



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Felix Hahn

Ermittlung der Materialeigenschaften und der Verarbeitbarkeit von CFK-Prepreg als Reparatur- material im Vergleich zu CFK-Vakuum-Infusion

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Felix Hahn

**Ermittlung der Materialeigenschaften und der
Verarbeitbarkeit von CFK-Prepreg als Reparatur-
material im Vergleich zu CFK-Vakuum-Infusion**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Nordex Energy GmbH
Blade Service & Composites
Langenhorner Chaussee 600
22419 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Friedrich Ohlendorf (HAW)
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Markus Kaden (DLR)

Abgabedatum: 13.06.2019

Zusammenfassung

Felix Hahn

Thema der Bachelorthesis

Ermittlung der Materialeigenschaften und der Verarbeitbarkeit von CFK-Prepreg als Reparaturmaterial im Vergleich zu CFK-Vakuum-Infusion

Stichworte

Faserverbundwerkstoffe, CFK, Prepreg, Vakuum-Infusion, Hauptgurt, Reparatur, Materialversuche, Zugversuche, Schliffbilder, DSC, Rotorblatt, Windenergieanlagen

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit werden Probenplatten aus Kohlenstofffaser-Prepreg und Probenplatten mit dem Vakuum-Infusionsverfahren hergestellt. Anhand von Reparatur- und Referenzproben wurde festgestellt, dass das Prepreg bessere Materialwerte erreicht. Die Verarbeitung von Prepreg einfacher und weniger fehleranfällig. Als Reparaturmaterial von Strukturbauteilen, wie dem CFK Gurt eines Rotorblattes, ist Prepreg besser geeignet als das Vakuum-Infusionsverfahren.

Felix Hahn

Bachelor Thesis title

Determination of the material properties and processability of CFRP prepreg as a repair material compared to CFRP vacuum infusion

Keywords

fiber-reinforced composite, CFRP, prepreg, vacuum infusion, main girder, repair, material testing, tensile testing, micrographic examination, DSC, rotor blade, wind turbines

Abstract

In this thesis CFRP plies are manufactured using prepreg and using vacuum infusion. With repair and reference specimens it is shown, that the material properties of the prepreg are superior. The processing of the prepreg is easier and risk of errors is lower. For a repair of structural components such as the CFRP girder of a rotor blade, prepreg is better suited than vacuum infusion.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
2 Grundlagen Faserverbundwerkstoffe	2
2.1 Verstärkungsfasern	3
2.2 Matrix	6
2.3 Verarbeitung	7
3 Grundlagen Windenergieanlagen	10
3.1 Entwicklung der Windenergieanlagen	10
3.2 Aufbau eines Rotorblatts	12
3.3 Schäden und Reparaturen an Rotorblättern	13
4 Versuchsplanung	15
5 Probenherstellung	18
5.1 Herstellen der Probenplatten	18
5.1.1 Infusionsplatten	18
5.1.2 Prepregplatten	28
5.1.3 Probenplatten für einschichtige Überlappungsproben	32
5.1.4 Probenplatten für die gestuften Schäftproben	32
5.2 Vorbereitung der Proben	35
5.2.1 Proben für Zugversuche	35
5.2.2 Proben für die Bestimmung des Faservolumengehaltes und für Schliffbilder	36
5.2.3 Proben für die Ermittlung der Glasübergangstemperatur	38
6 Bewertung der Verarbeitbarkeit	39
7 Bestimmung der Materialeigenschaften	42
7.1 0° Zugversuche	43

Inhaltsverzeichnis	II
7.1.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen	43
7.1.2 Versuchsdurchführung	44
7.1.3 Versuchsauswertung	44
7.2 90° Zugversuche	48
7.2.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen	48
7.2.2 Versuchsdurchführung	48
7.2.3 Versuchsauswertung	49
7.3 ±45° Zugversuche	50
7.3.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen	50
7.3.2 Versuchsdurchführung	50
7.3.3 Versuchsauswertung	51
7.4 Zugversuch mit einschichtig überlappten Proben	52
7.4.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen	52
7.4.2 Versuchsdurchführung	52
7.4.3 Versuchsauswertung	53
7.5 Zugversuch mit gestuften Schäftproben	55
7.5.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen	55
7.5.2 Versuchsdurchführung	55
7.5.3 Versuchsauswertung	56
7.6 Ultraschalluntersuchung	57
7.6.1 Versuchsaufbau und -durchführung	57
7.6.2 Versuchsauswertung	58
7.7 Untersuchung der Schliifproben	63
7.7.1 Versuchsaufbau und -durchführung	63
7.7.2 Versuchsauswertung	63
7.8 Bestimmung der Glasübergangstemperatur	68
7.8.1 Versuchsaufbau und -durchführung	68
7.8.2 Auswertung und Ergebnisse	68

Inhaltsverzeichnis	III
7.9 Bestimmung des Faservolumengehalts	70
7.9.1 Versuchsaufbau und Durchführung	70
7.9.2 Versuchsauswertung	70
7.10 Diskussion der Ergebnisse	73
8 Fazit und Ausblick	75
Literaturverzeichnis- und Quellenverzeichnis	77
Anhang	80
A Ultraschallbilder	80
B Größenmessung der Zugversuch-Proben	103
C Ergebnisse der Zugversuche	114
C.1 Versuchsergebnisse 0° Zugversuche	114
C.2 Ergebnisse der 90° Zugversuche	118
C.3 Ergebnisse der ±45° Zugversuche	123
C.4 Ergebnisse der Zugversuche mit einschichtig überlappten Proben	126
C.5 Ergebnisse der Zugversuche mit gestuften Schäftproben	128
D Tg-Ermittlung mittels DSC	131
E Mikroskopbilder	138
F Ergebnisse der Faservolumengehalt Bestimmung	147
Eidesstattliche Erklärung	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: weltweiter Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff Umsatz nach Anwendungsgebieten	3
Abbildung 2.2: Optimale Verstärkungskontur	3
Abbildung 2.3: schematische Darstellung der Vakuuminfusion	8
Abbildung 3.1: Entwicklung der Windenergieanlagen 1980 bis heute	11
Abbildung 3.2: Rotorblatt Längsprofil (oben) und Querschnitt (unten)	12
Abbildung 3.3: Typische Schäden am Rotorblattquerschnitt	13
Abbildung 3.4: Rotorblattbefahranlage für Inspektionen und Reparaturen	14
Abbildung 5.1: Kohlenstofffaser-Gelege Zuschnitt auf dem CNC Cutter	18
Abbildung 5.2: Schematischer Infusionsaufbau	20
Abbildung 5.3: Schlauchabdichtung	21
Abbildung 5.4: Infusionsaufbau	23
Abbildung 5.5: Vakuum-Infusion	24
Abbildung 5.6: Entgasen des Harzes im Magnetrührer	24
Abbildung 5.7: Fließfronten bei der Infiltration	25
Abbildung 5.8: Zuschnitt der Prepreg-Lagen auf dem CNC-Cutter	28
Abbildung 5.9: Fertiger Prepreg-Lagenaufbau bereit für das Aushärten	29
Abbildung 5.10: Gefräste Stufen an Platte P7	33
Abbildung 5.11: Aufbau gestufte Schäftplatten	33
Abbildung 5.12: Fertiger Infusionsaufbau Platte P6A	34
Abbildung 5.13: Markierte Rechtecke	35
Abbildung 5.14: Messmarken mit Schablone auftragen	36
Abbildung 5.15: Proben in Einbettformen	37
Abbildung 5.16: Schleifen der Schlifftbildproben	38
Abbildung 6.1: Schnittkante gestufte Schäftproben	40
Abbildung 7.1: Prüfmaschine mit hydraulischem Probenhalter	42
Abbildung 7.2: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN ISO 527-5/A	43
Abbildung 7.3: Krafteinleitungselemente an einer 0° Zugprobe	44
Abbildung 7.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm P2P4_8 ohne Korrekturfaktor	46
Abbildung 7.5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm P2P4_8 mit Korrekturfaktor 0,96	46
Abbildung 7.6: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN ISO 527-5/B	48
Abbildung 7.7: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN ISO 14129	50
Abbildung 7.8: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN 6060 II.1 B	52

Abbildungsverzeichnis	V
Abbildung 7.9: Biegestützen bei Zugversuchen mit einschichtig überlappten Proben	53
Abbildung 7.10: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN 6066-BI	55
Abbildung 7.11: Aufbau des Ultraschall Prüfstandes	58
Abbildung 7.12: Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur E501 Harz	59
Abbildung 7.13: Harz im Vlies der Platte P1P3	61
Abbildung 7.14: Überlagerung Foto und Ultraschallbild Platte P1P4	61
Abbildung 7.15: Mikroskopbilder, von oben nach unten: P1P, P1P2, P1P3, P1P4, P1P5, P1	63
Abbildung 7.16: Nähfäden mit Poren in Platte P1P5	64
Abbildung 7.17: Mikroskopbild und Foto von Probe 1 aus Platte P1P5	65
Abbildung 7.18: Kleine Poren im Harzbereich der Platte P1	65
Abbildung 7.19: Poren in Platte P5A	66
Abbildung A.1: Ultraschallbilder Platte P1P	80
Abbildung A.2: Ultraschallbilder Platte P1P2	81
Abbildung A.3: Ultraschallbilder Platte P1P3	82
Abbildung A.4: Ultraschallbilder Platte P1P4	83
Abbildung A.5: Ultraschallbilder Platte P1P5	84
Abbildung A.6: Ultraschallbilder Platte P1P6	85
Abbildung A.7: Ultraschallbilder Platte P1	86
Abbildung A.8: Ultraschallbilder Platte P2P	87
Abbildung A.9: Ultraschallbilder Platte P2P3	88
Abbildung A.10: Ultraschallbilder Platte P1P4	89
Abbildung A.11: Ultraschallbilder Platte P2	90
Abbildung A.12: Ultraschallbilder Platte P3P	91
Abbildung A.13: Ultraschallbilder Platte P3P2	92
Abbildung A.14: Ultraschallbilder Platte P3P4	93
Abbildung A.15: Ultraschallbilder Platte P3	94
Abbildung A.16: Ultraschallbilder Platte P4	95
Abbildung A.17: Ultraschallbilder Platte P4A	96
Abbildung A.18: Ultraschallbilder Platte P5	97
Abbildung A.19: Ultraschallbilder Platte P5A	98
Abbildung A.20: Ultraschallbilder Platte P6	99
Abbildung A.21: Ultraschallbilder Platte P6A	100
Abbildung A.22: Ultraschallbilder Platte P7	101
Abbildung A.23: Ultraschallbilder Platte P7A	102

Abbildungsverzeichnis	VI
Abbildung C.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P2P	115
Abbildung C.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P2P4	116
Abbildung C.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P2	117
Abbildung C.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P1P	119
Abbildung C.5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P1P4	120
Abbildung C.6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P1 mit mittlerer Dicke	121
Abbildung C.7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P1 mit minimaler Dicke	122
Abbildung C.8: Schubspannungs-Schubverformungs-Diagramm Platte P3P	123
Abbildung C.9: Schubspannungs-Schubverformungs-Diagramm Platte P3P4	124
Abbildung C.10: Schubspannungs-Schubverformungs-Diagramm Platte P3	125
Abbildung C.11: Kraft-Weg-Diagramm Platte P4A	126
Abbildung C.12: Kraft-Weg-Diagramm Platte P5A	127
Abbildung C.13: Kraft-Weg-Diagramm Platte P6A	128
Abbildung C.14: Kraft-Weg-Diagramm Platte P7A	129
Abbildung D.1: DSC-Kurven der Platte P1	131
Abbildung D.2: DSC-Kurven der Platte P2	132
Abbildung D.3: DSC-Kurven der Platte P1P	133
Abbildung D.4: DSC-Kurven der Platte P1P2	134
Abbildung D.5: DSC-Kurven der Platte P1P4	135
Abbildung D.6: DSC-Kurven der Platte P1P5	136
Abbildung D.7: DSC-Kurven der Platte P1P6	137
Abbildung E.1: Schliffbild Platte P1	138
Abbildung E.2: Schliffbild Platte P2	138
Abbildung E.3: Schliffbild Platte P3	139
Abbildung E.4: Schliffbild Platte P1P	139
Abbildung E.5: Schliffbild Platte P2P	140
Abbildung E.6: Schliffbild Platte P3P	140
Abbildung E.7: Schliffbild Platte P1P2	141
Abbildung E.8: Schliffbild Platte P1P3	141
Abbildung E.9: Schliffbild Platte P1P4	142
Abbildung E.10: Schliffbild Platte P2P4	142
Abbildung E.11: Schliffbild Platte P3P4	143
Abbildung E.12: Schliffbild Platte P1P5	143
Abbildung E.13: Schliffbild Platte P4A Probe 1	144
Abbildung E.14: Schliffbild Platte P4A Probe 2	144

Abbildungsverzeichnis	VII
Abbildung E.15: Schliffbild Platte P4A Probe 3	144
Abbildung E.16: Schliffbild Platte P4A Probe 4	144
Abbildung E.17: Schliffbild Platte P5A Probe 1	145
Abbildung E.18: Schliffbild Platte P5A Probe 2	145
Abbildung E.19: Schliffbild Platte P5A Probe 3	145
Abbildung E.20: Schliffbild Platte P5A Probe 4	145
Abbildung E.21: Schliffbild Platte P6A Probe 1	146
Abbildung E.22: Schliffbild Platte P6A Probe 2	146
Abbildung E.23: Schliffbild Platte P7A Probe 1	146
Abbildung E.24: Schliffbild Platte P7A Probe 2	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Faserwerkstoffe	4
Tabelle 2.2: Materialwerte ausgewählter Faserwerkstoffe	5
Tabelle 2.3: Materialeigenschaften von Duroplasten und Thermoplasten	7
Tabelle 4.1: Versuchsprogramm	15
Tabelle 4.2: Materialabschätzung	17
Tabelle 5.1: Übersicht der Infusionsplatten	27
Tabelle 5.2: Übersicht der Prepregplatten	31
Tabelle 6.1: Vor und Nachteile in der Verarbeitung	41
Tabelle 7.1: Zusammenfassung der 0° Zugversuche	47
Tabelle 7.2: Zusammenfassung der 90° Zugversuche	49
Tabelle 7.3: Zusammenfassung der $\pm 45^\circ$ Zugversuche	51
Tabelle 7.4: Ergebnisse Zugversuche einlagig überlappende Proben	53
Tabelle 7.5: Zusammenfassung gestufte Schäftproben	56
Tabelle 7.6: Ergebnisse der DSC Auswertung	69
Tabelle 7.7: Ergebnisse der Faservolumenbestimmung	71
Tabelle B.1: Probenmaße der Platte P1P	103
Tabelle B.2: Probenmaße der Platte P1P4	104
Tabelle B.3: Probenmaße der Platte P1	105
Tabelle B.4: Probenmaße der Platte P2P	106
Tabelle B.5: Probenmaße der Platte P2P4	107
Tabelle B.6: Probenmaße der Platte P2	108
Tabelle B.7: Probenmaße der Platte P3P	109
Tabelle B.8: Probenmaße der Platte P3P4	110
Tabelle B.9: Probenmaße der Platte P3	111
Tabelle B.10: Probenmaße der Platte P4A	112
Tabelle B.11: Probenmaße der Platte P5A	113
Tabelle C.1: Ergebnisse Platte P2P	115
Tabelle C.2: Ergebnisse Platte P2P4	116
Tabelle C.3: Ergebnisse Platte P2	117
Tabelle C.4: Ergebnisse Platte P1P	119
Tabelle C.5: Ergebnisse Platte P1P4	120
Tabelle C.6: Ergebnisse Platte P1 mit mittlerer Dicke	121
Tabelle C.7: Ergebnisse Platte P1 mit minimaler Dicke	122

Tabellenverzeichnis	IX
Tabelle C.8: Ergebnisse Platte P3P	123
Tabelle C.9: Ergebnisse Platte P3P4	124
Tabelle C.10: Ergebnisse Platte P3	125
Tabelle C.11: Ergebnisse Platte P4A	126
Tabelle C.12: Ergebnisse Platte P5A	127
Tabelle C.13: Ergebnisse Platte P6A	128
Tabelle C.14: Ergebnisse Platte P7A	129
Tabelle D.1: Glasübergangstemperatur Platte P1	131
Tabelle D.2: Glasübergangstemperatur Platte P2	132
Tabelle D.3: Glasübergangstemperatur Platte P1P	133
Tabelle D.4: Glasübergangstemperatur Platte P1P2	134
Tabelle D.5: Glasübergangstemperatur Platte P1P4	135
Tabelle D.6: Glasübergangstemperatur Platte P1P5	136
Tabelle D.7: Glasübergangstemperatur Platte P1P6	137
Tabelle F.1: Faservolumengehalt Messungen (1/4)	147
Tabelle F.2: Faservolumengehalt Messungen (2/4)	148
Tabelle F.3: Faservolumengehalt Messungen (3/4)	149
Tabelle F.4: Faservolumengehalt Messungen (4/4)	150

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

CFK.....	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
DSC.....	<i>differential scanning calorimetry</i>
GFK	<i>Glasfaserverstärkter Kunststoff</i>
UD.....	<i>Unidirektional</i>

Formelzeichen

γ	Schubverformung
ε	Dehnung
μ	Poissonzahl
ρ	Dichte
σ	Spannung
τ	Schubspannung
φ	Faservolumengehalt
ψ	Fasermassenanteil
b	Breite
E.....	Zugmodul
F.....	Zugkraft
G.....	Schubmodul
h	Dicke
L.....	Länge
m	Masse
n	Lagenanzahl
V.....	Volumen

Indizes

0	Ausgangswert
1	0° Richtung
2	90° Richtung
m	maximum
t	Traverse
th	theoretisch
ü	Überlappung

1 Einleitung

Ein stetig wachsender Energiebedarf gekoppelt mit immer häufiger zu beobachtenden Folgen des Klimawandels treibt die Entwicklung und den Ausbau von erneuerbaren Energien an. In Deutschland stellt die Windenergie den größten Teil der erneuerbaren Energien und steht daher oft symbolisch für diese Branche. Die Windenergieanlagen sind nicht zu übersehen und gehören mittlerweile fest zum Landschaftsbild.

