ketten trennen. Duroplaste und Elastomere sind nach ihrer Aushärtung nicht wieder schmelz- und formbar.

Beim Abkühlen des Thermoplasts bildet sich eine bestimmte Molekularstruktur aus. Diese ist von mehreren Faktoren wie z.B. der Abkühlgeschwindigkeit und dem Druck, sowie Additiven abhängig.

Die Struktur kann als amorph oder kristallin ausgebildet werden (siehe Abbildung 6). Auch eine Mischform, teilkristallin, ist möglich. Bei der amorphen Struktur liegen die Molekülketten ungeordnet in der erstarrenden Schmelze. Vollständig erkaltet sind Werkstücke aus einem amorphen Thermoplast eher durchsichtig, da die ungleichmäßige Anordnung keine dichte Packung der Ketten zulässt und somit lichtdurchlässig wird. Kristalline Thermoplaste haben gleichmäßig dicht geordnete Molekülketten. Sie sind lichtundurchlässig und dadurch undurchsichtig.

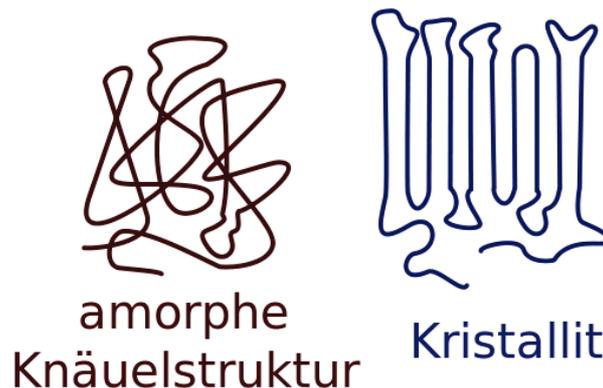


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Kristallstrukturen von Polymeren [7]

Thermoplaste können für technische Zwecke in vier verschiedene Werkstoffkategorien unterteilt werden, wobei sich diese Gruppen, aufgrund der fortschreitenden Entwicklung im Bereich der Kunststofftechnik, durchaus auch überschneiden. Zu unterscheiden gilt es die Standardkunststoffe, technische Thermoplaste, Hochleistungskunststoffe und die Spezialkunststoffe. [8]

Mit über 20% Anteil am weltweiten Markt ist Polypropylen (PP) der am zweit häufigsten verwendete Standardkunststoff nach Polyethylen. Deutlich weniger häufig, da hauptsächlich in spezielleren Anwendungen benötigt, werden beispielsweise Hochleistungskunststoffe verwendet. Beispielhaft kann hier PA mit 1,1% Anteil am weltweiten Markt 2014 genannt werden. Hochleistungskunststoffe haben aufgrund ihrer spezialisierten Eigenschaften dennoch eine sehr große Bedeutung für die Kunststoffindustrie. [8]

### 2.2.1 Polypropylen

PP wird durch Polymerisation von Propen gewonnen und zählt aufgrund seines einfachen Aufbaus und zahlreicher Anwendungsgebiete zu den Standardkunststoffen. [8]

PP hat gute elektrische Isoliereigenschaften und eine gute chemische Beständigkeit gegenüber vielen Säuren, Basen, Ölen und Fetten. Allerdings reagiert PP empfindlich auf starke Säuren und Oxidationsmitteln. Zudem ist PP in seiner Reinform nicht witterungsbeständig und brennbar. Diese Eigenschaften lassen sich durch Additive jedoch verbessern. [8]

Da PP eine hohe Dehnbarkeit sowie eine relativ hohe dynamische Belastbarkeit vorweist, ist es gut für die Herstellung von Filmscharnieren geeignet. Aber auch Fasern und Folien sowie weitere Verpackungsmaterialien sind typische Anwendungsgebiete von PP. [8]

Die wichtigsten Eigenschaften von PP sind in Tabelle 1 (siehe Kapitel 2.2.3) aufgeführt.

### 2.2.2 Polyamid

Die Herstellung von PA erfolgt in der Regel über Polykondensation von Aminocarbonsäuren, Lactamen und/oder Diaminen und Dicarbonsäuren. Aufgrund seiner hohen mechanischen Werte zählt es zu den technischen Thermoplasten. [8]

PA wird häufig in Form von Fasern, zum Beispiel für die Textilindustrie, verwendet. Aber auch für andere Industrien ist PA aufgrund seiner hohen Festigkeit und Steifigkeit sowie guter Abrieb- und Verschleißfestigkeit sehr gefragt. Um die Festigkeit und den E-Modul weiter zu erhöhen und außerdem die Dauergebrauchstemperatur von PA zu steigern, wird es häufig mit Glasfasern verstärkt. Da es verschiedene Arten PA gibt, werden diese nach ihrer Struktur bzw. Kettenlänge und Ausgangsstoffen unterschieden und sind mit einer Kennziffer versehen z.B. PA6, PA12 oder PA66. Als Grundsatz gilt: Je höher die Nummer, desto länger bzw. verzweigter sind die Ketten (siehe Abbildung 7 & Abbildung 8).[8]

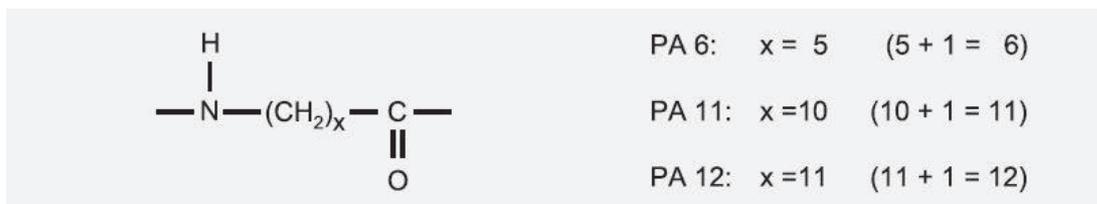


Abbildung 7 Grundstruktur von Polyamiden aus einem Ausgangsstoff [8]

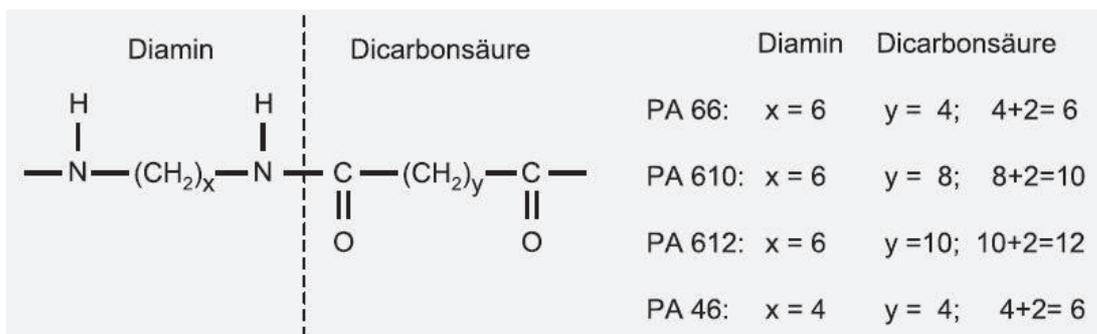


Abbildung 8 Grundstruktur von Polyamiden aus zwei Ausgangsstoffen [8]

PA ist hydrophil, das heißt es nimmt Wasser auf. Dies kann eine Volumenzunahme von über 1% zur Folge haben. Aufgrund von Gasbildung durch verdampfendes Wasser bei Einbringung von Wärme, ist es notwendig, PA vor der Verarbeitung zu trocknen. Trocken PA verhält sich allerdings hart und spröde, weshalb die Bauteile im Anschluss an ihre Fertigung in einem Wasserbad konditioniert werden müssen, um optimale Schlagzähigkeit und Verschleißfestigkeit zu erreichen. Der Feuchtigkeitsgehalt liegt dann zwischen ca. 3 und 4%. [8]

Die Eigenschaften von konditioniertem PA6 und PA66 werden exemplarisch im nachfolgenden Kapitel in Tabelle 1 aufgelistet.

### 2.2.3 Vergleich PP mit PA

In der Industrie wird PA aufgrund des relativ hohen Preises häufig durch PP substituiert. [8]

In der folgenden Tabelle 1 werden die Eigenschaften von PP mit denen zweier PA verglichen. Die Werte in den Klammern beziehen sich auf den jeweiligen Durchschnittswert.

Tabelle 1 Eigenschaften PP und PA (6 und 66) im Vergleich mit jeweiligem Preis [9] [10]

Eigenschaften	PP	PA 6	PA 66
Struktur	teilkristallin	teilkristallin	teilkristallin
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0.9 – 1.24 (0.94)	1 – 1.17 (1.12)	1.03 – 1.16 (1.12)
Steifigkeit (Zug-E-Modul) [GPa]	0.5 – 7.6 (1.9)	0.3 – 4 (1.9)	0.7 – 3.3 (2.1)
Bruchdehnung [%]	3 – 887 (120)	7 – 460 (94)	5 – 300 (83)
Zugfestigkeit [MPa]	20 – 80 (36)	48 – 100 (73)	40 – 86 (73)
Bruchzähigkeit [kJ/m <sup>2</sup> ]	ohne Bruch	ohne Bruch	ohne Bruch
Glasübergangstemperatur [°C]	-18	50 - 60	50 - 60
Schmelztemperatur [°C]	160	220	260
Max. Einsatztemperatur [°C]	44 – 148 (85)	40 – 230 (100)	40 – 86 (73)
Lin. Wärmeausdehnungskoeff. [K <sup>-1</sup> ]	150 · 10 <sup>-6</sup>	70 · 10 <sup>-6</sup>	70 · 10 <sup>-6</sup>
Chemische Beständigkeit	gut	gut	gut
Brandverhalten	entflammbar bei 345 °C	ohne Zusatzstoffe entflammbar	ohne Zusatzstoffe entflammbar
Preis Ø [€/kg]	0,80-0,90	1,70-1,85	2,00-3,00

Deutlich zu erkennen ist die gegenüber PA deutlich höhere Bruchdehnung von PP sowie vergleichbare Werte bei der Steifigkeit bei geringerer Dichte. Die geringere Dichte und somit geringere Masse bei gleichem Volumen macht PP, neben dem Kostenfaktor, ebenfalls attraktiv. Auch die Maßhaltigkeit von PP ist bei gleicher Bauweise ähnlich hoch wie bei PA, da die Schwindung sich in einer ähnlichen Größenordnung bewegt. Mit Additiven modifiziertes PP kann noch näher an PA angeglichen werden.

## 2.3 Faserverbundkunststoffe

Für manche Anwendungen, insbesondere im Leichtbau, ist es erforderlich, schwere und große Strukturen durch kleiner dimensionierte und leichtere zu ersetzen. Diese sollen dennoch eine ähnlich hohe Festigkeit bzw. Steifigkeit aufweisen. An dieser Stelle kommen häufig so genannte Faserverbundstoffe zum Einsatz.

Als Faserverbund- bzw. Kompositwerkstoffe gelten zunächst alle Hybridstrukturen, die durch die Einbringung von Zusatzelementen, wie beispielsweise Fasern, in ihren Eigenschaften verändert werden. In der Regel soll die Einbringung von Fasern die Steifigkeit sowie die Festigkeit bei geringerem Gewicht erhöhen. KS, die mit Fasern verstärkt werden, heißen Faserverbundkunststoff (FVK), faserverstärkter KS oder Faser-Kunststoffverbund. Die eingesetzten verstärkenden Fasern sind beispielsweise Glas-, Kohlenstoff-, Stahl- oder KS-Fasern.

Bei FVK wird der Kunststoff als Matrix bezeichnet. Sie schützt einerseits die Fasern, gibt andererseits aber auch die Form des Bauteils und, durch ihre mechanischen Eigenschaften, die Einsatzgebiete des FVK vor. Zudem fixieren sie die Fasern in ihrer Lage. Sie kann sowohl aus einem duroplastischen Harz bestehen, welches nach der Aushärtung nicht weiter verformt werden kann, als auch aus einem Thermoplast.

Duroplastische Matrizen werden im flüssigen Zustand aufgetragen. Für gewöhnlich wird dafür die Faser mit einem Gemisch aus Harz und Härter getränkt, welches unter Druck und Temperatur aushärtet. Für thermoplastische Matrizen wird der verwendete KS aufgeschmolzen. Die Fasern werden unter Druck mit der Schmelze getränkt und verbunden. Im Anschluss kühlt der Thermoplast ab und bildet eine starre Matrix. Sowohl bei duroplastischen- als auch bei thermoplastischen Matrizen ist es üblich sogenannte Prepregs bzw. Tapes herzustellen. Dies sind Halbzeuge aus getränkten Fasern, die auf Formen gelegt werden und erst dann aushärten. Dadurch ist es möglich auch große Flächen, wie beispielsweise Tragflächen eines Flugzeugs, aus FVK herzustellen. Duroplastische Prepregs werden schichtweise aufgetragen und dann im Autoklaven ausgehärtet. Thermoplastische Tapes werden erwärmt und anschließend umgeformt (siehe Kapitel 2.4.).

Die Anordnung der Faser in FVK ist entscheidend für die spätere Belastbarkeit des Endprodukts. Ungeordnet eingebrachte Fasern verstärken das Werkstück in alle Richtungen gleichmäßig. Ihre Wirkung ist jedoch nicht so groß, wie die von unidirektional (in eine Richtung) eingebrachten Fasern. Gleichmäßig aufgebracht werden können die Fasern z.B. in Form von Matten, Gewirke, Gestricke oder Gelege aus Fasern. Sie erhöhen die Belastbarkeit des KS gezielt in eine Richtung.

Ein Beispiel für einen FVK ist das sogenannte Organo-Blech (siehe Abbildung 9). Es besteht aus einem Gewirk, das mit einer thermoplastischen Schmelze umspritzt und anschließend noch warm porenfrei verpresst wird. Das entstehende HZ wird als Plattenmaterial (Blech) verwendet und kann in Warmumformverfahren (siehe Kapitel 2.4.2) weiterverarbeitet werden. Organo-Bleche werden vor allem im Fahrzeugbau angewendet. Ihr Vorteil besteht insbesondere in den verkürzten Zykluszeiten gegenüber Bauteilen aus FVK mit duroplastischer Matrix sowie der hohen Gewichtsersparnis bei vergleichbaren Bauteilen aus Stahl mit gleicher mechanischer Belastbarkeit. [11]

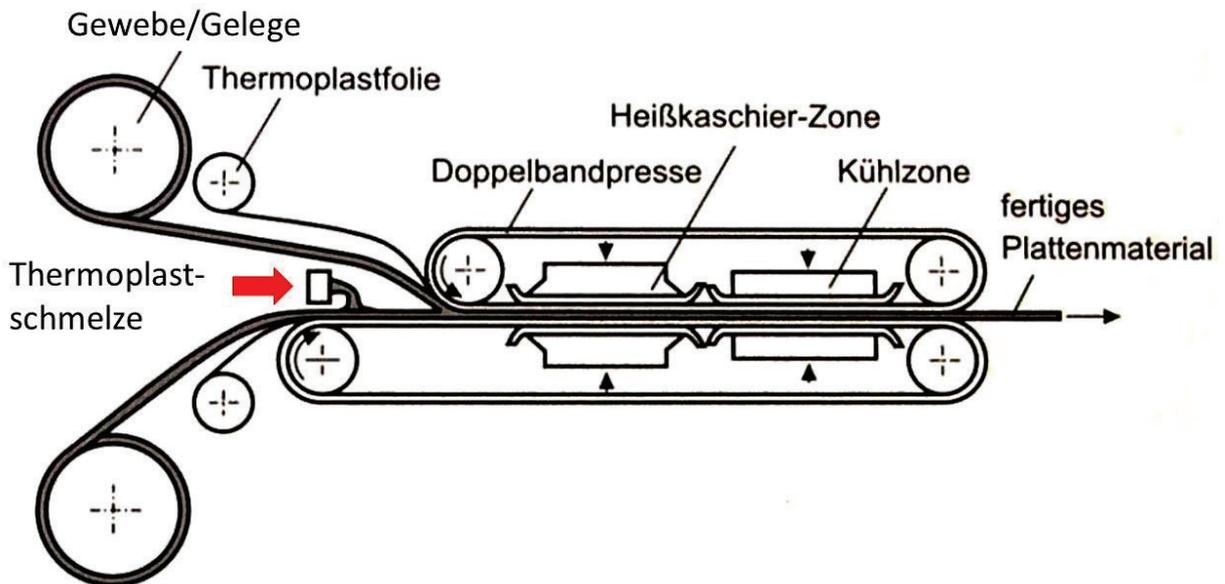


Abbildung 9 Herstellung von Organo-Blech [11]

## 2.4 Formgebung von Faserverbundkunststoff

Wie alle Werkstoffe müssen auch KS und FVK durch spezielle Verfahren in eine Form gebracht werden, die es möglich macht, sie später an verschiedener Stelle einzusetzen. Bei der Formgebung ist zwischen zwei Technologien zu unterscheiden: Dem Urformen und den Umformen [8].

Zum Urformen sind alle Verfahren zu zählen, bei denen die Form des Endprodukts direkt in den KS eingepreßt wird. Hierzu zählen beispielsweise das Spritzgießen, Extrudieren oder Blasformen. Diese Verfahren werden für hohe Stückzahlen bevorzugt, da die Herstellung der passenden Werkzeuge (WZ) aufwendig und teuer ist.

Das Umformen bezieht alle Verfahren ein, bei denen aus Platten in einem zweiten Verarbeitungsschritt Formteile hergestellt werden. Hierzu zählt beispielsweise das Thermoformen bzw. Warmumformen. Umformen wird in der Regel bei einfachen und großflächigen Geometrien und geringen Stückzahlen eingesetzt und kann nur bei Bauteilen aus thermoplastischem Werkstoff verwendet werden.

Der Standardprozess zur Herstellung von Kabelhaltern in der Industrie ist das Spritzgießen. Flächigere Bauteile werden aus so genannten Tapes unter anderem durch das Stempelumformen in Form gebracht.

### 2.4.1 Urformen: Spritzgießen

Spritzgießen ist ein vollständig automatisierbares urformendes Fertigungsverfahren. Bei Produkten, die spritzgegossen werden, ist keine Nachbearbeitung notwendig. Das Verfahren ermöglicht zudem die Kombination mehrerer Komponenten durch z.B. Umspritzen dieser oder das Einspritzen verschiedener KS. Die Formen können zudem so gestaltet werden, dass in einem Schritt mehrere Bauteile gleichzeitig ausgeformt werden. Das Verfahren ist daher sehr gut für kleine Massenbauteile, wie z.B. Kabelhalter, geeignet.

Verwendet wird für das Spritzgießen in der Regel thermoplastisches Granulat oder Pulver. Dieses kann auch Fasern enthalten, die das Bauteil später unidirektional verstärken. In besonderen Fällen ist das Spritzgießen auch für Duroplaste und Elastomere möglich, der Aufbau der Maschine gestaltet sich dann jedoch aufwendiger, als bei der Verarbeitung von Thermoplasten.

Das Verfahren läuft grundlegend wie in Abbildung 10 dargestellt ab.

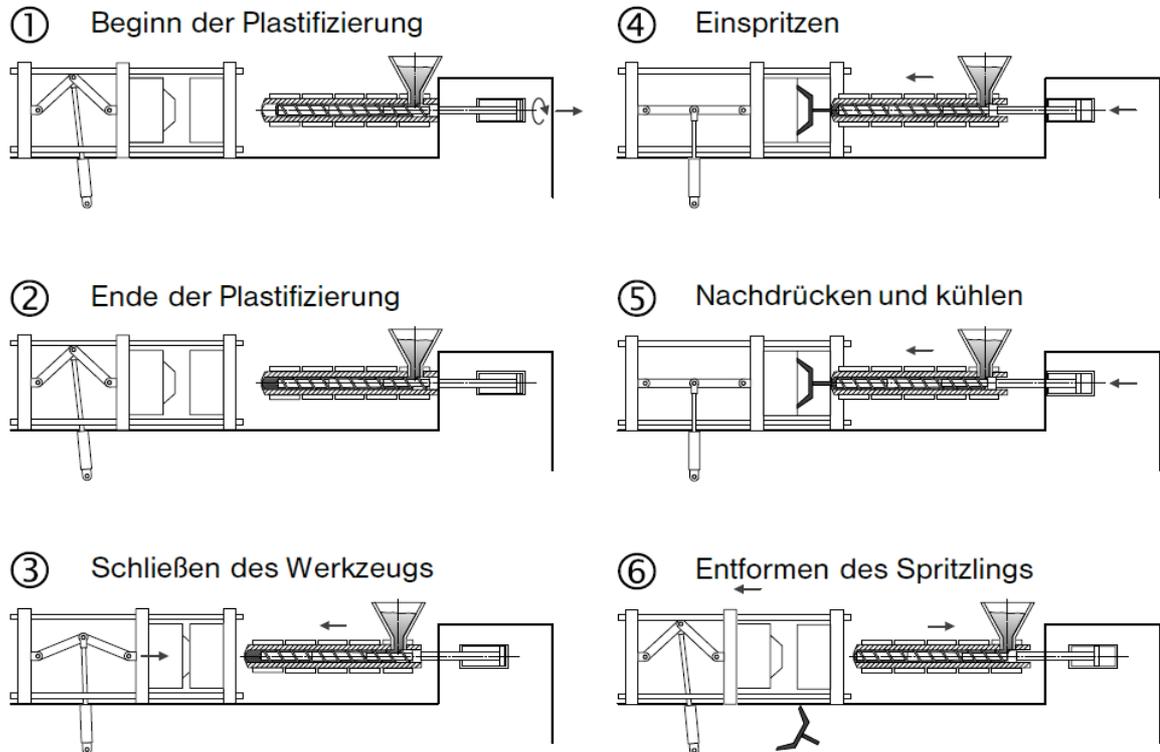


Abbildung 10 Schematischer Verfahrensablauf beim Spritzgießen [12]

Zunächst wird Granulat in die Schnecke eingezogen und aufgeschmolzen (plastifiziert) ①. Beim Plastifizieren wird die Schmelze von der Schnecke in die Spitze des Aggregats gefördert. Ist ausreichend Schmelze in der Spitze gesammelt, hört die Schnecke auf sich zu drehen ②. Anschließend wird das Werkzeug geschlossen ③. Die Schließung kann hydraulisch oder über einen Kniehebel, wie in dem in Abbildung 10 gezeigten Prozess verwendet wird, erfolgen. Sie muss jedoch ausreichend Druck aufbauen können, um das WZ während der folgenden Schritte geschlossen zu halten. Ist das WZ geschlossen, wird das Aggregat an das WZ herangefahren. Die Schnecke fährt anschließend ohne Rotation vor und spritzt so die Schmelze in das WZ ④. Da beim Abkühlen der Schmelze Schwindung im Bauteil auftritt, wird in Schritt ⑤ Schmelze nachgedrückt, die die entstehenden Hohlräume auffüllt. Ist das Werkstück (Spritzling) ausreichend abgekühlt, sodass keine Verformung mehr auftritt, wird es entformt und ein neuer Spritzgießzyklus eingeleitet ⑥.

Das fertige Bauteil kann nun entweder verpackt und weiter transportiert oder eingelagert werden, bis es weiterverwendet wird.

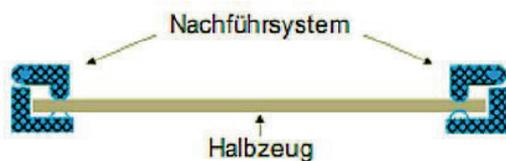
### 2.4.2 Warmumformen: Stempelumformen

Zum Warmumformen zählen alle Verfahren, bei denen ein zuvor präpariertes Stück Thermoplast oder thermoplastischer FVK erweicht und anschließend unter Druck umgeformt wird.

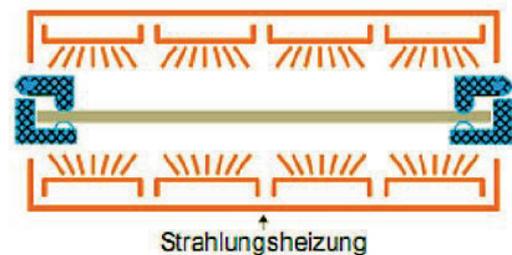
Etablierte Verfahren sind beispielsweise das Biegen oder das Stempelumformen. Des Weiteren kommen das Vakuum-, Autoklav- und das Non-Isothermal Diaphragm Forming-Verfahren zum Einsatz, wobei das Stempelumformen zu den wichtigsten der Verfahren zählt. [13]

Wie in Abbildung 11 ersichtlich, wird beim Stempelumformverfahren im ersten Schritt ein Halbzeug in einen Rahmen eingespannt und beidseitig bis zum Erreichen der Schmelztemperatur aufgeheizt. Anschließend wird es weiter zur Presse transportiert, dort durch einen Stempel in eine Patrize gepresst und kühlt in dieser bis zur Erstarrungstemperatur aus. Zuletzt wird das Formteil entnommen und kann, vollständig abgekühlt, weiterverarbeitet werden. [13]

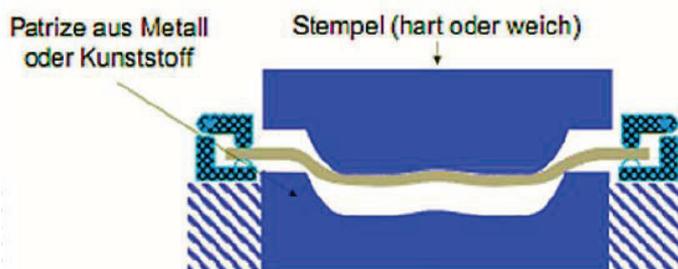
#### 1. Einlegen



#### 2. Aufheizen



#### 3. Umformen/Abkühlen



#### 4. Entnehmen

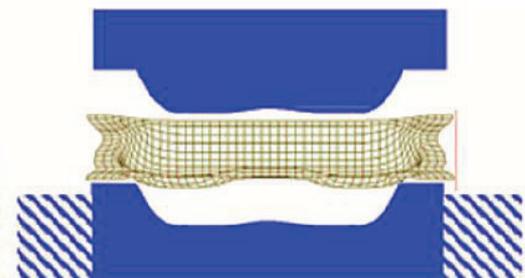


Abbildung 11 Prozessablauf beim Stempelumformverfahren [13]

Durch die Trennung von Heizung und Umformen sowie die Verwendung von thermoplastischen Prepregs, ist das Verfahren vollständig automatisierbar. Es sind kurze Zykluszeiten realisierbar und die Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten wie z.B. PA möglich. [13]

### 2.4.3 Vergleich Spritzgießen mit Warmumformen

Beide Verfahren haben im Vergleich zueinander Vor- und Nachteile. In der folgenden Tabelle 2 sind einige schematisch aufgelistet:

Tabelle 2 Vergleich von Spritzgießen und Warmumformen

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Spritzgießen	Gut automatisierbar	Verzug und Lunkerbildung bei großen Bauteilen
	keine Nachbearbeitung notwendig	teure WZ
	Kombination verschiedener Werkstoffe möglich	nur kleine Bauteile
Warmumformen	Große Bauteile formbar	keine Hinterschnitte
	Günstig	nur Thermoplaste verwendbar
	eine Halbzeugart kann für mehrere Anwendungen verwendet werden	erneuter Arbeitsaufwand notwendig

## 2.5 Schweißtechnik

Für die Verbindung von Stahlelementen wird seit vielen Jahrzehnten geschweißt. Seit der Entdeckung des Stroms konnten die ursprünglichen Techniken immer weiter verfeinert und neue Technologien bzw. Methoden entwickelt werden. Auch zum Verfügen von KS-Elementen miteinander wird heute Schweißtechnik angewandt. Das Verfügen von KS-Elementen mit Stahlkomponenten ist ebenfalls möglich, erfordert jedoch sehr genaue und feine Methoden wie z.B. Laser und Ultraschall. Diese Verfahren sind üblicherweise nicht überall und ohne weiteres einsetzbar, so wie es beispielsweise Lichtbogenschweißmaschinen sind. Zudem ist die Schweißnahtvorbereitung in der Regel für eine solche Verbindung sehr aufwendig, da schon kleinste Fehler in der Naht zu einem Versagen derselben führen können.

Schweißen gehört nach DIN 8593-0 zu den Fügverfahren und wird in der Norm DIN 8593-6 in die Verfahren Pressschweißen und Schmelzschweißen sowie die jeweiligen Unterkategorien aufgeteilt. Die Einteilung nach Norm ist in Abbildung 12 dargestellt. [14], [15]

Für das Verfügen von dünnen Blechen eignen sich besonders die Pressschweißverfahren. Hier ist der Wärmeeintrag und die damit verbundenen negativen Folgen für das Material, wie beispielsweise Verzug oder übermäßiges Aufschmelzen, geringer als bei den Schmelzschweißverfahren

Im Zuge von Forschungsarbeiten an FAUSST (siehe Kapitel II) wurde herausgefunden, dass Stahlgewirk und Blech mit Pressschweißverfahren durch elektrischen Strom (DIN EN 14610) gefügt werden können. Zum Einsatz kommen dabei das Widerstandspunktschweißen sowie das Widerstandsrollennahtschweißverfahren (kurz: Rollennahtschweißen). [16]

Das Punktschweißen wird zum Verschweißen von Blechen eingesetzt. Die Verbindung erfolgt über das Zusammendrücken der zu verschweißenden Elemente durch zwei Elektroden, durch die anschließend Strom fließt. Durch den Stromfluss wird der Bereich zwischen den Fügelementen örtlich begrenzt aufgeschmolzen. Der Druck sorgt in Kombination damit für eine stoffschlüssige, unlösbare Verbindung nach dem Erkalten.