Eine wichtige Komponente der Windkraftanlagen sind die Rotorblätter. Durch sie wird der Wind in eine Rotationsenergie umgewandelt, sodass mit Hilfe eines Generators Strom erzeugt werden kann. Die Rotorblätter bestehen zum Großteil aus Faserverbundwerkstoffen, insbesondere aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Um die Leistung der Windkraftanlagen zu steigern, werden diese immer höher und größer gebaut. Durch die größeren Höhen können die dort herrschenden höheren Windstärken genutzt werden. Außerdem wird durch den wachsenden Rotordurchmesser der Wind über eine größere Fläche genutzt. Die längeren Rotorblätter müssen allerdings auch größeren Belastungen standhalten. Daher werden einige Komponenten aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff gefertigt, der eine höhere Festigkeit und ein geringeres Gewicht aufweist als glasfaserverstärkter Kunststoff.

Die Rotorblätter werden in der Regel für einen Zeitraum von etwa 20 Jahren ausgelegt. Über den gesamten Zeitraum sind sie dabei den Umwelteinflüssen ausgesetzt, sodass Beschädigungen nicht zu vermeiden sind. Daher werden regelmäßig Inspektionen und Reparaturen durchgeführt. Für glasfaserverstärkten Kunststoff sind die Reparaturverfahren Routine und können von Serviceteams ausgeführt werden. Sollte es allerdings zu einer Beschädigung der kohlenstofffaserverstärkten Teile kommen, gibt es momentan keine freigegebenen Reparaturverfahren, die angewendet werden können. Ein Reparaturverfahren würde dem Bestreben, die Windenergieanlagen so nachhaltig und ökonomisch wie möglich zu betreiben, immens helfen.

In dieser Arbeit sollen erste Versuche in die Richtung von Reparaturen an Strukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen am Rotorblatt durchgeführt werden. Der Fokus soll auf den Unterschieden in der Handhabung und der Verarbeitung von vorimprägnierten Gelegen (Prepreg) und trockenem Gelege mit dem Infusionsprozess liegen. Hierfür werden Probplatten mit beiden Verfahren hergestellt und die Materialeigenschaften untersucht. Anhand der Ergebnisse soll eine Empfehlung abgegeben werden, welches Verfahren für eine Reparatur des Hauptgurtes eines Rotorblattes zu bevorzugen ist.

2 Grundlagen Faserverbundwerkstoffe

Wenn bei hochbeanspruchten Bauteilen Gewicht eingespart werden soll, stoßen konventionelle Werkstoffe an ihre Leistungsgrenzen. Sie können oft nur mit neuartigen Werkstoffen überwunden werden. Hier werden Verbundwerkstoffe und insbesondere Faserverbundwerkstoffen eingesetzt. (Teschner 2013, 195)

In Verbundwerkstoffen werden mindestens zwei Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammengeführt. Sie sind nicht in einander löslich und werden so kombiniert, dass sie gemeinsam bessere Materialeigenschaften aufweisen, als allein. Hierbei sind sämtliche Werkstoffkombinationen denkbar. (Bonnet 2016, 87)

In dieser Arbeit wird nur auf Faserverbundwerkstoffe eingegangen. Die Faser nimmt die Zugkräfte auf und durch die Polymermatrix können Biegung und Druck aufgenommen werden. (Witten 2014, 33)

Durch die Verwendung von Fasern im Verbund mit Polymeren lassen sich die Zugfestigkeit auf das fünffache und der E-Modul auf das 100-fache des reinen Polymers steigern. Außerdem ist es durch die anisotropen mechanischen Eigenschaften möglich, Bauteile mit lokal variierenden Materialeigenschaften herzustellen und genau auf die erwarteten Belastungen anzupassen. (Bonnet 2016, 87) Besonders sind außerdem die gute Korrosionsbeständigkeit, Dauerfestigkeit, verschleißarme Oberflächen und die Energieabsorption. (Neitzel et al. 2014, 3 f.)

Die Entwicklung von endlosfaserverstärkten Polymeren hat in den 30er Jahren begonnen. Die Luftfahrt hat aufgrund des hohen Potentials zur Gewichtsreduktion bei der Verwendung von Faserverbundwerkstoffen eine Vorreiterrolle eingenommen. (Neitzel et al. 2014, 1) Mittlerweile werden Faserverbundwerkstoffe unter anderem auch in der Windenergie, der Automobilindustrie, dem Bootsbau und im Bereich von Rohrleitungen und Behältern verwendet. (Witten 2014, 35)

In Abbildung 2.1 ist eine Prognose für den weltweiten Anstieg des Bedarfs an Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff aufgetragen. Dieser ist unterteilt in verschiedene Anwendungsgebiete. Laut dieser Prognose wird die Automobilindustrie den Bedarf der Luft- und Raumfahrt Ende 2020 übertreffen. Die Windenergie verwendet Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffe nur in den Gurten der Rotorblättern. Dennoch ist der weltweite Bedarf sehr hoch. (Witten/Schuster 2017, 44 f.)

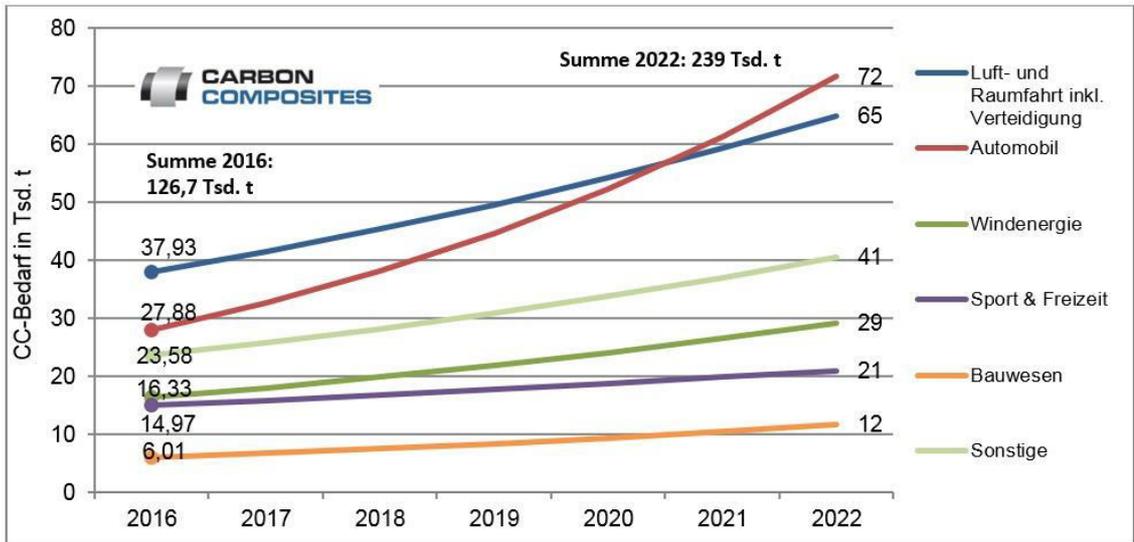


Abbildung 2.1: weltweiter Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff Umsatz nach Anwendungsgebieten (Quelle: Witten/Schuster 2017, 44)

2.1 Verstärkungsfaser

In Verbundwerkstoffen sollen die verwendeten Verstärkungsadditive die Kräfte aufnehmen. Dafür müssen diese von der Matrix eingeleitet werden können. Dies geschieht über die Grenzfläche zwischen Faser und Matrix. Um die Krafteinleitung zu optimieren, muss das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Verstärkungsadditives möglichst groß sein. (Bonnet 2016, 88)

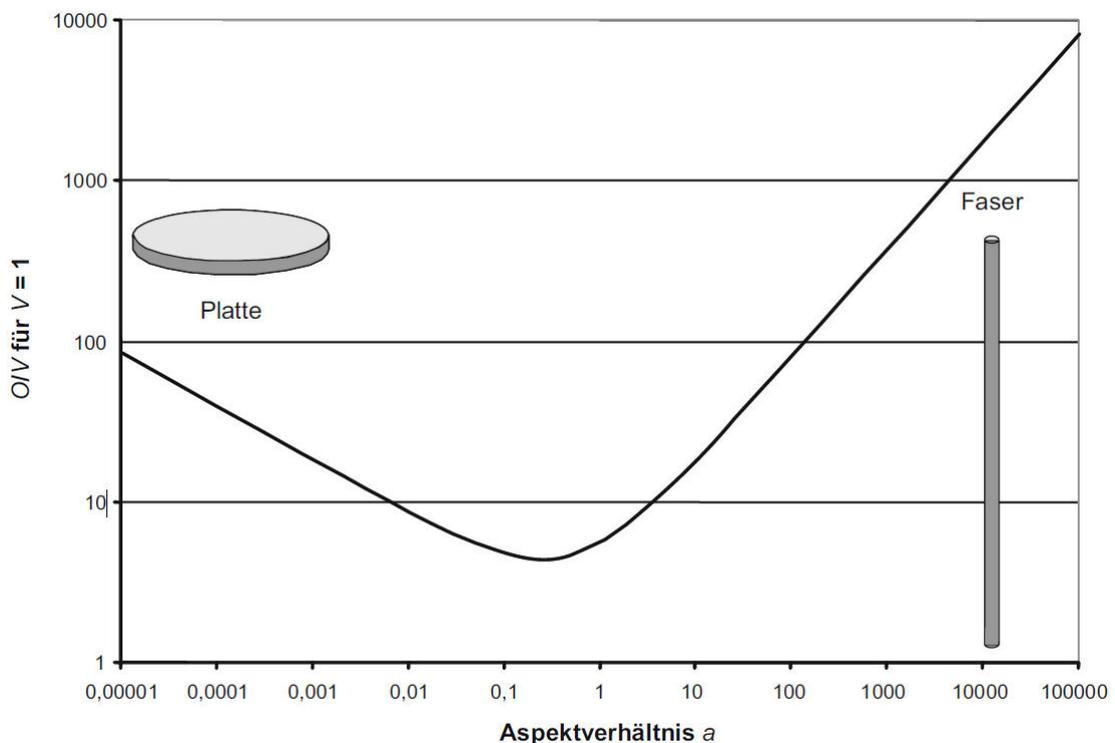


Abbildung 2.2: Optimale Verstärkungsstruktur (Quelle: Bonnet 2016, 89)

In Abbildung 2.2 ist für einen zylindrischen Körper das Verhältnis der Oberfläche über dem Volumen über dem Verhältnis der Länge über der dicke (dem Aspektverhältnis) aufgetragen. Bei einem sehr kleinen Aspektverhältnis handelt es sich um eine Platte, bei einem sehr großen Aspektverhältnis um eine Faser. Die Faser ist mit dem sehr großen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen der Platte vorzuziehen. Die Kraft kann durch die große Oberfläche optimal eingeleitet werden. (Bonnet 2016, 89)

Durch die kleinen Durchmesser der Fasern können sich außerdem nur kleine Defekte ergeben. Jeder Defekt bewirkt eine Spannungsspitze. Besonders bei spröden Werkstoffen können die Spannungsspitzen nicht durch plastische Verformung abgebaut werden. Das hat zur Folge, dass ein Defekt einen Bruch der ganzen Faser auslöst. Bei einer dünneren Faser ist die Wirkung demnach geringer. Die Festigkeitszunahme von dünneren Fasern wird Größeneffekt genannt. (Schürmann 2007, 21 f.)

Verstärkungsfasern werden hauptsächlich anhand des Faserwerkstoffs unterschieden. Als Werkstoff für Verstärkungsfasern eignen sich sowohl organische und anorganische Fasern, als auch Naturfasern und Metallfasern. Einige der möglichen Faserwerkstoffe sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

**Tabelle 2.1: Faserwerkstoffe
(nach Schürmann 2007, 26)**

Organische Fasern	Kohlenstoff, Aramid, Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid, (PA), Polyester (PES), Polyacrylnitril (PAN)
Anorganische Fasern	Glas, Basalt, Quarz, SiC, Al ₂ O ₃ , Bor, Asbest ...
Naturfasern	Haare, Wolle, Seide, Baumwolle, Flachs, Sisal, Hanf, Jute, Ramie, Bananenfaser
Metallfasern	Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel, Beryllium, Wolfram

In der industriellen Produktion werden hauptsächlich Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern verwendet. In weniger festigkeitskritischen Anwendungsbereichen wie beispielsweise Innenverkleidungen von Pkws werden auch zunehmend Naturfasern eingesetzt. Alle weiteren Fasern werden nur eingesetzt, wenn besondere Voraussetzungen erfüllt werden müssen. (Schürmann 2007, 26) In den Versuchsteilen dieser Arbeit werden nur Kohlenstofffasern verwendet.

Die Eigenschaften der Fasern unterscheiden sich je nach Herstellungsprozess stark, weshalb beispielsweise keine exakte Zugfestigkeit für Glasfasern angegeben werden kann, sondern nur ein Bereich. Die speziellen Eigenschaften einer Faser unterliegen dem

Optimierungsprozess bei der Herstellung. In Tabelle 2.2 sind die Materialeigenschaften einer Auswahl an Faserwerkstoffen angegeben.

Tabelle 2.2: Materialwerte ausgewählter Faserwerkstoffe
(Quelle: angepasst nach Rösler et al. 2016, 323)

Werkstoff	ρ / g/cm ³	E / GPa	σ_m / MPa	ε_m / %
Glasfasern	2,5 - 2,6	69 - 85	1500 - 4800	1,8 - 5,3
Aramidfasern	1,4 - 1,5	65 - 147	2400 - 3600	1,5 - 4,0
Polyethylenfasern	0,97	62 - 175	2200 - 3500	2,7 - 4,4
Kohlenstofffasern	1,75 - 2,2	140 - 820	1400 - 7000	0,2 - 2,4

An die Fasern werden drei Forderungen gestellt:

$$E_F > E_M \quad (2.1)$$

$$\sigma_{Fm} > \sigma_{Mm} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{Mm} > \varepsilon_{Fm} \quad (2.3)$$

Die erste Forderung (2.1) ist, dass die Hauptlasten von der Faser getragen werden. Dafür muss der Zugmodul der Faser deutlich größer als der Zugmodul der Matrix sein. Der Elastizitätsmodul der Matrix sollte allerdings auch möglichst hoch sein, sodass bei Druckbelastungen eine Stützende Wirkung vorhanden ist. Die zweite Forderung (2.2) ist, dass die Festigkeit der Faser größer ist, als die der Matrix. Ansonsten wird die Faser ihrer Funktion als Verstärkungsfaser nicht gerecht. Die dritte Forderung (2.3) ist, dass die Bruchdehnung der Matrix größer ist als die der Faser. Dadurch kann die volle Festigkeit der Faser ausgenutzt werden. (Schürmann 2007, 93)

Neben dem Faserwerkstoff werden die Fasern auch nach ihrer Länge unterschieden. Dabei erfolgt eine Einteilung in Kurzfasern (0,1-1 mm), Langfasern (1-50 mm) und Endlosfasern (>50 mm). (Schürmann 2007, 138) Naturfasern liegen immer als Kurzfasern oder Langfasern vor und können nur durch verdrehen zu quasi Endlosfasern verarbeitet werden. Künstliche Fasern können direkt als Endlosfasern hergestellt werden. (Schürmann 2007, 26)

Die sehr dünnen einzelnen Endlosfasern werden meist zu Faserbündeln zusammengefasst, die Rovings genannt werden. Es ist jedoch auch möglich, die Fasern zu verspinnen oder verdrehen. Die Rovings können in Gelegen oder Geweben verarbeitet werden. Bei Gelegen liegen die Rovings parallel nebeneinander und werden mit einem Nähfaden vernäht und so zusammengehalten. Es ist auch möglich, die Rovings in unterschiedlichen Faseranordnungen aufeinander zu legen und zu vernähen. In einem Gewebe sind die Rovings selbst verwoben. (Rösler et al. 2016, 301)

2.2 Matrix

Die Auswahl des Matrixwerkstoffes entscheidet maßgeblich über das Korrosionsverhalten, die Temperatur- und Brandbeständigkeit und die chemische Beständigkeit. (Cherif 2011, 649)

Für den Einsatz als Matrixwerkstoff sind alle Werkstoffklassen möglich. Neben Polymeren können so beispielsweise auch Metalle oder Keramiken als Matrixwerkstoff verwendet werden. Bei Metallmatrix-Verbundwerkstoffe werden hauptsächlich Aluminium, Magnesium und Titan als Matrixwerkstoff verwendet. Der Vorteil zu einer Polymermatrix liegt in der Einsatzmöglichkeit bei hoher Temperatur. Es wird jedoch bei der Herstellung ebenfalls eine hohe Temperatur benötigt, was den Prozess aufwendig macht. Bei Keramikmatrix-Verbundwerkstoffen wird durch die Fasern die Bruchzähigkeit erhöht. Sie können bei extrem Temperaturen eingesetzt werden. (Rösler et al. 2016, 304 f.)

Am meisten verwendet werden Polymermatrix-Verbundwerkstoffe. (Witten/Schuster 2017, 35) Als Polymermatrix können Duroplaste, Thermoplaste oder Elastomere eingesetzt werden. (Schürmann 2007, 83)

Duroplaste entstehen durch eine chemische Vernetzungsreaktion. Für die Reaktion wird dem Reaktionsharz ein Härter beigemischt. Sie kann durch zuführen von Wärme stark beschleunigt werden. Die Vernetzung erfolgt räumlich engmaschig und die Anordnung der Moleküle ist amorph. Die Reaktionsharze haben bei Verarbeitungstemperatur meist eine niedrige Viskosität und die Fasern können daher leicht getränkt werden. (Schürmann 2007, 84)

Thermoplaste bestehen aus räumlich nicht vernetzten Makromolekülen. Daher kommt es besonders bei höheren Temperaturen zum Kriechen. Zusammengehalten werden die Makromoleküle durch Nebervalenzbindungen, sie sind nicht chemisch gebunden. Durch Temperaturerhöhung vergrößert sich der Kettenabstand und die Thermoplaste werden plastisch verformbar. Wird die Temperatur weiter erhöht, lösen sich die physikalischen Bindungen und der Thermoplast wird flüssig. (Schürmann 2007, 85 f.) Das Aufschmelzen ist reversibel, solange die Zersetzungstemperatur nicht überschritten wird. (Teschner 2013, 116) Dadurch sind Thermoplaste verschweißbar und können leicht recycelt werden. (Schürmann 2007, 85 f.)

Elastomere verfügen über nur schwach räumlich vernetzte Molekülketten. Dadurch sind sie sehr dehnfähig, wobei die Verformung reversibel erfolgt. Elastomere sind wie Duromere nicht schmelzbar. Die Elastomere verfügen über eine geringe Steifigkeit und können die Fasern daher bei Druckbelastung nicht stützen. Sie werden für Faserverbundwerkstoffe nur als Matrix eingesetzt, wenn ausschließlich Zugbelastungen vorliegen. (Schürmann 2007, 86 f.)

Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht der Materialeigenschaften von ausgewählten Duroplasten und Thermoplasten, die als Matrixwerkstoff verwendet werden.

Tabelle 2.3: Materialeigenschaften von Duroplasten und Thermoplasten
(Quelle: nach Witten 2014, 42)

	Zug			Biegung		Dichte
	Modul	Festigkeit	Dehnung	Modul	Festigkeit	
Duroplast	GPa	MPa	%	GPa	MPa	g/cm ³
Ungesättigte Polyesterharze (UP)	2,8 – 3,5	40 – 75	1,3 – 3,3	3,4 – 3,8	80 – 130	1,25 – 1,30
Vinylesterharze (VE)	2,9 – 3,1	~80	3,5 – 5,5	3,0 – 3,7	120 – 140	~1,1
Epoxidharze (EP)	2,8 – 3,4	45 – 85	1,3 – 5,0	2,6 – 3,6	100 – 130	> 1,16
Thermoplast						
Polypropylen (PP)	1,3 – 1,8	30 – 40	> 50	1,1 – 1,6	~ 30	0,90 – 0,91
Polyamid 66 – trocken	3,0 – 3,5	75 – 100	> 20	~ 2,8	~ 110	1,13 – 1,20
Polyethylenterephthalat (PET) – teilkristallin	2,8 – 3,5	55 – 80	> 20	~ 2,3	~ 90	1,38 – 1,40
Polyphenylensulfid (PPS)	3,3 – 3,5	70 – 110	1,5	3,5 – 3,8	100–140	1,30 – 1,35
Polyetheretherketon (PEEK)	3,5 – 3,8	90 – 105	> 50	~ 3,6	~ 150	1,32

2.3 Verarbeitung

Im Folgenden sollen das Handlaminierverfahren, das Vakuuminfusionsverfahren und Verarbeitung von Prepreg beschrieben werden. Es gibt noch viele weitere Verfahren, in denen faserverstärkter Kunststoff hergestellt wird, diese sind jedoch für die Windenergie nicht relevant.

Im Handlaminierverfahren werden die Lagen schichtweise eingelegt und mit Reaktionsharz getränkt. Für das Einbringen des Harzes und das Verdichten werden einfache Werkzeuge

wie Pinsel und Andruckrolle verwendet. Wird der Aufbau größer oder komplexer, muss die Topfzeit des Harzes lang genug sein. Wenn die Bauteilqualität erhöht werden soll, kann der Aufbau mit einer Vakuumfolie abgedichtet und während der Aushärtung mit Vakuum komprimiert werden. (Cherif 2011, 653)

Beim Vakuuminfusionsverfahren werden alle Verstärkungslagen mit allen Fertigungshilfen wie Trenngewebe und Verteilmedium trocken eingelegt und mit einer Vakuumfolie abgedeckt. Aufgrund des Unterdrucks im Aufbau wird das Harz aus dem Vorratsbehälter (mit Umgebungsdruck) gezogen. Es fließt vom linien- oder ringförmigen Anguss durch das Verstärkungsmaterial bis zur Absaugung. Durch gezielten Einsatz von Fließhilfen und Variation der Anzahl und Positionierung der Angussprofile können auch große Bauteile hergestellt werden. Die Vakuumfolie, die als flexible Oberseite der Form dient, kann bei Bedarf auch gegen eine feste Formhälfte getauscht werden, sodass beide Bauteiloberflächen glatt sind. In Abbildung 2.3 ist der Vakuuminfusionsprozess schematisch dargestellt. Das Harz fließt durch das Verteilmedium und tränkt von dort in Dickenrichtung die Verstärkungsfasern. (Cherif 2011, 653 f.)

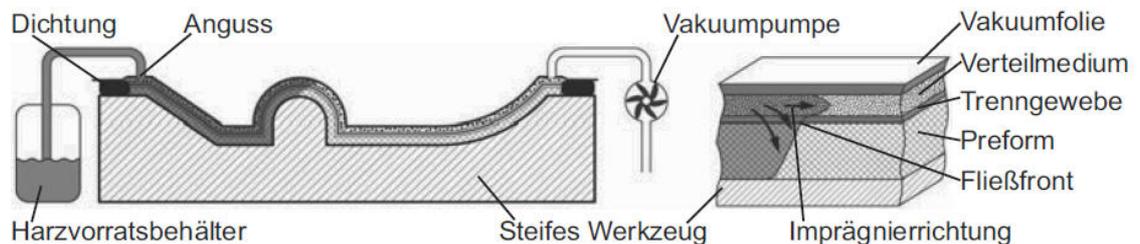


Abbildung 2.3: schematische Darstellung der Vakuuminfusion
(Quelle: Cherif 2011, 654)

Als Prepreg werden vorimprägnierte Fasern bezeichnet („pre-impregnated“). Prepregs wurden 1960 von Boeing für die Herstellung von unidirektionalen Strukturbauteilen entwickelt. Prepregs unterscheiden sich heutzutage stark durch die verwendeten Fasern, das verwendete Harz und den Faservolumenanteil. Durch die Zusammensetzung wird auch der Verarbeitungsprozess bestimmt. Hergestellt wird das Prepreg meist mit der Schmelzharzimidprägnierung. Das Harz wird erwärmt und auf eine Trägerfolie aufgebracht. Mit beheizten Walzen wird die Trägerfolie auf die Fasern gepresst und die Fasern so mit dem Harz imprägniert. Das fertige Prepreg wird abgekühlt und aufgerollt. Je nach verwendetem Harzsystem kann das Prepreg für einige Stunden oder einige Wochen bei Raumtemperatur gelagert werden. Um die Haltbarkeit weiter zu verlängern, werden Prepregs in der Regel in Tiefkühlräumen gelagert. Die Besonderheit beim Prepreg ist, dass sehr gleichmäßige Materialeigenschaften bei hohem Faservolumengehalt (etwa 60%)

erreicht werden. (Witten 2014, 136 f.) In der Luftfahrt wird die Autoklav Technik eingesetzt. (Witten 2014, 316) Im Autoklav wird zusätzlich zum Vakuumaufbau über dem Bauteil noch ein Kammerdruck von bis zu 70 bar erzeugt. Neben dem einstellbaren Druck wird auch das Temperaturprofil gesteuert. Die Autoklaven werden nach den Kundenwünschen angefertigt. Der bisher größte hat eine Beschickungslänge von 40 m. (Witten 2014, 307 ff.) Sogenannte „out of autoclave“ Technologien, also ein Aushärten ohne Autoklav, können die Produktionskosten erheblich senken. Insbesondere für große Bauteile ist ein Prozess ohne Autoklav interessant, es wird jedoch nicht die gleiche Qualität erreicht. (Witten 2014, 316)

3 Grundlagen Windenergieanlagen

3.1 Entwicklung der Windenergieanlagen

Die Nutzung der Windenergie ist keine Idee der Neuzeit. Es wird vermutet, dass bereits die Ägypter vor 3000 Jahren erste Windmühlen erbaut haben, wobei es hierfür keine beweiskräftigen Belege gibt. Erste zuverlässige Berichte gibt es aus dem Jahr 644 n. Chr. über eine Windmühle in dem persisch-afghanischen Grenzgebiet Seistan. Hierbei handelt es sich um eine einfache Windmühle mit vertikaler Drehachse, die zum Getreidemahlen genutzt wurde. Einige Jahrhunderte später gibt es auch Überlieferungen von chinesischen Windrädern. Sie hatten einen sehr ähnlichen Aufbau und wurden zum Wasserschöpfen benutzt. Es ist heute nicht mehr klar festzustellen, ob die Chinesen oder die Perser die Windmühlen früher erfunden wurden. Die ersten Hinweise auf Windmühlen mit horizontaler Drehachse gibt es aus dem Jahr 1119. Zu der Zeit soll bereits eine Bockwindmühle in der Provinz Brabant erbaut worden sein. Die Windmühlen wurden immer weiterentwickelt, so bewegte sich beispielsweise bei der Holländer Mühle im 16. Jahrhundert nur noch die Turmkappe und der Turm stand fest. (Hau 2016, 1 ff.)

Mitte des 19. Jahrhunderts standen in Deutschland mehr als 20 000 Windmühlen, insgesamt etwa 200 000 in ganz Europa. Mit der Entwicklung der Dampfmaschinen nahm der Mühlenbestand deutlich ab. Erst mit der Elektrifizierung der ländlichen Gebiete Anfang des 20. Jahrhunderts verlor die Windmühle endgültig an Bedeutung und verschwand zunehmend. (Hau 2016, 12 f.)

Für die heutigen Windenergieanlagen, die zur Stromgewinnung genutzt werden, hat sich der Aufbau mit horizontaler Drehachse und aerodynamisch geformten Rotorblättern durchgesetzt. Diese Bauweise bietet einige Vorteile. Durch das drehen der Rotorblätter entlang ihrer Längsachse kann die Rotordrehzahl eingestellt werden. Dadurch ist eine Leistungssteuerung und eine Schutz bei hohen Windgeschwindigkeiten gegeben. Außerdem kann durch Optimierung des aerodynamischen Profils ein sehr hoher Wirkungsgrad erreicht werden. (Hau 2016, 71)

Die Leistung P einer Windkraftanlage kann aus der Windgeschwindigkeit v , dem Leistungsbeiwert c_p , der vom Rotor überstrichenen Fläche A und der Dichte der Luft ρ_L berechnet werden. (Jamieson/Hassan 2011, 4)

$$P = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho_L \cdot A \cdot v^3 \quad (3.1)$$

Der Leistungsbeiwert beschreibt, welcher Anteil der Windenergie tatsächlich genutzt werden kann. Er ist auf den Betz Faktor von 0,593 limitiert. Dieser Faktor ist der Tatsache geschuldet, dass die Windgeschwindigkeit durch den Rotor nicht vollständig abgebremst werden kann. Das würde zu einem Luftstau führen, sodass keine Luft nachströmen und keine Leistung entnommen werden kann. (Hau 2016, 87) Der Leistungsbeiwert wird durch Optimierung des Rotorblattdesigns verbessert und kann durch die Nutzung von drehzahlvariablen Anlagen über einen großen Windgeschwindigkeitsbereich maximal gehalten werden. (Jamieson/Hassan 2011, 4) Aufgrund von Verlusten kann der Betz Faktor von 0,593 als Leistungsbeiwert nicht erreicht werden. Moderne Anlagen erreichen allerdings bereits einen Leistungsbeiwert von über 0,5. (Wesselak 2017, 641)

Die Formel 3.1 zeigt, eine lineare Abhängigkeit von der durchströmten Rotorfläche. Diese führt zu einer quadratischen Abhängigkeit vom Rotordurchmesser. Außerdem ist die Leistung kubisch von der Windgeschwindigkeit abhängig. Um die Leistung zu erhöhen werden daher windstarke Standorte angestrebt und der Rotordurchmesser so groß wie möglich gewählt. (Jamieson/Hassan 2011, 4) In Abbildung 3.1 ist der Trend zu immer größeren Anlagen gut veranschaulicht.

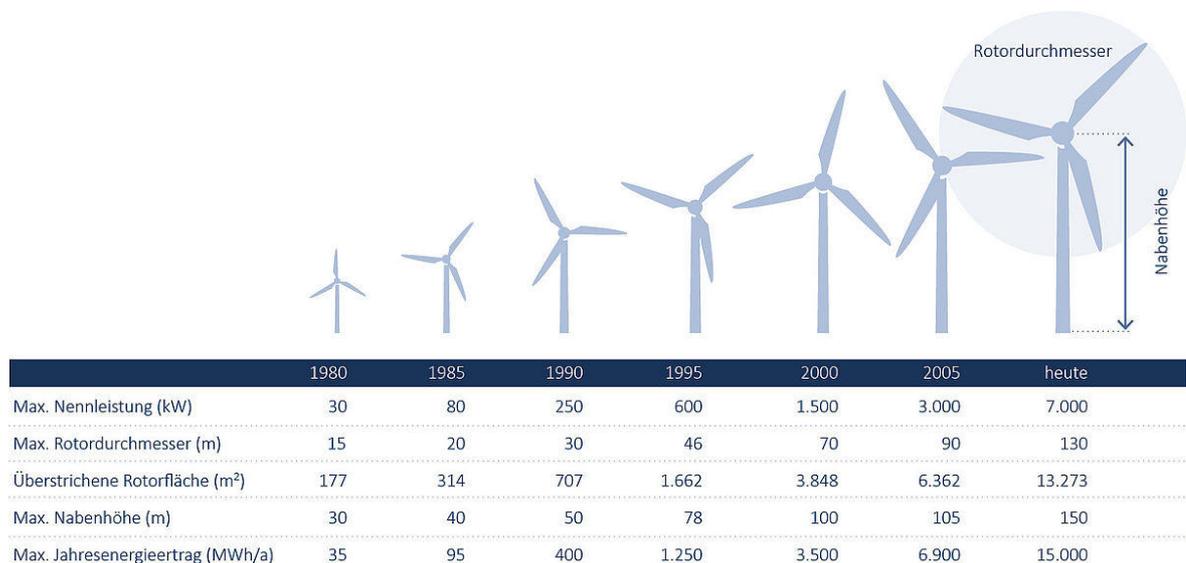


Abbildung 3.1: Entwicklung der Windenergieanlagen 1980 bis heute
(Quelle: Bundesverband WindEnergie e.V.)

3.2 Aufbau eines Rotorblatts

In Abbildung 3.2 ist ein beispielhafter Querschnitt eines Rotorblattes dargestellt. Das Rotorblatt besteht aus zwei Schalen, die an der Vorder- und Hinterkante verklebt sind. Die Schalen werden in Sandwichbauweise hergestellt. Zwischen die Innen- und Außenseite der Schale wird ein Schaum- oder Holzkernmaterial eingelegt. Dieses Kernmaterial verfügt über ein sehr geringes Gewicht und dient als Abstandshalter zwischen der Innen- und Außenseite aus faserverstärktem Kunststoff. Dadurch können größere Momente aufgenommen werden. Die Schale hat die Aufgabe Torsionslasten aufzunehmen. Für die sehr großen Biegelasten werden Gurte in die Schale eingelegt. Unter den Gurten befinden sich Stege, die mit beiden Schalen verklebt werden. Sie nehmen die Querkräfte auf. (Wesselak 2017, 661 f.)

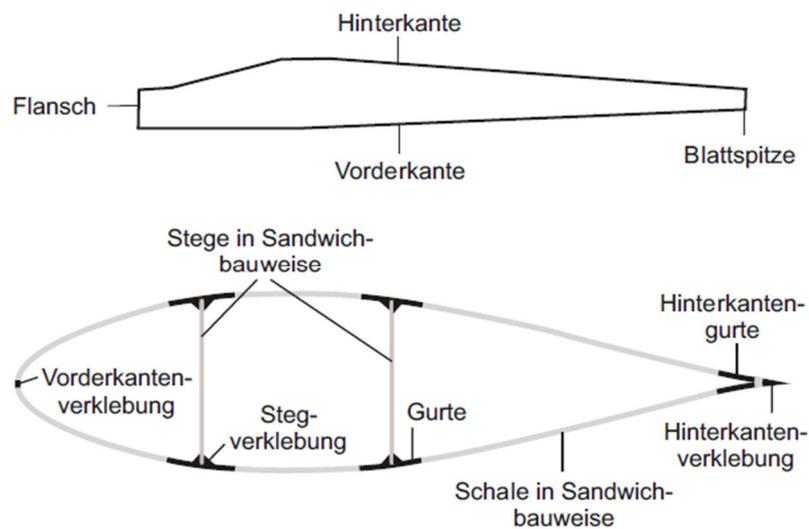


Abbildung 3.2: Rotorblatt Längsprofil (oben) und Querschnitt (unten)
(Quelle: Wesselak 2017, 662)

Die Rotorblätter werden heutzutage aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Bei größeren Rotorblättern werden hochbelastete Teile wie beispielsweise die Gurte aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Nur dadurch können die hohen Steifigkeiten bei geringerem Gewicht realisiert werden. Die Herstellung eines kompletten Rotorblatts aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff ist aus Kostengründen nicht wirtschaftlich. (Hau 2016, 314) Die französische Firma Atout Vent hat kleine Rotorblätter vollständig aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Bei gleicher aerodynamischer Kontur konnte das Gewicht so auf ein Drittel reduziert werden. (Jamieson/Hassan 2011, 62)

3.3 Schäden und Reparaturen an Rotorblättern

Schäden an Rotorblättern können während dem Betrieb aufgrund von Herstellungsfehlern, mechanischen Lasten oder Umwelteinflüssen auftreten. Mechanische Lasten werden beispielsweise durch hohe Windgeschwindigkeiten oder Materialermüdung hervorgerufen. Umwelteinflüsse sind beispielsweise die Luftfeuchtigkeit, Temperaturen und Blitzeinschläge. Es können allerdings bereits vor der Inbetriebnahme Schäden entstehen. So kommt es häufig bereits beim Transport und der Montage der Rotorblätter zu Schädigungen. Um diese Schäden möglichst gering zu halten, wird vor und nach der Montage eine Inspektion durchgeführt. Einige typische Schäden sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Ein häufiges Problem sind Erosionsschäden an der Vorderkante. Erosionsschäden sind keine strukturellen Schäden, es wird allerdings das aerodynamische Profil gestört und so die Effizienz der Anlage reduziert. Außerdem ist das Laminat nicht mehr vor Witterungseinflüssen geschützt. Produktionsfehler wie Ondulationen, falsche Faserorientierungen und Poren können zum Versagen führen. (Katnam et al. 2015, 119)

Blitzeinschläge führen meist zu große Schäden. Daher werden Blitzschutzsysteme eingesetzt, die den Strom von den Rezeptoren über Ableiter in das Fundament leiten. (Heier 2018, 464) Hierbei stellen kohlefaserverstärkte Bauteile eine besondere Herausforderung dar. Sie sind elektrisch leitend und daher anfällig für Blitzeinschläge. (Hau 2016, 311)