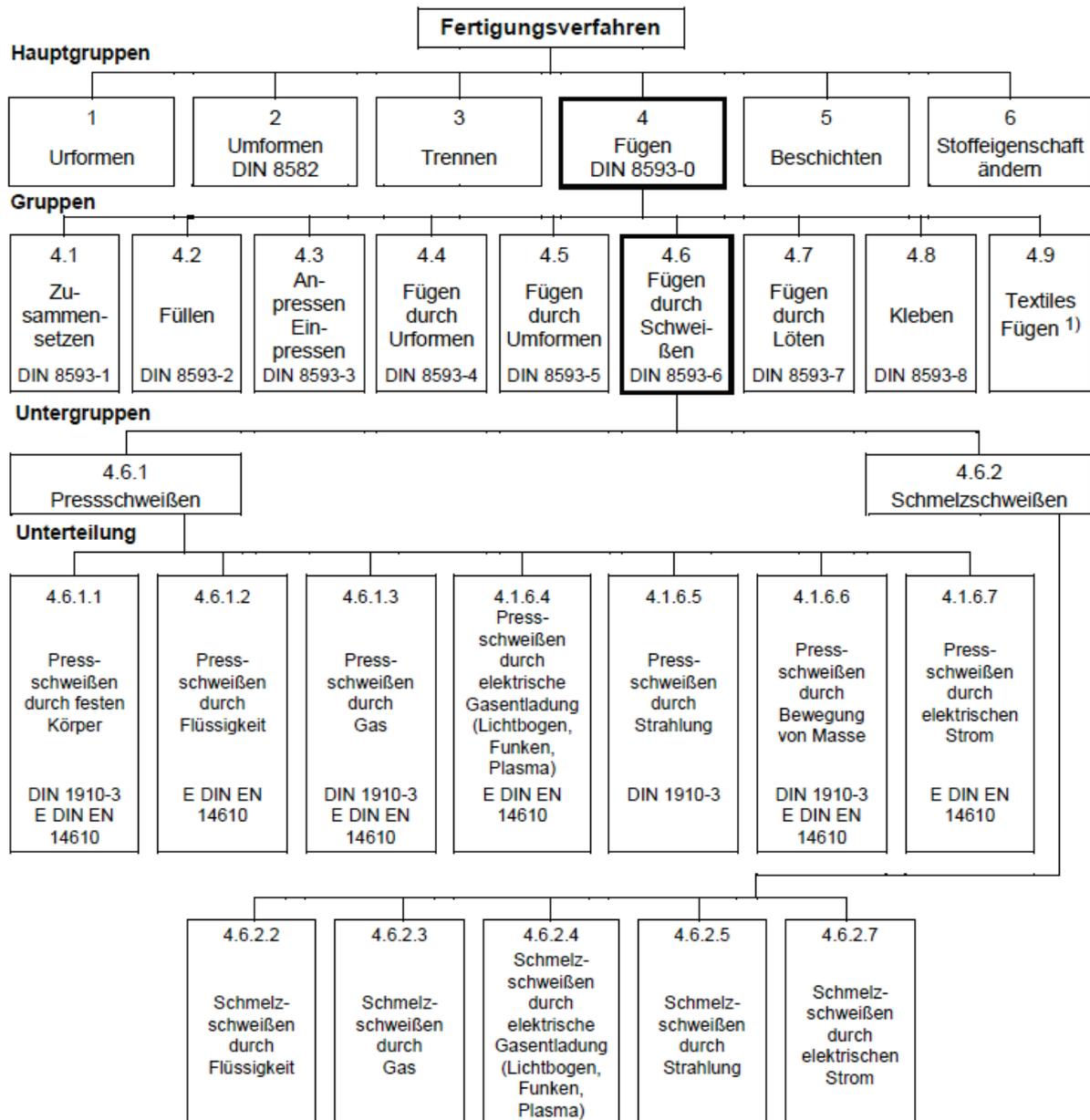


Abbildung 12 Fertigungsverfahren mit Schwerpunkt auf Fügen durch Schweißen [15]

Das Rollennahtschweißen ist eine Variation des Punktschweißens. Es ist unter anderem in der Norm DIN EN ISO 16433 beschrieben. Die Norm „(...) legt die Anforderungen für das Widerstandsrollennahtschweißen bei der Fertigung von Baugruppen aus zwei niedriglegierten Stahlblechen mit oder ohne metallischem Überzug fest, wobei die Einzeldicke der zu verschweißenden Teile im Bereich von 0,4 mm bis 3 mm liegt (...)“ [17]. Zudem regelt die Norm den Werkstoff und die Oberflächenveredelung der verwendbaren Bleche.

Beim Rollennahtschweißen werden die zu verfügbaren Bleche zwischen zwei rollenförmigen, sich drehenden Kupferelektroden zusammengepresst. Durch die Rollen fließt impulsartig Strom, welcher in die Bleche geleitet wird und dort für eine örtliche Aufschmelzung sorgt. Je mehr Impulse gesetzt werden bzw. je länger sie andauern, desto heißer wird die Fügestelle und desto dichter bzw. tiefer die Naht. (siehe Abbildung 13)

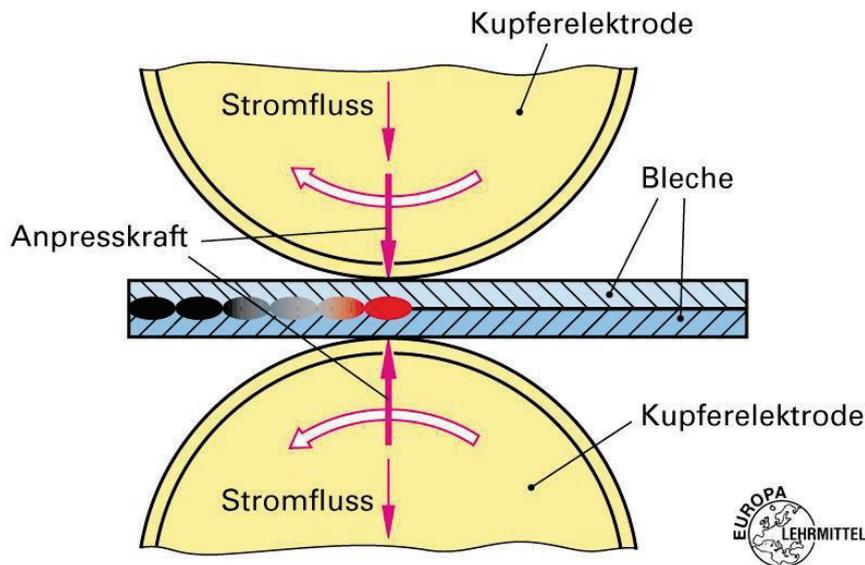


Abbildung 13 Schematischer Aufbau einer Widerstandsrollennahtschweißmaschine [18]

Bei FAUSST werden 5mm dicke Stahlbleche mit dem ca. 1mm dicken Stahlteil des Hybridgewirks gefügt. Das ist möglich, da die Gesamtdicke der zu verfügbaren Teile nicht mehr als die von der DIN zugelassenen 6mm (3mm + 3mm Blech jeweils) beträgt. Aluminiumbleche, wie sie im Leichtbau z.B. bei PKW und Flugzeugen eingesetzt werden, können derzeit mit dem FAUSST-Band noch nicht zuverlässig gefügt werden. Versuche dazu haben aber gezeigt, dass eine Verbindung möglich ist. Die Art, Festigkeit und Tiefe dieser Naht soll in zukünftigen Projekten erforscht werden.

### 3 Lösungsansatz

Das Ziel dieser Thesis ist es, zu prüfen, ob ein Halbzeug aus Stahlgewirk und Thermoplast (MeTHa) umformbar wäre, beispielsweise um einen Kabelhalter zu erzeugen.

Zum besseren Verständnis und zum Klären der Begrifflichkeiten in den nachfolgenden Kapiteln, ist der Aufbau von MeTHa in Abbildung 14 schematisch aufgeschlüsselt:

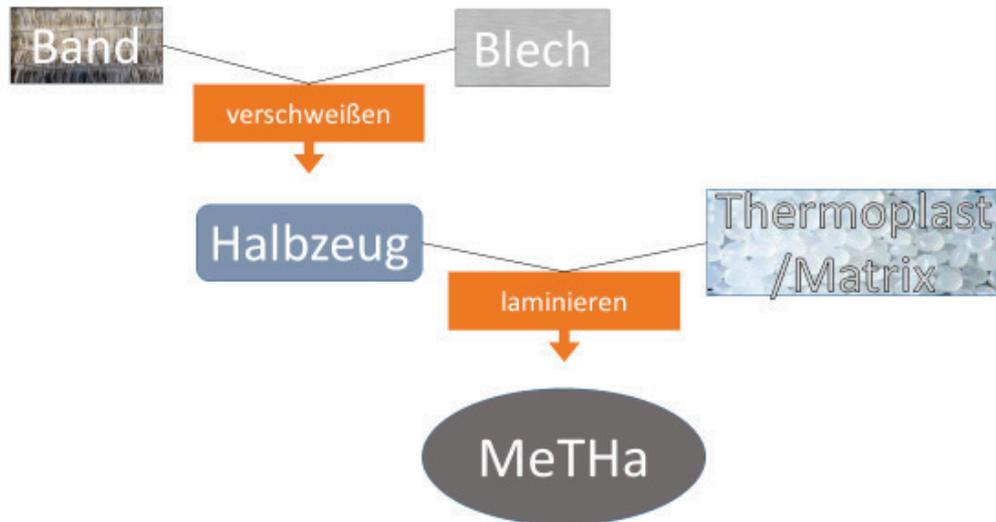


Abbildung 14 Hierarchie der MeTHa-Bestandteile

Die prinzipiellen Arbeitsschritte (Schweißen, Laminieren/Infundieren, Umformen) erfolgen wie in Abbildung 15 dargestellt.

Im 1. Schritt wird das in der Abbildung oben gezeigte Stahlgewirk an zwei Bleche angeschweißt. Der 2. Schritt ist dann die Verbindung vom Halbzeug mit einem Thermoplast. Wenn dieser ausgehärtet ist, kann das Halbzeug wieder erwärmt und umgeformt werden (3.).

Die genauen Prozesse sowie der Aufbau von HZ und MeTHa werden in den nachfolgenden Kapiteln 4 bis 6 erläutert.

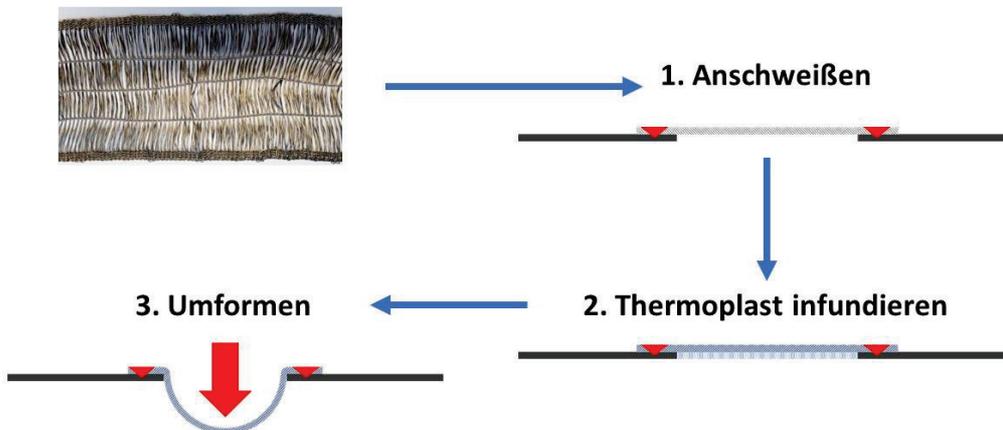


Abbildung 15 Prinzipskizze zur Herstellung und Umformung von MeTHa

Da in der Praxis nicht immer die gleichen Werkzeuge beim Umformen zum Einsatz kommen, soll die Umformbarkeit von MeTHa in zwei verschiedenen Aufbauten überprüft werden. Zum einen soll eine reine Biegung um die Y-Achse der Probestreifen auf einer Kantbank erzeugt werden. Zum anderen sollen Probestreifen in eine Tiefziehpresse eingelegt und mit einem Napfstempel in Z-Achse verformt werden. Durch die kombinierte Betrachtung der Versuche soll es möglich sein eine Empfehlung für die Art der möglichen Umformung abzugeben. Das Koordinatensystem wird wie in Abbildung 16 dargestellt verwendet.



Abbildung 16 Skizze mit Koordinatensystem von MeTHa

## 4 Das Halbzeug

Das Halbzeug für MeTHa wird aus dem gewirkten Stahlband sowie Stahlbelchen hergestellt. Hierfür wird das Band mittels Widerstandsrollreißschweißen (siehe Kapitel 2.5) an das Blech gefügt.

Genaue Informationen über den Fügeprozess sind der Masterthesis „Entwicklung eines laserbasierten Fügverfahrens zum Schweißen von Stahl- GFK-Hybridgewebe an Stahl“ von Robert Müller zu entnehmen. [16]

### 4.1 Bestandteile

Die Bestandteile des Halbzeugs sind jeweils ein Stahlgewirkabschnitt und zwei Bleche.

Das Stahlgewirk (siehe Abbildung 17) besteht aus einem festeren, engmaschigen Teil auf jeder Seite, der an ein Blech angeschweißt werden kann, sowie einem grob gehaltenen Mittelteil. Dieser Mittelteil sorgt später für die Festigkeit von MeTHa, da hier die sogenannten Stehfäden völlig glatt liegen und so die größte mögliche Zugkraft aufnehmen können. Zusammengehalten werden die Stehfäden durch die Maschenfäden. Von diesen verlaufen insgesamt drei orthogonal durch die Stehfäden.



Abbildung 17 Stahlgewirk mit Steh- und Maschenfäden

Das Gewirk ist aus rostfreien VN8.1.1.40Z Stahlfäden hergestellt. Diese bestehen aus 8µm dicken Fasern, die zu 1000 Stück mit 40 Umdrehungen umeinander pro 1m zu einem Faden verdreht sind. [19]

Das Stahlblech ist 1mm dickes CrNi-Edelstahlblech, auch V2A genannt, mit der Werkstoffnummer 1.4301. Die Breite ist für MeTHa auf 60mm festgelegt und die Länge auf 500mm. Diese Maße lassen sich an den verwendeten Maschinen gut bedienen.

## 4.2 Aufbau

Erst bei dem gefügten Halbzeug (Abbildung 18) wird der Aufbau ersichtlich. Die Fügeverbindung wird im nachfolgenden Kapitel besprochen.

Wie in Abbildung 18 ersichtlich, ist das HZ in drei Zonen unterteilbar: Reiner Stahlblechanteil (ca. 40mm), Schweißnaht und Hybridanteil von Blech und Gewirk (ca. 20mm) sowie reiner Gewirkanteil (ca. 105mm). Der reine Gewirkanteil überwiegt deutlich. Der Stahlanteil ist breit genug gewählt, dass bei einer späteren Anbringung von MeTHa an Anschlusselementen mit Hilfe einer SN der Wärmeeintrag in das Blech die thermoplastische Matrix von MeTHa nicht beschädigt. Die Bemaßung der Punktung (83 mm) ist als Richtwert anzusehen.

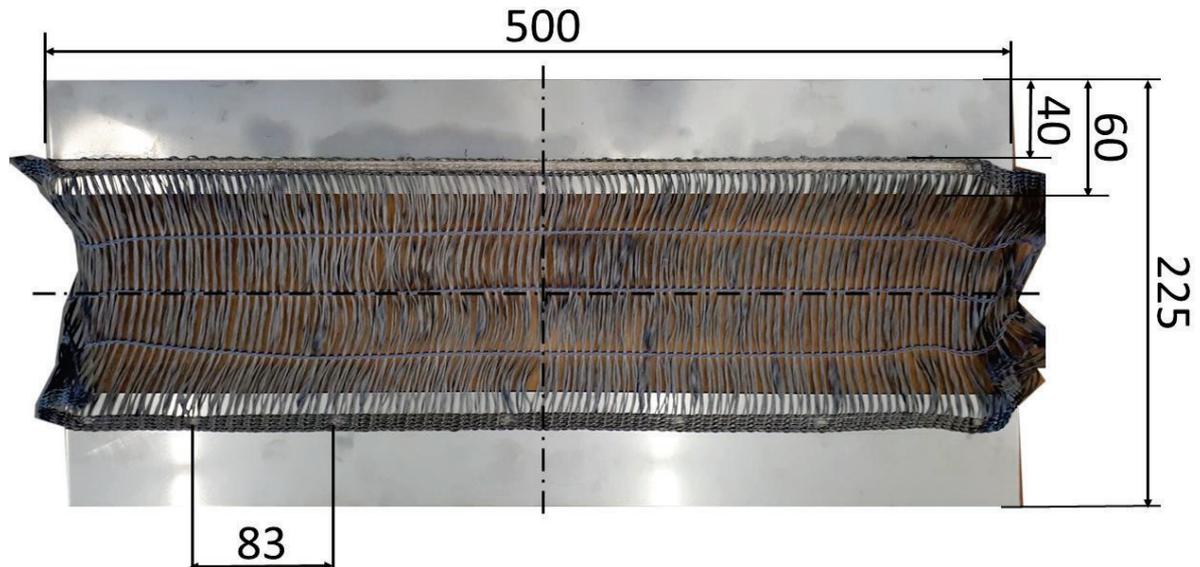


Abbildung 18 Einseitig durchgängig geschweißtes Halbzeug mit Bemaßung in mm

Der Bereich, in dem sich Blech und Gewirk überlappen, ist für die spätere Umformung besonders interessant. Hier liegen nach dem Laminieren drei Schichten verschiedener Materialien übereinander, die alle unterschiedlich miteinander verbunden sind.

### 4.3 Fügeverbindung

Das Fügen von Band und Blech erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird das Band am Blech mit Hilfe einer Punktschweißung in regelmäßigen Abständen fixiert, um das Band zu straffen und gegen Verrutschen zu sichern. Dann wird mit einer Rollenreibschweißmaschine eine gleichmäßige, durchgehende Naht erzeugt (siehe Abbildung 19).

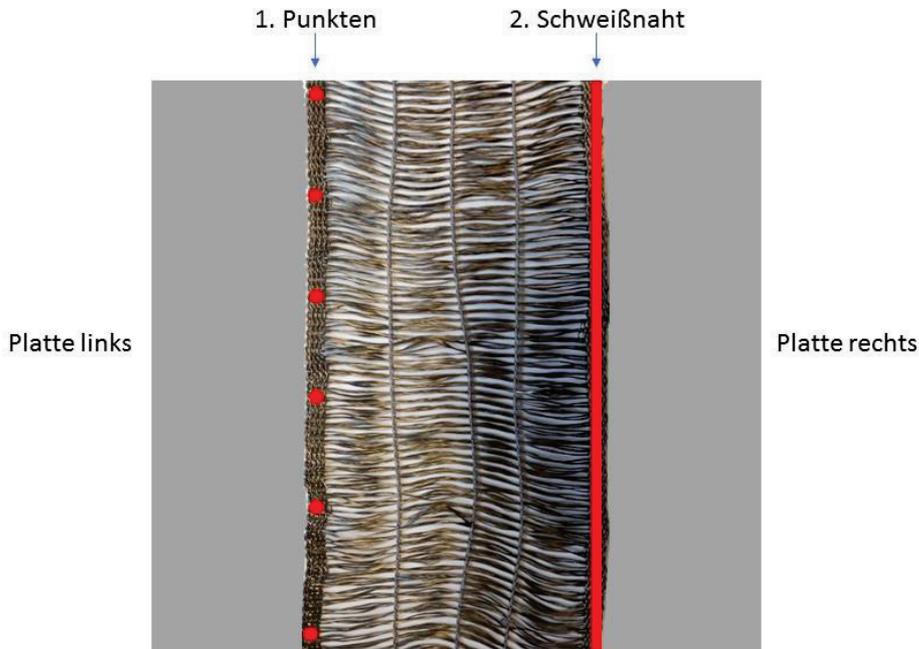


Abbildung 19 Schematischer Aufbau der Schweißung von Gewirk und Blech

Alle MeTHa-Halbzeuge wurden zunächst auf einer Seite gepunktet und geschweißt (siehe Abbildung 20), dann auf der anderen Seite.



Abbildung 20 Halbseitig geschweißte Elemente aus Blech und Gewirk

Es ist aber auch möglich, das Band zunächst beidseitig zu Punkten und im Anschluss beidseitig zu Schweißen. Auf das Endergebnis hat dies keinen Einfluss. Es handelt sich dabei um eine rein logistische bzw. Arbeitszeit optimierende Entscheidung. Wichtig für die spätere Weiterverarbeitung bzw. Umformung ist jedoch, dass beim Fixieren der zweiten Bandseite die orthogonal zu den Blechen verlaufenden Fäden gerade liegen. Nur bei einer möglichst exakten Ausrichtung lässt sich später eine zuverlässige Aussage über die Kräfte treffen.

Für die Punktschweißung wurde im Zuge dieser Arbeit eine Punktschweißmaschine LEW P80 der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle GmbH eingesetzt. Die Punktung erfolgte mit 6kA Strom bei einer Stromzeit von 40ms, wie in Abbildung 21 gezeigt.



Abbildung 21 Punktschweißen von Gewirk mit Blech

Das endgültige Fügen erfolgte an einer Rollennahtschweißmaschine LEW UN63 (siehe Abbildung 22), welche ebenfalls zu der Ausstattung der SLV Halle gehört. Die Stromzeit wurde mit einer Periode Stromzeit von 20ms für diese Maschine sehr gering gewählt und die Pause mit drei Perioden (60ms) verhältnismäßig hoch. Solche extremen Parameter waren notwendig, da das Blech sehr dünn ist und das Gewirk sehr empfindlich auf den Hitzeeintrag reagiert. Der Druck lag bei 3bar und die Stromstärke war auf 7kA beschränkt.



Abbildung 22 Widerstandsrollennahtschweißen von MeTHa

## 5 Herstellung MeTHa

Für die Erzeugung von MeTHa, sind zwei Komponenten erforderlich: Das Halbzeug (Kapitel 4) und ein geeigneter Thermoplast für das Laminat. Zudem muss ein Prozess entwickelt werden, mit dem es möglich ist, die Fasern des Gewirks in den Thermoplasten einzubetten.

### 5.1 Materialauswahl

Der Prozess des Laminierens muss mit möglichst einfachen Mitteln erfolgen können. Folglich ist es notwendig, einen Thermoplast zu verwenden, der ohne viel Aufwand verarbeitet werden kann. Spezialkunststoffe wie PA, welche für Kabelhalter üblicherweise verwendet werden, müssen vor ihrer Verarbeitung aufwendig getrocknet werden, da sie Wasser aufnehmen. Die Herstellung ihrer mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise die Zugfestigkeit erfolgt über anschließende Konditionierung im Wasserbad. Alle diese Prozesse sind aufwendig und damit teuer. Auch der Grundwerkstoff hat einen relativ hohen Preis (vgl. Kapitel 2.2.3).

Das Ziel dieser Arbeit ist es zu testen, ob es grundsätzlich möglich ist, Stahlgewirk in einen Thermoplast einzubetten. Es ist dafür nicht notwendig, einen teuren zu wählen. Günstigere Thermoplaste wie Polyethylen (PE) und PP können ebenfalls verwendet werden.

Für PP spricht, dass er auch in der Industrie als Substitut für PA gilt. Vorteilhaft ist ebenfalls, dass die mechanischen Eigenschaften mit PA vergleichbar sind. Zudem kann PP als Granulat für Spritzgussmaschinen ohne weitere Vorbereitung verwendet werden. Auch für dünne Filme ist PP gut geeignet. So wird bezüglich des Materials unter gleichen Voraussetzungen wie in der Industrie gearbeitet. (siehe Kapitel 2.2.3)

Aufgrund dieser positiven Eigenschaften und der schnellen Verfügbarkeit von PP an der Hochschule, wird entschieden, dieses als Granulat für das Laminat zu verwenden.

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die wichtigsten Daten aus dem Datenblatt des verwendeten Granulats vom Hersteller aufgeführt.

Tabelle 3 Eigenschaften des verwendeten PP-Granulats [20]

Bezeichnung	Eigenschaft
Aggregatzustand	fest
Erscheinungsbild	Pellets
Farbe	milchig
Selbstentzündungstemperatur [°C]	>300
Explosionsgefahr	keine
Schmelzbereich [°C]	160-170
Dampfdruck	vernachlässigbar
Dichte [ g/cm <sup>3</sup> ]	0.905-0.930
Wasserlöslichkeit	unlöslich
Verdampfungsgeschwindigkeit	vernachlässigbar

Bei der Verwendung des Granulats entsteht demnach keine Gefahr für Leib und Leben. Es kann ohne spezielle Vorkehrungen verarbeitet werden.

## 5.2 Prozessauswahl

Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Laminieren des Halbzeugs ist die Überführung des Thermoplasts in den flüssigen Zustand, damit die Fasern den KS aufnehmen können. Dafür muss mit dem Prozess die Schmelztemperatur von PP (160-170°C) überschritten werden können.

In der Industrie würde das Laminieren des HZ beispielsweise in einer Spritzgussmaschine oder kontinuierlich mit einem Extruder aufgetragen werden. Diese Möglichkeit steht aufgrund des hohen Preises für Maschinen und Werkzeug für die Durchführung dieser Thesis nicht zur Verfügung. Zudem ist die Spritzgussmaschine der Hochschule nicht für das Umspritzen von Fasern ausgerichtet.

Als Alternative könnte eine Thermoformmaschine verwendet werden, sofern diese auf Temperaturen über dem Schmelzbereich von PP erreicht. Außerdem müsste die Maschine ausreichend Druck aufbauen können, um von den Fasern vollkommen aufgenommen zu werden. Auch diese Möglichkeit besteht an der HAW Hamburg nicht.

Eine weitere Alternative wäre die Verwendung eines Autoklavs. Auch dieser muss Temperaturen deutlich über 170°C erreichen können. Zudem müsste ein Vakuumsack verwendet werden, der diesen hohen Temperaturen standhält. Die an der Hochschule verfügbaren Autoklaven und die dazugehörigen Materialien sind für solche Temperaturen nicht ausgelegt, da sie vorwiegend zum Aushärten von duroplastischen Harzen für den Flug- und Fahrzeugbau verwendet werden.

Daher wird auf eine simple Fertigungsmethode für das Laminat zurückgegriffen, wie sie in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt wird. Das Halbzeug wird in eine Form eingelegt und eingerahmt. Im zweiten Schritt wird das Granulat auf dem HZ gleichmäßig verteilt und mit Gewichten abgedeckt. Die Form mit HZ, Granulat und Gewicht wird anschließend in einem Ofen auf über Schmelztemperatur des PP erwärmt. Im Ofen wird sie eine gewisse Zeit auf dieser Temperatur gehalten, um der Schmelze die Möglichkeit zu geben, sich mit der Faser formschlüssig zu verbinden. Anschließend wird der Aufbau abgekühlt und nach vollständigem Erhärten entformt.

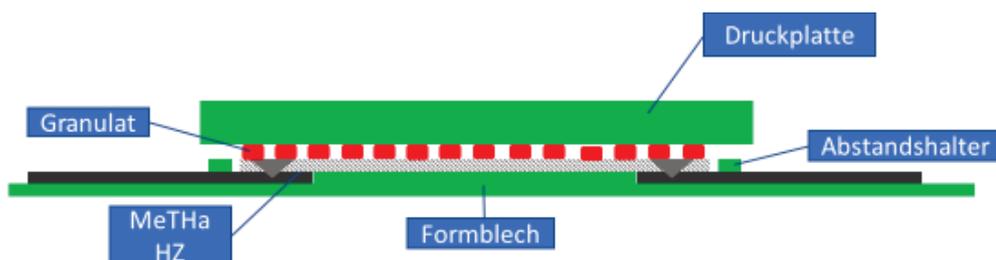


Abbildung 23 Prinzipieller Aufbau der Schmelzform mit Granulat

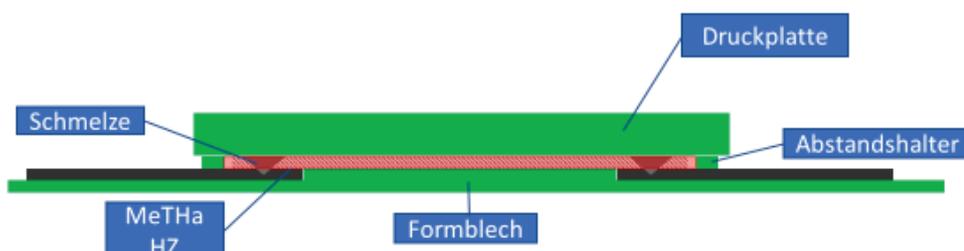


Abbildung 24 Prinzipieller Aufbau der Schmelzform mit Schmelze

Das Formblech bestand aus zwei Teilen, der Auflageplatte und dem Distanzblech, welches zwischen den beiden MeTHa-Blechen lag. Es sollte für Spannung in den Fäden sorgen und verhindern, dass die Schmelze vom Gewirk wegfließt. Die Abstandshalter hatten zwei Funktionen inne. Zum einen sollten sie verhindern, dass die Schmelze durch das Gewicht weggedrückt wird und zum anderen sollten sie die Schmelze seitlich begrenzen, sodass sie nicht ausläuft. Zu diesem Zweck wurde an allen vier Seiten des Halbzeuges Abstandshalter eingefügt. Jene an den kurzen Seiten waren von der Dicke her so gestaltet, dass überstehendes Gewirk über sie gelegt werden konnte, ohne dass dadurch eine Erhöhung in der Auflage von der Druckplatte entstand.

Die nachfolgende Tabelle 4 ist eine Stückliste der verwendeten Elemente pro Laminierform.

Tabelle 4 Stückliste für Laminierform

Element	Anzahl	Dicke [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]
Distanzblech	1	1	107	500
Auflage	1	1	203	530
Abstandshalter lang	2	1,5	10	500
Abstandshalter kurz	2	2	10	160
Druckplatte	1	1	170	520

Da die Druckplatte allein nicht schwer genug war, wurde sie durch verschiedene Gewichte (G) beschwert. GL steht für „Gewicht leicht“. Dahinter steht ein kleineres Gewicht, als bei G1 und G2 (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5 Masse der verwendeten Gewichte

Name	Gewicht [kg]
G1	4,416
G2	4,423
GL1	2,511
GL2	2,389
GL3	3,633
GL4	4,806

Die Vor- und Nachteile dieses einfachen Aufbaus sind in der nachfolgenden Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6 Vor- und Nachteile des gewählten Laminierprozesses

Vorteile	Nachteile
preisgünstig	geringe Genauigkeit (Temperatur, Druck), da kein zielgerichtetes Ansteuern der Parameter möglich
einfach reproduzierbar, auch an anderen Orten	kein zielgerichtetes Positionieren des Gewirks möglich
schnell umsetzbar	leichtes Verrutschen der Komponenten (Rahmen, HZ, Granulat)
schneller Umbau zu anderen Konfigurationen	ungleichmäßige Granulatverteilung

Für das Laminieren wurde ein Trockenschrank MCP FD 240 des Instituts für Produktionstechnik an der HAW Hamburg verwendet (siehe Abbildung 25). Er kann auf bis zu 300°C hochgeheizt werden und hat eine Abluftabsaugung. Das ist relevant um gesundheitsschädliche Dämpfe, die von der Schmelze aufsteigen können, aus dem Schrank zu entfernen. Zudem wird die aktuelle Schrankinnentemperatur über ein Display angezeigt.



Abbildung 25 Trockenschrank MCP FD 240

## 5.3 Laminieren

Es wurden zunächst Vorversuche ohne Gewirk nach der ausgewählten Methode durchgeführt. Dies diente der Verifizierung des Prozesses zur Herstellung des Laminats und der Abschätzung der Herstellungsparameter. Als erkennbar war, dass die Prozessparameter zufriedenstellende Ergebnisse liefern, wurde damit begonnen die Halbzeuge zu laminieren.

### 5.3.1 Vorversuche

Es gab insgesamt vier Vorversuche. Begonnen wurde mit Proben ohne Gewirk, dann wurde zu Proben mit Gewirk übergegangen. Abschließend wurden die Prozessparameter an einem Probepaneel überprüft.

Die Ergebnisse jedes Vorversuchs werden am Ende des jeweiligen Unterkapitels tabellarisch kurz zusammengefasst.

### 5.3.1.1 Vorversuch 1

In dem ersten Vorversuch (VV1) wurden 20g Granulat ohne Gewirk auf dem Auflageblech in einem Rahmen aus den Distanzblechen auf einer Fläche von 112cm<sup>2</sup> verteilt.