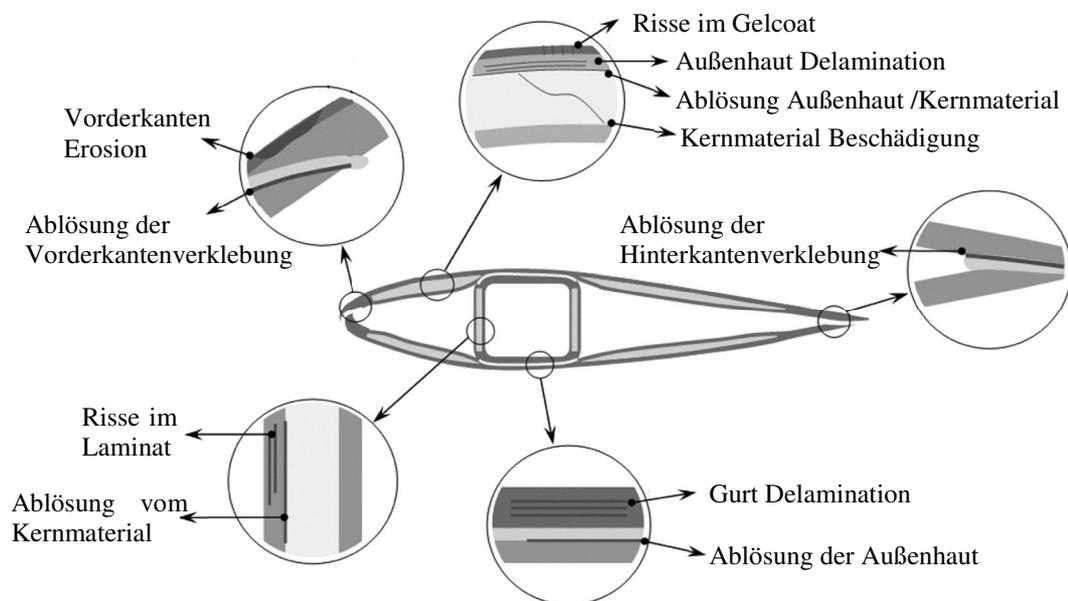


Abbildung 3.3: Typische Schäden am Rotorblattquerschnitt
(Quelle: verändert nach Katnam et al. 2015, 117)

Während Inspektionen oft durch Seilteams ausgeführt werden können, werden Reparaturen in der Regel auf Rotorblattbefahranlagen (siehe Abbildung 3.4) durchgeführt. Sie werden in verschiedensten Versionen angefertigt. Es ist zu beachten, dass die Bühnen nur bis zu einer

maximalen Windgeschwindigkeit eingesetzt werden können. Bei den Rotorblattbefahranlagen der Gebr. Käufer GmbH liegt die maximale Windgeschwindigkeit beispielsweise bei 11m/s. (Gebr. Käufer GmbH) Windkraftanlagen stehen allerdings an möglichst windreichen Standorten, wodurch Reparaturen nicht immer möglich sind. (Hau 2016, 864) Bei hohen Windgeschwindigkeiten wird das Arbeiten selbst auch zunehmend schwerer.



Abbildung 3.4: Rotorblattbefahranlage für Inspektionen und Reparaturen (Quelle: Gebr. Käufer GmbH)

Die meisten Schäden können von der Rotorblattbefahranlage aus repariert werden. Bei größeren Schäden beispielsweise am Gurt ist eine Reparatur an der Anlage eventuell nicht möglich und das Rotorblatt muss getauscht und am Boden repariert werden. Alle Reparaturen dürfen nur von qualifiziertem Personal ausgeführt werden und den Arbeitsanweisungen muss Folge geleistet werden. (*DNVGL-ST-0376*, 86 f.)

Der allgemeine Reparaturprozess ist immer ähnlich. Im ersten Schritt wird die Reparaturstelle vorbereitet. Die Oberfläche wird von Verschmutzungen gereinigt und anschließend das beschädigte Material entfernt. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass beim Schneiden oder Schleifen keine weiteren Bauteile beschädigt werden. Die Reparaturstelle wird geschäftet und mit Schleifpapier mit einer 120er Körnung geglättet. Abschließend wird die Reparaturstelle trocken und feucht gereinigt, um alle Staubrückstände zu entfernen. Im zweiten Schritt werden die Reparaturlagen zugeschnitten und mit dem Handlaminierverfahren verarbeitet. Hier ist auch eine Vakuumkompression oder das Infusionsverfahren möglich. Im dritten Schritt wird das Reparaturlaminat mit einer Heizmatte erwärmt und ausgehärtet. Die Temperatur und Aushärtezeit müssen mitgeschrieben werden. Im letzten Schritt wird die Oberflächenversiegelung wiederhergestellt. (*DNVGL-ST-0376*, 87 f.)

4 Versuchsplanung

Die für diese Arbeit ausgewählten Versuche sind angelehnt an das Materialqualifizierungsprogramm von Nordex. Es wird entschieden, welche Werkstoffeigenschaften untersucht werden sollen und welche Versuche dafür durchgeführt werden müssen. Da es auch um die Anwendbarkeit für Reparaturen gehen soll, werden auch gestufte Schäftproben getestet. In Tabelle 4.1 sind die geplanten Versuche aufgelistet. Die Versuche werden mit Infusionsproben und Prepregproben durchgeführt Dabei sind die Prepreg Probenplatten mit einem „P“ am Ende bezeichnet. Bei den Probenplatten P5A und P7A wird das Primärlaminat mit dem Infusionsverfahren hergestellt und mit Prepreg auflaminiert (siehe Abschnitt 5.1.3 und 5.1.4)-

Tabelle 4.1: Versuchsprogramm

Material-eigenschaften	Versuch	DIN	Probenmaße / mm	Faser-orientierung	Platte
Zugfestigkeit und Zugmodul	0° Zugversuch	DIN EN ISO 527-5 / A / 2	250 · 15±0,5 · 1±0,2	0°	P2/P2P
	90° Zugversuch	DIN EN ISO 527-5 / A / 1	250 · 25±0,5 · 2±0,2	90°	P1/P1P
Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul	0° Druckversuch	DIN EN ISO 14126 / A	110±1 · 0±0,5 · 2±0,2	0°	
Schubfestigkeit und Schubmodul	±45° Zugversuch	DIN EN ISO 14129	250 · 25±0,5 · 4Lagen	±45° symmetrisch	P3/P3P
Glasübergangstemperatur	DSC Untersuchung	DIN 65467 - A	Ø2,7 · 1		
Binefestigkeit Infusion	Zugversuch einschichtig überlappte Proben	DIN EN 6060 II.1 B	200 · 25±0,5 · (2 · 2±0,1)	0°	P4A
Binefestigkeit Prepreg		DIN EN 6060 II.1 B	200 · 25±0,5 · (2 · 2±0,1)	0°	P5A
Zugfestigkeit geschäftete Probe Infusion	Zugversuch gestufte Schäftproben	DIN EN 6066 B	562 · 25,4±0,2 · 8Lagen	0°	P6A
Zugfestigkeit geschäftete Probe Infusion		DIN EN 6066 B	562 · 25,4±0,2 · 8Lagen	0°	P7A
Porosität	Ultraschalluntersuchung				Alle
Porosität und Homogenität	Schliffbilder		20 · 10	0°	P1, P1P, P3, P3P, P4A, P5A, P6A, P7A

Es wird überschlagen, wie viel Material für die Probenplatten voraussichtlich benötigt wird. Beispielhaft wird im Folgenden die Berechnung für die Platte P2 durchgeführt.

In allen verwendeten DIN wird gefordert, dass mindestens fünf Proben geprüft werden. In dieser Arbeit sollen stets mindestens acht Proben geprüft werden. Dadurch ist es möglich Proben aus der Auswertung auszuschließen, wenn diese beispielsweise während dem Versuch im Probenhalter rutschen. Außerdem ist bei einer größeren Anzahl an Proben ein genaueres Ergebnis zu erwarten.

Für acht 0° Zugversuch Probekörper mit den Abmaßen 250x15 mm wird mindestens eine Fläche von 250 x 120 mm benötigt. Bei den Infusionsplatten ist an einer Kante ein Stück Fließhilfe für die Absaugung (siehe Abschnitt 5.1.1.3). Hier müssen etwa 40 mm entfernt werden. Außerdem ist der Schnittspalt noch nicht berücksichtigt. Damit die Proben nicht aus dem Randbereich der Probenplatten entnommen werden, wird auf jeder Seite etwa 50-70 mm hinzugefügt. Für die Platte P2 wird daher eine Größe von 400 mm · 250 mm gewählt. Dadurch können auch noch Proben für Schlibfbilder aus dem Rand geschnitten werden.

Für die 0° Zugproben ist eine Dicke h_{soll} von $1 \pm 0,2$ mm vorgegeben. Mit dem Faservolumenanteil φ_f , der Dichte der Faser ρ_f und dem Flächengewicht des trockenen Geleges $m_{f,Fläche}$, kann die benötigte Lagenanzahl n berechnet werden (Schürmann 2007, 167)

$$n = h_{soll} \cdot \varphi \cdot \frac{\rho_f}{m_{f,Fläche}} \quad (4.1)$$

$$n = 1\text{mm} \cdot 55\% \cdot \frac{1,78 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{\frac{600\text{g}}{\text{m}^2}} = 1,63 \text{ Lagen}$$

Es werden daher zwei Lagen gewählt und nach umstellen der Formel 4.1 ergibt sich eine theoretische Dicke von 1,23 mm, was knapp über der geforderten Dicke von $1 \pm 0,2$ mm liegt.

Mit der Größe der Platten, der Anzahl der Lagen und der Breite der Gelegerollen können die benötigten Laufmeter Gelege bestimmt werden. Die Rolle des trockenen Kohlenstofffaser-Geleges für die Infusionsplatten hat eine Breite von 500 mm, die Prepreg Rolle 1250 mm. Für die Platte P2 (Infusionsplatte) werden also 0,4 m benötigt, da die zwei Lagen mit einer Breite von 250 mm nebeneinander passen. In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der Materialabschätzung aufgetragen. Die farblich markierten Felder beim Prepreg zeigen, welche Lagen kombiniert wurden, um die Breite von 1250 mm möglichst gut auszunutzen. Die Gelben Felder ergeben eine Länge von 0,718 m bei einer Breite von 1000 mm. Bei den

blauen Feldern werden die erste und letzte Lage kombiniert, sodass sich eine Länge von 736 mm ergeben. Das gleiche gilt für die zweite und vorletzte und dritte und drittletzte. Diese drei Kombinationen neben einander sind 1200 mm breit und passen so auf das Prepreg Gelege. Die errechneten Mengen müssen großzügig aufgerundet werden, da bei Problemen bei der Plattenherstellung oder beim Zuschnitt möglicherweise mehr Material benötigt wird.

Für die Versuche stehen 25 Laufmeter trockenes Kohlenstofffaser-Gelege für die Infusionsplatten und 20 Laufmeter Prepreg zur Verfügung.

Tabelle 4.2: Materialabschätzung

Infusion			Prepreg		
Platte	Lagenanzahl · Länge · Breite / mm	benötigte Länge / m	Platte	Lagenanzahl · Länge · Breite / mm	benötigte Länge / m
P2	2 · 400 · 250	0,4	P2P	2 · 400 · 250	0,75
P1	3 · 350 · 500	1,05	P1P	3 · 350 · 500	
P3	4 · 500 · 500	1	P3P	4 · 500 · 500	1
P4	3 · 350 · 500	1,05			
P5	3 · 350 · 500	1,05			
P6	8 · 500 · 500	4			
P7	8 · 500 · 500	4			
P4A	3 · 350 · 500	1,05	P5A	3 · 350 · 500	0,718
P6A	1 · 470 · 400	0,47	P7A	1 · 470 · 400	0,736
	1 · 436 · 400	0,436		1 · 436 · 400	
	1 · 402 · 400	0,402		1 · 402 · 400	
	1 · 368 · 400	0,368		1 · 368 · 400	
	1 · 334 · 400	0,334		1 · 334 · 400	
	1 · 300 · 400	0,3		1 · 300 · 400	
	1 · 266 · 400	0,266		1 · 266 · 400	
	1 · 232 · 400	0,232		1 · 232 · 400	0,232
	1 · 198 · 400	0,198		1 · 198 · 400	
Summe:		16,606	Summe:		3,436

5 Probenherstellung

5.1 Herstellen der Probenplatten

5.1.1 Infusionsplatten

Der Prozess zur Herstellung von Infusionsplatten besteht aus vier Schritten, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden sollen. Als erstes erfolgt der Lagenzuschnitt. Hierbei werden die benötigten Lagen von der Gelegerolle geschnitten. Im zweiten Schritt wird die Metallplatte, die als Unterlage für den Lagenaufbau dient, mit einem Trennmittel eingetrennt. Das gewährleistet, dass die fertige Infusionsplatte von der Metallplatte gelöst werden kann. Im dritten Schritt erfolgen der Lagen und Vakuumaufbau. Hier werden die Lagen des Kohlenstofffaser-Geleges und alle benötigten Hilfsmaterialien eingelegt und das Vakuum gezogen. Im vierten Schritt findet die eigentliche Infusion statt. Hier gelangt das Harz in das Gelege. Das Aushärten und Tempern werden ebenfalls im vierten Abschnitt beschrieben.

5.1.1.1 Lagenzuschnitt

Die Kohlenstofffaserlagen werden mit einem CNC-Cutter zugeschnitten (siehe Abbildung 5.1).

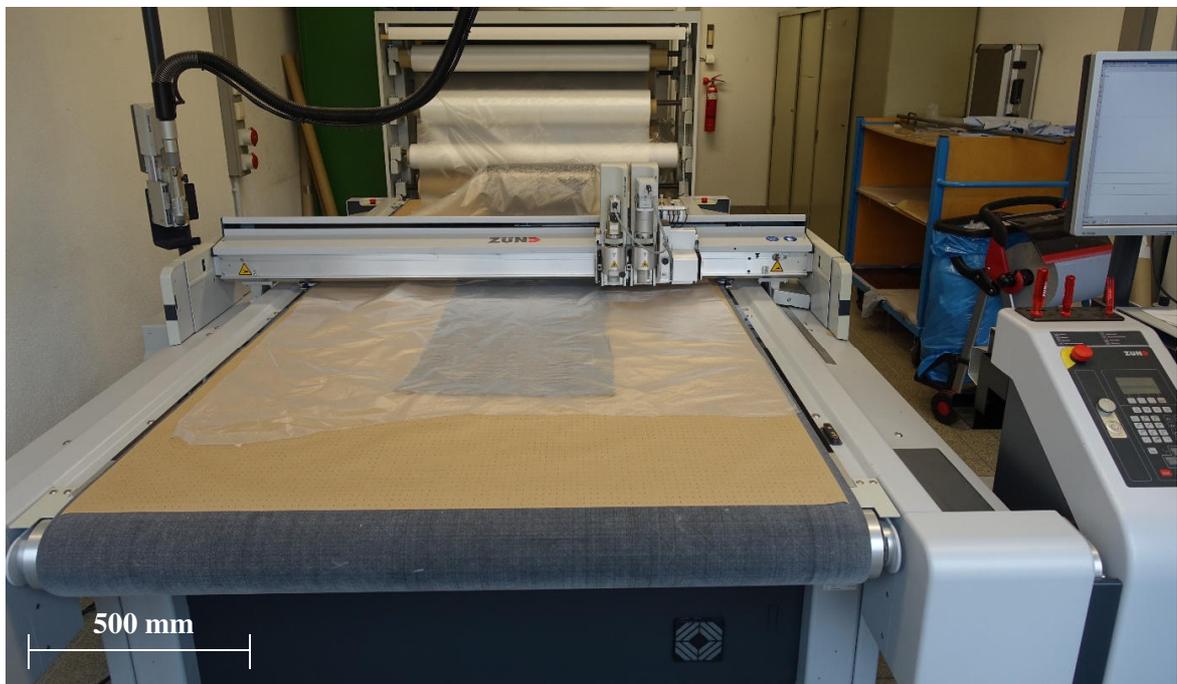


Abbildung 5.1: Kohlenstofffaser-Gelege Zuschnitt auf dem CNC Cutter

Hierfür wird ein dünnes perforiertes Papier über die gesamte Tischlänge gelegt. Darauf wird die Kohlenstofffaserrolle ausgerollt und mit einer dünnen Vakuumfolie bedeckt. Es ist

darauf zu achten, dass die Gelegebahn gerade liegt. Ist dies sichergestellt, wird Luft abgesaugt und auf diese Weise das Gelege durch die Vakuumfolie in Position gehalten. Die notwendigen Schnitte werden in der Bedienoberfläche eingestellt und anschließend mit einem rotierenden Schneidewerkzeug ausgeführt. Abschließend wird die Folie und das Papier auf beiden Seiten etwa 50 mm neben der Gelegebahn abgeschnitten. Dadurch können die fertig zugeschnittenen Lagen inklusive des Papiers und der Folie entnommen und aufeinander gelegt werden. Der Stapel mit einzelnen Lagen des Kohlenstofffaser-Geleges wird in Folie eingepackt und bis zur Verarbeitung so geschützt gelagert. Die benötigten Lagen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

5.1.1.2 Eintrennen

Die Infusion der Proben wird auf einer Metallplatte durchgeführt, die als ebene Unterlage dient. Die Platte wird mit Isopropanol gereinigt, um mögliche Fettrückstände zu beseitigen. Damit die fertige Probenplatte von der Metallplatte gelöst werden kann, muss ein Trennmittel aufgetragen werden. Um die Vakuumfolie später aufkleben zu können, müssen die Ränder mit einer Breite von etwa 50 mm abgeklebt werden. Anschließend wird die innere Fläche eingetrennt. Als Trennmittel wird Mikon 205 verwendet. Hierbei wird zuerst das Trennmittel dünn und gleichmäßig aufgetragen und nach etwa 20 Sekunden wird mit einem trockenen Tuch ohne Druck über die Oberfläche gestrichen, um das überflüssige Trennmittel abzutragen. Insgesamt werden fünf Schichten aufgetragen, wobei jede Schicht etwa 30 Minuten aushärtet. Die letzte Schicht härtet bis zum nächsten Tag aus. Das Eintrennen sollte stets unter einer Absaugung stattfinden.