Abbildung 26 Aufbau Vorversuch 1

Aus der durchschnittlichen Dichte des KS-Granulats von  $\rho=0,9175\text{g/cm}^3=\text{konst.}$  und der Masse  $m_{G;VV1}=20\text{g}$  des Granulats sowie der Fläche  $A_{VV1}=112\text{cm}^2$ , kann die Dicke  $d_{t1}$  des Laminats berechnet werden:

$$d_t = \frac{m_G}{\rho * A} \quad (1)$$

Bei Einfügen der Werte in Formel (1), ergibt sich eine theoretische Dicke von  $d_{t;VV1}=0,19\text{cm}$ .

Das Granulat wurde beim Schmelzprozess mit einem Blech und einem 4,4kg schweren Gewicht beschwert, um ausreichend Druck für eine stoffschlüssige Verbindung von Faser und Schmelze zu erzeugen. Über die Masse  $m_w$  des Gewichts und die belastete Fläche  $A$ , die der Fläche des Granulats entspricht, wird nach Formel (2) der Druck berechnet. Die Masse des Blechs wird aufgrund ihres verhältnismäßig geringen Anteils vernachlässigt.

$$p = \frac{F_L}{A} \quad (2)$$

mit

$$F_L = m_w * g \quad (3)$$

Die Erdbeschleunigung wird mit  $g=9,807\text{m/s}^2$  angenommen.

Bei einer Masse von  $m_{w;VV1}=4,4\text{kg}$  und einer Fläche von  $A_{VV1} = 112\text{cm}^2$  ergibt sich demnach  $p_{VV1}=3,9\text{kPa} \triangleq 39\text{mbar}$ .

Die Form mit Gewicht und Granulat wurde anschließend im Ofen auf die Zieltemperatur  $\vartheta_{Z1}=200^\circ\text{C}$  erwärmt. Der Prozess des Aufheizens dauerte bei einer Starttemperatur von  $\vartheta_{S1}=45^\circ\text{C}$  ca.  $t_{h1}=45\text{min}$ . Nach Erreichen von  $\vartheta_{Z1}$  wurde diese für die Haltezeit  $t_{s1}=15\text{min}$  konstant gehalten. Im Anschluss wurde der Ofen bis auf  $130^\circ\text{C}$  abgekühlt, um unter der Schmelztemperatur zu sein. Nun wurden die Türen des Ofens geöffnet und die Abkühlung beschleunigt. Nach der vollständigen Abkühlung der Form und des Laminats wurde dieses entformt. Deutlich zu erkennen ist das nicht vollständig verschmolzene bzw. verbundene Granulat (siehe Abbildung 27).

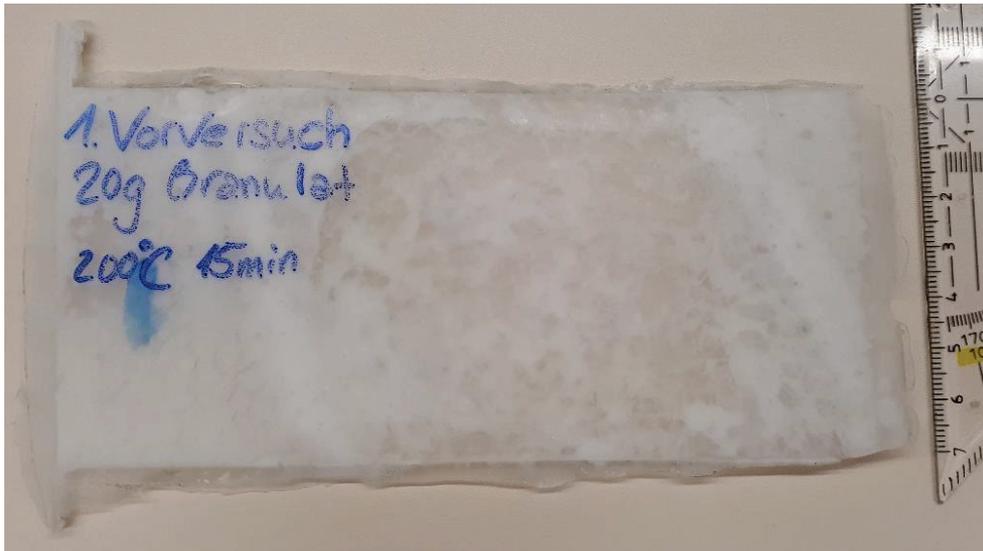


Abbildung 27 Laminat aus Vorversuch 1

Positiv war, dass die erreichte reale Dicke des Laminats von ca.  $d_{r,VV1}=0,19\text{cm}$  mit der theoretisch errechneten Dicke übereinstimmt.

Tabelle 7 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Vorversuch 1

positiv	negativ
$d_t = d_r$	viele große Gaseinschlüsse
Schmelze gut in der Form verteilt	nicht vollständig gelöstes Granulat

Um die Schmelzung und damit die Verbindung des Granulats zu verbessern, wurde die Zieltemperatur im Ofen von  $\vartheta_{z1}=200^\circ\text{C}$  auf  $\vartheta_{z2}=225^\circ\text{C}$  und die Haltezeit auf dieser Temperatur von  $t_{s1}=15$  auf  $t_{s2}=20\text{min}$  erhöht. Die Masse des Granulats blieb unverändert ( $m_{G;VV1}=20\text{g}$ ).

### 5.3.1.2 Vorversuch 2

Im Folgeversuch (Vorversuch 2; VV2) wurden zwei Laminat parallel erstellt. Eines wurde wie im ersten Versuch mit 20g Granulat auf einer Fläche von  $A_{VV2.1} = A_{VV1}=112\text{cm}^2$  erzeugt. Für das zweite Laminat wurde die gleiche Menge Granulat auf einem Stück unverarbeitetem Metallgewirk auf einer Fläche von  $A_{VV2.2}=144\text{cm}^2$  verteilt.



Abbildung 28 Aufbau Vorversuch 2 mit Gewirk ohne Granulat

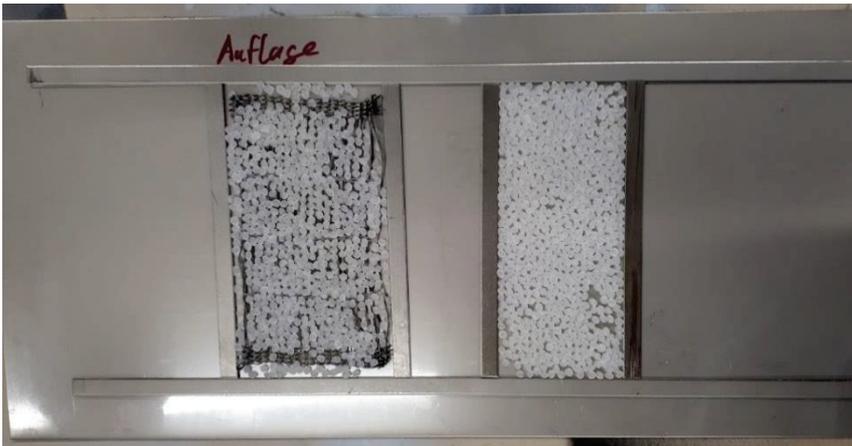


Abbildung 29 Aufbau Vorversuch 2 mit Gewirk mit Granulat

Nach Formel (3) berechnet sich für das Laminat mit Gewirk demnach eine theoretische Dicke von  $d_{t,VV2.2}=0,15\text{cm}$ . Das Band wird bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da das PP in die Fäden eindringen und den Platz ausfüllen soll. Theoretisch ist somit die Masse des Bandes vernachlässigbar. Die Dicke des Laminats ohne Gewirk sollte  $d_{t,VV2.1}=d_{t,VV1}=0,19\text{cm}$  betragen, da Fläche und Menge Granulat beibehalten wurden.

Wie im ersten Versuch, wurde das Granulat in den Formen mit Gewichten (4,9kg) beschwert (siehe Abbildung 30). Nach Formel (2) mit  $m_{w,VV2}=4,9\text{kg}$  und  $A_{VV2,ges}=256\text{cm}^2$  entsprach der Druck auf dem Granulat etwa  $p_{VV2}=19\text{mbar}$ . (Berechnung, auch für die folgenden Versuche, siehe Anhang)

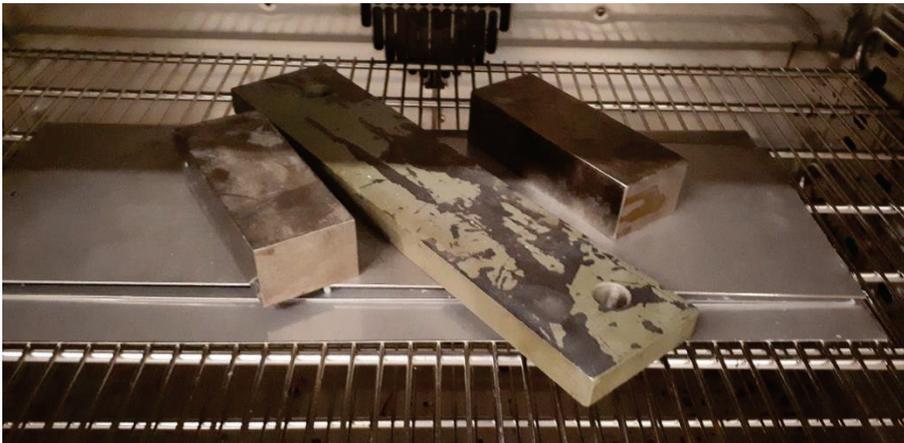


Abbildung 30 Mit Gewichten beschwerter Vorversuchsaufbau 2 im Ofen

Da die Zieltemperatur diesmal höher lag ( $\vartheta_{z2}=225^\circ\text{C}$ ) und die Starttemperatur geringer war ( $\vartheta_{s2}=39^\circ\text{C}$ ), dauerte der Aufheizprozess ca.  $t_{h2}=1\text{h}$ . Die Zieltemperatur wurde dann  $t_{s2}=20\text{min}$  gehalten und anschließend der Ofen bis  $150^\circ\text{C}$  abgekühlt. Um den Prozess der Abkühlung allgemein zu beschleunigen, wurde bereits bei dieser Temperatur die Tür geöffnet. Da das PP bei  $150^\circ$  unter Schmelztemperatur ist, wurde kein Austreten von gefährlichen Dämpfen mehr befürchtet. Der Prozess wurde durch das Aufsetzen der Form bei einer Restwärme von ca.  $85^\circ\text{C}$  auf einen Lüfter zusätzlich beschleunigt.

Die entformten Laminare weisen deutliche Gaseinschlüsse auf. Einzelne Granulate sind nicht mehr zu erkennen. Die Verbindung der Schmelze mit dem Gewirk kann als ausreichend eingestuft werden (Abbildung 34).

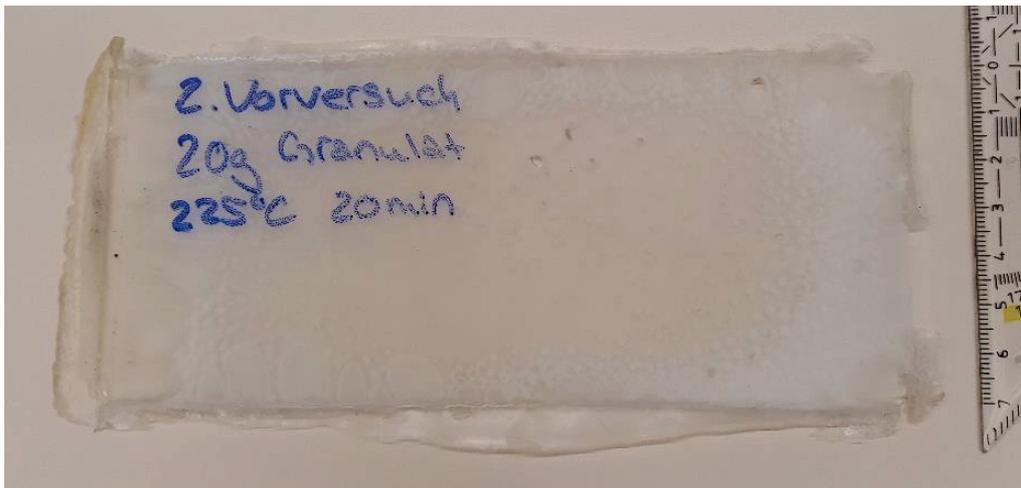


Abbildung 31 Laminat ohne Gewirk aus Vorversuch 2

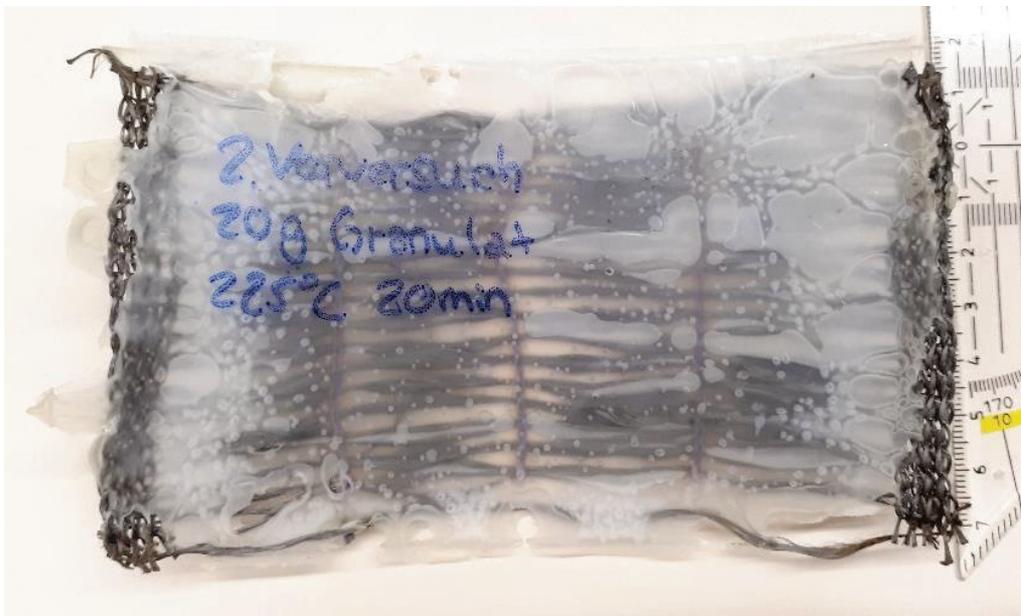


Abbildung 32 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 2 (Draufsicht)

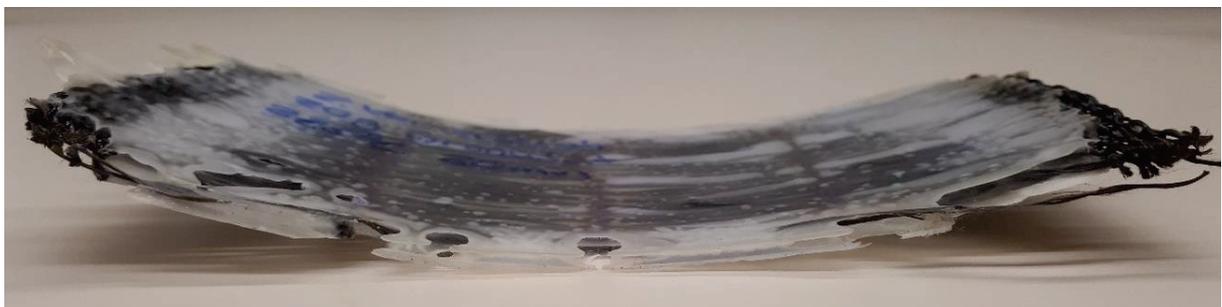


Abbildung 33 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 2 (Seitenansicht)



Abbildung 34 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 2 (Bodenansicht)

Auf Abbildung 33 ist deutlich der Verzug des Laminats zu erkennen. Gemessen wurde die Krümmung mit einem Radius von ca. 13cm.

Die gemessene Dicke  $d_{r,VV2.2}=0,245\text{cm}$  des Laminats mit Gewirk entsprach nicht der errechneten von  $d_{t,VV2.2}=0,15\text{cm}$ . Aber auch die Dicke des Laminats ohne Gewirk  $d_{r,VV2.1}=0,215\text{cm}$  stimmte diesmal nicht mit der errechneten überein.

Tabelle 8 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Vorversuch 2

positiv	negativ
Granulat vollständig geschmolzen	$d_t > d_r$
ausreichende Verbindung von Gewirk und Kunststoff	deutliche Gaseinschlüsse
	deutlicher Verzug

Die Menge an Luftpneinschlüssen im Laminat lässt sich theoretisch über drei Methoden verringern: 1. Erhöhung des Drucks, 2. Erhöhung der Granulatmasse oder 3. die Schmelze einem Vakuum aussetzen. Da es technisch in den zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten nicht möglich war, die Schmelze zu vakuumieren und auch die Erhöhung des Drucks zu Schwierigkeiten führte, wurde beschlossen Punkt 2 zu erproben. Die Granulatmasse pro Fläche wurde erhöht.

### 5.3.1.3 Vorversuch 3

Für den dritten Vorversuch VV3 wurde aufgrund der vorherigen Erkenntnisse auf einer Fläche von  $A_{VV3}=200\text{cm}^2$  eine Menge von  $m_{G;VV3}=60\text{g}$  Granulat über einem Gewirkstück verteilt. Die nach Formel (7) berechnete Laminatdicke beträgt demnach  $d_{t;VV3}=0,33\text{cm}$ .



Abbildung 35 Aufbau Vorversuch 3 mit Gewirk mit Granulat

Das Granulat wurde mit einer Last von  $m_{w;VV3}=9,32\text{kg}$  belastet, wodurch nach Formel (2) ein Druck von ca.  $p_{VV3}=46\text{mbar}$  entstand.

Bei einer Starttemperatur von  $\vartheta_{S3}=44^\circ\text{C}$  und einer Zieltemperatur von  $\vartheta_{Z3}=225^\circ\text{C}$  dauerte das Aufheizen, wie auch in VV2, etwa  $t_{h3}=1\text{h}$ . Nachdem  $\vartheta_{Z1}$  erreicht war, wurde diese für  $t_{s1}=17\text{min}$  gehalten. Das Abkühlen erfolgte wie in VV2.

Das fertig entformte Laminat weist sehr wenig Lufteinschlüsse um das Gewirk herum auf. Sie sind eher am Rand konzentriert (siehe Abbildung 36). Zudem ist das Laminat sehr gleichmäßig und hat eine durchgehend klare, amorphe Struktur, welche das Gewirk sauber umschließt (siehe Abbildung 38 & Abbildung 39). Die gemessene Dicke liegt mit  $d_{r;VV3}=0,22\text{cm}$  allerdings deutlich unter der berechneten von  $d_{t;VV3}=0,33\text{cm}$ . Zudem ist wieder sehr deutlich der Verzug des Laminats zu erkennen (siehe Abbildung 37).



Abbildung 36 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 3 (Draufsicht)

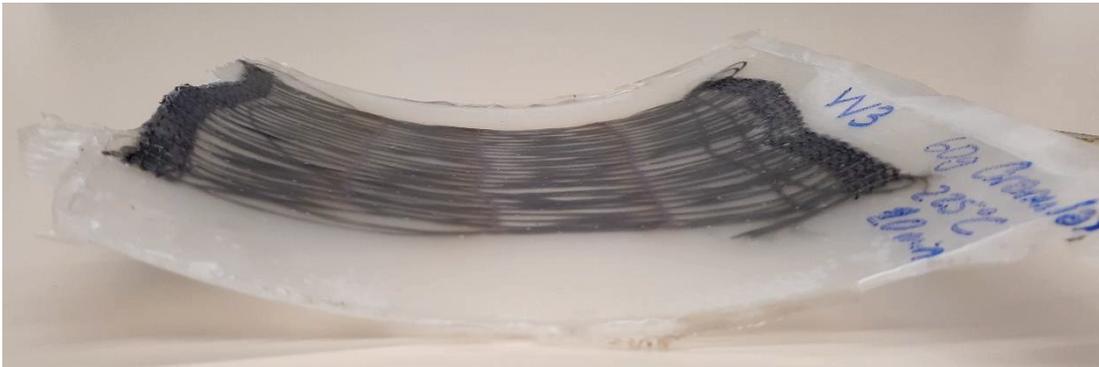


Abbildung 37 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch (Seitenansicht)



Abbildung 38 Laminat mit Gewirk aus Vorversuch 3 (Bodenansicht)



Abbildung 39 Detailansicht Fasereinbettung bei Laminat aus Vorversuch 3

Tabelle 9 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Vorversuch 3

positiv	negativ
wenige, kleine Gaseinschlüsse am Rand	$d_t < d_r$
ausgezeichnete Fasereinbettung	deutlicher Verzug
gleichmäßig amorphe Kristallstruktur	

Aufgrund der sehr guten Ergebnisse bei VV3 bezüglich der Dichte des Laminats und dem Einschluss des Gewirks, wurde beschlossen, den nächsten Versuch bereits an einem Halbzeug durchzuführen.

#### 5.3.1.4 Vorversuch 4

Da die Fläche der Halbzeuge deutlich größer als die der Probestücke ist, musste die Menge Granulat entsprechend angeglichen werden. Anstatt wie in den vorherigen Versuchen 60g/200cm<sup>2</sup> zu verwenden, wurde die Menge auf 200g/800cm<sup>2</sup> erhöht, wodurch nach Formel (1) die errechnete Dicke des Laminats bei  $d_{t,VV4}=0,272\text{cm}$  liegt. Alle anderen Parameter wurden beibehalten. Die Zeiten blieben unverändert mit  $t_{h,VV4}=1\text{h}$  und  $t_{s,VV4}=20\text{min}$ . Die Starttemperatur lag bei  $\vartheta_{s,VV4}=38^\circ\text{C}$  und die Zieltemperatur bei  $\vartheta_{z,VV4}=225^\circ$ . Bei einer Belastung durch  $m_{w,VV4}=13,739\text{kg}$  lag der Druck auf dem Granulat bzw. der Schmelze bei ungefähr  $p_{VV4}=17\text{mbar}$ . Abgekühlt wurde wie in den beiden vorhergehenden Versuchen.

Das fertig laminierte Paneel ist deutlich verzogen. Durch die wirkenden Kräfte in den Materialien ist auch das Blech verformt worden, wie in Abbildung 41 zu erkennen. Die Matrix ist größtenteils amorph, weist jedoch in den Randbereichen eine teilkristalline Struktur auf. Wie in Abbildung 40 zu erkennen, ist die KS-Schmelze aus dem Rahmen geflossen und hat einen Film auf dem Blech gebildet. Die Fasereinbettung war zufriedenstellend, wenn auch bei weitem nicht so gut wie in VV3 (siehe Abbildung 42).



Abbildung 40 Laminiertes Paneel aus Vorversuch 4 (Draufsicht)



Abbildung 41 Laminiertes Paneel aus Vorversuch 4 (Bodenansicht)



Abbildung 42 Detailansicht Fasereinbettung bei Paneel aus Vorversuch 4

Tabelle 10 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Vorversuch 4

positiv	negativ
keine großen Gaseinschlüsse	deutlicher Verzug
zufriedenstellende Fasereinbettung	Fasereinbettung schlechter als bei VV3
größtenteils amorphe Kristallstruktur	teilkristalline Randbereiche
	Schmelzeaustritt aus Rahmen

Da das Ergebnis als zufriedenstellend beurteilt werden konnte, waren die Vorversuche mit VV4 abgeschlossen und es wurde zum eigentlichen Laminieren übergegangen.

### 5.3.1.5 Zusammenfassung der Vorversuche

Zur übersichtlicheren Darstellung der Versuchsabläufe werden an dieser Stelle alle relevanten Parameter und Konfigurationen der Vorversuche zusammengefasst.

Tabelle 11 Zusammenfassung der Parameter der Vorversuche

VV	Konfiguration	$m_G$ [g]	A [cm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [cm]	$d_r$ [cm]	$t_h$ [h]	$t_s$ [min]	$\vartheta_s$ [°C]	$\vartheta_z$ [°C]	$p$ [mbar]
1	Nur PP	20	112	0,19	0,19	1	15	45	200	39
2.1	Nur PP	20	112	0,19	0,22	1	20	39	225	19
2.2	PP + Gewirk	20	144	0,15	0,25	1	20	39	225	19
3	PP + Gewirk	60	200	0,33	0,22	1	20	44	225	46
4	HZ	200	800	0,27	-	1	20	39	225	17

### 5.3.2 Laminieren der Halbzeuge

Das Laminieren der Halbzeuge erfolgte in der Regel zu jeweils zwei Stück gleichzeitig, kenntlich gemacht durch die gleiche Seriennummer, bei den in Tabelle 12 folgenden Parametern

Trotz den grundsätzlich gleichen Bedingungen, außer bei V04, sind alle Paneele unterschiedlicher Qualität, wie in Abbildung 43 sichtbar. Auf der Abbildung sind alle Paneele nebeneinander aufgereiht, von rechts nach links in der Reihenfolge ihrer Herstellung einschließlich VV4.

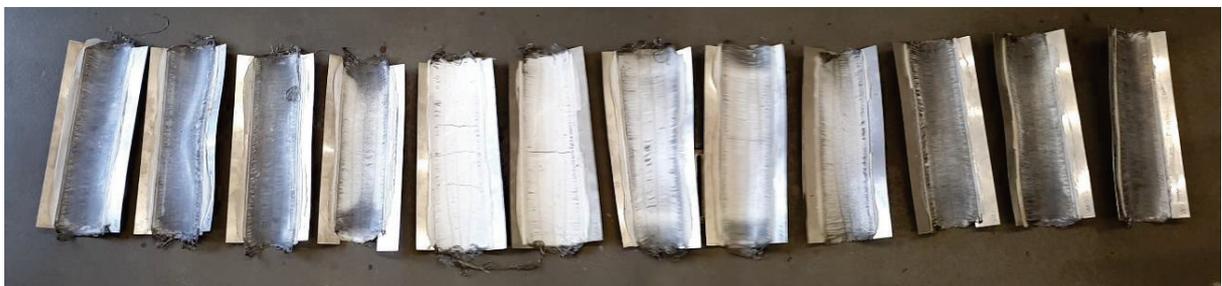


Abbildung 43 Alle laminierten Halbzeuge nebeneinander aufgereiht

Die ersten drei Paneele aus VV4, V01.1 und V02.1 sind alle von annähernd gleicher Struktur. Die Matrix ist amorph. V02.2 hingegen ist deutlich kristalliner, ebenso wie V03.1 und V03.2. Die Gasblasen sammeln sich eher im mittleren Bereich, die Ränder sind nahezu frei davon. V04.1 und V04.2 weisen eine vollständig kristalline Kristallstruktur auf. V05.1 ist ähnlich wie

V03.1 am Rand amorph und in der Mitte eher kristallin bis teilkristallin. V06.1, V06.2 und V07.1 sind, ebenso wie die ersten drei Paneele, amorph.

Tabelle 12 Parameter beim Laminieren der Halbzeuge

Versuch Nr.	$m_G$ [g]	$\vartheta_s$ [°C]	$\vartheta_z$ [°C]	$t_h$ [h]	$t_s$ [min]	p [mbar]	Änderungen
V01.1	180	37	225	1	25	16,8	-
V02.1	180	37	225	1	25	11,4	-
V02.2	180	37	225	1	25	15,8	-
V03.1	180	29	225	1	25	11,4	obere Schiene im Heizschrank nach oben verschoben
V03.2	180	29	225	1	25	15,8	untere Schiene im Heizschrank nach unten verschoben
V04.1	180	29	225	1	20	11,4	sehr langsames Abkühlen (über 1,75h)
V04.2	180	29	225	1	20	15,8	sehr langsames Abkühlen (über 1,75h)
V05.1	180	42	225	1	20	11,4	kein Distanzblech, schnell abkühlen
V06.1	200	39	225	1,35	20	11,4	kein Distanzblech, beim Hochheizen ca. 20min auf 135°C gehalten
V06.2	200	39	225	1,35	20	15,8	kein Distanzblech, beim Hochheizen ca. 20min auf 135°C gehalten
V07.1	220	57	225	1	20	11,4	kein Distanzblech, Schweißnähte versetzt (siehe Abbildung 55)

In den nachfolgenden zwölf Abbildungen sind die Paneele noch einmal einzeln in der Draufsicht abgebildet. Alle weisen den typischen Film neben der Schweißnaht auf, der durch die mangelnde Begrenzung der Schmelze verursacht wird.



Abbildung 44 Paneel VV4



Abbildung 45 Paneel V01.1



Abbildung 46 Paneel V02.1

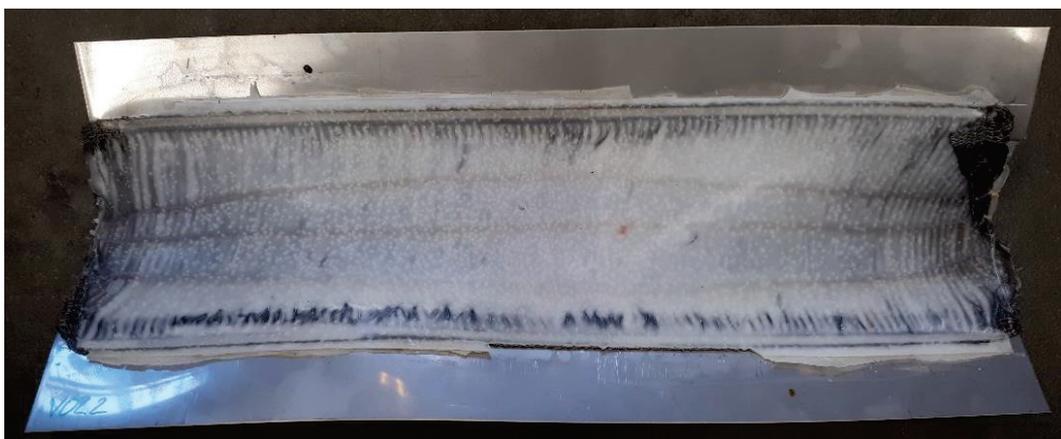


Abbildung 47 Paneel V02.2

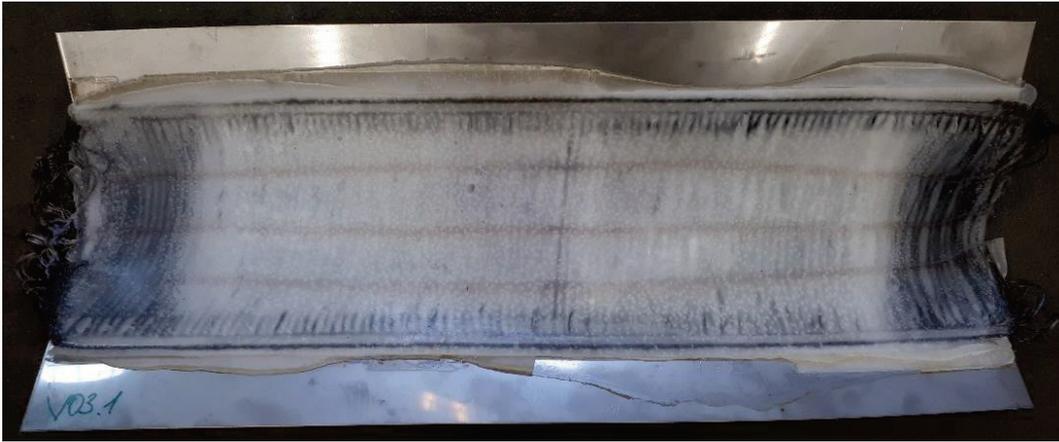


Abbildung 48 Paneel V03.1



Abbildung 49 Paneel V03.2

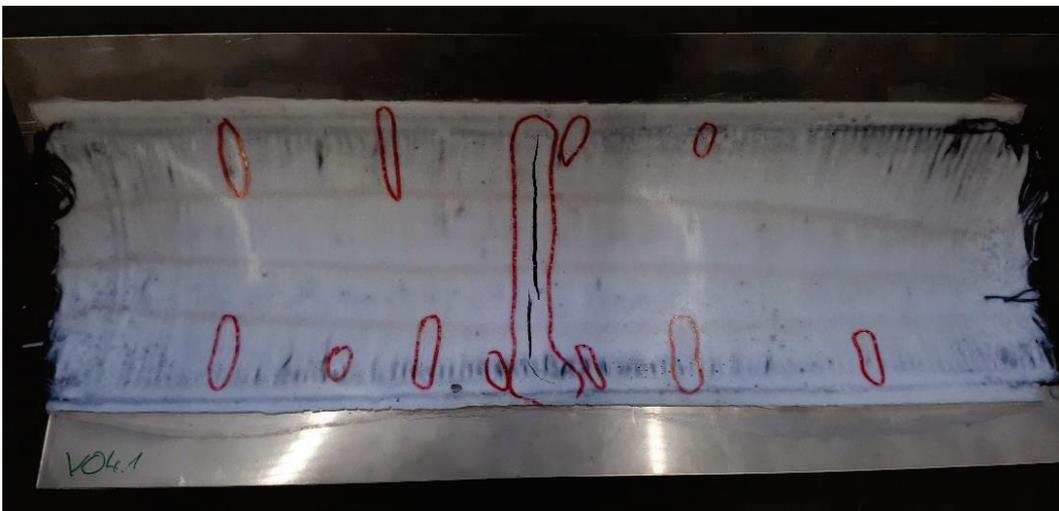


Abbildung 50 Paneel V04.1

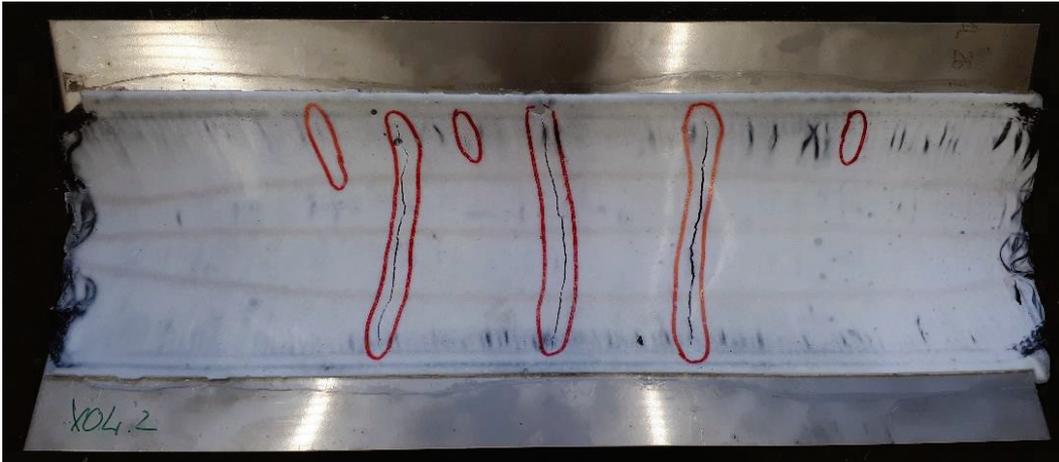


Abbildung 51 Panel V04.2

Deutlich bei den Paneelen der Reihe V04 (siehe Abbildung 50 & Abbildung 51) sind die Risse zu erkennen, die zum Hervorheben auf dem Panel rot markiert wurden.

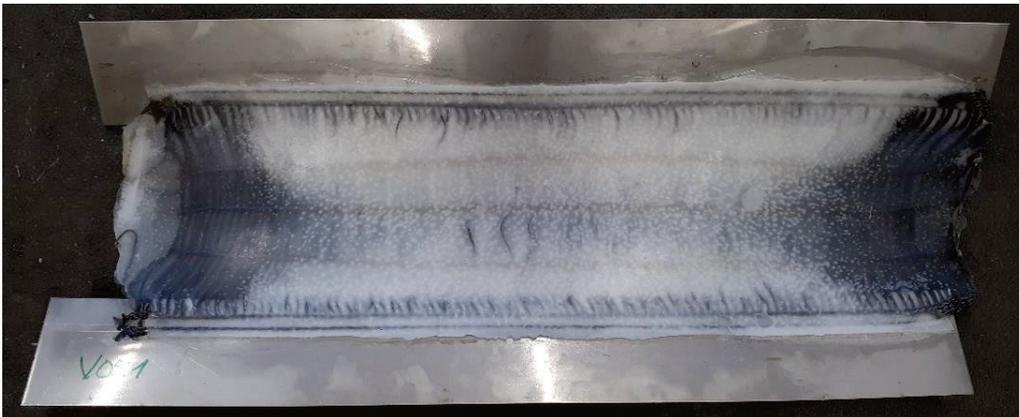


Abbildung 52 Panel V05.1

Bei Panel V05.1 (siehe Abbildung 52) wurde beim Schweißen nicht auf eine symmetrische Ausrichtung der Bleche geachtet, daher liegen sie versetzt zueinander.



Abbildung 53 Panel V06.1



Abbildung 54 Paneel V06.2

Bei V06.1 und V06.2 kam es zu deutlich größeren Gasblasen, die auch Löcher in der Oberfläche verursacht haben.



Abbildung 55 Paneel V07.1

Wenn die ganze Bandbreite der Paneele betrachtet wird, sind alle Qualitätsstufen abgedeckt. Unter den Laminaten befinden sich sowohl welche nahezu ohne Gaseinschlüsse als auch mit deutlichen Gaseinschlüssen, rissfreie und rissige und ebenso amorphe, teilkristalline und kristalline. Dies ist insofern vorteilhaft, als das bei den Umformversuchen jede Qualität getestet und eine Aussage über die verschiedenen Einflussfaktoren, die durch das Material gegeben sind, getroffen werden kann.

## 6 Umformversuche

Dass eine Verbindung von einem Thermoplast und einem Stahlgewirk möglich ist, wurde durch die Versuche zum Laminieren und die erfolgreiche Laminierung der Paneele gezeigt. Eine wesentliche, noch ungeklärte Frage ist jedoch die Umformbarkeit dieses hybriden Materials. Diese wurde in verschiedenen Versuchen getestet.

### 6.1 Versuchsaufbau

Für die Umformversuche wurden erwärmte Probenkörper in ein Werkzeug eingelegt und dann durch Einbringen einer Kraft in Form gebracht. Die umgeformten Werkstücke wurden entnommen und einer optischen Beurteilung unterzogen. Die Umformung erfolgte sowohl maschinell, als auch per Hand.

#### 6.1.1 Probenkörper

Da die Umformbarkeit an verschiedenen Proben überprüft werden sollte, mussten die laminierten Paneele zunächst in schmalere Probestreifen zerteilt werden.

Hierfür wurden die vorhandenen Probenkörper zunächst, wie exemplarisch in Abbildung 56 dargestellt, mit roten Markierungen in Abschnitte unterteilt, welche mit römischen Nummern versehen wurden. Aus dieser Nummer, sowie der Nummer des Paneels setzt sich die Bezeichnung der Probe zusammen. Beispiel: Für die erste Probe aus dem dargestellten Paneel lautet die Bezeichnung V04.2 I.

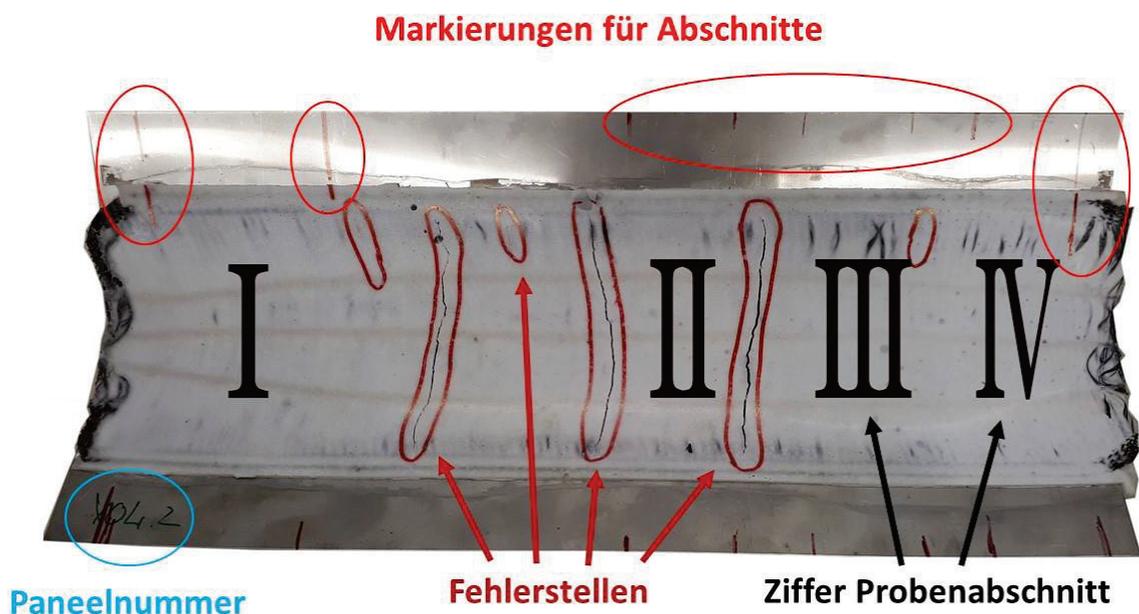


Abbildung 56 Exemplarisch mit Probennummern versehenes Paneel V04.2

Bei der Einteilung der Probenabschnitte auf dem Paneel wurde versucht, extreme Fehlerstellen wie z.B. Risse auf den Proben zu vermeiden. Die Streifen, die für die Umformung in der Presse vorgesehen waren, wurden auf ca.  $b=50\text{mm}$  Breite bemessen.

Die Zerteilung der Paneele erfolgte an einer Bandsäge MSU-4 des Herstellers Jaespa, ausgerüstet mit einem, für Edelstahl geeigneten Sägeblatt.

Für die Kantbank und evtl. alternative Versuche wurden breitere Streifen vorgesehen.



Abbildung 57 Zersägen der Paneele zu Probenkörpern



Abbildung 58 Sieben Probenkörper nebeneinander aufgereiht

Beim Sägen musste darauf geachtet werden, dass das Sägeblatt nicht überhitzt, da das Trennen von hybriden Strukturen immer eine starke Belastung für die trennenden Materialien darstellt. Die besondere, hybride Struktur von MeTHa, insbesondere der Übergang zwischen KS + Metall und reinem Metallteil bereitete dem Sägeblatt öfters Probleme, sodass es nicht weiter in das Material sägte. Der Hybridteil aus KS und Gewirk war im Gegensatz dazu sehr einfach zu trennen, wobei es auch hier Unterschiede zwischen kristalliner und amorpher Struktur gab. Die Paneele mit kristalliner Struktur ließen sich einfacher trennen, als die mit amorpher.

Trotz Anschlag an der Säge (siehe Abbildung 57), gelang es durch den Verzug der Paneele nicht, die Proben auf eine konstante Breite gerade zu sägen (siehe Abbildung 58). Die

Abweichung betrug allerdings nur 2-4mm. Da dies für die nachfolgenden Versuche kein Problem darstellte, wurde dieser Fehler in Kauf genommen.

Leider konnten nicht alle MeTHa-Paneele in Probenkörper unterteilt werden. Aufgrund der hohen Belastung beim Zerspanen sind die Sägeblätter der Bandsäge an ihrer Schweißnaht gerissen.

Vor ihrer Verwendung wurden die Proben für die Presse optisch nach der Kristallstruktur des PP sowie der Einbettung des Gewirks in den KS kategorisiert. Zudem wurde die Dicke der Proben gemessen, um den Durchschnittswert für das entsprechende Paneel bestimmen und diesen mit der berechneten Dicke abgleichen zu können. Die Kategorisierung erfolgte wie in Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt.

Eine sehr gute Fasereinbettung liegt vor, wenn alle Fasern vollständig von der Matrix getränkt und eingeschlossen worden sind, eine sehr schlechte, wenn die Fäden vollständig außerhalb des KS liegen. Die Bewertung der Kristallstruktur erfolgte anhand einer Sichtprüfung. Bei einer klaren, durchsichtigen Matrix wurde die Kristallstruktur als amorph bewertet, milchig als teilkristallin und undurchsichtig weiß als kristallin.

*Tabelle 13 Kategorisierung der Fasereinbettung in die Matrix*

Fasereinbettung					
sehr gut	gut	ausreichend	mangelhaft	ungenügend	sehr schlecht
1	2	3	4	5	6

*Tabelle 14 Bewertung der Kristallstruktur der Matrix*

Bewertung Kristallstruktur				
amorph		teilkristallin		kristallin
1	2	3	4	5

Die Proben sind, wie in Tabelle 15 folgt, beurteilt worden.

Tabelle 15 Bewertung der Proben für Umformung in der Presse

Name Panel	Abschnitt	Bewertung		
		Einbettung Fasern	Gefüge	Ø Dicke [mm]
VV4	I	2	1	3,6
VV4	II	3	1	3,0
VV4	III	3	1	3,2
VV4	V	3	1	3,2
VV4	VI	2	1	2,9
V03.1	II	3	3	2,9
V03.1	III	3	3	3,0
V03.1	IV	3	1	3,1
V03.1	V	4	3	3,1
V03.1	VI	4	3	3,1
V03.2	I	2	3	2,5
V03.2	II	3	3	2,9
V03.2	III	3	3	3,1
V03.2	IV	3	3	3,5
V03.2	V	4	3	3,6
V04.1	I	3	4	2,8
V04.1	II	3	5	2,9
V04.2	III	4	5	3,1
V04.2	IV	4	5	-
V04.2	V	4	5	3,2
V04.2	VI	3	5	3,0
V04.2	VII	3	5	2,8
V04.2	VIII	2	5	2,1
V05.1	I	3	1	-
V05.1	II	3	2	3,6
V05.1	III	4	3	3,8
V05.1	IV	4	3	3,8
V05.1	V	3	3	3,5
V05.1	VI	3	3	3,3
V05.1	VIII	3	1	2,8
V06.1	I	2	1	3,1
V06.1	II	3	1	3,6
V06.1	III	4	1	3,5
V06.1	IV	3	1	3,7
V06.1	VI	3	1	3,5
V06.1	VII	3	1	3,6
V06.1	VIII	3	1	3,7

Aus den Dicken der Proben konnte für das jeweilige Herkunftspaneel die durchschnittliche Dicke berechnet werden. In Tabelle 16 wird diese mit der in Kapitel 5.3 berechneten verglichen.

Tabelle 16 Durchschnittliche Paneeldicke im Vergleich zu der berechneten

Name Panel	Ø Dicke [mm]	d <sub>t</sub> [mm]	Abweichung von d <sub>r</sub> zu d <sub>t</sub> [%]
VV4	3,18	2,72	116,91
V03.1	3,04	2,45	124,08
V03.2	3,12	2,45	127,35
V04.1	2,85	2,45	116,33
V04.2	2,84	2,45	115,92
V05.1	3,47	2,45	141,63
V06.1	3,53	2,72	129,78
			Ø 124,57

Die berechnete Dicke liegt für jedes Paneel deutlich unter der tatsächlich erreichten. Die durchschnittliche Abweichung beträgt 124,57%, also knapp 25% über dem optimalen, berechneten Wert.

### 6.1.2 Werkzeuge

Die Umformversuche wurden an einer 100t-Hydraulikpresse der Firma Hymag, welche als Stempelpresse eingerichtet war, in der HAW Hamburg im Institut für Produktionstechnik (IPT) durchgeführt (Abbildung 59).l



Abbildung 59 Werkzeug mit Stempel der Hydraulikpresse

Die Hydraulikpresse hat eine maximale Presskraft von 100kN und verfügt über eine rechnergestützte Messkette, mit der die Stößelposition und die Stempel- sowie Niederhaltekraft aufgenommen werden kann. [21] Zudem können die Niederhaltekraft und der Verfahrweg des Stempels gezielt angesteuert und für die Versuche bei Bedarf verringert werden.

Die händische Umformung wurde mit Hilfe von Handschuhen und einem Schraubstock durchgeführt.

Für die Zugversuche kam eine Zwick 1454 zum Einsatz (siehe Abbildung 60). Diese verfährt mit konstanter Geschwindigkeit. Ein gekoppeltes Computerprogramm kann ein Kraft-Weg oder Kraft-Zeit-Diagramm aufnehmen. Sind die Probengeometrien bekannt, können diese Diagramme in Spannungs-Dehnungs-Diagramme überführt werden. Für den Zugversuch wurde ein Zeit-gesteuertes Programm mit einer Verfahrgeschwindigkeit von 15mm/min gewählt.



Abbildung 60 Zwick Zugmaschine mit angeschlossenen Systemen

Die Erwärmung der Proben erfolgte, wie auch schon das Laminieren, in dem Trockenschrank MCP FD 240.

## 6.2 Durchführung

Es wurden drei verschiedene Arten der Umformung erprobt. Zunächst wurden Versuche an der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Presse durchgeführt. Diese werden durch eine händische Umformung ergänzt. Zuletzt wurden Zugversuche durchgeführt.

Die ursprünglich geplanten Versuche an der Kantbank konnten leider nicht durchgeführt werden, da keine Möglichkeit bestand, die Proben vor der Umformung auf eine ausreichend hohe Temperatur zu bringen, damit sie währenddessen nicht spröde brechen.

### 6.2.1 Umformung an der Presse

Vor den eigentlichen Versuchen mussten wieder Vorversuche durchgeführt werden, bei denen die genaue Umform-Temperatur ermittelt wurde. Hierfür wurden zunächst zwei Probenstreifen in den Trockenschrank gelegt und auf 120°C erwärmt. Dabei wurde die Schrankinnentemperatur an der digitalen Anzeige des Trockenschanks abgelesen. Die Temperatur der Proben wurde mit einem Ultraschallthermometer überprüft. Als die Proben die Temperatur angenommen hatten, wurde die erste Probe V05.1 I mittig und mit der Schweißnaht nach oben unter dem Stempelwerkzeug positioniert und umgeformt. Die Probe zerbrach spröde und ohne merkliche Umformung.

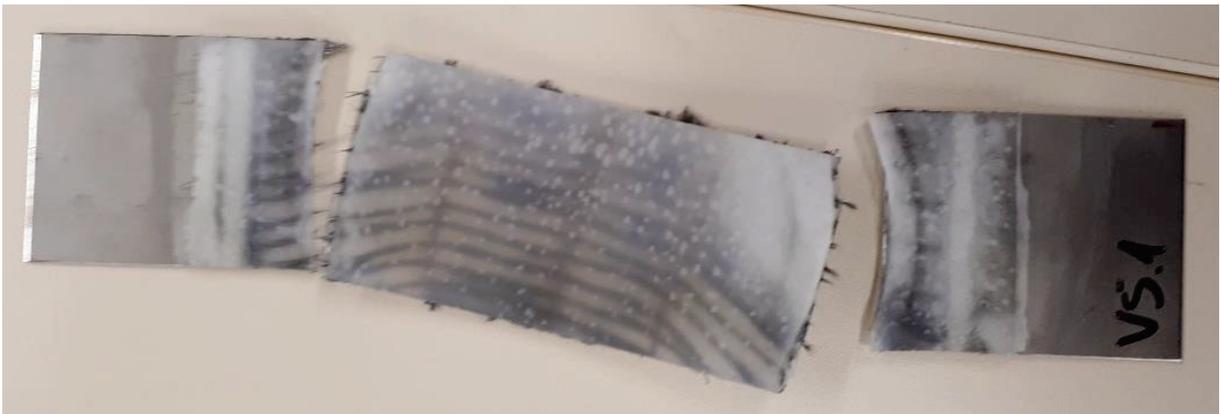


Abbildung 61 Zerbrochene Probe V05.1 I nach Umformung in der Presse

Da im ersten Versuch keine Umformung stattfand, wurde die Temperatur der zweiten Probe (V04.2 IV) auf 150°C, also knapp über der maximalen Einsatztemperatur von 148°C (vgl. Tabelle 1) hoch gesetzt. Diesmal lag die SN unten. Auch diese Probe zerbrach, wie in den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich.



Abbildung 62 Bei Umformung zerbrochene Probe V04.2 IV in Draufsicht

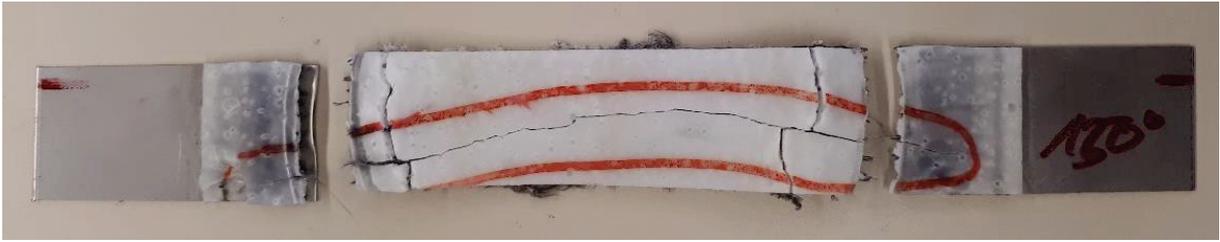


Abbildung 63 Bei Umformung zerbrochene Probe V04.2 IV in Bodenansicht

Aufgrund des immer noch spröden Verhaltens der Proben beim Umformen, wurde die Temperatur weiter erhöht. Die nächsten drei Versuche erfolgten händisch (siehe Kapitel 6.2.2). Erst als eine Temperatur erreicht war, bei der auch eine händische Umformung kein Problem darstellte, wurden weitere Versuche in der Presse durchgeführt. Bei 165°C im Trockenschrank wurde die nächste Probe (V06.1 VII) in der Maschine umgeformt. Diesmal kam es zu einer starken elastischen, sowie geringen plastischen Verformung.

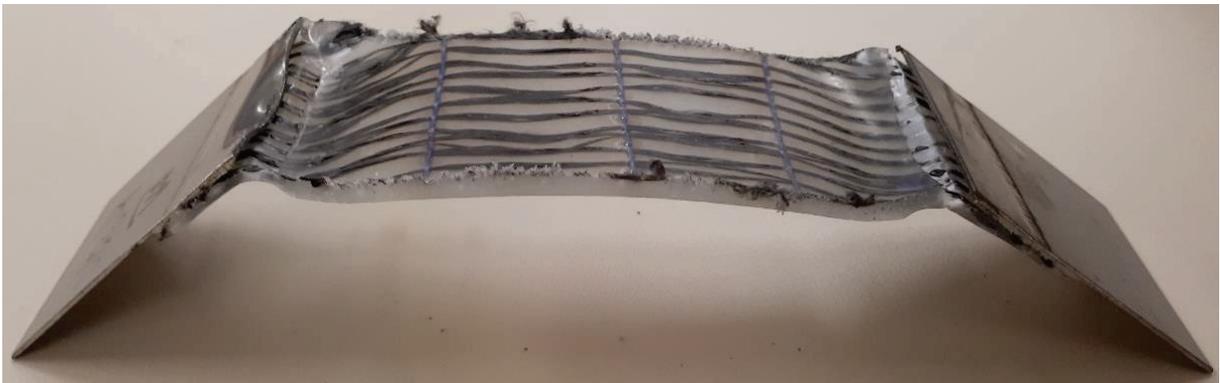


Abbildung 64 Nach Umformung plastisch verformte und verzogene Probe V06.1 VII

Das Ergebnis war so gut, dass auch die nächsten Versuche bei einer Ausgangstemperatur von 165°C im Trockenschrank durchgeführt werden sollten. Da es jedoch immer noch zu Rissen durch Sprödigkeit kam, wurde die Temperatur bis 170°C weiter erhöht. Der Versuch, mit der Temperatur noch höher zu gehen, scheiterte daran, dass die Probe schon bei 173°C zu weich wurde und nicht mehr aus dem Schrank entnommen werden konnte. Der hohe Temperaturbereich warf die Frage auf, ob überhaupt Versuche an der Kantbank möglich sind. In den Räumlichkeiten wo das Werkzeug steht, befindet sich keine Möglichkeit, die Proben so stark zu erhitzen. Es wurde also beschlossen, auf die Versuche an der Kantbank zu verzichten, da sie für den Beweis der Umformbarkeit keine große Relevanz besaßen.

Bei den Versuchen wurde mit verschiedenen Konfigurationen experimentiert, wie in Tabelle 17 aufgelistet. Verändert wurde einerseits die Position der Probe unter dem Stempel (mittig, seitlich, exzentrisch), andererseits die Lage der Probe selbst (SN oben, SN unten). Auch die Niederhaltekraft sowie die Verweildauer der Probe im Werkzeug wurden variiert. Die Probenbreite wurde ebenfalls verändert, als absehbar war, dass die Umformung an der Presse unproblematisch ist. Hierfür wurden die ursprünglich für die Kantbank geplanten Proben verwendet.

Tabelle 17 Parameter und Konfiguration der Proben bei Umformversuchen an Presse

Nr.	Proben Nr.	Schrank- temperatur [°C]	Nieder- halte- kraft [bar]	Haltezeit Stempel [s]	Konfiguration		
					SN	Position	Breite Probe [mm]
1	V05.1 V	165	60	9	oben	mittig	50
2	VV4 III	165	60	9	unten	mittig	50
3	V03.2 IV	165	45	9	unten	mittig	50
4	V06.1 VIII	169	45	9	unten	mittig	50
5	-	173	-	-	-	-	-
6	V03.2 III	170	45	9	unten	mittig	50
7	V06.1 IV	170	45	9	unten	mittig, verschoben	50
8	V06.1 II	170	45	9	unten	mittig, verschoben	50
9	V03.1 IV	170	45	9	oben	mittig, verschoben	50
10	V05.1 IV	170	45	9	unten	mittig, verschoben	50
11	VV4 I	170	45	9	unten	mittig, verschoben	50
12	V03.2 II	170	45	9	oben	mittig, verschoben	50
13	V06.1 I	170	45	9	unten	mittig, verschoben	50
14	V06.1 III	170	45	9	unten	mittig	50
15	V04.2 III	170	45	9	unten	mittig	50
16	V04.2 VIII	170	45	9	unten	mittig	50
17	V03.2 V	170	45	300	unten	mittig	50
18	VV4 V	170	45	300	oben	mittig	50
19	V05.1 VI	170	45	300	unten	mittig	50
20	V06. VI	170	45	300	oben	mittig	50
21	V04.2 VII	170	45	300	unten	seitlich	50
22	V04.2 VI	170	45	300	unten	seitlich	50
23	V05.1 III	170	45	300	unten	seitlich	50
24	V03.2 I	170	45	300	unten	seitlich	50
25	V03.1 II	170	45	300	unten	seitlich	50
26	V03.1 III	170	45	300	oben	seitlich	50
27	VV4 II	170	45	300	oben	seitlich	50
28	V04.2 V	170	45	300	unten	seitlich	50
29	V03.2 VII	170	45	300	unten	mittig	x
30	V03.2 VI	170	45	300	unten	annähernd mittig	x
31	V04.2 I	170	45	300	unten	exzentrisch	x

Die Position der Proben in der Presse wird in der nachfolgenden Abbildung 65 schematisch verdeutlicht. In Abbildung 66 sind typische Ergebnisse für die jeweilige Positionierung abgebildet.

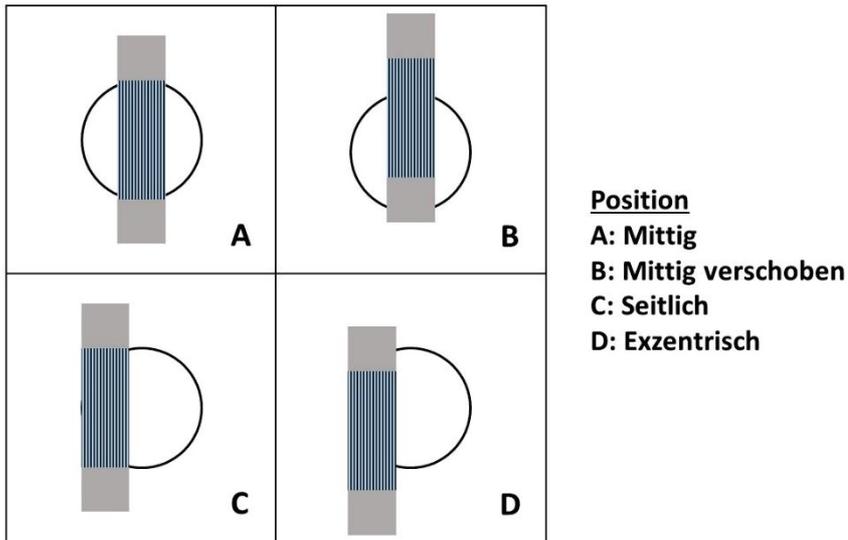


Abbildung 65 Schematische Darstellung der Position der Proben in der Presse

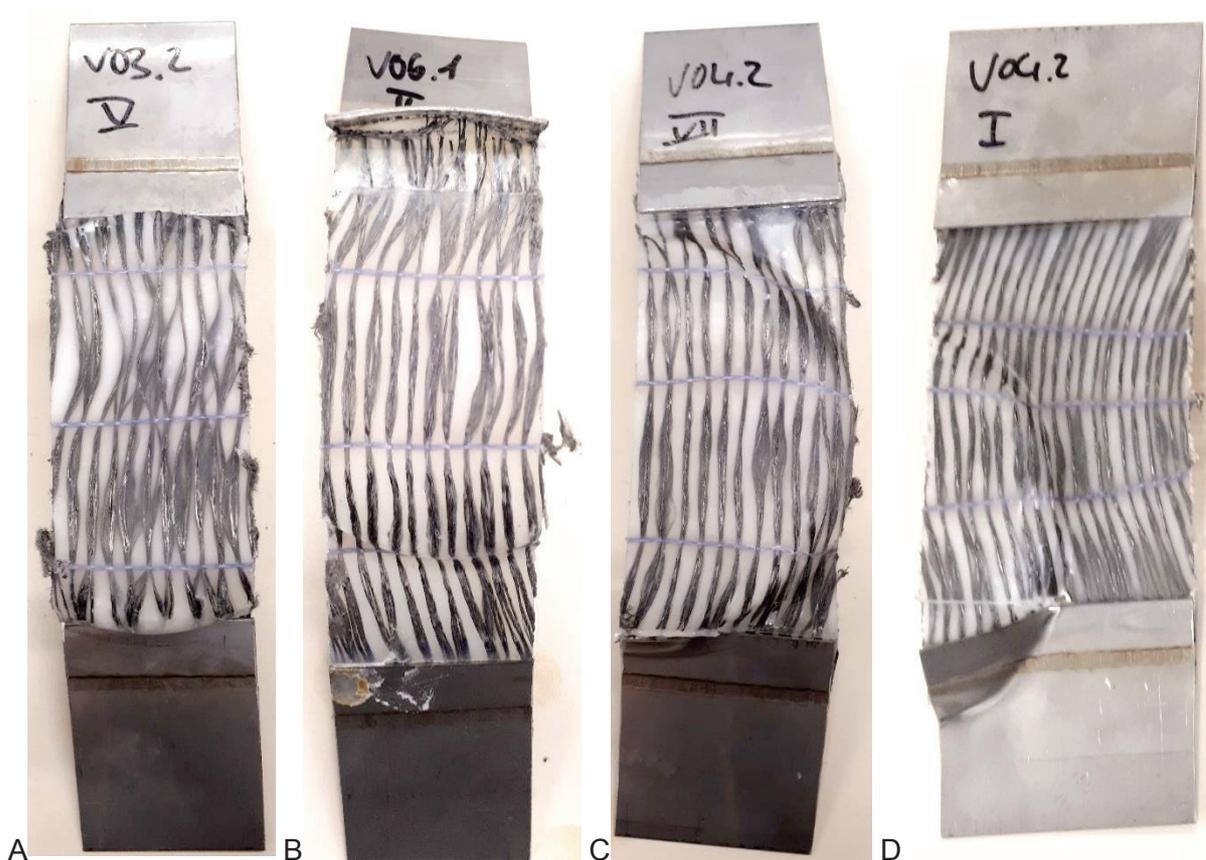


Abbildung 66 Ergebnisse der verschiedenen Positionierungen in der Presse

Im Anschluss an die Umformung wurde jede Probe optisch beurteilt und das Ergebnis der Umformung schriftlich dokumentiert. Die Beurteilung erfolgte nach den in Tabelle 18 aufgeführten Kriterien.