Wird die Metallplatte zum zweiten Mal verwendet, so sind mögliche Harzreste gründlich zu entfernen. Das grundsätzliche Vorgehen des Eintrennens ist dasselbe wie zuvor beschrieben, jedoch genügen nun zwei neue Schichten. (Lange+Ritter GmbH)

5.1.1.3 Lagen- und Vakuumaufbau

Am Rand der eingetrennten Metallplatte werden zwei Reihen Vakuum-Dichtband nebeneinander aufgebracht. An den Ecken überlappt das Dichtband etwa bis zur Hälfte der Dicke. Dadurch soll die Dichtigkeit sichergestellt werden.

Der folgende Ablauf wird für die Platte P1 beschrieben. Sie besteht aus drei Lagen, die in Faserrichtung 350 mm lang sind und 500 mm breit. Der Aufbau ist in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt, wobei hier die Randabdichtung und Vakuumfolie fehlen.

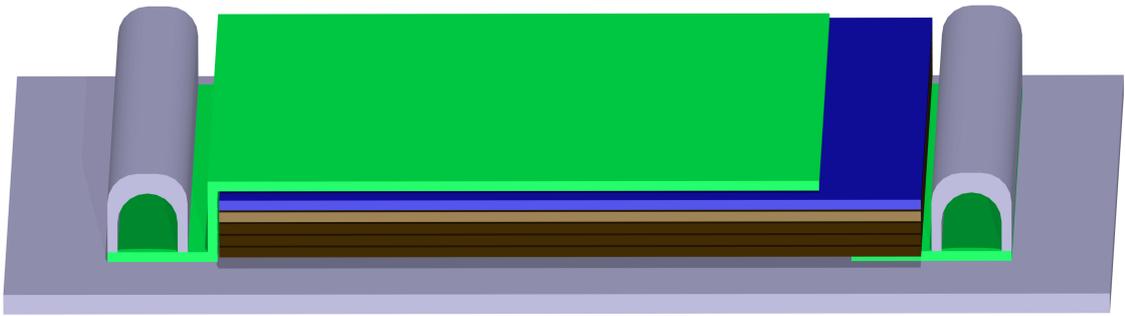


Abbildung 5.2: Schematischer Infusionsaufbau

Ein 60 mm mal 460 mm großes Stück Fließhilfe (in Abbildung 5.2 grün) wird neben das innere Dichtband gelegt. Darauf wird die erste Lage des Kohlenstofffaser-Geleges (in Abbildung 5.2 dunkel braun) so platziert, dass etwa 20 bis 30 mm der Fließhilfe von der langen Seite des Geleges bedeckt werden. Die Fließhilfe dient später als Absaugung. Alle weiteren Lagen des Kohlenstofffaser-Geleges werden auf der ersten Lage platziert.

Auf das Kohlenstofffaser-Gelege werden anschließend ein Abreibgewebe (in Abbildung 5.2 beige), eine Lochfolie (in Abbildung 5.2 dunkel blau) und eine Fließhilfe (in Abbildung 5.2 dunkel grün) gelegt. Das Abreibgewebe und die Lochfolie haben die gleiche Größe wie die Kohlenstofffaser-Gelege, sodass sie diese vollständig bedecken. Die Fließhilfe ist auf der Seite des Angusses etwa 30 mm länger als die Lagen darunter, um später den Angusskanal darauf zu platziert. Auf der gegenüberliegenden Seite endet die Fließhilfe etwa 40 mm vor dem Ende der Kohlenstofffaserlagen, dafür liegt wie zuvor beschrieben auf dieser Seite ein Stück Fließhilfe unter den Kohlenstofffaserlagen. So wird sichergestellt, dass sich die Harzfließfront am Ende aufstellt und das Harz durch das Kohlenstofffaser-Gelege fließt. An den zwei übrigen Seiten ist die Fließhilfe etwa 20 mm kürzer als die Kohlenstofffaserlagen, sodass hier kein Harz über den Rand fließt. Außerdem wird ein ca. 50 mm breiter Streifen Folie auf den Rand gelegt. Dieser dient als Randabdichtung und wird so platziert, dass er den 20 mm breiten Streifen ohne Fließhilfe über die gesamte Länge des Geleges abdeckt und die restlichen 30 mm auf der Metallplatte liegen. So wird das Herunterfließen des Infusionsharzes verhindert.

Für den Anguss und die Absaugung werden Silikonprofile verwendet. Diese Profile werden über die gesamte Breite der Fließhilfe gelegt. Dadurch ist ein linearer Anguss gewährleistet. Ein Schlauch mit 6 mm Innendurchmesser verbindet die Profile mit dem Angussharztopf bzw. dem Vakuumtopf. An den Stellen, an denen die Schläuche das Dichtband passieren, werden diese mit einer Lage Dichtband umwickelt und auf dem Dichtbandrand festgedrückt. Neben den Schlauch kommt ein kleines „Röllchen“ Dichtband und oben drüber eine Lage

Dichtband. So entsteht ein gleichmäßiger Übergang über den Schlauch (siehe Abbildung 5.3).

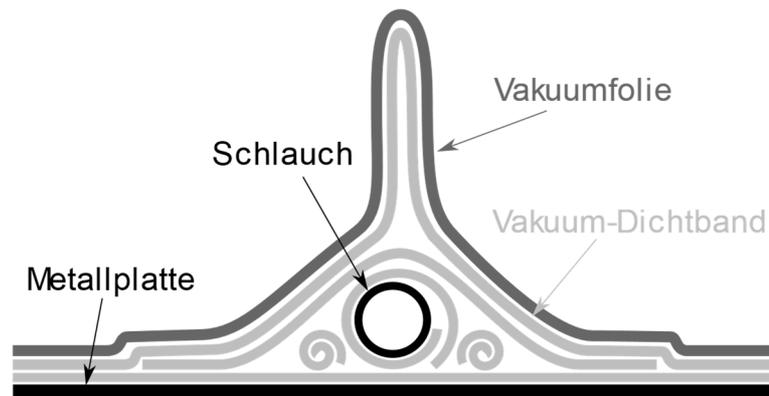


Abbildung 5.3: Schlauchabdichtung

Die Vakuumbündel muss so ausgeschnitten werden, dass die Kanten etwa 20 cm länger sind, als die zuvor auf die Metallplatte aufgebrauchte Bündelbandmaße. Auf die Vakuumbündel wird auch eine Lage Vakuumbündelband entlang des Randes aufgebraucht. Die Bündel sollte etwas gespannt gehalten werden, sodass sich keine Falten bilden, die als Luftkanal dienen könnten.

Zuerst werden die Ecken der Bündel auf die innere Reihe Bündelband gedrückt. Anschließend werden die Kanten nacheinander aufgeklebt. Hierbei werden mit der zusätzlichen Bündelbandlänge Falten gebildet, indem das Bündelband der Bündel zusammengedrückt wird. Die Falten helfen die Unebenheiten in der Oberfläche, z. B. durch die Schläuche und Silikonprofile, oder Anfang und Ende des Kohlenstofffaser-Geleges auszugleichen. Daher sollten die Falten auch möglichst dort platziert werden. Zum Abschluss wird noch einmal das Bündelband an allen Stellen kräftig angedrückt, sodass eine gute Verbindung sichergestellt ist.

Sind die vorherigen Schritte abgeschlossen, wird ein Vakuum gezogen. Dafür wird der Schlauch des Angusses mit einer Schlauchklemme geschlossen und der Schlauch der Absaugung an eine Vakuumpumpe angeschlossen. Es wird ein Vakuum von etwa 2 mbar gezogen und während dessen werden mögliche Undichtigkeiten des Randes durch erneutes anpressen des Bündelbands geschlossen. Beim Vakuumziehen ist darauf zu achten, dass die Vakuumbündel nicht unter die Silikonprofile kommt und diese blockiert. Außerdem müssen an den Stellen der Dickenänderung Falten liegen, sodass sich die Bündel gut anpassen kann. Ist das Vakuum erreicht, wird der Schlauch der Absaugung ebenfalls mit einer Schlauchklemme geschlossen. Nach einiger Zeit kann die Schlauchklemme wieder geöffnet

werden. Wurde das Vakuum über diese Zeit gehalten, ist der innere Vakuum-Aufbau dicht und die Schlauchklemme wird wieder geschlossen.

Die zweite Vakuumfolie wird wieder etwa 20 cm größer als das auf das Metall aufgeklebte Dichtband ausgeschnitten und Dichtband wird auf den Rand der Folie aufgebracht. Damit die Luft zwischen der inneren und äußeren Folie abgesaugt werden kann, muss Vlies eingelegt werden. Das Vlies wird in zwei Streifen diagonal von Ecke zu Ecke eingelegt. Auf das Vlies wird ein Schlauch für die Absaugung gelegt, der aus dem Aufbau hinaus führt. Dieser sollte nicht auf dem Bauteil liegen, da sonst Abdrücke im Bauteil entstehen können. Damit er die Folie nicht beschädigt und die Luft optimal absaugen kann, ohne von der Vakuumfolie blockiert zu werden, wird er vorne schräg abgeschnitten und mit Vlies umwickelt. An der Stelle, an der der Schlauch das Dichtband passiert, wird er wie bereits zuvor beschrieben, eingebettet. Abschließend wird die äußere Vakuumfolie analog zur inneren aufgebracht und das Vakuum gezogen.

Zum einen dient der äußere Vakuumaufbau als eine zusätzliche Sicherheit, falls der innere Vakuumaufbau während der Infusion undicht wird. Zum anderen sorgt er für die Kompaktierung, da im äußeren Vakuumaufbau später ein niedrigerer Druck herrscht als im inneren.

Ist der Aufbau abgeschlossen und der Vakuumtest für den inneren und äußeren Vakuumaufbau erfolgreich, so ist der Lagenaufbau bereit für die Infusion. Ein fertiger Aufbau wird in Abbildung 5.4 gezeigt.

Während des Herstellens der Infusions-Probenplatten wurden einige kleine Änderungen am Aufbau vorgenommen, um diesen zu verbessern.

Es ist sehr hilfreich, eine kleine Falte Folie direkt neben das Vakuum-Dichtband zu legen. Dadurch wird dieses beim Vakuumziehen das Dichtband nicht unter Spannung gesetzt und hält besser. Um diese kleine Falte zu platzieren, wird der Vakuumschlauch mit einer Schlauchklemme geschlossen, sobald der Großteil der Luft aus dem Aufbau gezogen ist, die Folie aber noch bewegt werden kann. Außerdem hat sich gezeigt, dass das Überlappen an den Ecken nicht notwendig ist und die zusätzliche Erhöhung es erschwert, die Ecken wirklich dicht zu halten. Besser ist es, das Dichtband an den Ecken auf Stoß zu legen, wobei allerdings kein Spalt entstehen darf. Außerdem können die Ränder der Vakuumfolie für die ersten zwei Zentimeter von jeder Ecke aus gesehen mit dem Dichtband zusammengeklebt werden, sodass eine Falte entsteht. So ist noch ein bisschen mehr Folie verfügbar, die sich perfekt der Ecke anpassen kann und noch besser dicht hält.

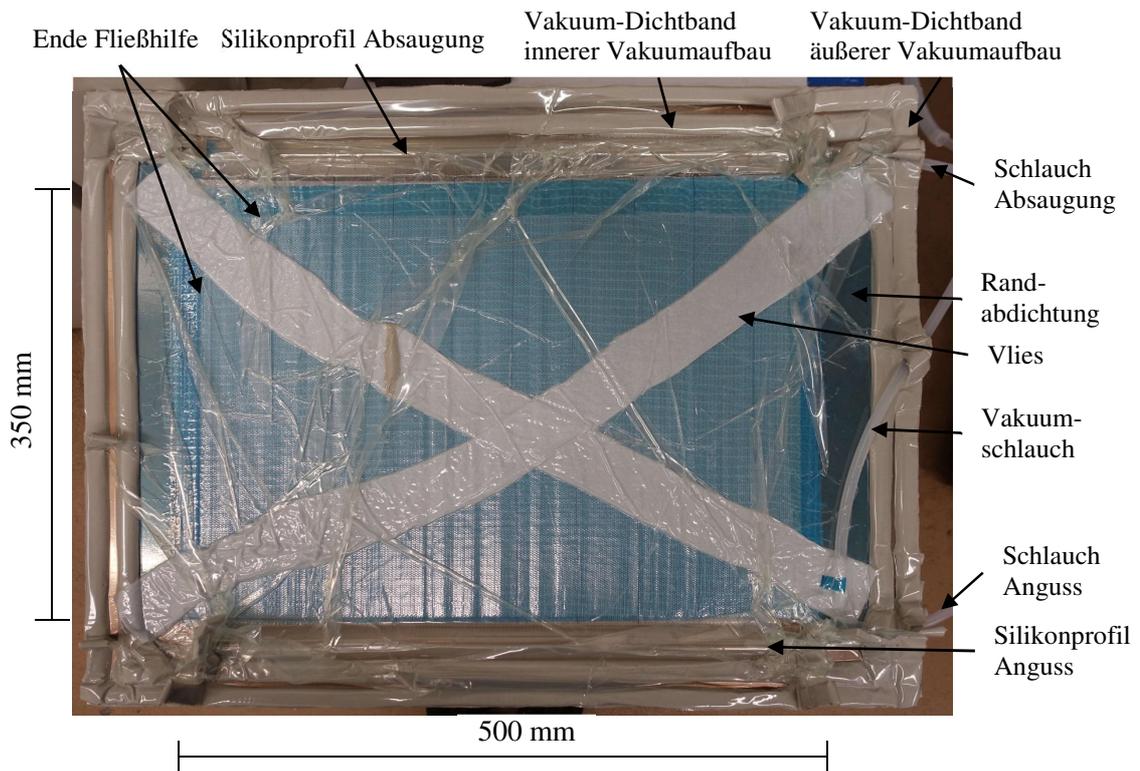


Abbildung 5.4: Infusionsaufbau

5.1.1.4 Infusion, Aushärten und Tempern

Der Schlauch der Absaugung aus dem inneren Vakuumaufbau wird mit der Harzfalle verbunden. Der Vakuumschlauch des äußeren Vakuumaufbaus wird direkt an die Vakuumpumpe geschlossen. Der Schlauch des Angusses wird mit dem Harztopf verbunden (siehe Abbildung 5.5). Der Angusschlauch wird mit einer Schlauchklemme geschlossen und das Vakuum kann aufgebaut werden. Der Infiltrationsdruck im inneren Vakuumaufbau beträgt 50 mbar, der Kompressionsdruck des äußeren Vakuumaufbaus etwa 3 mbar.

Parallel dazu kann das Harz angemischt werden. Das Harzsystem besteht aus dem Epoxidharz AH120 und dem Härter IP430 der Firma ebalta. Das Mischverhältnis ist 10:3, gemessen in Masseanteilen. Es ist wichtig das Mischverhältnis einzuhalten, da es sonst nicht zu einer vollständigen Reaktion kommen kann. Es bleibt dann entweder Härter übrig oder das Harz härtet nicht vollständig aus. In beiden Fällen ist das Harz unbrauchbar. Das Harzsystem hat eine Topfzeit von etwa fünf Stunden, sodass für das Anrühren und die Infusion der verhältnismäßig kleinen Probenplatte genug Zeit zur Verfügung steht. Das Harz wird nach dem Abwiegen für etwa eine Minute gründlich verrührt. Zu Beginn des Verrührens wird eine Stoppuhr gestartet, sodass die Zeit ab dem Mischen von Harz und Härter gemessen werden kann. Anschließend wird es mit Hilfe eines Magnetrührers unter Vakuum entgast (siehe Abbildung 5.6). Hierbei sollte der Druck 30 mbar nicht

unterschreiten, damit das Harz nicht zu „kochen“ beginnt, was eine zusätzliche Blasenbildung zur Folge hätte. Nach etwa 20 Minuten entgasen ist das Harz bereit für die Infusion.

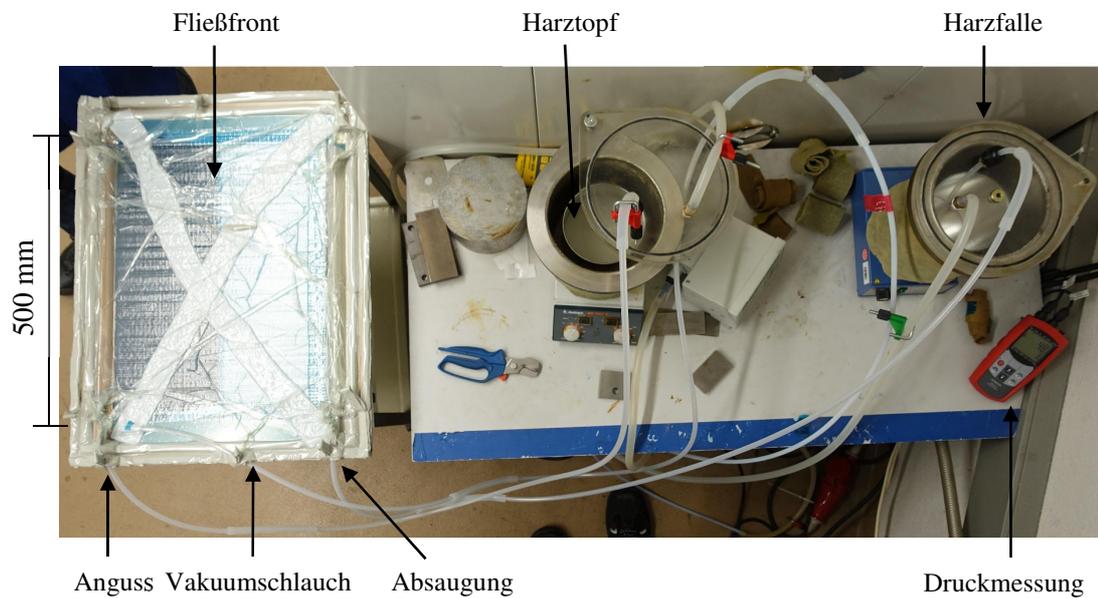


Abbildung 5.5: Vakuum-Infusion

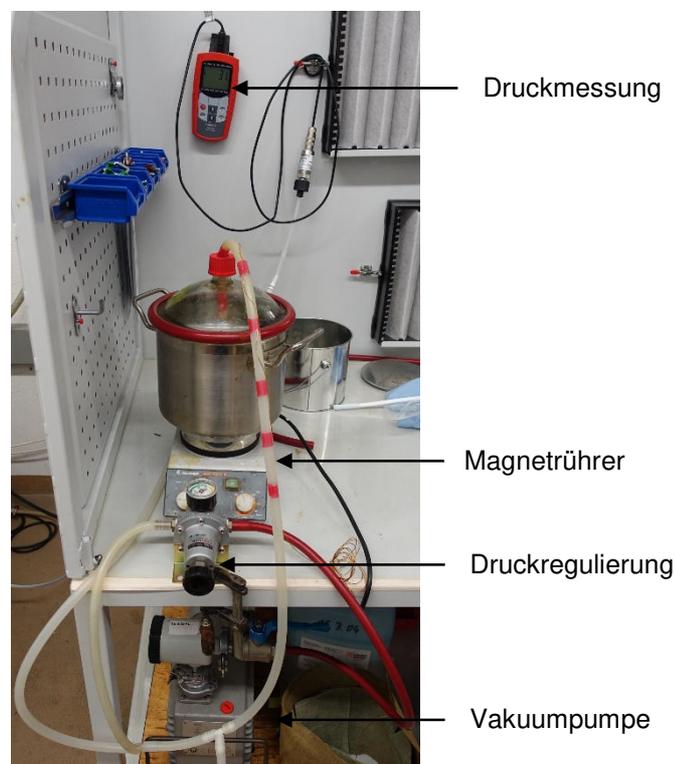


Abbildung 5.6: Entgasen des Harzes im Magnetrührer

Der Harzbehälter wird in den Vakuumbehälter gestellt und der Angusschlauch eingeführt.