Tabelle 18 Bewertungsmatrix für pressend umgeformte Proben

Verformung				
rein elastisch				rein plastisch
1	2	3	4	5

Weißbruch			
kein			starker
1	2	3	4

Rissbildung				
keine				starke
1	2	3	4	5

Fließen im Einzugsbereich			
starkes			kein
1	2	3	4

Abscheren des KS an Blechkante			
Einschnüren des KS durch Fäden			
Gerissene Fäden			
kein(e)			stark(es)
1	2	3	4

Die Proben konnten, wie in Tabelle 19 folgt, beurteilt werden.

Tabelle 19 Beurteilung der umgeformten Proben

Nr.	Proben Nr.	Beurteilung							
		Verformung	Weißbruch	Rissbildung	Fließen im Einzugsbereich	Abschere des KS an Blechkante	Einschnüren des KS durch Fäden	Gerissene Fäden	Sonstiges
1	V05.1 V	2	2	3	3	1	1	3	-
2	VV4 III	2	3	2	3	2	2	3	-
3	V03.2 IV	-	-	5	-	-	-	-	ein Blech an SN abgerissen
4	V06.1 VIII	3	3	2	4	2	1	4	
6	V03.2 III	4	2	3	2	4	2	2	
7	V06.1 IV	4	3	2	3	4	1	2	einseitiger, kompletter Bruch
8	V06.1 II	3	2	2	4	2	1	3	Blech einseitig abgeklappt
9	V03.1 IV	2	2	2	2	2	1	1	
10	V05.1 IV	3	2	1	3	3	3	3	
11	VV4 I	3	3	3	4	1	2	1	
12	V03.2 II	3	2	3	3	2	1	4	
13	V06.1 I	3	3	1	3	2	2	3	
14	V06.1 III	3	3	1	3	3	2	2	
15	V04.2 III	3	3	4	3	2	4	2	
16	V04.2 VIII	-	-	5	-	-	-	-	ein Blech an SN abgerissen
17	V03.2 V	4	2	2	3	3	2	1	
18	VV4 V	3	2	4	3	1	1	3	
19	V05.1 VI	4	2	2	3	3	4	3	
20	V06. VI	5	2	1	2	1	1	1	
21	V04.2 VII	4	2	3	3	4	2	3	
22	V04.2 VI	4	2	2	2	4	2	2	Probe bei Laminieren gerissen
23	V05.1 III	4	2	1	2	3	3	2	
24	V03.2 I	3	2	2	3	3	2	4	
25	V03.1 II	4	1	2	3	3	2	1	
26	V03.1 III	4	2	3	3	1	1	2	
27	VV4 II	4	2	2	2	1	1	3	
28	V04.2 V	4	2	3	3	3	2	2	
29	V03.2 VII	4	3	3	2	3	2	3	
30	V03.2 VI	4	3	2	4	4	2	2	
31	V04.2 I	5	2	4	3	1	2	2	Blech einseitig abgeklappt

Exemplarisch sind in den nachfolgenden Abbildungen die typischsten Fälle gezeigt. Sie zeigen den relevanten Bereich der Probe im Detail.



Abbildung 67 Umgeformte Probe mit Weißbruch



Abbildung 68 Während der Umformung am Blech abgescherte Probe



Abbildung 69 Umgeformte Probe mit gerissenen Fäden

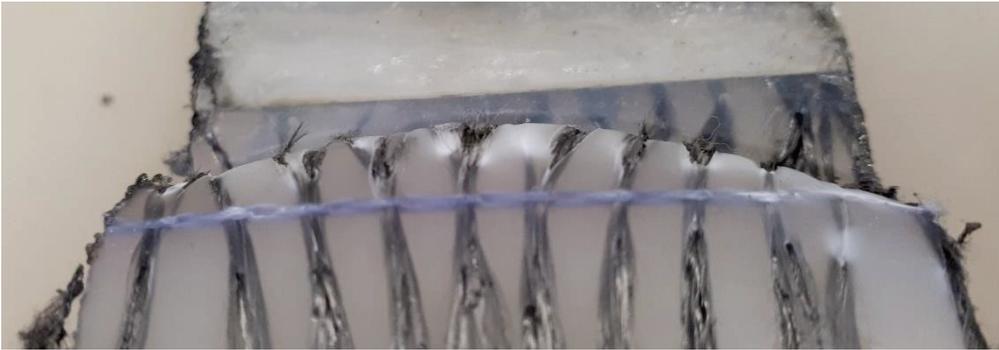


Abbildung 70 Umgeformte Probe mit Einschnürung des Kunststoff durch das Gewirk



Abbildung 71 Umgeformte Probe mit Weißbruch und Rissen

Das Fließen des Kunststoff bei der Umformung beschränkt sich zumeist auf einen schmalen Streifen direkt vom Blech weg.



Abbildung 72 Umgeformte Probe mit Rissen sowie geringen Fließen des Kunststoff

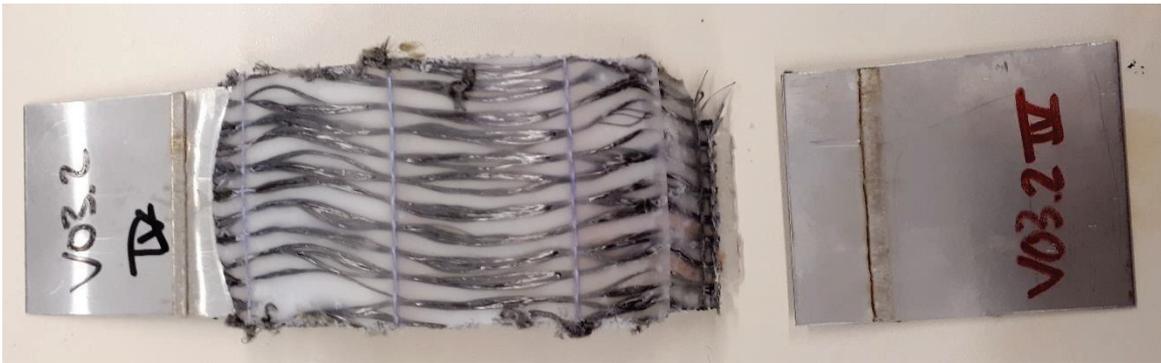


Abbildung 73 Während der Umformung abgerissene Probe

### 6.2.2 Händische Umformung

Die Umformung per Hand wurde zunächst im Anschluss an die gescheiterten Umformversuche an der Presse durchgeführt, um die richtige Temperatur für die Umformung zu finden. Hierfür wurde die Temperatur im Ofen schrittweise erhöht, bis die Umformung mit der Hand ohne Anstrengung möglich war. So wurde sie in drei Versuchen von 155°C auf 160°C erhöht. Da zu diesem Zeitpunkt der KS zwar ausreichend weich für eine Umformung war, aber noch nicht den Schmelzbereich erreicht hatte, wurde für die Versuche an der Presse die Temperatur auf 165°C gesteigert.

Die ersten händischen Umformversuche erfolgten durch Einspannen der Probe in einen Schraubstock, wie er dem IPT zur Verfügung steht. Dann wurde die Probe mit geringem Kraftaufwand um die y-Achse gebogen (siehe Abbildung 74).



Abbildung 74 Händische Umformung am Schraubstock

Beim ersten Versuch dieser Art brach die Probe spröde und gerade wie in Abbildung 75 erkennbar. Zuvor wurde sie sie mehrmals im und gegen den Uhrzeigersinn um die Achse gebogen.



Abbildung 75 Spröde gebrochene Probe V05.1 VII nach händischer Verformung

Im zweiten Versuch fand nur eine Umformung in eine Richtung statt. Diese erfolgte ohne Bruch. Da die Umformung aber mit den Fasern auf der Innenseite der Wölbung stattfand und die daher auf Druck beansprucht wurden, ragen die nicht sauber vom KS eingeschlossenen Fasern aus dem Werkstück heraus, wie deutlich in Abbildung 76 zu erkennen.

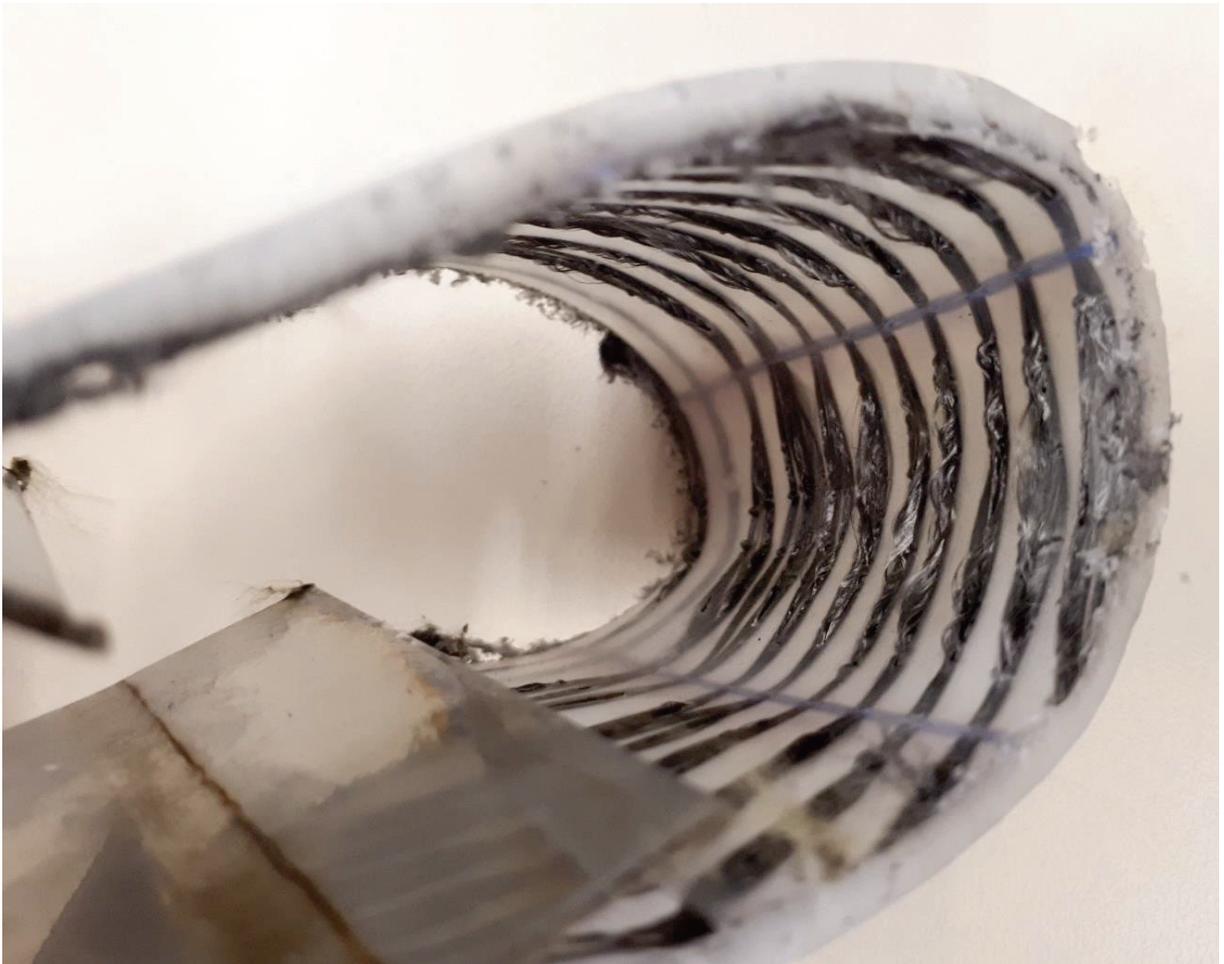


Abbildung 76 Händisch umgeformte Probe V05.1 II in Nahaufnahme

Da die Proben vor ihrer vollständigen Erkalzung aus der Belastung entnommen wurden, wiesen sie deutlichen Verzug auf. Die Probe konnte elastisch verformt werden, indem die beiden Metallbleche gegeneinander gedrückt wurden.

Im Anschluss an die Umformversuche an der Presse wurden drei weitere händische Umformversuche mit einer Schranktemperatur von 170° durchgeführt. Diesmal wurden die

Proben bis zu ihrem Erkalten in Position gehalten, sodass der Anteil der plastischen Verformung gegenüber der elastischen deutlich erhöht wurde.

Um eine alternative Umformung zu erproben, wurden zwei Proben (V05.1 VIII, V04.1 II) um ihre x-Achse tordiert. Dabei wurde eine Drehung um nahezu  $180^\circ$  erreicht. Zudem traten kein Weißbruch und keine Rissbildung in den Proben bzw. in dem umgeformten Bereich der Proben auf (siehe Abbildung 77 & Abbildung 78).



Abbildung 77 Tordierte Probe V04.1 II

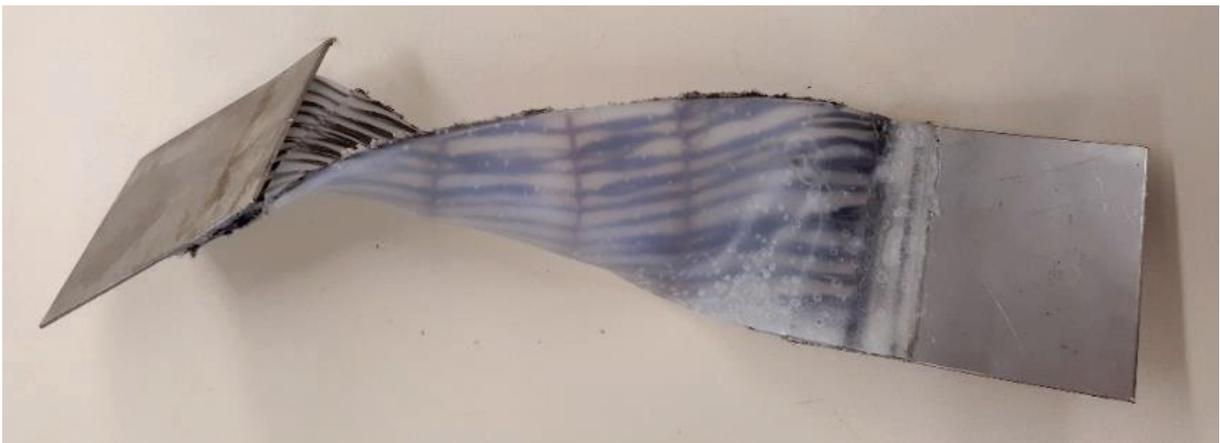


Abbildung 78 Tordierte Probe V05.1 VIII



Abbildung 79 In Spannbacken eingespannte Probe V03.1 VI während des Erhaltens



Abbildung 80 Umgeformte und erkaltete Probe V03.1 VI

Zuletzt wurde erneut eine Biegung um die y-Achse erzeugt (siehe Abbildung 79). Da die Probe in der dargestellten Position auskühlte, zeigte sie nur geringen Verzug in Form von auffedern bei der Entnahme (siehe Abbildung 80). Auch hier war eine elastische Verformung des erkalteten Formteils möglich.

### 6.2.3 Zugversuch

Die Belastung von MeTHa durch reine Zugkraft, bildete den Abschluss der Versuchsreihen. Es wurden an vier Proben Zugversuche durchgeführt. Davon war eine Probe ohne die angeschweißten Bleche (siehe Abbildung 81 a), die anderen drei Proben wurden mit den Blechen in der Einspannung gezogen (siehe Abbildung 81 b). Die Proben wurden, wie auch die gepressten Proben, im Trockenschrank auf 170°C erwärmt, bevor sie gezogen wurden. Während des Ziehens kühlten sie aus.

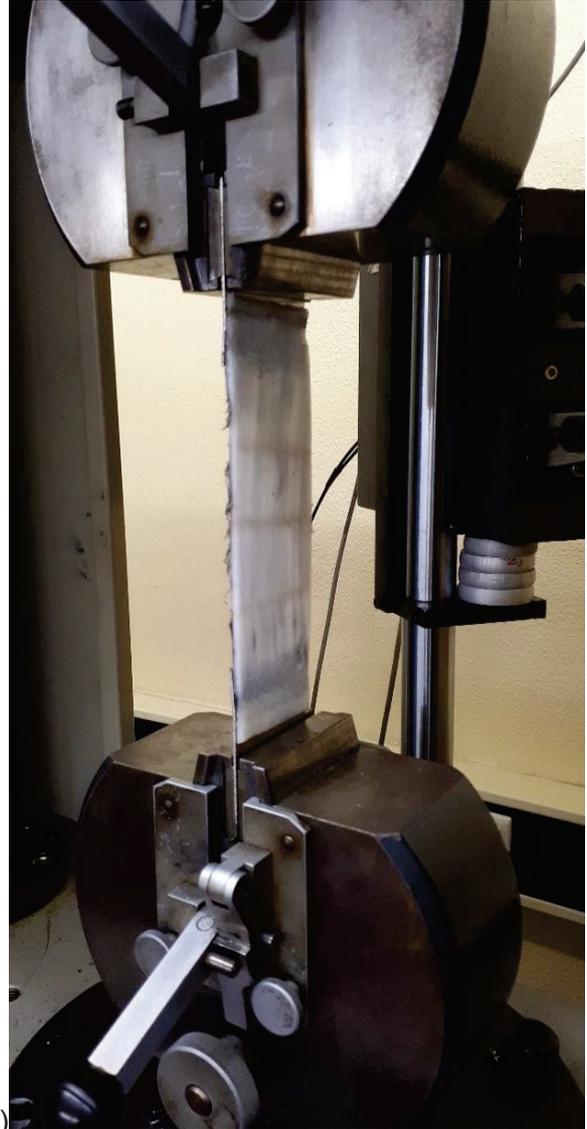
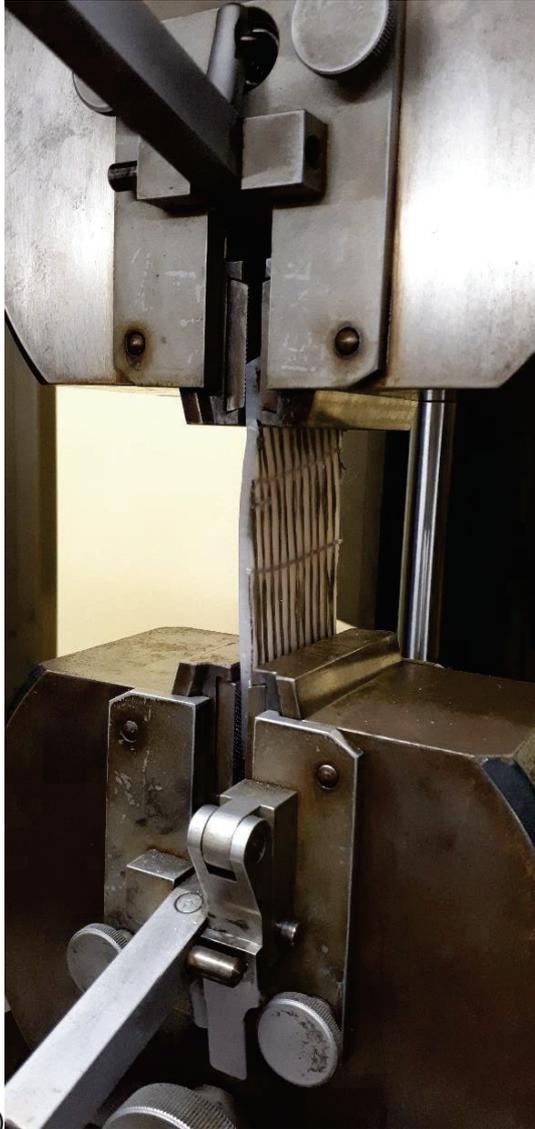


Abbildung 81 In Zugmaschine eingespannte Probe a) ohne Blech und b) mit Blech



Abbildung 82 Zugprobe mit Blech während des Ziehens

Bei den ersten drei Proben, die mit Blech gezogen wurden, hat sich zunächst die Matrix gelängt, ohne dass es zum Einschnüren kam (siehe Abbildung 82 a). Fäden sind dabei nicht gerissen. Dann begann die Matrix vom Blech abzuscheren und ist an der SN von diesem abgerissen, wie in Abbildung 82 b ersichtlich.

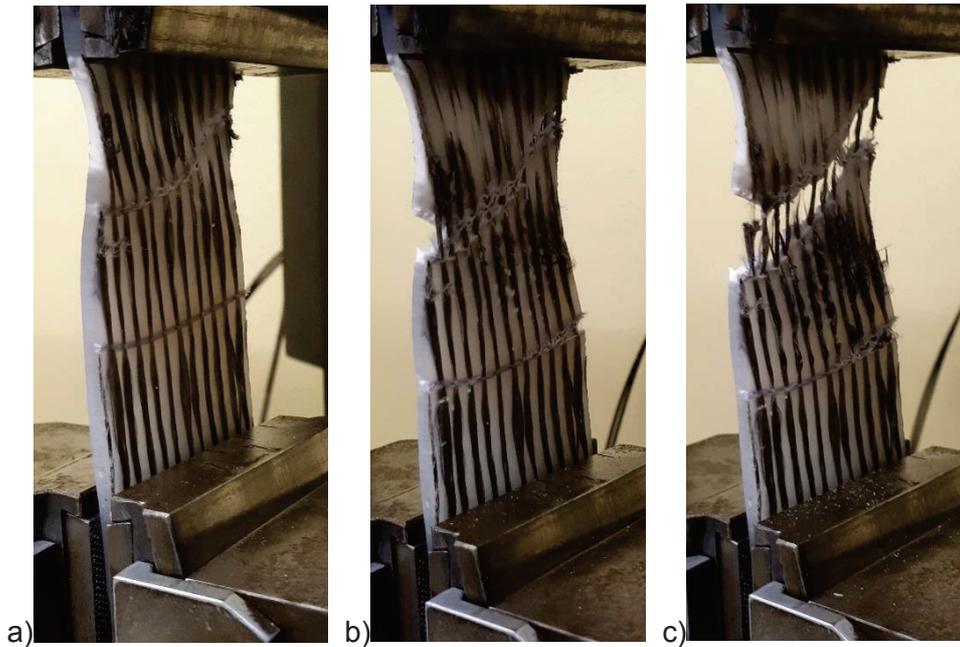


Abbildung 83 Zugprobe ohne Blech im Verlauf des Zugversuchs

Bei der Probe ohne Blech kam es zunächst zu einer Dehnung der Matrix (Abbildung 83 a), dann rissen die ersten Fäden und die Matrix schnürte sich ein (Abbildung 83 b). Im Anschluss riss auch die Matrix, jedoch nicht an der Einschnürung, sondern an dem, parallel zur Zugrichtung liegenden, Maschenfaden. An diesem verlief der komplette Riss durch die Matrix. (siehe Abbildung 83 c).

Für alle Proben wurden Kraft-Zeit-Diagramme aufgenommen (siehe Anhang). Über die mehrfache Anwendung eines Meridian-Filters konnten die Kurven geglättet und Kraftspitzen herausgefiltert werden.

Der Meridian-Filter berechnet den Meridian (auch Zentralwert genannt) aus einer Gruppe von Zahlen. Hierfür werden die Werte in der Zahlengruppe zunächst aufsteigend sortiert. Im Anschluss wird der mittig liegende Wert ermittelt. Bei drei Werten entspricht der Meridian also dem 2. Wert der Liste, bei fünf Werten dem 3. Wert und bei sieben Werten dem 4. Bei einer geraden Anzahl an Werten wird der Meridian aus dem Mittelwert der beiden Werte gebildet, die um die „Mitte“ der Liste herum liegen. Bei sechs Werten in einer Liste ergibt sich der Meridian also aus dem Mittelwert von dem 3. und 4. Wert. Der Vorteil dieses Filters ist, dass Spitzen in einer Wertkette nicht mit einfließen und zum Glätten reale Werte heran gezogen werden.

Um die Auswirkung des Filters zu verdeutlichen, folgt exemplarisch für diesen Schritt zunächst das ungefilterte Kraft-Zeit-Diagramm der Zugprobe 4 und anschließend das gefilterte (vgl. Abbildung 84 & Abbildung 85).

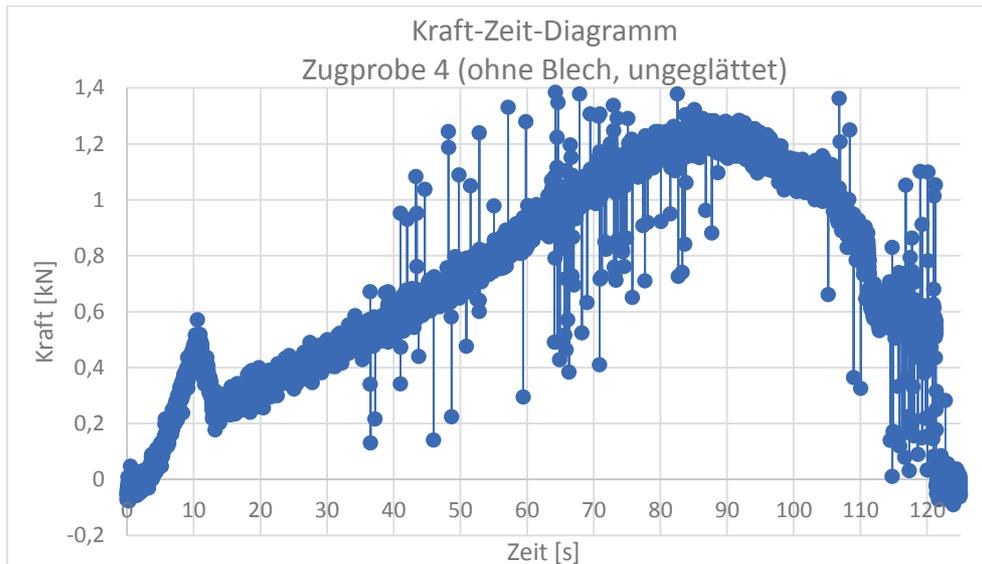


Abbildung 84 Ungelättete Kraft-Zeitkurve aus Zugversuch

Deutlich bei der ungeglätteten Kurve zu erkennen sind die Ausreißer insbesondere im mittleren Bereich der Kurve. Sie kommen durch Messfehler der Maschine zustande. Diese entstehen, wenn es zu einem plötzlichen Kraftabfall durch Risse in der Probe kommt. So entstehen auch die negativen Werte zu Beginn und am Ende der Messung.

Am Anfang war die Probe noch sehr weich, wodurch keine messbare Kraft in sie übertragen werden konnte. Zum Ende der Messung war die Probe komplett gerissen und nahm keine Kraft mehr auf. Das Computerprogramm, welches die Kurve aufnimmt, versucht in einem solchen Fall nachzujustieren und „sucht“ nach einem messbaren Wert. Dies resultiert in sehr niedrigen oder sehr hohen Werten im Diagramm und ist bei allen vier Kurven zu beobachten. Die negativen Werte werden nicht gefiltert.

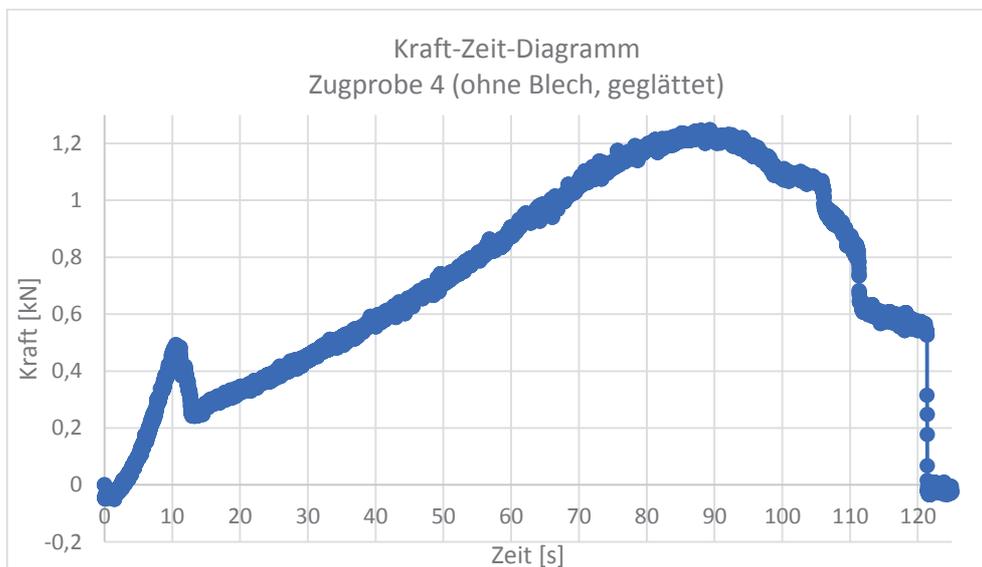


Abbildung 85 Geglättete Kraft-Zeitkurve aus Zugversuch

Die geglättete Kurve weist keine Ausreißer mehr auf. Der Verlauf ist eindeutiger und es kann eine klare Aussage über Kraftspitzen getroffen werden. Diese geglätteten Werte dienen als Basis für die Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Diagramme.

Die Spannung  $\sigma$  konnte mit der Formel 4

$$\sigma = \frac{F_Z}{S_0} \quad (4)$$

berechnet werden, wobei

$$S_0 = b * d_r \quad (5)$$

Dabei gibt  $b$  die Breite und  $d_r$  die durchschnittliche Dicke der Probe an.  $F$  gibt die Kraft, mit der an der Probe gezogen wird in Newton an.

Die Dehnung  $\varepsilon$  ergibt sich aus dem Verhältnis von der Längenänderung  $\Delta L$  zur Ausgangslänge  $L_0$ .  $\Delta L$  konnte aus dem Verfahrenweg der Zugmaschine ermittelt werden.

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

Die Dehnung wird üblicherweise in Prozent angegeben. Hierfür gilt

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * 100 \quad (7)$$

Alle Kalkulationen sowie die Erstellung der Diagramme erfolgten in Excel (siehe Anhang).

Um die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aller Proben übersichtlich vergleichen zu können, wurden sie in einem Diagramm zusammengefasst (siehe Abbildung 86).

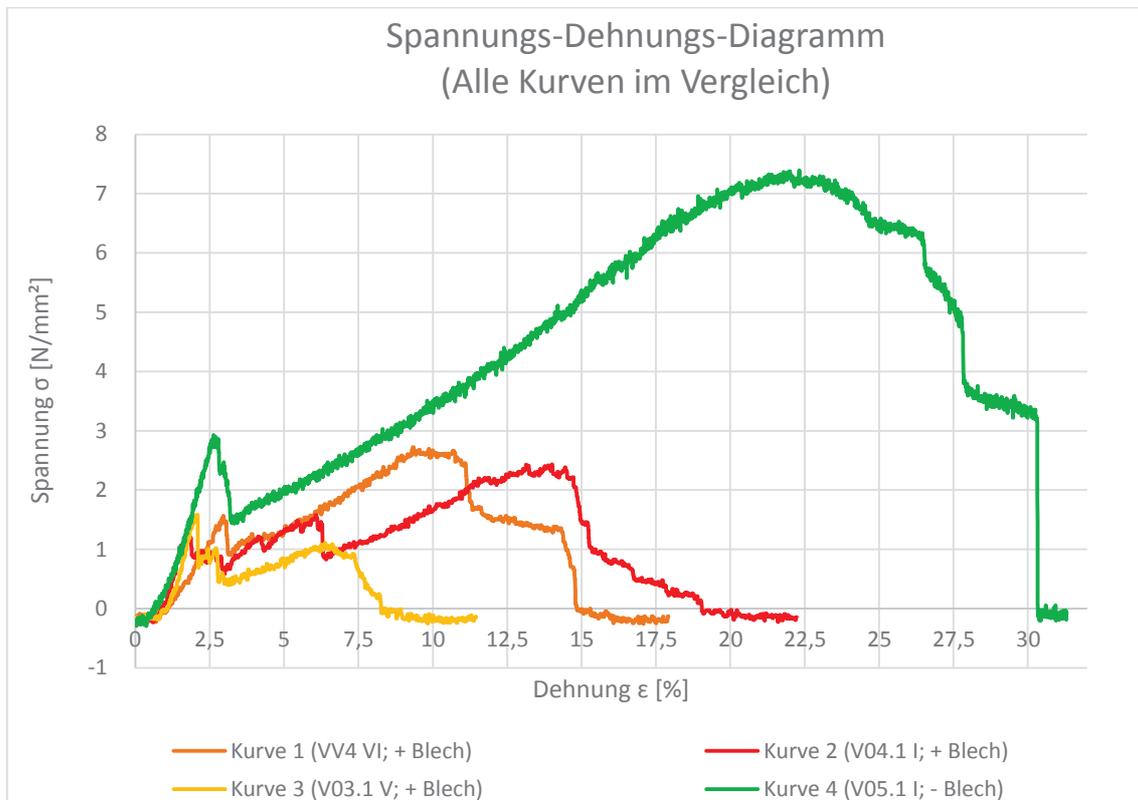


Abbildung 86 Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus allen Zugversuchen

In der nachfolgenden Tabelle werden die markantesten Punkte der Kurvenverläufe für jede Probe aufgeführt.

Tabelle 20 Markante Punkte der Kurvenverläufe im Spannungs-Dehnungsdiagramm

Probe	1. Maximum		1. Minimum		2. Maximum		2. Minimum		3. Maximum	
	$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]								
VV4 VI	2,9	1,5	3,3	0,9	10,0	2,6	-	-	14,3	1,3
V04.1 I	1,8	1,2	2,9	0,6	6,1	1,5	6,4	0,8	14,0	2,4
V03.1 V	2,1	1,6	2,1	0,7	2,7	1,0	3,1	0,5	6,4	1,0
V05.1 I	2,7	2,8	3,4	1,4	21,9	7,2	-	-	-	-

Die negativen Werte der Kurven zu Beginn und am Ende ergeben sich aus dem oben beschriebenen Messfehler und sind nur der Vollständigkeit halber mit im Diagramm enthalten. Sobald die Messung  $\sigma=0$  erreicht hat, ist sie komplett gerissen. Alle nachfolgenden Werte sind daher hinfällig.

Auffällig ist, dass das 2. Maximum vor dem dauerhaften Abfall der Kurve bei allen Proben über einen längeren Bereich nahezu konstant gehalten wurde. In diesem Bereich kam es zu der Belastung der Schweißnaht und dem Abschälen des Kunststoffes. Zudem kommt es bei Kurve 2 und 3 zu einem zackig ansteigenden Kurvenverlauf nach der ersten Spannungsspitze, was an dem Reißen der Fäden und der Matrix liegt.

## 7 Auswertung

Im Anschluss an die Versuche zu Laminieren und Umformen, werden die Ergebnisse an dieser Stelle zusammengefasst und dargestellt.

### 7.1 Herstellung des Laminats

Die Versuche zum Laminieren haben gezeigt, dass es möglich ist, mit einfachsten Mitteln ein Metallgewirk mit einem thermoplastischen Kunststoff zu verbinden.

Dabei wurden jedoch auch immer wieder die Abstandshalter mit in den Kunststoff eingegossen und mussten aufwendig entfernt werden. Das Fließen der Schmelze unter den Abstandshaltern hindurch führte außerdem zu dünnen Filmen aus KS auf den MeTHa-Blechen (siehe Abbildung 87). Zudem kam es durch die losen Teile des Öfteren zu einem Verrutschen derselben. Das Granulat neigte außerdem dazu sich an genau den Stellen abzusetzen, wo es störend war, beispielsweise auf den Abstandshaltern.



Abbildung 87 Unsauberes, entformtes Laminat

Die Laminare sahen unsauber aus und mussten vor der Weiterverarbeitung erst „gereinigt“ werden. Alle losen Teile, wie die dünnen Filme, sowie die überstehenden Ränder wurden entfernt. Der dadurch entstandene zusätzliche Arbeitsaufwand kostete viel Zeit.

Des Weiteren lag das Gewirk nicht mittig in dem Kunststoff ein, da das Distanzblech das Band nicht ausreichend auf Spannung halten konnte und das Gewirk beim Laminieren darauf auflag. So konnte keine Schmelze unter die Fäden fließen, weshalb diese nicht sauber eingebettet wurden. Ein Weglassen des Distanzbleches hat nicht zu merklichen Verschlechterungen, aber auch nicht zu Verbesserungen bei der Fasereinbettung geführt. Die Granulatmenge musste jedoch deutlich erhöht werden, um den zusätzlichen Platz zu füllen.

Eine zu geringe Menge Granulat führte in jedem Fall zu störenden großen Gaseinschlüssen, die auch die Oberflächenqualität beeinträchtigten.

In kommenden Versuchen sollten andere Methoden versucht werden, die zum Ziel haben, weniger Schmelzeaustritt aus der Form zu erreichen und das Gewirk mittig in dem KS zu platzieren. Es muss auch ein Weg gefunden werden, die Gaseinschlüsse im KS zu minimieren und zudem die gewünschte Laminatdicke zu erreichen, ohne dass übermäßig viel Granulat verschwendet wird. Dazu könnten beispielsweise PP-Platten statt Granulat verwendet werden.

## 7.2 Bewertung der Proben

Um die Proben in brauchbar oder unbrauchbar unterteilen zu können, wurden die Bewertungskriterien aus Kapitel 6.2.1 auf ihren Einfluss hinsichtlich des geplanten Endprodukts „Kabelhalter“ untersucht. Ein stark negativer Einfluss auf das Endprodukt, wie ihn Risse in der Matrix oder in den Fäden haben, führte zum Ausschuss der Probe. Nur schwach negative Kriterien wie geringes Fließen, konnten geduldet werden. Die einzelnen Stufen (Stufe 1- sofortiger Ausschuss, Stufe 6- wird hingenommen) wurden einer Farbe zugeordnet, wie nachfolgend in Tabelle 21 dargestellt:

Tabelle 21 Bewertungsranking der Einflusskriterien in die Probenbewertung

Verformung					Stufe
rein elastisch				rein plastisch	3
1	2	3	4	5	
Weißbruch					5
kein			starker		
1	2	3	4		
Rissbildung					1
keine				starke	
1	2	3	4	5	
Fließen im Einzugsbereich					6
starkes			kein		
1	2	3	4		
Abscheren des KS an Blechkante					2
kein			starkes		
1	2	3	4		
Einschnüren des KS durch Fäden					4
kein			starkes		
1	2	3	4		
Gerissene Fäden					1
kein			stark		
1	2	3	4		

Im Anschluss wurden die Proben bewertet. Hierfür wurden die Beurteilungen der einzelnen Kategorien immer dann farbig markiert, wenn die Probe für die jeweilige Kategorie als schlecht bewertet wurde. Im Anschluss wurde die jeweils negativste Beurteilung mit dem größten Einfluss als Ausschusskriterium gewertet und die Probennummer dementsprechend farbig markiert, um ihre Bewertung zu visualisieren (siehe Tabelle 21). Proben, bei denen keine der

Bewertungen deutlich im schlechten Bereich lag, wurden mit dunkelgrün markiert, da keine der Beurteilungen zum vorzeitigen Ausschuss führte.

Tabelle 22 Bewertung der umgeformten Proben anhand der Beurteilungskriterien

Proben Nr.	Beurteilung							Aus- schuss bei Stufe
	Verfor- mung	Weiß- bruch	Rissbil- dung	Fließen im Einzugsbe- reich	Abscheren des KS an Blechkante	Einschnü- ren des KS durch Fäden	Geris- sene Fäden	
V05.1 V	2	2	3	3	1	1	3	3
VV4 III	2	3	2	3	2	2	3	3
V03.2 IV	-	-	5	-	-	-	-	1
V06.1 VIII	3	3	2	4	2	1	4	1
V03.2 III	4	2	3	2	4	2	2	2
V06.1 IV	4	3	2	3	4	1	2	2
V06.1 II	3	2	2	4	2	1	3	6
V03.1 IV	2	2	2	2	2	1	1	3
V05.1 IV	3	2	1	3	3	3	3	6
VV4 I	3	3	3	4	1	2	1	6
V03.2 II	3	2	3	3	2	1	4	1
V06.1 I	3	3	1	3	2	2	3	6
V06.1 III	3	3	1	3	3	2	2	6
V04.2 III	3	3	4	3	2	4	2	1
V04.2 VIII	-	-	5	-	-	-	-	1
V03.2 V	4	2	2	3	3	2	1	6
VV4 V	3	2	4	3	1	1	3	1
V05.1 VI	4	2	2	3	3	4	3	4
V06. VI	5	2	1	2	1	1	1	6
V04.2 VII	4	2	3	3	4	2	3	2
V04.2 VI	4	2	2	2	4	2	2	2
V05.1 III	4	2	1	2	3	3	2	6
V03.2 I	3	2	2	3	3	2	4	1
V03.1 II	4	1	2	3	3	2	1	6
V03.1 III	4	2	3	3	1	1	2	6
VV4 II	4	2	2	2	1	1	3	6
V04.2 V	4	2	3	3	3	2	2	6
V03.2 VII	4	3	3	2	3	2	3	6
V03.2 VI	4	3	2	4	4	2	2	2
V04.2 I	5	2	4	3	1	2	2	1

Die farbige Markierung der Probennummer ist wichtig, um auf den ersten Blick unterschieden zu können, ob die Probe gut oder schlecht war.

Um diese Bewertung in einen Bezug zu den ermittelten Kriterien vor dem Umformen (vgl. Tabelle 13 & Tabelle 14; Kapitel 6.1.1) zu setzen, wurde die Zusammenführung in einem Diagramm gewählt, wie in Abbildung 88 gezeigt. Auf der x-Achse ist die Bewertung der Fasereinbettung vor dem Umformen aufgetragen, auf der y-Achse die Kristallstruktur.

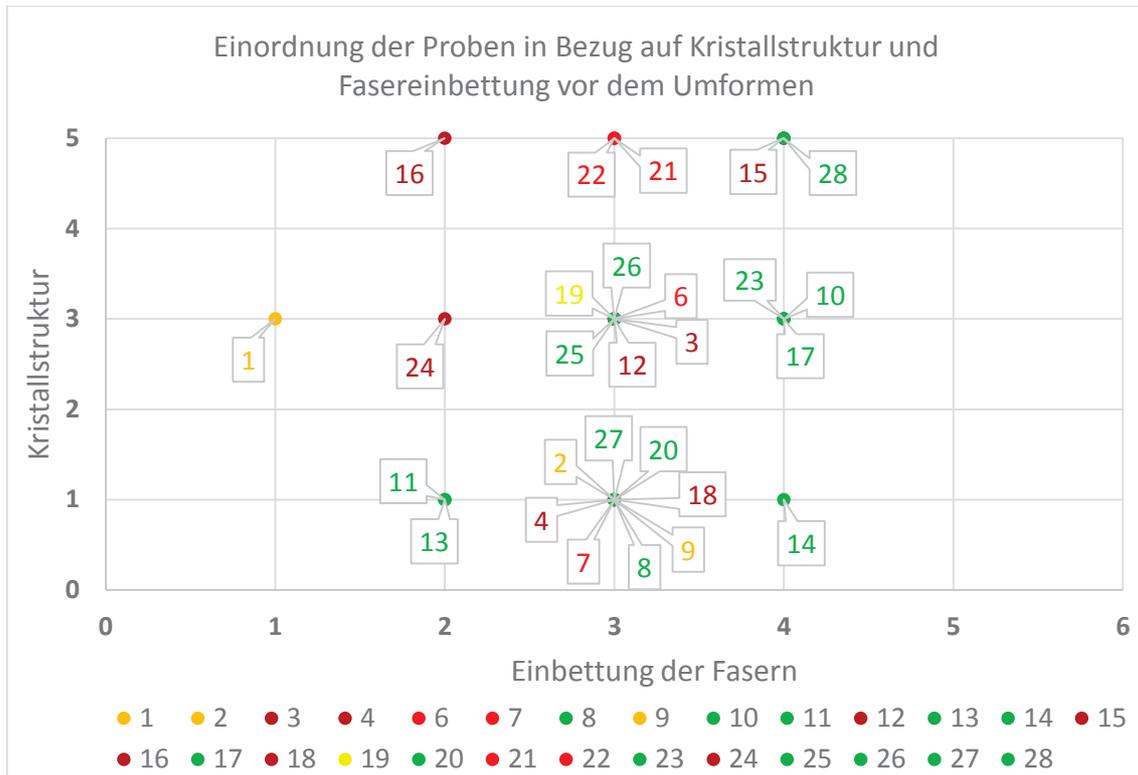


Abbildung 88 Bewertete Proben in Bezug zu Kristallstruktur und Fasereinbettung

Die Anordnungen der Proben innerhalb der entstehenden Matrix weisen auf den ersten Blick keine Tendenz zu einer bestimmten Verteilung auf. Auffällig ist jedoch, dass viele Proben vor dem Umformen nur eine mittelmäßige Fasereinbettung aufwiesen. Dennoch kommt es in diesem Bereich nicht zu übermäßig vielen schlecht bewerteten Proben, was dafür spricht, dass die Fasereinbettung für die Umformung in erster Linie keine problematische Rolle spielt.

Problematisch bei dieser Form der Darstellung ist, dass nur die Bewertung auf gut oder schlecht mit einfließt. Die Gründe für diese Bewertung werden nur dann ersichtlich, wenn die Grafik in Zusammenhang mit Tabelle 22 betrachtet wird. Zudem müssen für eine aussagekräftige Bewertung auch andere Kriterien, wie beispielsweise die Lage der Probe in dem Werkzeug, berücksichtigt werden. Nur mit der Summe aller Kriterien kann schlussendlich eine Aussage darüber getroffen werden, unter welchen Bedingungen eine komplikationslose Umformung mit gutem Endergebnis möglich ist.

Diese Zusammenführung wird in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgenommen.

Auffällig war bei der Herstellung des Laminats, dass die berechnete Dicke für die Laminat außer in den Vorversuchen immer deutlich unter der tatsächlichen Dicke lag. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die von oben auf die Schmelze gedrückte Platte (vgl. Kapitel 5.2) durch den Abstandshalter nach unten hin begrenzt ist. Wenn das Granulat flüssig ist und zu fließen anfängt, wird kein Druck mehr auf die Schmelze ausgeübt, sobald das Blech in Kontakt mit dem Abstandshalter kommt. Dieser Druckverlust könnte auch ursächlich für den hohen Anteil an Gaseinschlüssen in den Laminaten sein. Diese führen, durch Verringern der Dichte des Kunststoffes, zu einem zusätzlichen Volumeneintrag in das Laminat

### 7.3 Verzug

Beim Laminieren kam es zu deutlichem Verzug der Paneele beim Abkühlen (siehe Abbildung 89). Der Verzug wird dadurch verursacht, dass das Gewirk nicht mittig in der PP Schmelze einlag und es somit zu einer Masseanhäufung an der Oberseite des Laminats kam. Da das PP mit  $\alpha_{PP}=150 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (vgl. Tabelle 1) einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten als Stahl ( $\alpha_{Stahl}=16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [22]) hat, dehnt es sich bei der Erwärmung stärker aus als das Gewirk. Dadurch nimmt es mehr Raum ein. Beim Abkühlen zieht es sich dementsprechend stärker zusammen, als das Gewirk auf der Unterseite. Durch die Anhäufung der Masse kommt es zu einer ungleichmäßigen Schwindung an der Ober- und Unterseite des Laminats (PP oben, Gewirk unten), die den Verzug verursacht.

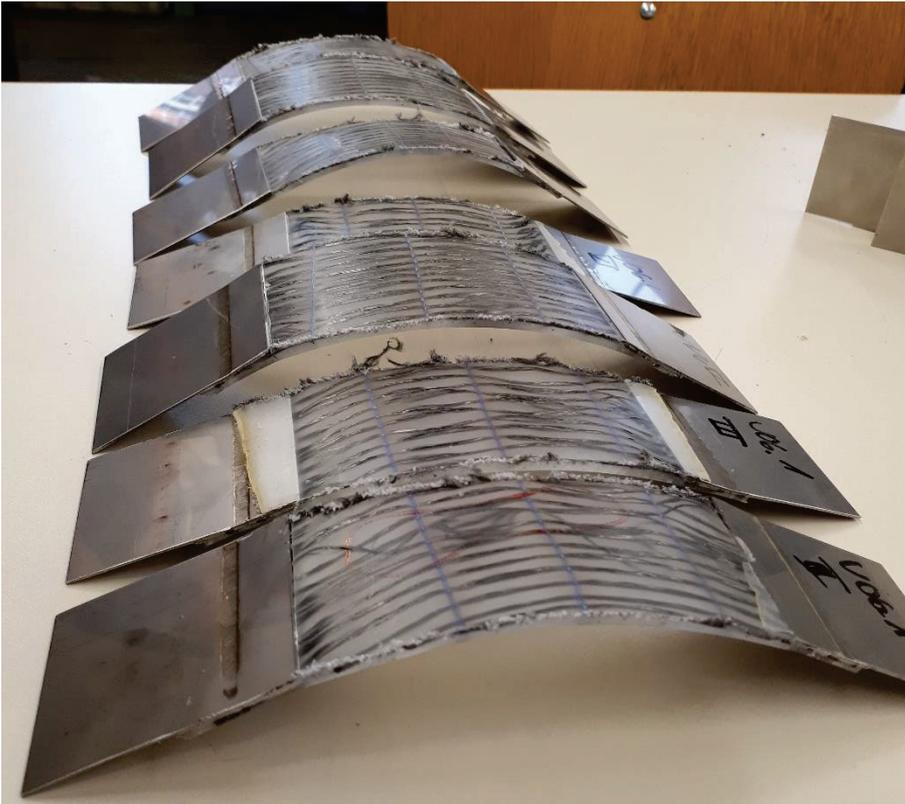


Abbildung 89 Aufgereichte umgedrehte Proben

Dieser Verzug war auch beim Umformen zu beobachten. Ist das umgeformte Werkstück noch warm dem Werkzeug entnommen worden und dann an der Luft ausgekühlt, hat es sich verzogen. Dies konnte dadurch verhindert werden, dass das Werkstück bis zum vollständigen Erkalten im WZ belassen wurde (vgl. Abbildung 90 & Abbildung 91).



Abbildung 90 Umgeformte Probe erkaltet an Luft



Abbildung 91 Umgeformte Probe erkaltet im Werkzeug

Es macht zudem einen Unterschied, ob mit oder gegen die Verzugsrichtung umgeformt wird. Beide oben abgebildeten Proben wurden in Richtung des materialbedingten Verzugs verformt. Das heißt, dass die gegebene Geometrie ausgenutzt und die Probe mit dem Gewirk nach unten in das WZ eingelegt wurde. Die Verformung ist sehr deutlich. Wurde die Probe jedoch mit dem Gewirk nach oben eingelegt, war die Verformung trotz Abkühlung im WZ, deutlich geringer, wie in Abbildung 92 ersichtlich.



Abbildung 92 Umgeformte Probe mit Gewirk oben

Es ist also wichtig, die Geometrie von MeTHa bei der Umformung zu berücksichtigen, sofern das Gewirk nicht mittig in der Matrix einliegt. Wenn beidseitig des Gewirks die Matrix zu gleichen Anteilen verteilt ist und es zu keiner Masseanhäufung auf einer Seite kommt, sollte der Verzug keine Rolle mehr spielen.

## 7.4 Kristallstruktur

Die Kristallstruktur der meisten Paneele war eher amorph. Bei den Paneelen V04.1 und V04.2, die verhältnismäßig langsam abgekühlt wurde, wies das Laminat jedoch eine kristalline Struktur auf. Durch den langen Abkühlprozess, hatten die Molekülketten ausreichend Zeit, sich in eine geordnete, dicht gepackte Struktur zu legen. Diese ließ sich, aufgrund ihrer Sprödigkeit, besonders gut spanend bearbeiten bzw. trennen. Die Paneele mit amorpher Struktur waren hingegen schwerer zu bearbeiten, da die Struktur eher zäh ist.

Beim erneuten Erwärmen der Proben im Ofen auf Schmelztemperatur, kam es bei den kristallinen Proben zu einer Änderung in der Kristallstruktur. Durch die Zugabe von Energie in den KS haben die Molekülketten wieder eine ungeordnete Lage eingenommen. Durch das schnelle Abkühlen während des Prozesses blieb die Kristallstruktur im Anschluss amorph, auch bei den zuvor kristallinen Proben.

Auf die Umformbarkeit hat sich die kristalline Struktur tendenziell negativ ausgewirkt. Proben, die einen hohen kristallinen Anteil aufwiesen, neigten eher zu Rissbildung, als Proben, bei denen der amorphe Anteil überwog.

Dies wird insbesondere deutlich, wenn man alle Proben miteinander vergleicht, bei denen es beim Umformen zu starker Rissbildung in der Matrix kam:

*Tabelle 23 Vergleich der Kristallstruktur stark rissiger Proben vor und nach Umformen*

Probennummer	Kristallstruktur	
	vor Umformen	nach Umformen
V03.2 IV	3	2
V04.2 III	5	4
V04.2 VIII	5	1
VV4 V	1	1
V04.2 I	5	4

Von fünf auffälligen Proben haben drei vor dem Umformen eine kristalline Kristallstruktur aufgewiesen. Nach dem Umformen hat sich die Struktur bei allen Proben um eine Stufe hin zu amorph verschoben, sofern sie nicht schon komplett amorph waren.

Diese Tendenz legt die Vermutung nahe, dass bei der Umformung von MeTHa vorzugsweise eine möglichst amorphe Kristallstruktur vorliegen sollte, da eine kristalline eher zur Rissigkeit neigt. Das Trennen ist jedoch, im kristallinen Bereich vorteilhafter. Die Struktur sollte von kristallin in amorph übergehen, wenn der Kunststoff lange genug erwärmt wird. Um eine absolute Aussage hierrüber zu treffen, sind jedoch ausführlichere Versuche notwendig, die nicht zum Rahmen dieser Thesis gehören. Die geringe Anzahl an Proben mit kristallinem Gefüge, die im Zuge dieser Thesis umgeformt wurden, kann nur Aufschluss über einen Trend geben.

## 7.5 Verarbeitung

Die Verarbeitung von MeTHa erfolgte in zwei Schritten, Trennen und Umformen. Beide Verfahren erwiesen sich grundsätzlich als machbar, es kam jedoch auch zu Einschränkungen durch die gewählten Prozesse.

### 7.5.1 Trennen

Wie schon in Kapitel 6.1.1 sowie Kapitel 7.4 erwähnt, ließen sich die Paneele mit kristalliner Struktur besser trennen, als die mit amorpher Matrix. Dies liegt vor allem an der jeweiligen Zähigkeit, die durch die Kristallstruktur gegeben ist. Dennoch ist das Sägeblatt der Bandsäge unabhängig von der Kristallstruktur gerissen. Dies lässt sich vor allem auf die unterschiedlichen Festigkeiten von KS und Metall zurückführen, die das Sägeblatt stark belastet haben. Insbesondere der Mischbereich im Übergang von Kunststoff-Blech-Anteil zu dem reinen Blechteil neben der Schweißnaht erwies sich als problematisch (siehe Abbildung 93).

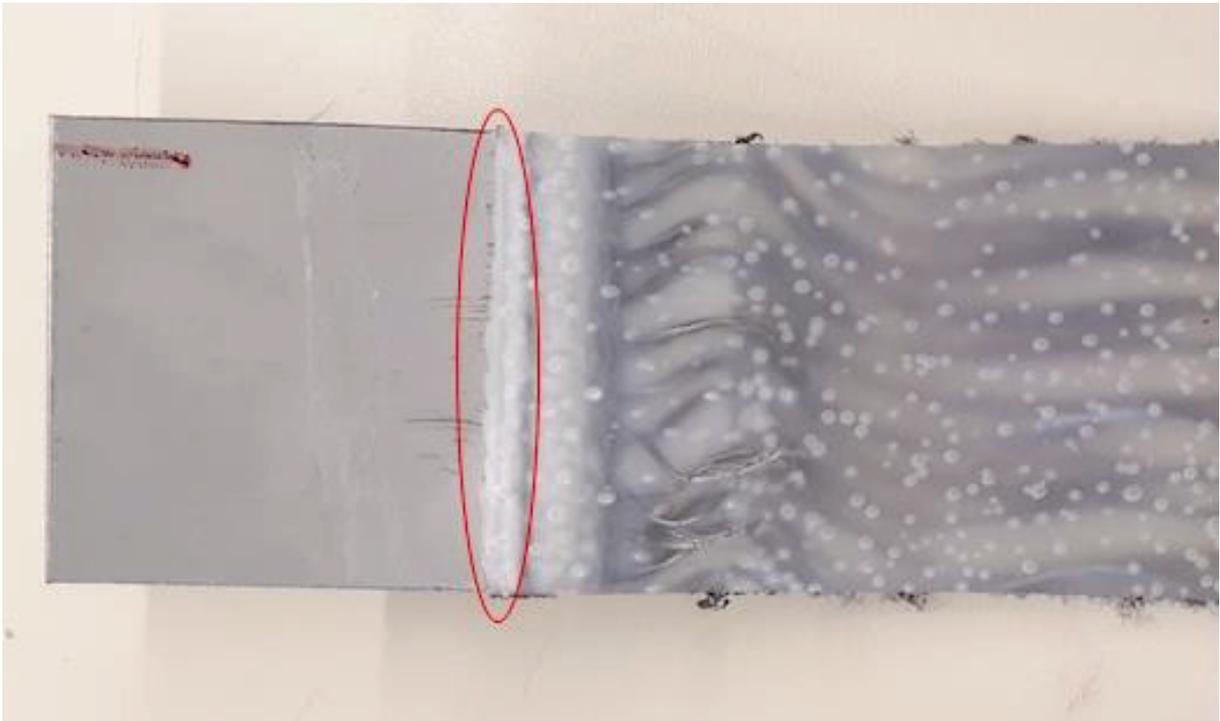


Abbildung 93 Beim Sägen problematischer Bereich

Eine weitere Einschränkung gab es dadurch, dass der MeTHa-Anteil, der im Eingriff der Säge war, immer Kontakt zu der Bodenplatte der Säge haben musste. Bei Kontaktverlust wurde das Fügeteil in Schwingung versetzt und es kam zum so genannten „Flattern“. Für Fügeteil und Säge stellt dieser Effekt ein Risiko dar, da durch ihn zum einen eine zusätzliche hohe mechanische Belastung entsteht, aber auch deutlich mehr Wärme durch die Schwingung und die hohe Reibung in Sägeblatt und Fügeteil eingebracht wird. Durch diese Kontaktbedingung und einen niedrigen Anschlag, an den das Fügeteil nicht komplett angelegt werden konnte, sind alle Proben nicht genau gerade gesägt worden.

Die Bandsäge erwies sich zwar als grundsätzlich geeignet um MeTHa zu trennen, der Prozess sollte aber optimiert werden, da das Ergebnis nicht optimal war.

Eine Möglichkeit, den Prozess zu optimieren, wäre die Verwendung härterer Sägeblätter, bei denen die Schweißnaht nicht die Schwachstelle darstellt. Zudem sollte der Anschlag erhöht werden, sodass das Füge teil auf seiner ganzen Länge daran angelegt werden kann.

Die bessere Optimierungsalternative wäre die Verwendung eines anderen Trenn-Prozesses. Das Wasserstrahlschneiden ist besonders geeignet für Faserverbundstoffe. Da PP durch Wasser nicht beeinträchtigt wird und es zu keinem erhöhten Werkzeugverschleiß durch Mischstrukturen kommen kann, sollte dieses Verfahren jedem Trennverfahren mit direktem Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück vorgezogen werden.

### 7.5.2 Umformen

Das Umformen der Proben erwies sich als grundsätzlich möglich. Einige grundsätzliche Voraussetzungen sind für die Umformung jedoch von Bedeutung.

Entscheidend für die Umformbarkeit ist die Temperatur des Werkstücks. Der KS muss ausreichend weich sein, um bruchfrei umgeformt werden zu können. Auch die Kristallstruktur sollte sich eher im amorphen Bereich befinden, um Risse zu vermeiden.

Die Einbettung der Fasern ist nicht von Bedeutung für die Umformbarkeit, da nicht das Gewirk, sondern die Matrix verformt wird. Die Fasern tragen lediglich zur späteren Festigkeit des Bauteils bei. Eine deutlich oberflächliche Lage führt jedoch beim Verformen zum Einschnüren des KS, da dieser deutlich weicher ist als die Fäden. Die Fäden werden weniger verformt, als viel mehr in eine Form gerichtet, wodurch sie auf Zug belastet werden. Durch diese Zugbeanspruchung verdrängen sie beim Umformen die Matrix.

Unbedingt beachtet werden muss, dass es nicht zu einer Umformung über die Blechkante kommt. Ist dies der Fall, wird der KS an der Kante abgeschert, wie deutlich in Abbildung 94 sichtbar.



Abbildung 94 An Blechkante abgescherteter Umformbereich

Stattdessen sollte das Blech entweder deutlich im Umformbereich liegen oder deutlich außerhalb. So wird der KS nicht über die scharfe Kante gezogen. Dies wird bei den Proben deutlich, die deutlich zur Mitte verschoben umgeformt wurden (siehe Abbildung 95).