Die Schlauchklemme wird langsam geöffnet und die Infiltration beginnt. Durch das Vakuum von 50 mbar wird das Harz hinein gezogen. Es ist wichtig, dass der Infiltrationsdruck höher als der Druck bei der Entgasung ist. Andernfalls kann es zu einer weiteren Entgasung während der Infiltration kommen. Das Harz fließt vom Angussprofil linienförmig über die Fließhilfe. Von der Fließhilfe läuft das Harz durch die Lochfolie in das Kohlenstofffaser-Gelege. Von oben sind zwei Fließfronten sichtbar, eine etwas hellere und kurz dahinter eine etwas dunklere (siehe Abbildung 5.7). An der helleren Front ist nur die Fließhilfe durchtränkt, an der dunkleren auch das Gelege. Diese Fronten wandern vom Angusskanal bis zum Vakuumkanal. Kurz vor dem Vakuumkanal endet die Fließhilfe und das Fortschreiten der Fronten verlangsamt sich etwas. Wenn das Kohlenstofffaser-Gelege mit Harz gefüllt ist, erreicht das Harz den Vakuumkanal und wird mit abgesaugt. Um letzte Lufteinschlüsse zu beseitigen, wird die Infusion fortgesetzt, bis sich ein Teil des Harzes im Vakuumtopf im Harzabscheider gesammelt hat und keine Blasen mehr mit aus dem Laminat gesogen werden. Der Anguss wird mit einer Schlauchklemme geschlossen und das Vakuum auf 450 mbar reduziert. Anschließend wird der Vakuumbehälter um den Harztopf am Anguss geschlossen und ebenfalls mit einem Vakuum von 450 mbar beaufschlagt. Die Schlauchklemme wird wieder geöffnet. So wird von beiden Seiten gesogen und überschüssiges Harz kann abfließen. Durch das Erhöhen des Restdrucks von 50 mbar auf 450 mbar werden alle möglicherweise noch im Laminat vorhandenen Lufteinschlüsse kleiner. In diesem Zustand härtet das Laminat über Nacht aus.

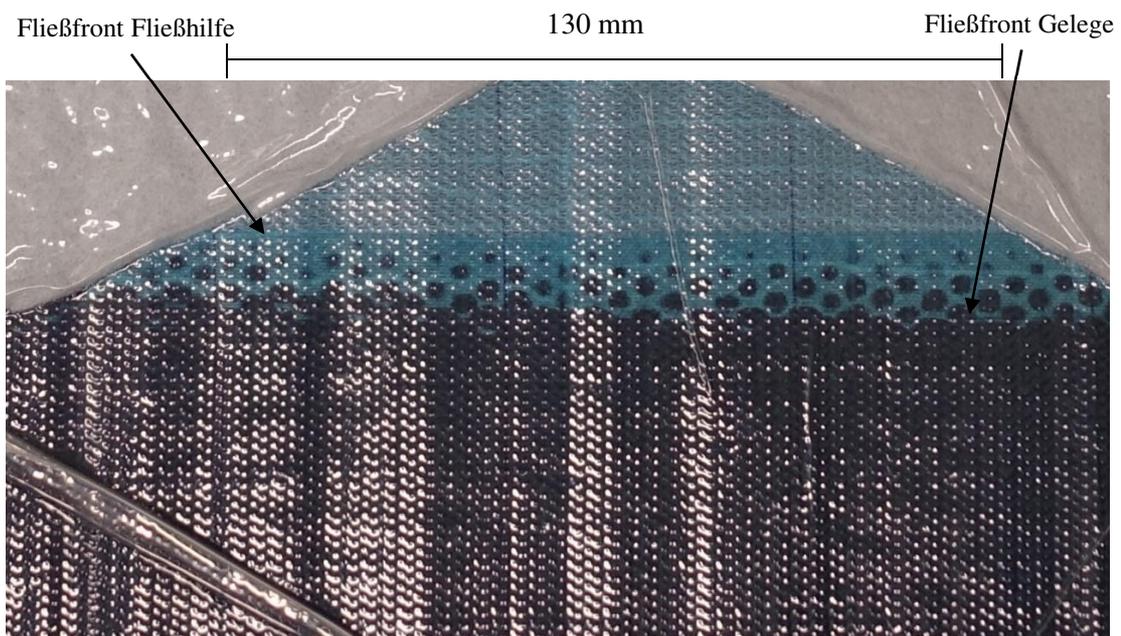


Abbildung 5.7: Fließfronten bei der Infiltration

Ist das Laminat ausgehärtet, muss es getempert werden. Hierbei wird der Grad der Vernetzungen erhöht, wodurch die Festigkeit gesteigert und die Glasübergangstemperatur erhöht wird. Das Tempern findet in einem Ofen statt. Der Ofen wird mit einer Heizrate von $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ auf 70°C erhitzt. Nach vier Stunden wird die Temperatur erneut mit $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ auf 80°C erhöht. Nach weiteren 6 Stunden wird die Temperatur mit einer Abkühlrate von $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ auf 40°C abgekühlt und das Temperprogramm ist beendet.

Die Herstellung der Probenplatte ist nach dem Tempern abgeschlossen. Der Vakuumaufbau kann entfernt und die Probenplatte von der Metallplatte gelöst werden. Anschließend wird das Abreißgewebe inklusive der Lochfolie und der Fließhilfe entfernt. Dies erleichtert das anschließende Ultraschallscannen der Probenplatten. Das Entfernen des Abreißgewebes ist an dieser Stelle möglich, da die Oberfläche für keine weitere Bearbeitung benötigt wird.

In Tabelle 5.1 ist eine Übersicht aller Platten, die mit dem zuvor beschriebenen Infusionsverfahren hergestellt wurden.

Tabelle 5.1: Übersicht der Infusionsplatten

Platte	Maße	Anzahl und Ausrichtung der Lagen	Temperzyklus	Verwendet für
P1	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende	90° Zugproben
P2	250 mm (0°) · 400 mm (90°)	2 Lagen UD	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende	0° Zugproben
P3	500 mm · 500 mm	4 Lagen 0°/90°/90°/0°	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende	±45° Zugproben
P4	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende	Grundplatte für einschichtig überlappte Proben mit Innfusion
P5	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende	Grundplatte für einschichtig überlappte Proben mit Prepreg
P6	5000 mm (0°) · 500 mm (90°)	8 Lagen UD	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende	Grundplatte für gestufte Schäftproben mit Innfusion
P7	500 mm (0°) · 500 mm (90°)	8 Lagen UD	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende	Grundplatte für gestufte Schäftproben mit Prepreg

5.1.2 Prepregplatten

5.1.2.1 Lagenzuschnitt

Das Prepreg Kohlenstofffaser-Gelege wird bei -18°C in einer Tiefkühltruhe gelagert. Vor dem Zuschneiden muss es für zwei Tage bei Raumtemperatur auftauen. Damit beim Auftauen kein Kondenswasser an das Prepreg gelangt, ist die Rolle in Folie eingepackt.

Das Ausschneiden findet wie unter 5.1.1.1 beschrieben am CNC-Cutter statt (siehe Abbildung 5.8). Für das Prepreg wird allerdings keine Vakuumfolie benötigt, da es bereits in Folie eingepackt ist und so vom Vakuum gehalten werden kann.

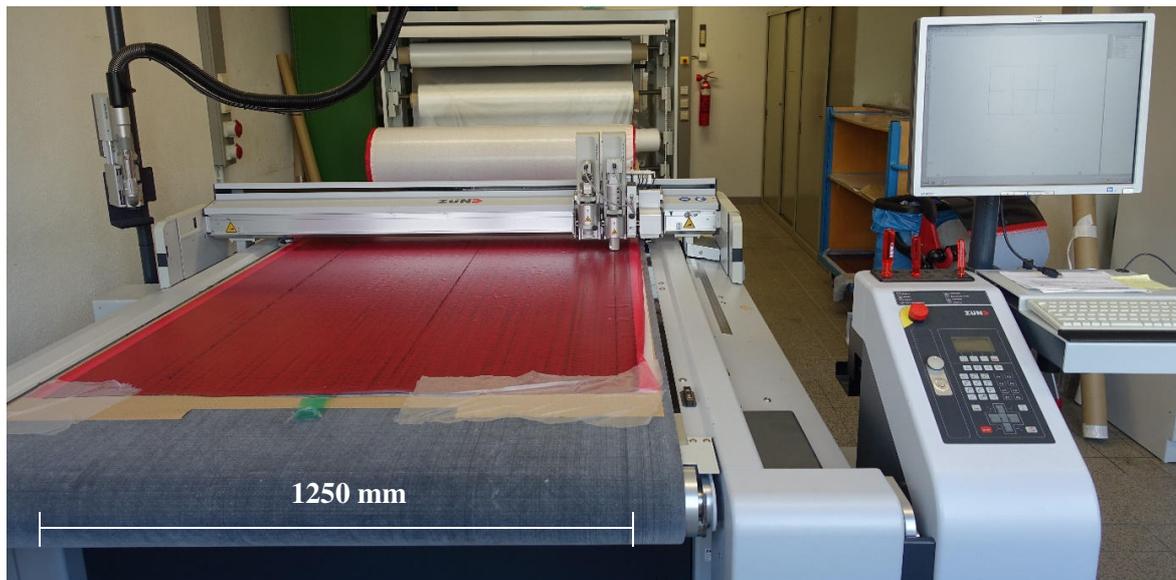


Abbildung 5.8: Zuschchnitt der Prepreg-Lagen auf dem CNC-Cutter

5.1.2.2 Eintrennen

Für die Herstellung der Prepreg Probenplatten werden die selben Metallplatten verwendet, die auch für den Infusionsaufbau verwendet wurden. Der Vorgang des Eintrenns entspricht ebenfalls dem in Abschnitt 5.1.1.2 beschriebenen.

5.1.2.3 Lagen- und Vakuumaufbau

Der Aufbau ist dem Infusionsaufbau beschrieben in Abschnitt 5.1.1.3 sehr ähnlich, der Innere Vakuumaufbau ist jedoch nicht notwendig.

Zuerst wird das Klebeband vom Eintrennen am Rand der Platte entfernt und eine Reihe Dichtband aufgeklebt. Anschließend werden die Prepreg Lagen einzeln eingelegt. Hierfür wird die Folie entfernt. Die Prepreg Lage wird mit einer Anpressrolle mit relativ hohem Druck von einem Rand startend Stück für Stück eingelegt. Dadurch wird die Lage mit möglichst wenig Lufteinschlüssen auf die vorherigen Lage gebracht. Bei dem Prepreg

handelt es sich um eine Semipreg. Das bedeutet, das Harz wurde nur von einer Seite mit hohem Druck aufgespresst, das Gelege ist aber nicht vollständig durchtränkt. Dies geschieht erst beim Aushärten unter Temperatur. Außerdem ist das Prepreg nicht sehr klebrig, erst durch das andrücken mit der Rolle verbindet es sich leicht mit der vorherigen Lage.

Der weitere Aufbau auf den Prepreg Lagen wird im Laufe der Plattenherstellung variiert.

Im ersten Ansatz werden auf das Prepreg ein Abreißgewebe, eine Lochfolie und ein Vlies gelegt. Diese drei Lagen sind etwas größer als die Prepreg Lagen, sodass sie diese überlappen und so Luft in alle Richtungen rausgezogen werden kann. Ein Schlauch wird vorne schräg angeschnitten und mit einem kleinen Stück Vlies umwickelt. Dieses Ende liegt auf dem Vlies, aber neben dem Bauteil. Dadurch wird die Luft abgesaugt, es entstehen aber keine Abdrücke vom Schlauch auf dem Bauteil. Der Schlauch wird, wie unter 5.1.1.3 beschrieben, beim Passieren des Dichtbands eingebettet und über den gesamten Aufbau wird eine Vakuumfolie fixiert. Nach dem Herstellen des Vakuums von etwa 5 mbar ist der Aufbau bereit für das Tempern (siehe Abbildung 5.9).

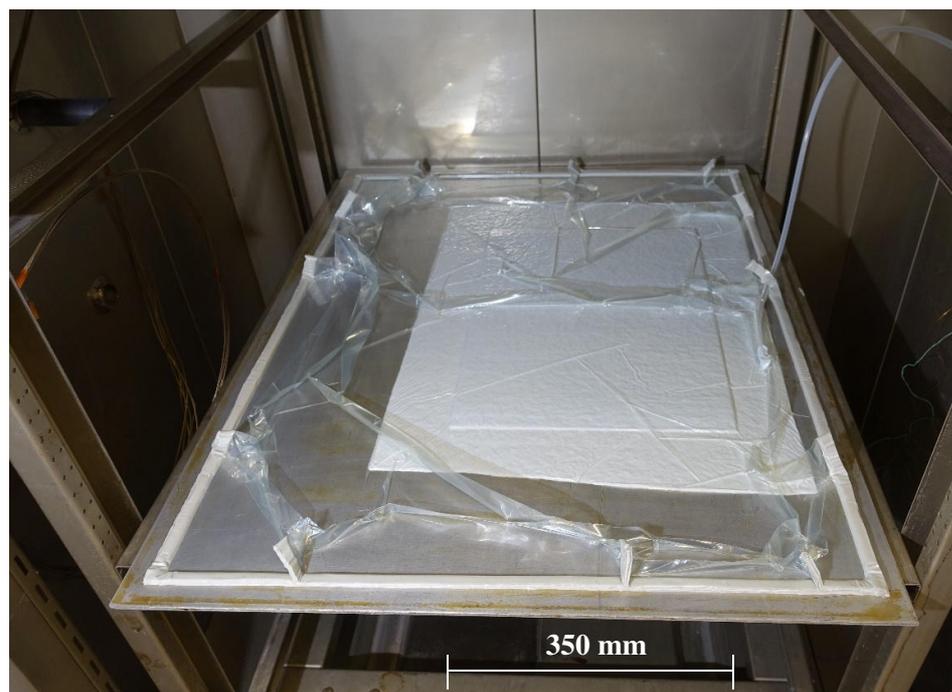


Abbildung 5.9: Fertiger Prepreg-Lagenaufbau bereit für das Aushärten

Bei der zweiten Variante wird das Vlies nur noch in 50 mm breiten Streifen um das Prepreg-Gelege herum gelegt, anstatt oben drauf. Die Luft muss also oben durch das Abreißgewebe und nur an den Seiten durch das Vlies abgesaugt werden.

Im dritten Ansatz wird das Vlies komplett weggelassen und es wird nur noch ein kleines Stück unter den Schlauch gelegt. Die gesamte Luft muss durch das Abreißgewebe abgesogen werden.

In der vierten Variante wird auf das Prepreg Gelege eine Lochfolie gelegt und darauf eine semipermeable Membran und ein Vlies. Die Lochfolie, die Membran und das Vlies überragen das Gelege um etwa 20 mm an jeder Seite. Die semipermeable Membran ist für Luft durchlässig, nicht aber für das Harz.

In Abschnitt 7.6 wird erklärt, wie es zu den Variationen im Aufbau kommt.

5.1.2.4 Aushärten

Bei dem verwendeten Prepreg handelt es sich um ein sogenanntes out of autoclave Prepreg. Das bedeutet, dass es auch ohne Autoklav verarbeitet werden kann und die Vakuumkomprimierung ausreichend ist. Das Prepreg kann bei Raumtemperatur für etwa 70 Tage gelagert werden und härtet nur unter erhöhter Temperatur aus.

Zum Aushärten werden verschiedene Aushärtezyklen im Ofen getestet.

Der erste Aushärtezyklus entspricht dem, der auch beim Tempern des Infusionsaufbaus verwendet wird (siehe Abschnitt 5.1.1.4). Es wird mit einer Heizrate von 2°C/min geheizt und abgekühlt, mit einem 3 h Plateau bei 70°C und einer maximalen Temperatur von 80°C, die 6 h gehalten wird.

Der zweite Aushärtezyklus heizt mit 2°/min auf 85°, hält diese für 6 h und kühlt anschließend mit 2°/min auf 45°C ab.

Der dritten Aushärtezyklus hat eine Heizrate von 1°/min. Es wird ein Plateau mit 45°C und eines mit 70°C für jeweils 30 min gehalten. Die finale Aushärtetemperatur beträgt 85°C und wird für 6 h gehalten.

Der vierte Aushärtezyklus entspricht dem dritten, wobei die Plateaustufen für 50 min statt 30 min gehalten werden.

Auf den Grund der verschiedenen der Aushärtezyklen wird in Abschnitt 7.6 eingegangen.

Nach Beendigung des Aushärtezyklus wird der Vakuumaufbau entfernt und die Probenplatte von der Metallplatte gelöst. Abschließend wird das Abreißgewebe inklusive Lochfolie und Vlies von der Probenplatte entfernt und die Platte mit Ultraschall gescannt, um mögliche Fehler festzustellen.