Abbildung 95 Umgeformte Probe mit deutlich verschobenem Zugbereich

Die Verformung lief hier sauberer ab, als bei den Proben, bei denen die Blechkante im direkten Zugbereich lag. Dennoch wird das Blech, wenn es mit umgeformt wird, eher weggedrückt. Dadurch entsteht eine scharfe Kante. Sollte diese Konfiguration für spätere Prozesse gewählt werden, sollte eine Form verwendet werden, in die MeTHa gedrückt wird. So bleibt das Blech in Kontakt mit der Matrix und wird nicht abgedrückt. Alternativ könnte der Hybridteil, in dem Blech und Matrix + Gewirk überlappen, deutlich verlängert werden, sodass das Blech in den Umformungsbereich hereinragt. So würde es mit umgeformt werden und bliebe in Kontakt mit der Matrix.

Die händische Umformung hat gezeigt, dass die erwärmte Matrix ohne viel Kraftaufwand in jede beliebige und geometrisch mögliche Form gebracht werden kann. Es ist also nicht notwendig, mit einer Maschine viel Kraft auf das Formteil aufzubringen, sofern es weich genug ist. Zudem ist die Umformung nicht auf eine bestimmte Geometrie beschränkt, sondern kann vielmehr nahezu frei gestaltet werden. Dabei berücksichtigt werden muss jedoch, dass das Gewirk nur zu einem geringen Anteil dehnbar ist. Es sollte bei der Formgebung also darauf geachtet werden, dass dem Gewirk genug Raum zum Gleiten innerhalb der weichen Matrix gegeben wird. Nur dann kann es sich der angestrebten Form ebenfalls anpassen und das Fertigteil in bestmöglicher Weise verstärken.

Durch den Zugversuch wurde klar, dass die Schweißnaht die schwächste Stelle von MeTHa ist, da alle Proben mit Blech dort gerissen sind. Das spricht deutlich für die Verbindung zwischen Gewirk und Matrix. Das Abscheren an der SN sollte jedoch in Zukunft minimiert werden. Schon beim Sägen wiesen einige Proben eine Schwachstelle an der laminierten Naht auf, die auch beim Umformen zum Abreißen in dem Bereich führte. Die Naht hat entweder das Gewirk zu stark beschädigt, dass es nicht mehr tragfähig in dem Bereich ist oder die Naht war nicht tief genug. In diesem Falle wäre das Gewirk nicht ausreichend mit dem Blech verbunden. Eine genauere Untersuchung der SN ist jedoch nicht Teil dieser Thesis und wird daher an anschließende Forschungsarbeiten empfohlen.

Die Zugkurven der Proben mit Blech sind alle sehr unterschiedlich im Verlauf. Dies liegt vor allem an der SN, die unterschiedlich stark belastet wurde. Zudem kam es durch den leichten Versatz während des Ziehens aufgrund des Bleches zu geringen Scherkräften. Diese haben den Verlauf der Kurven zusätzlich beeinflusst. Bei der ohne Blech eingespannten Probe wird direkt an der Matrix gezogen. Scherkräfte konnten so ausgeschlossen werden. Zudem wird

nicht die Schweißnaht getestet, sondern nur der Hybridanteil bestehend aus Kunststoff und Gewirk. Der Kurvenverlauf ist hier klarer. Da bei  $\sigma=2,8\text{N/mm}^2$  die Probe reißt, sollte bei der Umformung darauf geachtet werden, diesen Wert nicht zu überschreiten. Da die Probe während des Ziehens allerdings abkühlte und somit steifer und spröder wurde, kann dieser Wert nur als tendenzieller Richtwert dienen. Ist die Probe länger weich bzw. wird länger auf einer höheren Temperatur gehalten, sind die Spannungen in dem Material deutlich geringer. Dann muss berücksichtigt werden, dass sich der Kunststoff deutlich zäher verhält als die Stahlfäden des Gewirks.

## 8 Diskussion

Die Auswertung hat gezeigt, dass generell die Herstellung und Umformung von MeTHa möglich ist. Die Ergebnisse der Versuche zeigen aber auch, dass für ein optimales Ergebnis und den Einsatz als Serienprodukt die Herstellungs- und Umformungsbedingungen verbessert und auf einen reproduzierbaren Standard gebracht werden müssen.

### 8.1 Zusammenführung der Erkenntnisse

Sofern die Rahmenbedingungen (Temperatur, Kristallstruktur, Form) entsprechend angepasst werden, ist MeTHa in der Regel umformbar. MeTHa ist somit grundsätzlich für die Herstellung von Kabelhaltern geeignet. Die Form der Halter sollte dem Material aber insofern entgegenkommen, als dass dieses bei der Herstellung nicht auf Druck beansprucht und das Gewirk keinen starken Zugkräften ausgesetzt wird. Optimal wäre eine einfache eckige Geometrie, wie beispielsweise die in Kapitel 2.1 gezeigten geraden Kabelrinnen (siehe Abbildung 4). MeTHa könnte erwärmt und, wie ein Blech, umgebogen werden (siehe Abbildung 96).

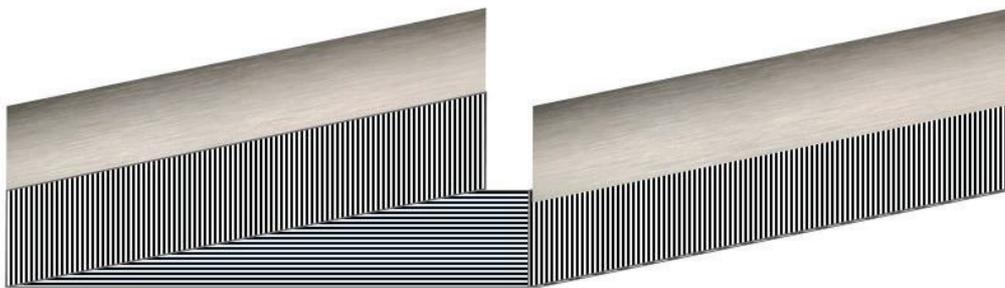


Abbildung 96 Prinzipskizze für gerade Kabelrinne aus MeTHa

Der Radius der Kanten sollte möglichst groß gehalten werden, um die Fasern nicht zu stark zu belasten. Der Krafftfluss in den Fasern unter Belastung würde durch einen großen Radius ebenfalls unterstützt.

Diese Art der Herstellung hätte den Vorteil, dass die Schweißnähte nicht belastet werden. Zudem könnten unter Umständen schon bestehende Produktionslinien z.B. für die Blechumformung verwendet werden. Es müssten lediglich Heizelemente in die Prozesskette implementiert werden, die MeTHa auf Umformtemperatur bringen. Auch Kühlelemente, für ein schnelles Auskühlen der Formteile nach ihrer Umformung, müssten evtl. angebracht werden. Zudem müssten die Transportwege beschleunigt werden, damit die erwärmten MeTHa-Stücken nicht zu stark auskühlen.

Eine andere Alternative wäre ein Umbiegen um ein rundes Element. So könnten Halter ähnlich den Kabelhängern aus Kapitel 2.1 (siehe Abbildung 3) produziert werden. Diese Form würde die natürliche Elastizität des PP ausnutzen. Dass eine solche Formgebung möglich ist, wurde in Kapitel 6.2.2 bei der händischen Verformung bewiesen.

Wird ausreichend schnell gearbeitet und der KS hoch genug erhitzt, sollte ein Umformen z.B. an einer Kantmaschine um einen großen Radius zu keinen Problemen führen. Wichtig ist, dass

nicht über die Blechkante umgeformt wird. Sie muss ausreichend weit von der Umformstelle entfernt sein, um ein Abscheren und so eine Zerstörung des Bauteils zu verhindern.

Eine Form, wie sie von der Automobil- oder Bauindustrie verwendet wird (siehe Abbildung 1 & Abbildung 2) ist nicht möglich, aber auch nicht erstrebenswert. Sie würde die Materialeigenschaften von MeTHa (hohe Elastizität, Schweißbarkeit) nicht optimal ausnutzen. Stattdessen könnte die Automobilindustrie eine kleinere Ausführung von Kabelrinnen aus MeTHa verwenden, als sie in der Schifffahrt Anwendung finden könnten. Diese wären auch für den Flugzeugbau interessant. Die Halter müssten allerdings ausreichend groß sein, dass der Schweißprozess nicht zu einem Wärmeeintrag in die Kunststoffmatrix führt. Diese würde dadurch irreparabel geschädigt und das Bauteil stark geschwächt werden.

Für den Gebäudebau ist MeTHa derzeit eher uninteressant, da in dieser Branche nur wenig geschweißt wird. In anderen Bereichen der Branche, wie beispielsweise den Brückenbau, könnten MeTHa-Halter allerdings eine Gewichtsreduzierung der Gesamtkonstruktion ermöglichen.

Die oben genannten Einsatzgebiete erheben verschiedene Anforderungen an das Material. Der in den Versuchen zu dieser Thesis verwendete Thermoplast, Polypropylen, kann dafür durch einen anderen ausgetauscht werden, der diesen Anforderungen entspricht. Die hier angegebenen Parameter wie beispielsweise Schmelztemperatur und Umformtemperatur gelten dann aber nicht mehr. Für alternative Thermoplaste müssten diese Parameter individuell neu ermittelt werden.

Voraussetzung für die Verwendung von MeTHa ist jedoch, dass die Faser mittig in den Kunststoff eingebracht wird. Es muss also ein Herstellungsprozess für MeTHa entwickelt werden, der dies gewährleistet.

Eine Möglichkeit wäre zum Beispiel durch Umspritzen des Halbzeugs gegeben (vgl. Kapitel 2.4.1). Dadurch würden auch Luftblasen reduziert und eine optimale Abkühlgeschwindigkeit zum Erzeugen einer amorphen Kristallstruktur erreicht. Ein Nachteil wäre jedoch die Bauraum-Beschränkung. Werkzeuge von Spritzgussmaschinen können nicht unendlich groß gebaut werden.

Bei einer Herstellung, die an die von Organo-Blechen angelehnt ist (vgl. Kapitel 2.3), würde der Bauraum kein Problem darstellen. Es könnte ein endloser Prozess ablaufen, der beliebig lange Paneele erzeugt. Um solch eine Herstellung weiter zu optimieren, müsste aber auch die Herstellung der Halbzeuge in einem nahezu unendlichen Verfahren ablaufen.

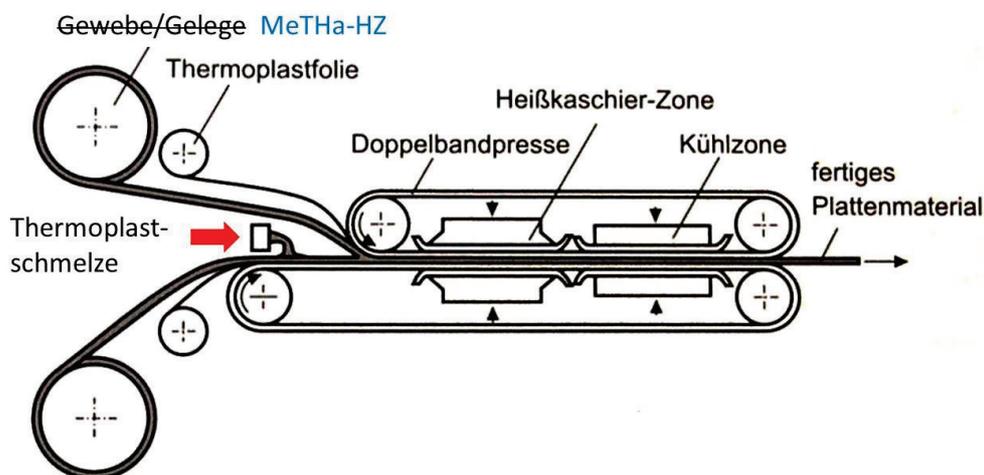


Abbildung 97 Herstellung von MeTHa angelehnt an Organo-Blechproduktion

Eine dritte Möglichkeit wäre das Einarbeiten von PP-Fäden in das Gewirk. Diese könnten in dem Formgebungsprozess aufgeschmolzen werden. So könnte ein Prozessschritt, das Laminieren, übersprungen und so viel Zeit gespart werden. Nachteilig könnte sich bei dieser Lösung jedoch das Verschweißen von Gewirk und Blech miteinander auf die PP-Fäden auswirken. Wird das Blech zu heiß, könnten sie frühzeitig schmelzen und verkleben. Dadurch könnten Lücken in der Matrix von MeTHa entstehen

Für erste Produktionsversuche ist meines Erachtens nach das Laminieren wie bei Organo-Blechen am zielführendsten. Es könnte eine bestehende Produktionsanlage verwendet werden, die halb-manuell mit Halbzeugen bestückt wird. Das Einlegen der HZ müsste per Hand erfolgen, damit sichergestellt wird, dass das Gewirk nirgends hängen bleibt.

Beim Zerteilen der Paneele sollte auf Wasserstrahlschneiden gesetzt werden, auch wenn es bei den Paneelen nach oben genannter Herstellungsweise nicht zum Verzug kommen sollte. Durch Sägen entsteht ein Grat, der vor der Weiterverarbeitung entfernt werden müsste. Das ist ein zusätzlicher Zeitaufwand, der vermieden werden kann. Zudem bleibt die Werkzeugbelastung durch den Kontakt mit dem hybriden Material problematisch. Diese beiden Faktoren würden beim Wasserstrahlschneiden eliminiert. Das Verfahren kann vollautomatisch ablaufen und ist somit auch für die industrielle Herstellung geeignet.

## 8.2 Ausblick

Die Übergabe von MeTHa in die Massenproduktion erfordert jedoch noch einige Forschungsarbeiten. Die theoretischen Erkenntnisse müssen anhand von Laborversuchen bestätigt und erweitert werden, bevor MeTHa an die Industrie übergeben werden kann.

Der erste Schritt würde durch die mittige Einlage des Gewirks in der Matrix beschränkt. Eine Empfehlung für einen entsprechenden industriellen Herstellungsprozess wurde in Kapitel 8.1 bereits gegeben. Für Laborversuche wäre es erforderlich, das Gewirk möglichst straff zu halten, während es mit Schmelze umhüllt wird. Zudem darf es nicht auf einer Unterlage aufliegen, damit die Schmelze von allen Seiten um die Fäden fließen kann.

Im nächsten Schritt müssen die Gaseinschlüsse auf ein absolutes Minimum reduziert werden. Ein Heizschrank mit der Möglichkeit, ein Vakuum zu erzeugen, wäre am besten geeignet. Durch das Vakuum würde die Schmelze von Gasen befreit. Es würde auch helfen, die Fäden durchgängig mit Schmelze zu tränken.

Weiterhin muss die Kristallstruktur der Lamine optimiert werden. Bereits in Kapitel 7.4 wurde aufgeführt, dass es ausführlichen Versuchen zu dem Einfluss der Kristallstruktur auf die Umformbarkeit von MeTHa geben muss. Dafür muss eine gezielte Herstellung von rein kristallinen, teilkristallinen und amorphen Laminen angestrebt werden. Zudem muss herausgefunden werden, welche Prozesszeiten für eine vollständige und optimale Strukturänderung von kristallin/teilkristallin hin zu amorph erforderlich sind, da amorphe Elemente aufgrund ihrer Zähigkeit besser für die Umformung geeignet sind. Im Zuge dieser Versuche sollte auch geklärt werden, wie die Struktur beschaffen sein sollte, um optimale Werte bei der Belastung umgeformter Teile zu erhalten.

Im Folgenden, vierten Schritt, muss der Weißbruch reduziert werden. Dafür reicht evtl. schon eine höhere Temperatur während der Umformung aus. Diese ließe sich durch kürzere Wege zwischen Heizelement und Formwerkzeug erreichen. Durch eine höhere Umformtemperatur könnten auch Risse in der Matrix und im Gewirk reduziert werden. Außerdem würde das Fließen des Materials begünstigt.

Sobald die Optimierung des Materials und der Umformungsparameter zufriedenstellend abgeschlossen sind, sollten alternative Umformungsszenarien erprobt werden. Getestet werden sollte in jedem Fall das Abkanten um einen großen Radius. Auch Tiefziehen mit geraden Konturen und größeren Radien ist im Hinblick auf eine Serienumformung von Relevanz und sollte getestet werden.

Sind ausreichend Erkenntnisse zum Materialverhalten vorhanden und ist MeTHa unter Laborbedingungen maximal optimiert, können erste Prototypen erstellt werden. Vorteilhaft wäre es, dafür bereits Partner in der Industrie zu gewinnen, die eine kleine Produktionslinie zur Verfügung stellen könnten. Zunächst empfiehlt sich die Herstellung einfacher Konturen wie beispielsweise die in Abbildung 96 gezeigte. Die Prototypen können dann unter realen Bedingungen auf ihre Belastbarkeit getestet werden.

Den Abschluss der Prozesskette bildet die Zertifizierung von MeTHa als Halbzeug für die Herstellung von Haltern durch eine entsprechende Zulassungsstelle wie beispielsweise den TÜV oder den DNV GL. Die Zulassung ist absolut notwendig, um MeTHa in Konstruktionen zu verwenden, Erst, wenn diese vorliegt, kann MeTHa der industriellen Fertigung zugeführt werden.

Die Schritte von MeTHa hin zur Produktionsreife werden in Abbildung 98 noch einmal übersichtlich zusammengefasst.

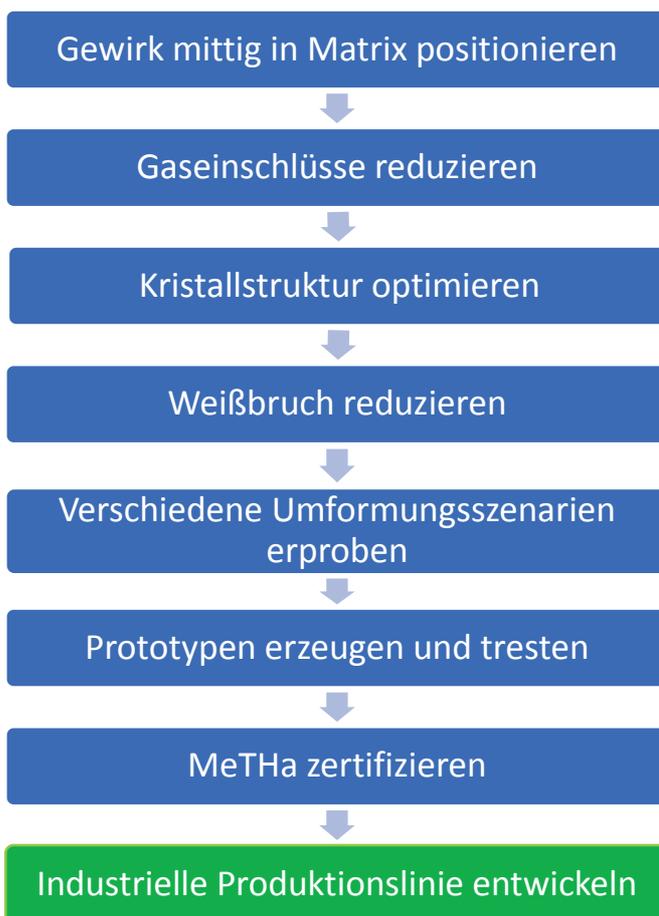


Abbildung 98 Flowchart: Schritte von MeTHa zur Produktionsreife

Bis zum Einsatz von MeTHa in der Schifffahrt oder im Automobilbau müssen noch einige Arbeiten geleistet werden. Doch die Arbeit würde sich, meines Erachtens nach, durch eine deutliche Gewichtsersparnis insbesondere bei Großprojekten wie Schiffen bezahlt machen.

### VI. Quellenverzeichnis

- [1] R. Luterbacher, L. Molter, A. Sumpf, und R. Peters, „FAUSST: bridging the gap between steel and fibre- reinforced materials“, *Technol. Light. Struct.*, Bd. 1, Nr. 2, S. 26–31, 2017.
- [2] J. Tozer und Daily Mail, „Oasis of the Seas: Incredible facts about the leviathan of luxury which is the world’s largest cruise ship“, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-1224504/Oasis-Seas-Worlds-largest-cruise-ship-squeezes-Danish-bridge-sailing-British-waters.html>. [Zugegriffen: 05-Apr-2018].
- [3] Förch GmbH, „Chassisklemmen Kabel-Clips Kabelschellen DIN 72571 Kabelschellen Kunststoff“. Förch GmbH, 2018.
- [4] Adolf Würth GmbH & Co. KG, „Würth online“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://eshop.wuerth.de/is-bin/INTERSHOP.enfinity/WFS/1401-B1-Site/de\\_DE/-/EUR/ViewCatalog-Browse?CatalogCategoryRef=14016502024301%40WuerthGroup-Wuerth-1401&CatalogCategoryID=v7AKD92eonoAAAFKncml.Bb&SelectedFilterAttribut=%255B%255D](https://eshop.wuerth.de/is-bin/INTERSHOP.enfinity/WFS/1401-B1-Site/de_DE/-/EUR/ViewCatalog-Browse?CatalogCategoryRef=14016502024301%40WuerthGroup-Wuerth-1401&CatalogCategoryID=v7AKD92eonoAAAFKncml.Bb&SelectedFilterAttribut=%255B%255D). [Zugegriffen: 08-Mai-2018].
- [5] F. Boekhoff, „Kabelbefestiger in der Schifffahrt“. 2018. [Email]
- [6] Bibliographisches Institut GmbH, „Kunststoff @ www.duden.de“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Kunststoff>. [Zugegriffen: 13-Apr-2018].
- [7] R. Ziel, „Schematische Anordnung der Polymerketten in amorphen und kristallinen Bereichen“. [Online]. Verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polymerketten\\_-\\_amorph\\_und\\_kristallin.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polymerketten_-_amorph_und_kristallin.svg). [Zugegriffen: 18-Mai-2018].
- [8] G. Abts, *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*, 3. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2017.
- [9] P. Ermanni, „Composites Technologien“, *ETH Zürich*, Nr. August. ETH Zürich, Zürich, S. 442, 2007.
- [10] Plasticker.de, „Angebotspreise in der plasticker Rohstoffbörse“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [http://plasticker.de/preise/preise\\_monat.php?group=gran](http://plasticker.de/preise/preise_monat.php?group=gran). [Zugegriffen: 09-Apr-2018].
- [11] F. Ohlendorf, „KSV 5 Faser-Verbund-Kunststoffe“. HAW Hamburg Department M+P, Hamburg, S. 34, 2017.
- [12] G. Abts, *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*, 3. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2017.
- [13] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., *Handbuch Faserverbundkunststoff/Composites*, 4. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [14] Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) ;, „Fertigungsverfahren Fügen Vorwort“. Deutschland, S. 5, 2003.
- [15] Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) ;, „Fertigungsverfahren Fügen Teil 6: Fügen durch Schweißen Einordnung, Unterteilung, Begriffe (DIN 8593-6)“, Nr. 0005. Deutschland, S. 4, 2003.
- [16] R. Müller, „Entwicklung eines laserbasierten Füge- verfahrens zum Schweißen von Stahl- GFK-Hybridgewebe an Stahl“, Universität Rostock, 2017.

- [17] Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), „Widerstandsschweißen – Verfahren zum Rollenahtschweißen von niedriglegierten Stählen mit oder ohne metallischem Überzug (DIN EN ISO 16433)“, Nr. September. Deutschland, S. 30, 2007.
- [18] G. Kukutschki, „Grundlagen Maschinenbau“, in *Grundlagen Maschinenbau – Fertigungstechnik*, Klagenfurt: HTL Mössingerstraße, 2010, S. 22.
- [19] Bekaert, „Stahlfäden Bekaert“, 2018. .
- [20] SABIC Polymers, „Einstufung des Stoffs oder des Gemisches“. SABIC Polymers, 2015.
- [21] IPT HAW Hamburg, „Einrichtung Lernort Digitale Umformtechnik HAW MP IPT“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.haw-hamburg.de/ti-mp/institute/ti-mpipt/schwerpunkte/lernort-digitale-umformtechnik/einrichtungen.html>. [Zugegriffen: 10-Mai-2018].
- [22] InnoRat GmbH, „Längenausdehnungskoeffizient verschiedener Werkstoffe“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.innorat.ch/Längenausdehnungskoeffizient\\_u2\\_73.html](http://www.innorat.ch/Längenausdehnungskoeffizient_u2_73.html). [Zugegriffen: 07-Mai-2018].

# Anhang

## Berechnung der Laminatdicke

Grundformel

$$d_t := \frac{m_G}{\rho \cdot A} \quad \rho := 0.9175 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \quad \text{Die Einheit gm steht für Gramm.}$$

VV1

$$m_{G;VV1} := 20 \text{ gm}$$

$$A_{VV1} := 112 \text{ cm}^2$$

$$d_{t;VV1} := \frac{m_{G;VV1}}{\rho \cdot A_{VV1}}$$

$$d_{t;VV1} = 0.1946 \text{ cm}$$

VV2

$$m_{G;VV2} := 20 \text{ gm}$$

$$A_{VV2} := 144 \text{ cm}^2$$

$$d_{t;VV2} := \frac{m_{G;VV2}}{\rho \cdot A_{VV2}}$$

$$d_{t;VV2} = 0.1514 \text{ cm}$$

VV3

$$m_{G;VV3} := 60 \text{ gm}$$

$$A_{VV3} := 200 \text{ cm}^2$$

$$d_{t;VV3} := \frac{m_{G;VV3}}{\rho \cdot A_{VV3}}$$

$$d_{t;VV3} = 0.327 \text{ cm}$$

VV4

$$m_{G;VV4} := 200 \text{ gm}$$

$$A_{VV4} := 800 \text{ cm}^2$$

$$d_{t;VV4} := \frac{m_{G;VV4}}{\rho \cdot A_{VV4}}$$

$$d_{t;VV4} = 0.2725 \text{ cm}$$

Anm.: Das Gleichsetzen der Versuchsnummern bedeutet, dass die Endergebnisse der gleichgesetzten Konstellationen einander entsprechen

V01=V02=V03=V04=V05

$$m_{G;V01} := 180 \text{ gm}$$

$$A_{V01} := 800 \text{ cm}^2$$

$$d_{t;V01} := \frac{m_{G;V01}}{\rho \cdot A_{V01}}$$

$$d_{t;V01} = 0.2452 \text{ cm}$$

V06

$$m_{G;V06} := 200 \text{ gm}$$

$$A_{V06} := 800 \text{ cm}^2$$

$$d_{t;V06} := \frac{m_{G;V06}}{\rho \cdot A_{V06}}$$

$$d_{t;V06} = 0.2725 \text{ cm}$$

V07

$$m_{G;V07} := 220 \text{ gm}$$

$$A_{V07} := 800 \text{ cm}^2$$

$$d_{t;V07} := \frac{m_{G;V07}}{\rho \cdot A_{V07}}$$

$$d_{t;V07} = 0.2997 \text{ cm}$$

## Berechnung des Drucks durch Gewichte auf die Schmelze

Grundformeln

$$p := \frac{F}{A} \quad \text{mit} \quad F := m_w \cdot g \quad \text{wobei} \quad g = 9.807 \frac{m}{s^2}$$

und  $m_w$  die Masse des Gewichts angibt

Definition von Einheiten:

$$mbar := 0.001 \text{ bar}$$

VV1

$$m_{w;VV1} := 4.416 \text{ kg}$$

$$F_{L;VV1} := m_{w;VV1} \cdot g = 43.306 \text{ N}$$

$$A_{VV1} := 112 \text{ cm}^2$$

$$p_{VV1} := \frac{F_{L;VV1}}{A_{VV1}}$$

$$p_{VV1} = 3.867 \text{ kPa}$$

$$p_{VV1} = 38.666 \text{ mbar}$$

VV2

$$m_{w;VV2} := 4.9 \text{ kg}$$

$$F_{L;VV2} := m_{w;VV2} \cdot g = 48.053 \text{ N}$$

$$A_{VV2} := 144 \text{ cm}^2$$

$$A_{VV2;ges} := A_{VV1} + A_{VV2} = 256 \text{ cm}^2$$

$$p_{VV2} := \frac{F_{L;VV2}}{A_{VV2;ges}}$$

$$p_{VV2} = 1.877 \text{ kPa}$$

$$p_{VV2} = 18.771 \text{ mbar}$$

VV3

$$m_{w;VV3} := 9.323 \text{ kg}$$

$$F_{L;VV3} := m_{w;VV3} \cdot g = 91.427 \text{ N}$$

$$A_{VV3} := 200 \text{ cm}^2$$

$$p_{VV3} := \frac{F_{L;VV3}}{A_{VV3}}$$

$$p_{VV3} = 4.571 \text{ kPa}$$

$$p_{VV3} = 45.714 \text{ mbar}$$

VV4

$$m_{w;VV4} := 13.739 \text{ kg}$$

$$F_{L;VV4} := m_{w;VV4} \cdot g = 134.734 \text{ N}$$

$$A_{VV4} := 800 \text{ cm}^2$$

$$p_{VV4} := \frac{F_{L;VV4}}{A_{VV4}}$$

$$p_{VV4} = 1.684 \text{ kPa}$$

$$p_{VV4} = 16.842 \text{ mbar}$$

$$V01=VV4$$

$$p_{V01} := \frac{F_{L;VV4}}{A_{VV4}} = 16.842 \text{ mbar}$$

Anm.: Das Gleichsetzen der Versuchsnummern bedeutet, dass die Endergebnisse der gleichgesetzten Konstellationen einander entsprechen

$$V02.1=V03.1=V04.1=V05.1=V06.1=V07.1$$

$$m_{w;V02.1} := 9.313 \text{ kg}$$

$$F_{L;V02.1} := m_{w;V02.1} \cdot g = 91.329 \text{ N}$$

$$A_{V02.1} := 800 \text{ cm}^2$$

$$p_{V02.1} := \frac{F_{L;V02.1}}{A_{V02.1}}$$

$$p_{V02.1} = 1.142 \text{ kPa}$$

$$p_{V02.1} = 11.416 \text{ mbar}$$

$$V02.2=V03.2=V04.2=V06.2$$

$$m_{w;V02.2} := 12.862 \text{ kg}$$

$$F_{L;V02.2} := m_{w;V02.2} \cdot g = 126.133 \text{ N}$$

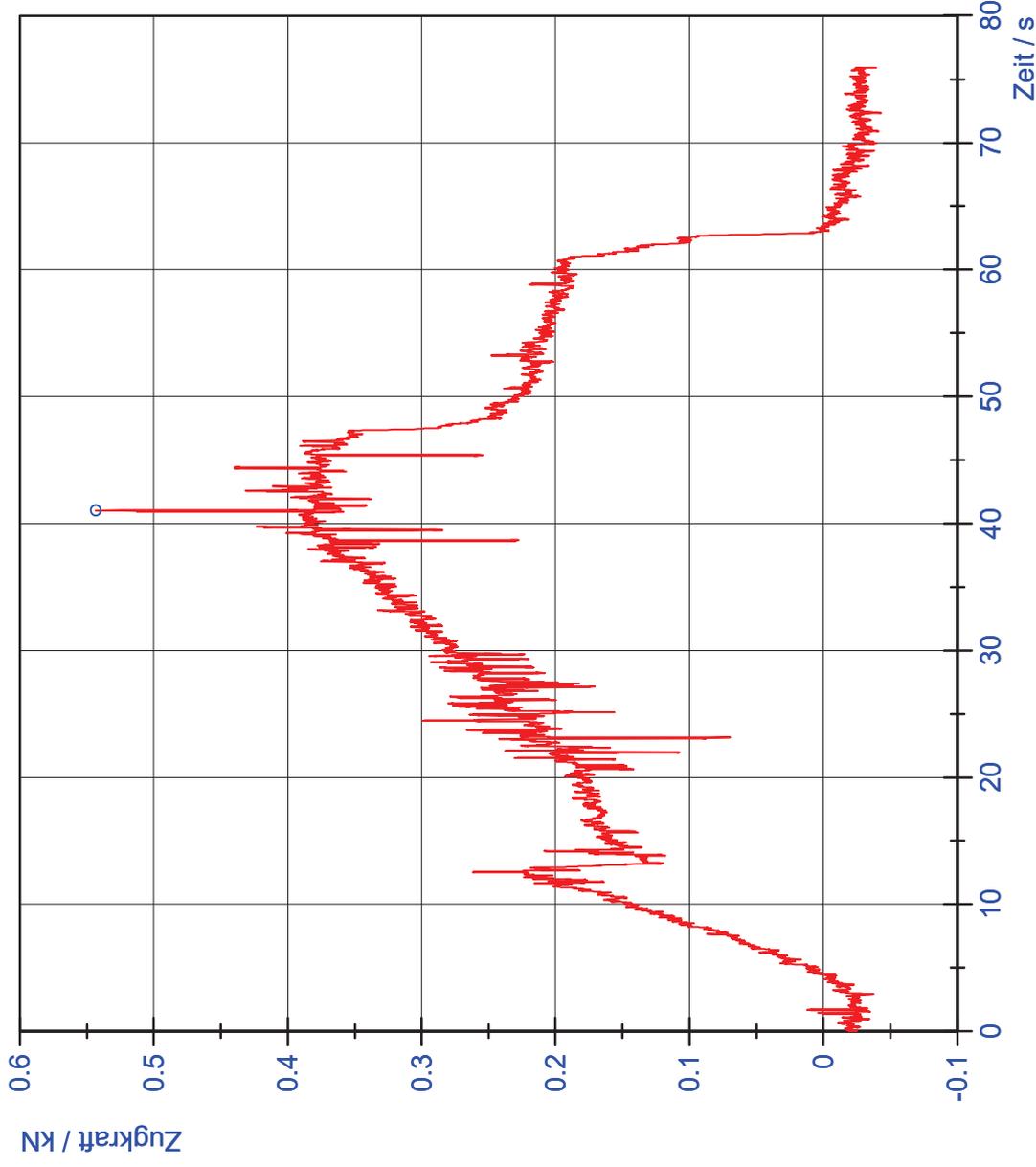
$$A_{V02.2} := 800 \text{ cm}^2$$

$$p_{V02.2} := \frac{F_{L;V02.2}}{A_{V02.2}}$$

$$p_{V02.2} = 1.577 \text{ kPa}$$

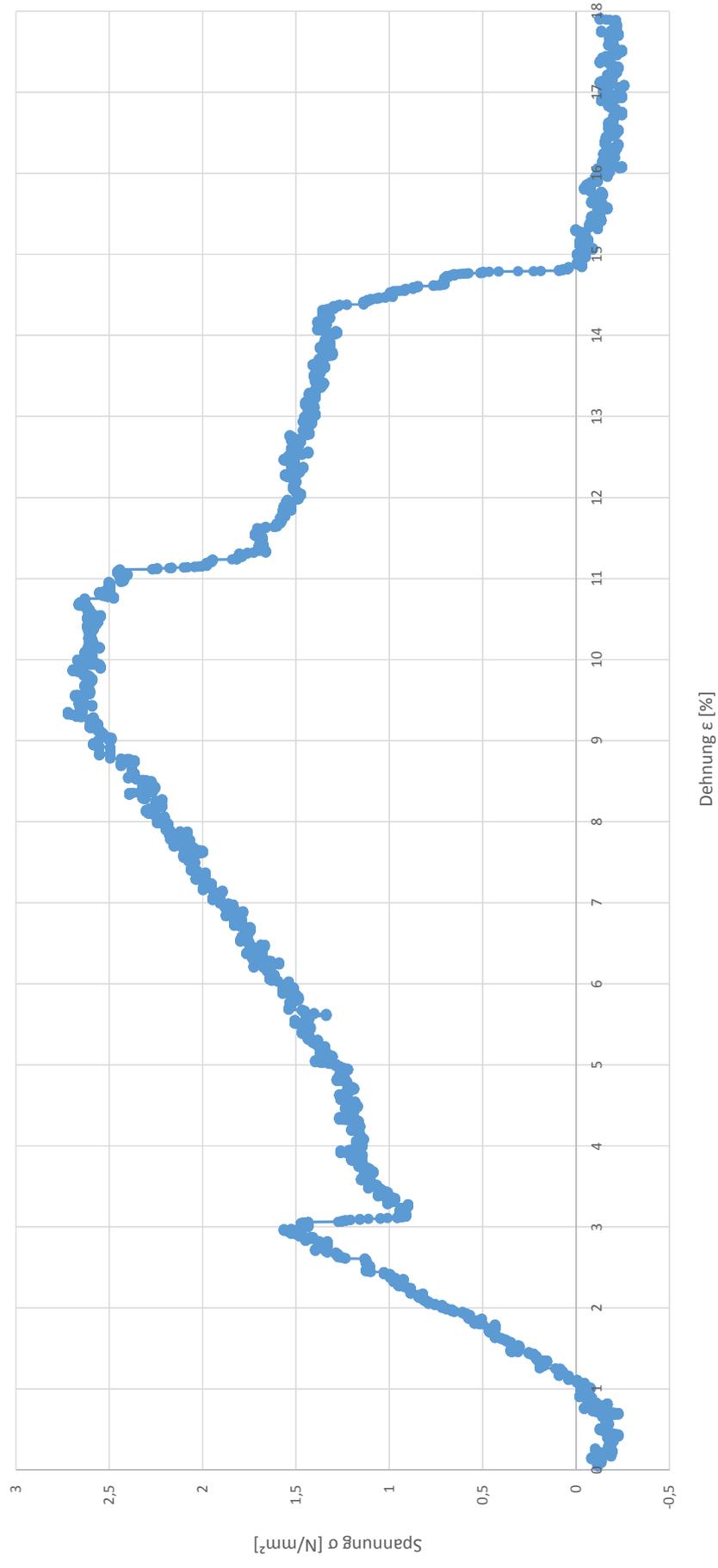
$$p_{V02.2} = 15.767 \text{ mbar}$$

# Kraft-Zeit-Diagramm - Zugprüfung Nieten

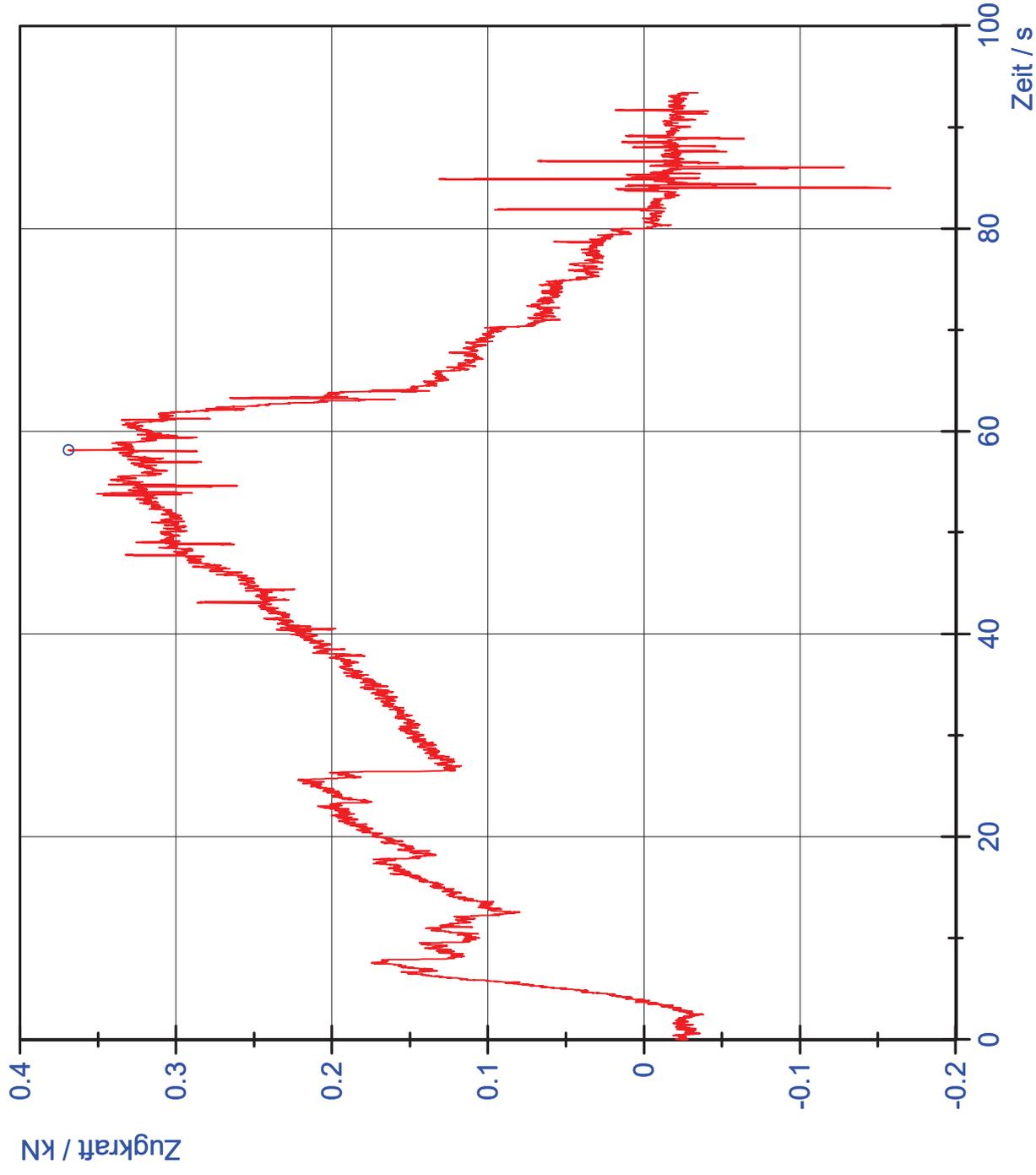


<b>F<sub>max</sub> = 0.5 kN</b>	
Versuch:	1
Anzahl Bleche:	2
Material Bleche:	DC01
Art Niet:	Vollniet
Material Niete:	Stahl
Anzahl Niete:	2
Ausrichtung:	quer
Anzahl Schnitte:	1
Blech eingeschnürt:	k. A
Blech gerissen:	k. A
Lochleibung versagt :	k. A
Niet abgesichert:	k. A
Gruppe:	1
08.05.2018 09:05:24	
<small>Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences</small>	

Spannungs - Dehnung- Diagramm  
Zugprobe 1 (VV4 VI; mit Blech, geglättet)

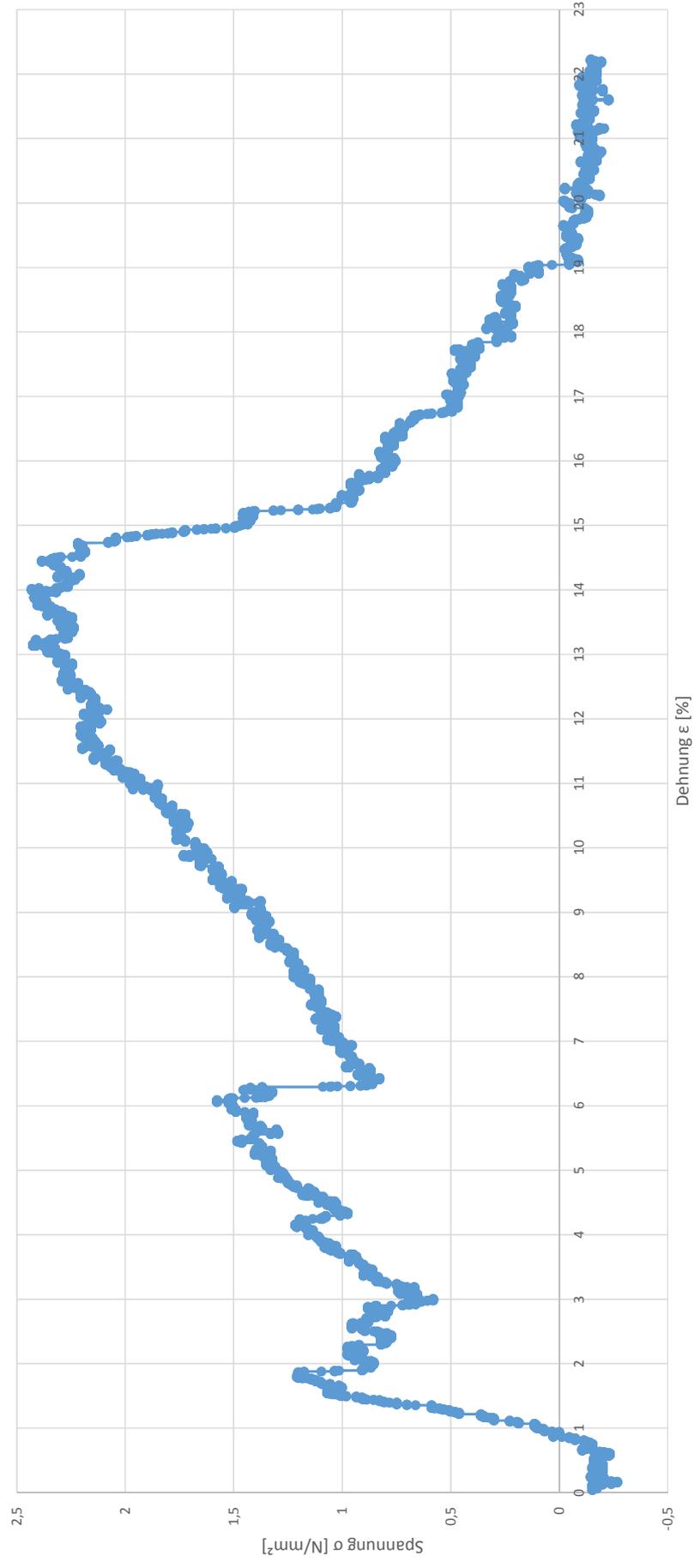


# Kraft-Zeit-Diagramm - Zugprüfung Nieten

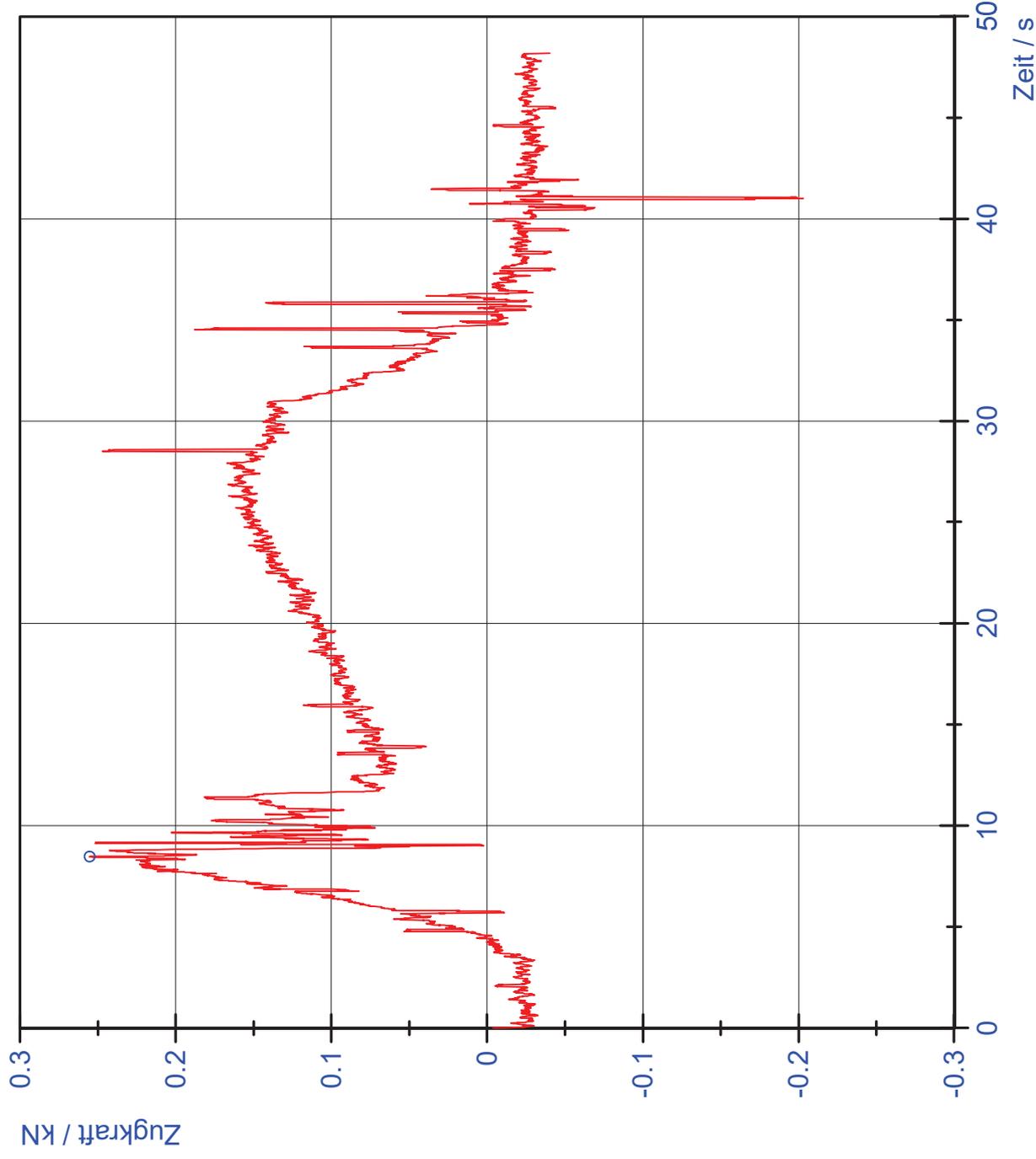


<b><math>F_{max} = 0.4 \text{ kN}</math></b>	
Versuch:	1
Anzahl Bleche:	2
Material Bleche:	DC01
Art Niet:	Vollniet
Material Niete:	Stahl
Anzahl Niete:	2
Ausrichtung:	quer
Anzahl Schnitte:	1
Blech eingeschnürt:	k. A
Blech gerissen:	k. A
Lochleibung versagt :	k. A
Niet abgesichert:	k. A
Gruppe:	1
08.05.2018 09:19:44	
	
<small>Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences</small>	

Spannungs - Dehnungs - Diagramm  
Zugprobe 2 (V04.1 I; mit Blech, geglättet)

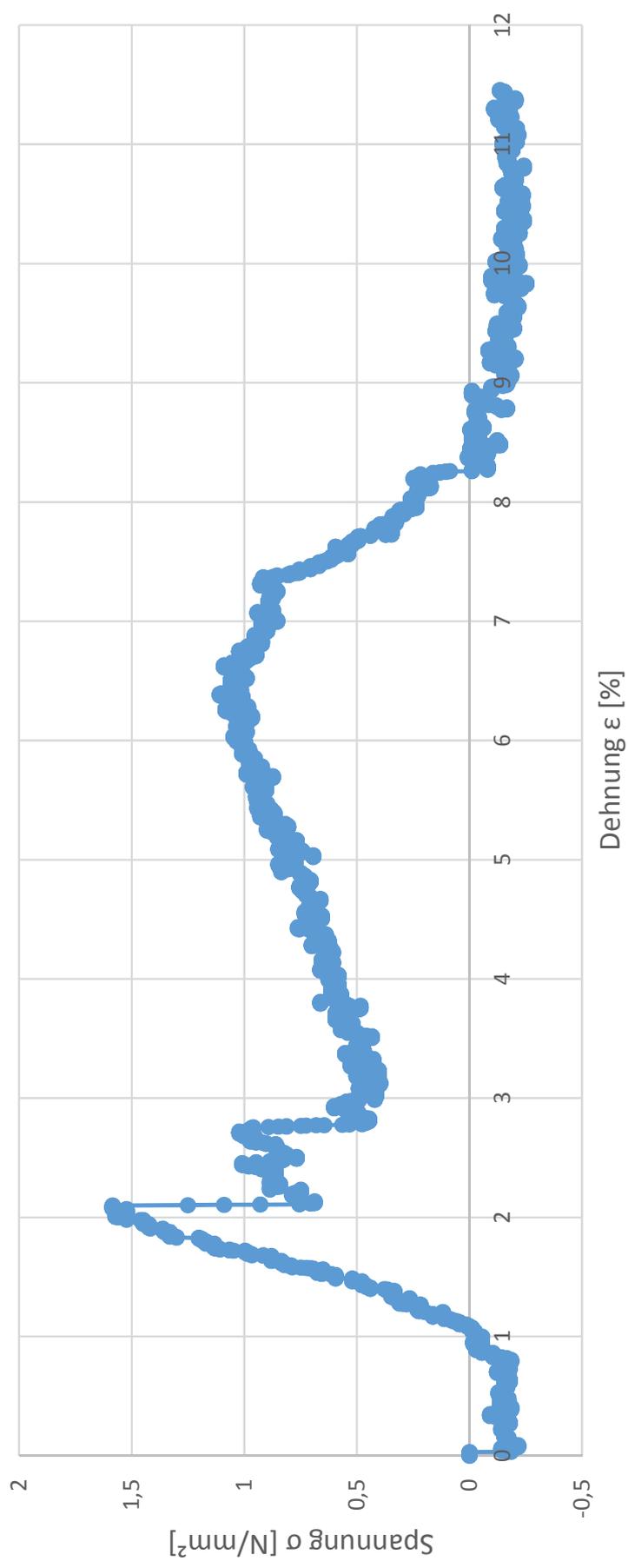


# Kraft-Zeit-Diagramm - Zugprüfung Nieten

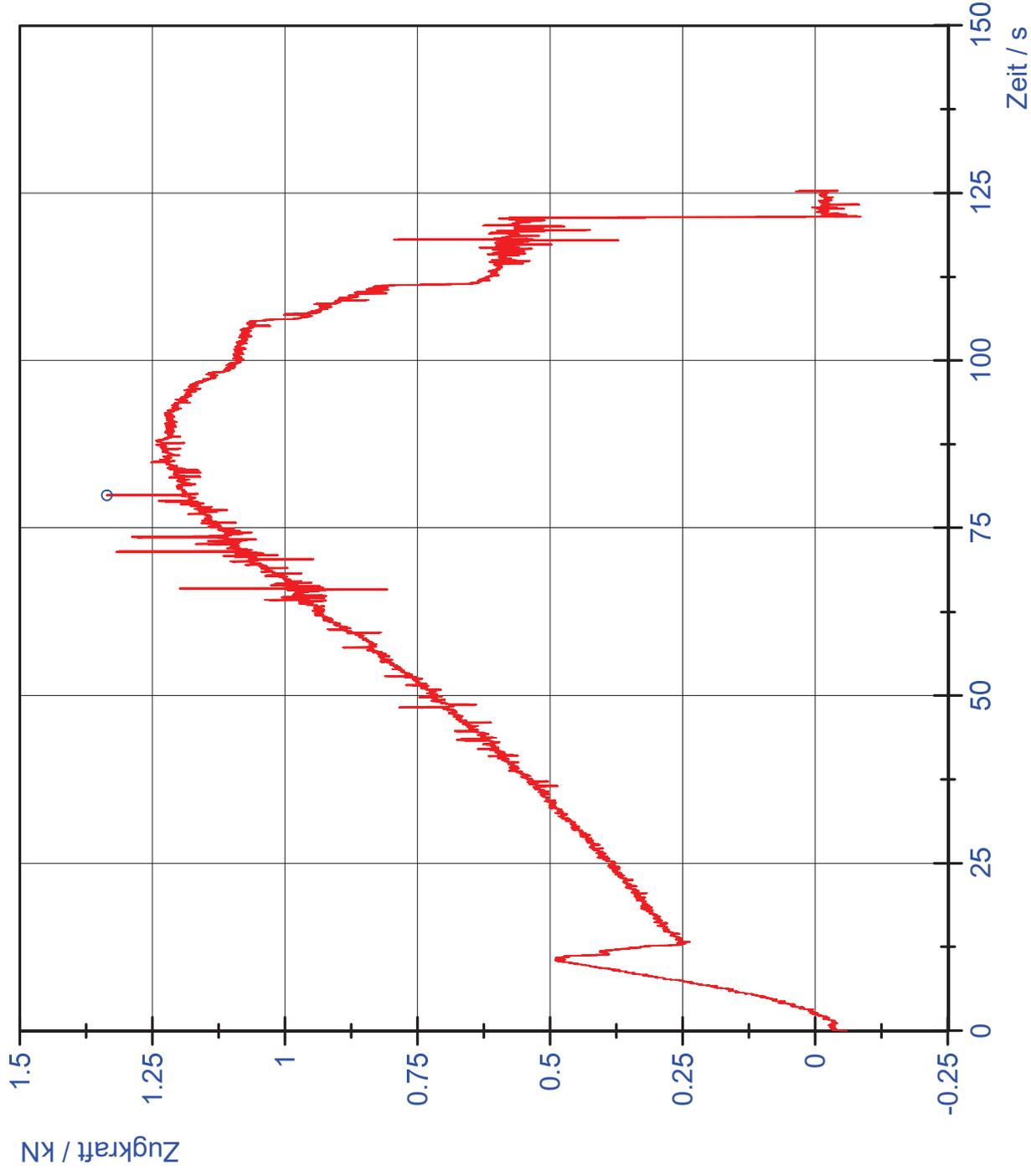


<b><math>F_{\max} = 0.3 \text{ kN}</math></b>
Versuch: 1
Anzahl Bleche: 2
Material Bleche: DC01
Art Niet: Vollniet
Material Niete: Stahl
Anzahl Niete: 2
Ausrichtung: quer
Anzahl Schnitte: 1
Blech eingeschnürt: k.A
Blech gerissen: k.A
Lochleibung versagt: k.A
Niet abgesichert: k.A
Gruppe: 1
08.05.2018 09:26:16
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences

Spannungs - Dehnungs - Diagramm  
Zugprobe 3 (V03.1 V; mit Blech, geglättet)

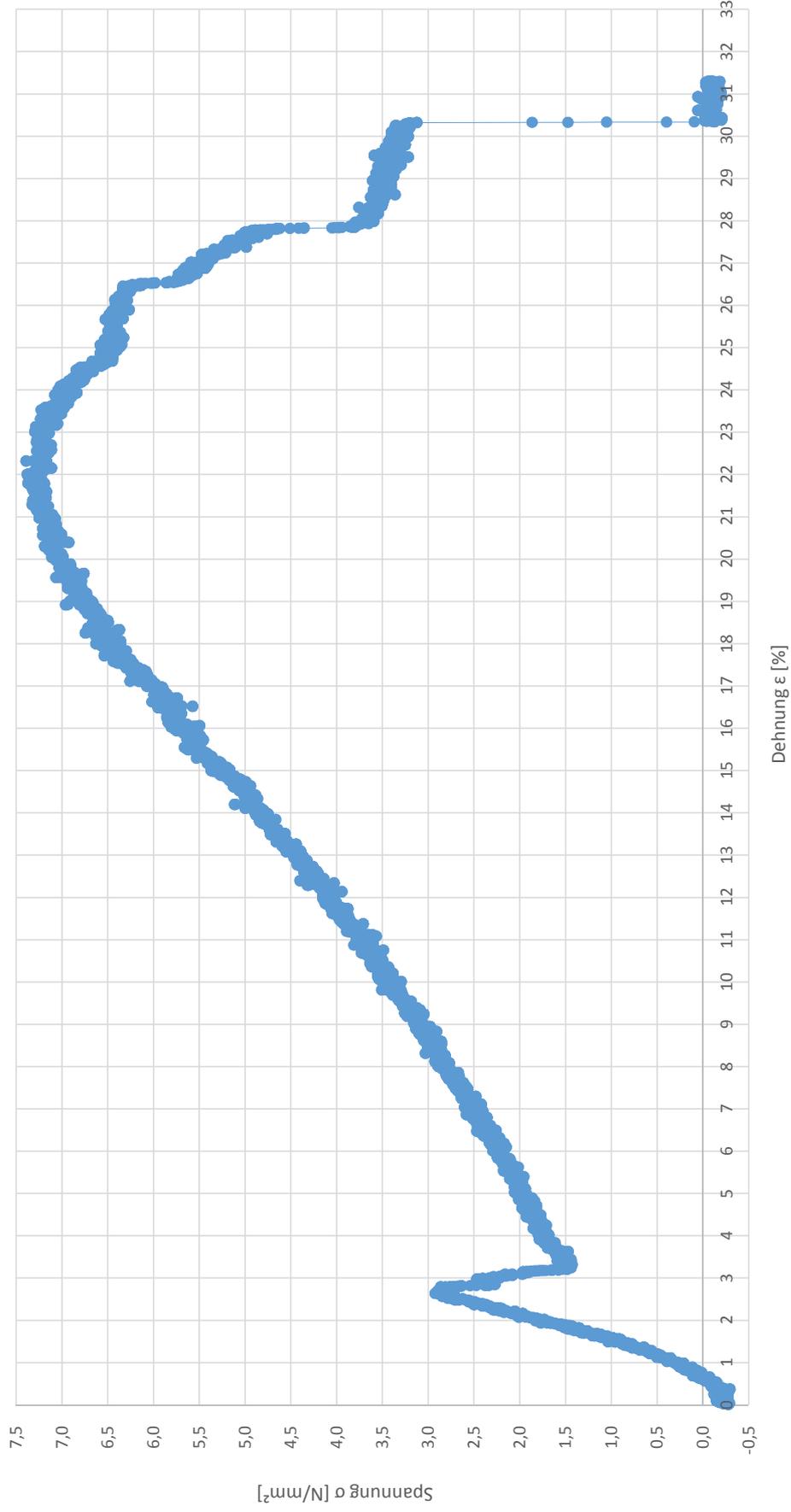


# Kraft-Zeit-Diagramm - Zugprüfung Nieten



<b><math>F_{\max} = 1.3 \text{ kN}</math></b>	
Versuch:	1
Anzahl Bleche:	2
Material Bleche:	DC01
Art Niet:	Vollniet
Material Niete:	Stahl
Anzahl Niete:	2
Ausrichtung:	quer
Anzahl Schnitte:	1
Blech eingeschnürt:	k.A
Blech gerissen:	k.A
Lochleibung versagt :	k.A
Niet abgesichert:	k.A
Gruppe: 1	08.05.2018 09:30:26
	
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences	

Spannungs - Dehnungs - Diagramm  
Zugprobe 4 (V05.1 I; ohne Blech, geglättet)





## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Jahnke

Vorname: Juliane

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit  bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Umformbarkeit eines Metallgewirks in thermoplastischer Matrix am Beispiel der Herstellung von Kabelhaltern

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

04.06.2018

Ort

Datum

Unterschrift im Original