In Tabelle 5.2 sind die hergestellten Infusionsplatten mit den jeweils verwendeten Aushärtezyklen aufgelistet.

Tabelle 5.2: Übersicht der Prepregplatten

Platte	Maße	Anzahl und Ausrichtung der Lagen	Aufbau	Aushärtezyklus
P1P	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	Abreißgewebe, Lochfolie, Vlies, Vakuumfolie	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P2P	250 mm (0°) · 400 mm (90°)	2 Lagen UD	Abreißgewebe, Lochfolie, Vlies, Vakuumfolie	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P3P	500 mm · 500 mm	4 Lagen 0°/90°/90°/0°	Abreißgewebe, Lochfolie, Vlies, Vakuumfolie	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P1P2	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	Abreißgewebe, Lochfolie, Vlies, Vakuumfolie	2°/min -> 85°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P3P2	500 mm · 500 mm	4 Lagen 0°/90°/90°/0°	Abreißgewebe, Lochfolie, Vlies, Vakuumfolie	2°/min -> 85°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P1P3	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	Abreißgewebe, Lochfolie, Vliesstreifen am Rand, Vakuumfolie	1°/min -> 45°C, 30min halten, 1°/min -> 70°C, 30min halten, 1°/min -> 85°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P2P3	250 mm (0°) · 400 mm (90°)	2 Lagen UD	Abreißgewebe, Lochfolie, Vliesstreifen am Rand, Vakuumfolie	1°/min -> 45°C, 30min halten, 1°/min -> 70°C, 30min halten, 1°/min -> 85°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P1P4	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	Abreißgewebe, kurzer Vliesstreifen unter Vakuumschlauch, Vakuumfolie	1°/min -> 45°C, 50min halten, 1°/min -> 70°C, 50min halten, 1°/min -> 85°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P2P4	250 mm (0°) · 400 mm (90°)	2 Lagen UD	Abreißgewebe, kurzer Vliesstreifen unter Vakuumschlauch, Vakuumfolie	1°/min -> 45°C, 50min halten, 1°/min -> 70°C, 50min halten, 1°/min -> 85°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P3P4	500 mm · 500 mm	4 Lagen 0°/90°/90°/0°	Abreißgewebe, kurzer Vliesstreifen unter Vakuumschlauch, Vakuumfolie	1°/min -> 45°C, 50min halten, 1°/min -> 70°C, 50min halten, 1°/min -> 85°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P1P5	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	Lochfolie, semipermeable Membran, Vlies, Vakuumfolie	1°/min -> 45°C, 50min halten, 1°/min -> 70°C, 50min halten, 1°/min -> 85°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende
P1P6	350 mm (0°) · 500 mm (90°)	3 Lagen UD	Lochfolie, semipermeable Membran, Vlies, Vakuumfolie	2°/min -> 70°C, 4h halten, 2°/min -> 80°C, 6h halten, 2°/min -> 45°C, Ende

5.1.3 Probenplatten für einschichtige Überlappungsproben

Die Probenplatten 4 und 5 werden mit dem Vakuuminfusionsverfahren aus je drei Lagen hergestellt. Nachdem diese getempert und mit Ultraschall gescannt sind, müssen weitere drei Lagen auflaminiert werden. Hierfür wird die ebene Seite, die bei der Herstellung auf dem Metall lag, mit 120er Schleifpapier angeschliffen. Auf Platte P5 wird mit dem Prepreg-Verfahren auflaminiert, wobei der erste Aufbau und der erste Aushärtezyklus verwendet wird. Diese Platte wird in Zukunft mit P5A bezeichnet.

Auf Platte P4 wird mit dem zuvor beschriebenen Infusionsverfahren auflaminiert und die Platte wird in Zukunft mit P4A bezeichnet. Bei der Infusion wurde der Rand nicht gut genug abgedichtet und Harz konnte an der Seite neben dem Gelege entlang fließen. Das Harz hat die Absaugung erreicht, bevor das Gelege vollständig durchtränkt war. Dadurch wurde Luft im Gelege eingeschlossen und es ist eine weniger gute Anbindung an das ursprüngliche Laminat zu erwarten. Das Gelege wurde trotzdem über Nacht ausgehärtet, mit dem normalen Temperzyklus getempert und wird für Proben verwendet, da aus zeitlichen Gründen keine neue Probenplatte hergestellt werden kann.

5.1.4 Probenplatten für die gestuften Schäftproben

Nachdem die Platten P6 und P7 mit Ultraschall untersucht sind, werde sie mit einer Wasserstrahlschneidemaschine auf eine Größe von 430 mm in Faserrichtung und 400 mm quer zur Faserrichtung zugeschnitten.

Anschließend werden mit einer Fräse die 34 mm langen Stufen in die Platten gefräst. Hierbei stellt die unebene Oberfläche eine besondere Herausforderung dar. Die ebene Seite wird auf eine ebene Metallplatte gespannt. Diese wird als Referenz angetastet, um von dort aus die Stufenhöhe einstellen zu können. Die letzten zwei Stufen sind durch die unebene Oberfläche nicht mehr durchgängig (siehe Abbildung 5.10). Daher können die letzten Lagen beim Lagenaufbau des Reparaturmaterials nicht mehr auf Stoß gelegt werden und es kommt zu einer Umlenkung der Fasern. Dies führt potenziell zu einer Schwächung. Mit Schleifpapier mit 220er Körnung werden die Stufen noch einmal leicht angeschliffen und überstehende Faserreste entfernt. Abschließend wird die Oberfläche noch mit Isopropanol gereinigt.

In der DIN EN 6066, nach der die gestuften Schäftproben hergestellt werden, ist als Beispiellaminat ein 180-220g/m² Gewebe aufgeführt. Die Überlappungslänge je Lage ist mit 10 mm angegeben. Das entspricht bei dem 180g/m² Gewebe und einer daraus resultierenden Lagendicke von etwa 0,2 mm einem Schäftverhältnis von 1 zu 50. Bei dem 600 g Gelege

liegt die theoretische Lagendicke bei 0,67 mm. Wenn das Schäftverhältnis von 1 zu 50 beibehalten wird, liegt die Überlappungslänge bei 33,5 mm. Für diese Proben wird daher eine Überlappungslänge von 34 mm gewählt. (DIN EN 6066:1996-04)



Abbildung 5.10: Gefräste Stufen an Platte P7

Auf die Platte P7 werden die vorbereiteten Prepreglagen auflaminiert (siehe Abbildung 5.11). Hierfür wird die erste Lage mit der Länge von 198 mm auf Stoß an die unterste Stufe gelegt. Die nächsten sieben Lagen sind jeweils genau 34 mm länger und sind somit bündig mit der ersten Lage und liegen mit der gestuften Infusionsplatte genau auf Stoß. Die letzte Lage ist eine Dopplerlage. Da die letzten zwei Stufen nicht mehr an allen Stellen die volle Höhe haben, läuft die Dopplerlage am Ende nicht mehr ganz waagrecht. Für den weiteren Aufbau wird die vierte in Abschnitt 5.1.2.3 beschriebene Variante verwendet, es wird also über den Lagenaufbau Lochfolie, semipermeable Membran und Vlies gelegt. Als Aushärtezyklus wird der vierte in Abschnitt 5.1.2.4 beschriebene Aushärtezyklus verwendet. Die so hergestellte Platte wird im Folgenden mit P7A bezeichnet.

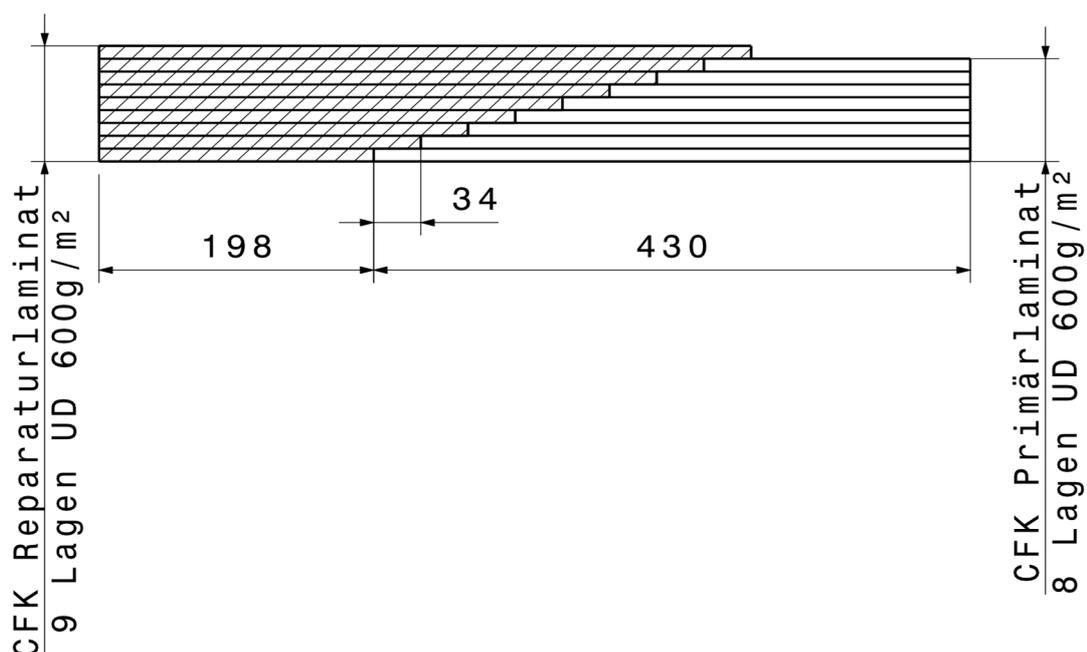


Abbildung 5.11: Aufbau gestufte Schäftplatten

Auf die Platte P6 wird mit dem Infusionsverfahren beschrieben in Abschnitt 5.1.1.3 auflaminiert. Damit kein Harz an der Seite vorbeilaufen kann, soll zusätzlich zur Randabdichtung auch Vakuumdichtband direkt neben die Lagen aufgebracht werden. Hierfür muss mit einem Schleifvlies das Trennmittel in diesem Bereich entfernt werden.

Am freien Ende wird ein Stück Fließhilfe unter die unterste Lage Kohlenstofffaser-Gelege gelegt, welches als Absaugung dient. Sind alle Lagen trockenes Kohlenstofffaser-Gelege eingelegt, wird das Dichtband auf dem zuvor geschliffenen Bereich direkt am Rand des Geleges angebracht. Anschließend wird Abreißgewebe, Lochfolie, Fließhilfe und Randabdichtung aufgelegt. Der weitere Aufbau erfolgt genau wie zuvor beschrieben. In Abbildung 5.12 ist der fertige Aufbau dargestellt. Nach dem Aushärten ist aufgefallen, dass während der Infusion auch Harz von dem Anguss auf das ausgehärtete CFK gelaufen ist. Das liegt daran, dass keine Barriere z.B. mit Vakuum-Dichtband hinter dem Angussprofil geschaffen wurde. Dadurch konnte das Harz vom Vakuum auch in diese Richtung gezogen werden. Für die Zugversuche sollte dies keinen Einfluss haben, da es sich nur um etwas zusätzliches Harz handelt und das Kohlenstofffaser-Gelege trotzdem durchtränkt wurde.

Nach dem Aushärten der Platten P6A und P7A werden diese wieder mit Ultraschall untersucht.



Abbildung 5.12: Fertiger Infusionsaufbau Platte P6A

5.2 Vorbereitung der Proben

5.2.1 Proben für Zugversuche

Mit der Wasserstrahlschneidemaschine wird aus den Probeplatten P1, P1P, P1P4, P2, P2P, P2P, P3, P3P, P3P4, P4A und P5A je ein Rechteck geschnitten. Dieses hat bereits die Länge der Proben. Damit die Proben nach dem Zuschneiden ihrer ursprünglichen Position zugeordnet werden können, wird ein diagonaler Strich auf die Platte gezeichnet (siehe Abbildung 5.13).

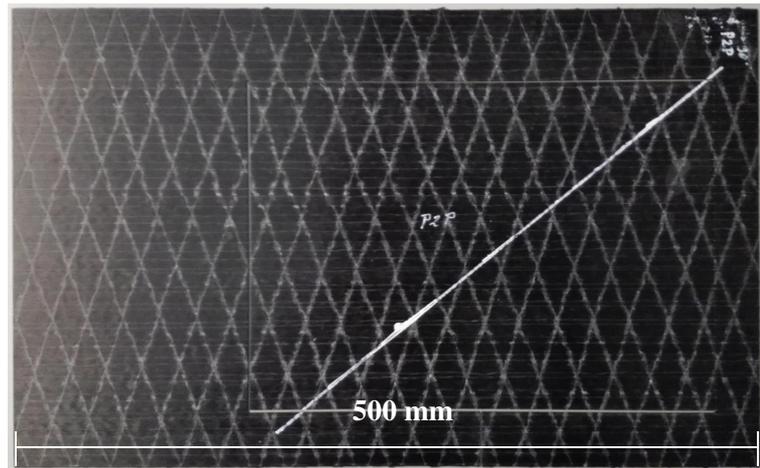


Abbildung 5.13: Markierte Rechtecke

Aus dem Rechteck werden mit einer Probensäge die einzelnen Proben gesägt. Diese Säge hat einen automatischen Vorschub und gewährleistet so parallele Proben mit sehr glatten Schnittkanten.

Bei den einschichtigen Überlappungsproben aus Platte P4A und P5A müssen noch die Schlitzte geschnitten werden (siehe Abbildung 7.8). Dies erfolgt ebenfalls auf der Probensäge. Das Sägeblatt wird so eingestellt, dass der Schlitz eine Tiefe von 52 bis 55% der Platte hat.

Die gestuften Schäftproben sind mit einer Länge von 562 mm zu lang für die Probensäge. Daher werden diese Proben aus Platte P6A und P7A mit der Wasserstrahlschneidemaschine ausgeschnitten. Um möglichst gute Probenkanten zu erhalten, wird ein sehr feines Abrasivmittel für den Schneidevorgang gewählt. Die Genauigkeit des Zuschnitts ist aufgrund der CNC-Steuerung hoch.

Vor der Durchführung der Versuche werden die Proben noch mit Hilfe der Markierungslinie in Reihenfolge gebracht und durchnummeriert. Außerdem müssen Messmarken für die optische Längsdehnungsermittlung auf die Proben aufgetragen werden. Dafür werden Blechstreifen auf den Tisch fixiert, die als Anschlag für die Probe dienen und Holzklötze,

die einen Anschlag für die Schablone bilden. Mit Hilfe dieser Schablone können die Proben wiederholgenau in einem Abstand von 50 mm mit zwei Punkten markiert werden (siehe Abbildung 5.14). Da die einlagig überlappten Proben mit einer Biegestütze geprüft werden, müssen hier die Punkte 70 mm auseinander liegen. Bei den gestuften Schäftproben ist das Markieren mit der Schablone nicht gut möglich, daher werden die Messmarken hier mit einem Lineal ausgemessen und markiert.

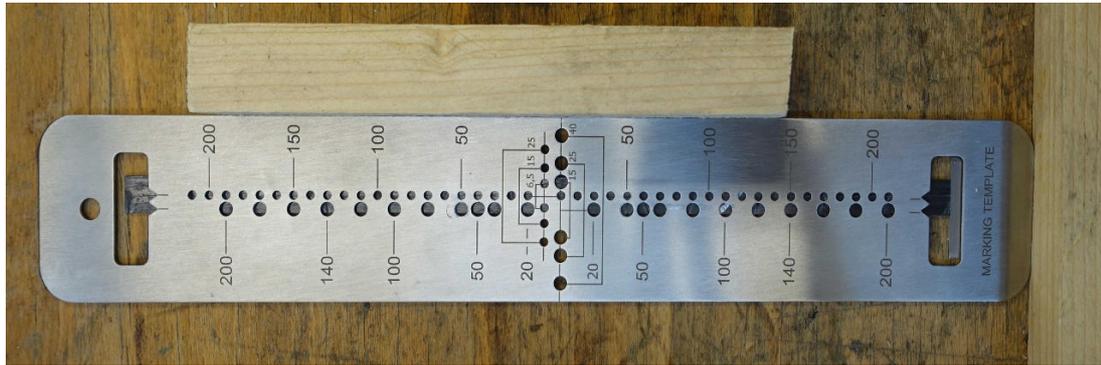


Abbildung 5.14: Messmarken mit Schablone auftragen

Anschließend werden die Proben mit einem digitalen Messschieber gemessen. Im Anhang B sind in den Tabelle B.1 bis Tabelle B.11 die Ergebnisse der Messungen aufgeführt. Für die Berechnungen in den folgenden Abschnitten werden die Mittelwerte aus diesen Tabellen verwendet.

5.2.2 Proben für die Bestimmung des Faservolumengehaltes und für Schliffbilder

Die Proben zur Bestimmung des Faservolumengehaltes werden mit einer Nasssäge mit Diamantsägeblatt ausgesägt. Die Proben haben eine Größe von 10 mm in Faserrichtung und 20 mm senkrecht zur Faserrichtung. Es werden Proben von Platte P1, P1P, P1P2, P1P3, P1P4, P1P5, P2, P2P, P2P4, P3, P3P und P3P4 entnommen. Nach dem Wiegen und Messen (beschrieben in Abschnitt 7.9.1) werden von jeder Platte vier der Proben für ein Schliffbild vorbereitet.

Zusätzlich werden noch von den einlagig überlappenden Probenplatten P4A und P5A und den gestuften Schäftprobenplatten P6A und P7A Proben ausgesägt und für Schliffbilder vorbereitet.

Die Proben müssen für die Schliffbilduntersuchung in einem Epoxidharz eingebettet werden. Auf den Deckel der Einbettform wird ein dünnes zweiseitiges Klebeband

aufgebracht. Das verhindert ein Aufschwimmen der Proben beim Harzeinfüllen und wird später beim Schleifen abgetragen. Es werden vier Proben mit Einbetthilfen nebeneinander auf den Deckel der Einbettform gestellt. Wichtig ist, dass die äußeren beiden Proben gut lesbar beschriftet sind, und die Reihenfolge der Proben notiert wird, sodass später die Zuordnung möglich ist. Der Rand der Form wird aufgesteckt und die Probe ist bereit für das einfüllen des Harzes (siehe Abbildung 5.15)



Abbildung 5.15: Proben in Einbettformen

Als Einbettharz wird das Epoxidharz EpoFix der Firma Streuers verwendet. Die Topfzeit beträgt 30 Minuten. Die nötige Menge Harz und Härter wird in einem Massenverhältnis von 25:3 in einem Pappbecher für etwa drei Minuten verrührt. Um die Lufteinschlüsse zu minimieren, wird das Harz für drei Minuten bei 30 mbar entgast. Anschließend wird das Harz in die Einbettformen eingegossen. Langsames Eingießen beugt der Bildung von störenden Lufteinschlüssen vor, trotzdem entstehende Blasen werden beim erneuten Entgasen für 15 min bei 30 mbar entfernt. Die Aushärtezeit beträgt acht Stunden bei Raumtemperatur. (Science Services GmbH)

Die ausgehärteten Proben werden aus den Einbettformen entfernt in dem Schleif- und Poliergerät Streuers TegraPol-31 geschliffen und poliert (siehe Abbildung 5.16). Der erste Schleifgang erfolgt auf einem Schleifpapier mit einer 500er Körnung und Wasser als Suspension. Nach jedem Schleifgang werden die Proben mit Wasser gereinigt und zusammen mit dem Probenhalter in ein Ultraschallbad gelegt, bevor der nächste, feinere Schleifgang beginnen kann. So wird sichergestellt, dass keine groben Körner mit in den nachfolgenden feineren Schleif-/Politur Schritt gelangen. Der zweite und dritte

Schleifschritte erfolgen mit einer Diamantsuspension. Der finale Politurgang ist auf einem Neoprentuch mit einer Siliziumoxidsuspension, die eine Korngröße von $0,04\ \mu\text{m}$ hat.

Die fertig polierten Proben werden unter fließendem Wasser und im Ultraschallbad gereinigt. Sollten noch leichte Schlieren sichtbar sein, werden diese vorsichtig mit Wasser und Spülmittel entfernt.



Abbildung 5.16: Schleifen der Schliffbildproben

5.2.3 Proben für die Ermittlung der Glasübergangstemperatur

Bei der Probenuntersuchung mit dem DSC Gerät dürfen die Proben einem maximalen Durchmesser von 3 mm nicht überschreiten, sodass sie in die vorhandenen Probentiegel passen. Daher werden die Proben mit einem Diamanthohlbohrer 2,8 mm Innendurchmesser ausgebohrt. Dieser wird mit Wasser durchströmt und so gekühlt. Um einen Einfluss dieses Kühlwassers auf die Proben zu vermeiden, werden diese bei 50°C für mindestens 6 Stunden getrocknet.

6 Bewertung der Verarbeitbarkeit

Für diese Arbeit wurden Probenplatten mit dem Infusionsverfahren und dem Prepreg-Verfahren hergestellt. Die dafür notwendigen Schritte sind in dem vorherige Abschnitt beschrieben.

Das Prepreg-Verfahren unterscheidet sich von dem Infusionsverfahren bereits in der Vorbereitung. Da das Prepreg bei Raumtemperatur nur für eine begrenzte Zeit gelagert werden kann, wird es in der Regel bei -18°C gelagert. Vor der Verarbeitung muss es aufgetaut werden. Das verwendete Prepregsystem von SGL Carbon verwendet das Harzsystem E501 und kann bis zu 70 Tage bei Raumtemperatur gelagert werden. (SGL Carbon SE 2018a) Je nach Beschaffungs- und Lagerstrategie kann die eingeschränkte Lagerzeit bei Raumtemperatur jedoch ein Problem darstellen.

In beiden Verfahren werden zuerst die Kohlenstofffaserlagen zugeschnitten. Sowohl das trockene Gelege als auch das Prepreg können mit dem CNC-Cutter sehr genau zugeschnitten werden. Die Lagen werden dabei mit dem Vakuum gut gehalten und einzelne Rovings verrutschen nicht. Beim Zuschnitt mit einer Schere zeigen sich einige Unterschiede. Bei dem trockenen Gelege werden die Rovings nur von den Nähfäden zusammengehalten. Hier muss das Zuschneiden vorsichtig erfolgen, damit das Gelege nicht auseinander gezogen wird. Das Prepreg ist aufgrund der Deckfolien und des Harzes etwas schwerer zu schneiden. Deshalb wird eine sehr scharfe Schere benötigt. Das Harz und die Deckfolien haben beim Zuschnitt allerdings auch den Vorteil, dass sie die Rovings stabilisieren und zusammenhalten. Dadurch sind sehr genaue Zuschnitte möglich.

Für den Infusionsaufbau werden einige zusätzliche Hilfsmaterialien benötigt, wie z.B. die Fließhilfe, die Randabdeckung und die Anguss- und Absaugungsprofile. Diese benötigen beim Zuschneiden und Einlegen zusätzliche Zeit. Außerdem muss bei dem Infusionsprozess das Harz angerührt, entgast und infiltriert werden, was zusätzliche Zeit beansprucht.

Die Prepreg Lagen haben nach Entfernen der Folie eine sehr geringe Klebrigkeit (tack). Erst wenn sie mit einer Rolle angedrückt werden kleben sie. Dadurch ist ein genaues Platzieren sehr gut möglich und die Lagen verrutschen nicht. Bei den trockenen Kohlenstofffaserlagen muss darauf geachtet werden, dass sie während dem Aufbau nicht verrutschen. Insbesondere für eine Reparaturanwendung in der vertikalen stellt das ein Problem dar, hier muss mit Harz oder Sprühkleber zum Fixieren gearbeitet werden.

Abbildung 6.1 zeigt die Schnittkante von zwei gestuften Schäftproben. Bei der oberen wurde mit Prepreg auflaminiert, bei der unteren mit dem Infusionsverfahren. Bei dem Prepreg sind die Übergänge, an denen die Lagen auf Stoß liegen, kaum zu erkennen. Bei den mit dem Infusionsverfahren auflaminierten Lagen ist ein Harzspalt von 1-2 mm zu sehen. Das zeigt sehr gut, dass die Prepreglagen sehr genau eingelegt werden können. Das trockene Gelege verrutscht hingegen leicht.

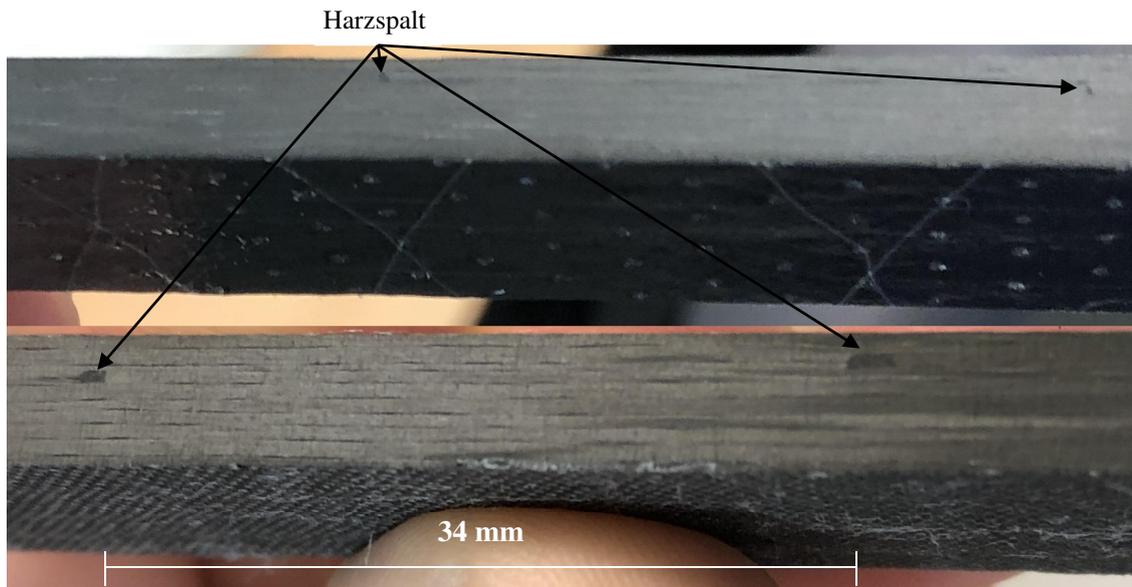


Abbildung 6.1: Schnittkante gestufte Schäftproben

Es ist leichter, trockene Kohlenstofffaserlagen an stark gekrümmte Konturen anzupassen, da sie sich besser verformen lassen als das steifere Prepreg. Allerdings ist dies für die relativ ebenen Konturen an Rotorblättern nicht relevant.

Ein sehr wichtiger Aspekt bei der Verarbeitung ist die Temperatur beim Aushärten bzw. Tempern. Im Fall von Reparaturen sollte die Temperatur 85°C nicht überschreiten, um umliegendes Material wie insbesondere Schaumteile nicht zu beschädigen. Die benötigte Aushärtezeit ist sehr wichtig, da sie die Prozessdauer maßgeblich entscheidet. Die Aushärtezeiten sind dabei abhängig vom verwendeten Harzsystem.

In dieser Arbeit wurden die Infusionsplatten über Nacht ausgehärtet und erst am nächsten Tag getempert. Das ist je nach verwendetem Harzsystem nicht notwendig.

Alles in allem ist Prepreg leichter und schneller zu verarbeiten, wobei das verwendete Harzsystem mit den Aushärte- und Temperzeiten die Prozesszeit entscheidet.

In der Tabelle 6.1 sind noch einmal die Vor- und Nachteile bezüglich der Verarbeitung zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Vor und Nachteile in der Verarbeitung

Infusion	Prepreg
<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfache Lagerung • Kein Auftauen vor der Verarbeitung notwendig • Leichte Anpassung an stark gekrümmte Konturen • Die benötigten Materialien (Harz und Faser) sind in größerer Vielfalt verfügbar <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der korrekte Aufbau ist sehr wichtig, bei schlechter Randabdichtung beispielsweise wird das Bauteil unbrauchbar • Es werden mehr Zusatzmaterialien benötigt • Der Aufbau ist aufwendig und zeitintensiv 	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weniger Hilfsmaterialien <ul style="list-style-type: none"> ○ Zeitersparnis beim Zuschnitt und Aufbau • Genauerer Zuschnitt möglich, da das Gelege gut zusammengehalten wird • Genaues Einlegen ohne Verrutschen möglich • Sehr einfacher Lagenaufbau <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beschränkte Lagerdauer bei Raumtemperatur, ansonsten Lagerung bei -18°C <ul style="list-style-type: none"> ○ Logistik wird besonders aufwendig, wenn kleine Mengen benötigt werden • Einschränkungen in der Verfügbarkeit von Harz-Faser-Kombinationen

7 Bestimmung der Materialeigenschaften

In diesem Abschnitt werden alle durchgeführten Versuche beschrieben und die Ergebnisse ausgewertet. Abschließend werden die Ergebnisse unter 7.10 diskutiert.

Alle Zugversuche wurden mit der Prüfmaschine 1494 von Zwick durchgeführt. (siehe Abbildung 7.1) Die Zwick 1494 hat eine maximale Nennlast von 500 kN und wurde mit testControl II modernisiert. Außerdem verfügt sie über ein videoXtens Modul, bestehend aus zwei Kameras. Dieses Video Extensometer kann Messmarken automatisch erkennen und ermöglicht eine optische Längs- und Querdehnungsmessung.

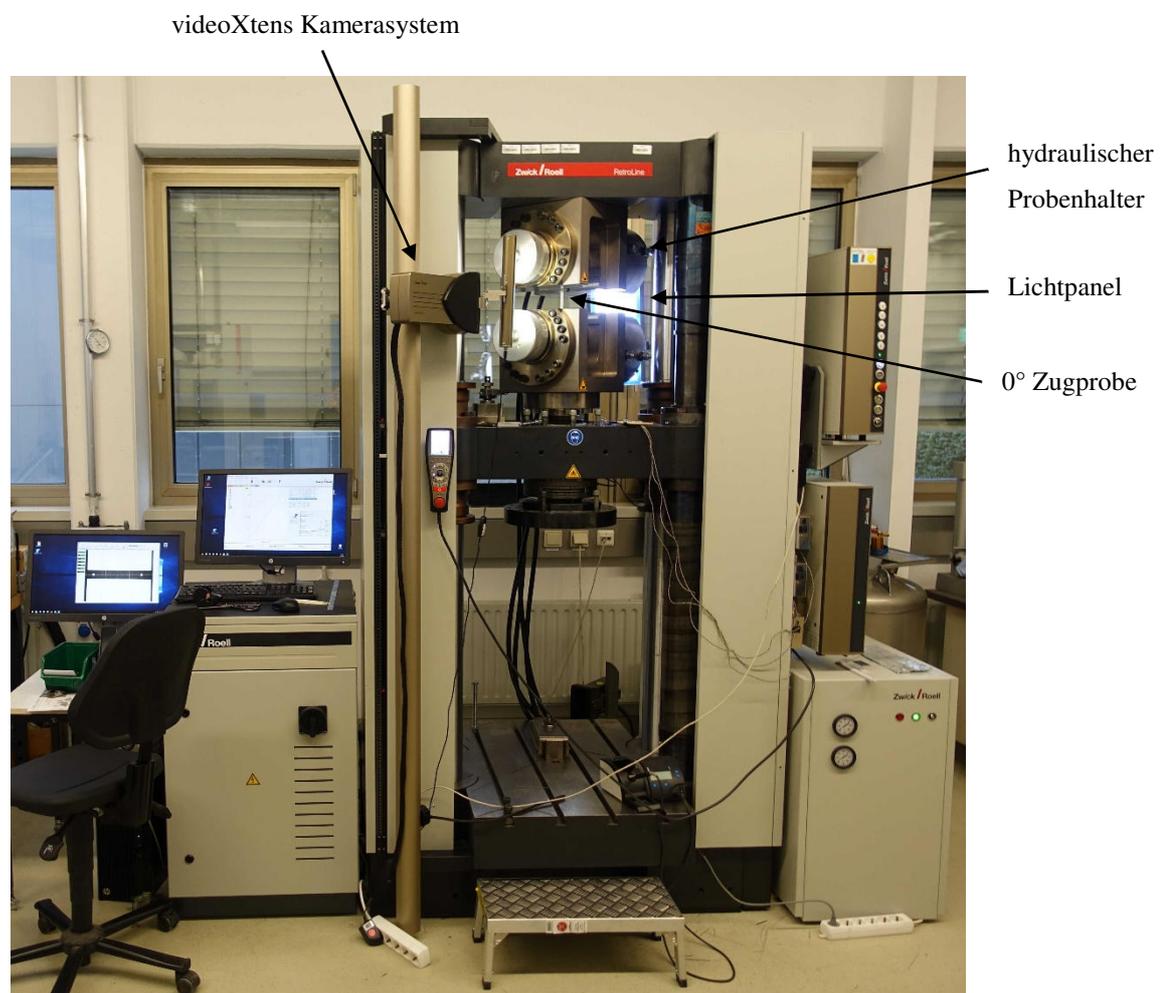


Abbildung 7.1: Prüfmaschine mit hydraulischem Probenhalter

7.1 0° Zugversuche

7.1.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen

Bei den 0° Zugversuchen wird ein hydraulischer Probenhalter mit einem Spanndruck von 40 bar verwendet. Aufgenommen werden die Kraft und der Verfahrweg. Außerdem misst das videoXtens System die Längs- und Querdehnung. Dafür müssen die Kameras kalibriert sein. Die Kamera erkennt die zwei weißen Punkte (siehe Abschnitt 5.2) und misst deren Abstand. Außerdem wird der Hintergrund mit einer weißen Lichtpaneel erhellt, sodass die schwarze Probe einen deutlichen Kontrast an den Kanten hat. Die Kanten werden erkannt und so die Querdehnung mit der Kamera gemessen.

Die 0° Zugversuche sind angelehnt an die DIN EN 527-5 / A / 2. Die verwendete Probekörpergeometrie entspricht mit folgenden Abweichungen der DIN:

- Die Probekörperdicke entspricht nicht $1\pm 0,2$ mm, da das 600 g Gelege sehr dick ist
- Die Breite wurde von $15\pm 0,5$ mm auf 10 mm angepasst, um die Kraft nicht zu groß werden zu lassen

In Abbildung 7.2 ist die verwendete Probekörpergeometrie gezeigt.

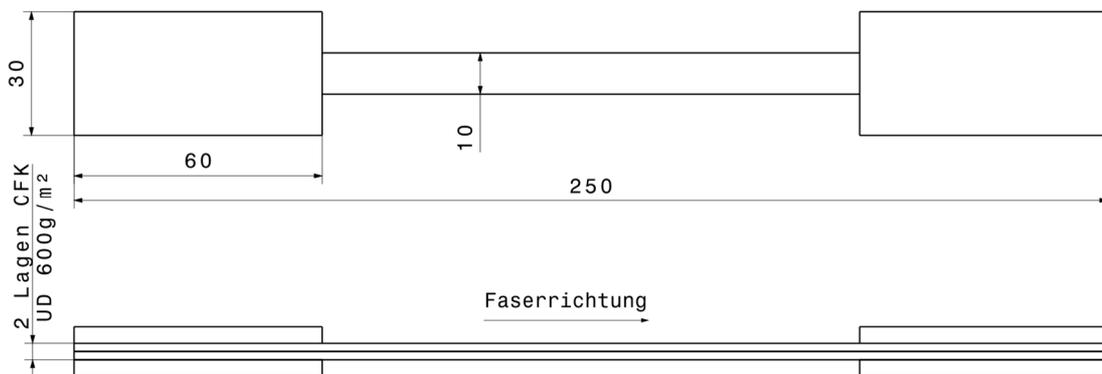


Abbildung 7.2: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN ISO 527-5/A
(Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN ISO 527-5:2010-01)

Eine weitere Abweichung zur DIN EN 527-5 ist, dass die Krafteinleitungselemente aus GFK nicht aufgeklebt sind, sondern nur aufgelegt werden. Die Aufgabe der Krafteinleitungselemente ist es, die Spannkraft gleichmäßig in die Probe einzuleiten, sodass die Probe selbst so wenig wie möglich in der Einspannung geschwächt wird. In der Vergangenheit wurde bei Versuchen festgestellt, dass insbesondere beim Einspannen mit hydraulischen Probenhaltern sich das Versuchsergebnis nicht ändert, wenn die Krafteinleitungselemente nicht festgeklebt sind. Dadurch, dass die Krafteinleitungselemente nicht geklebt sind, können sie mehrfach verwendet werden und der Arbeitsschritt des Aufklebens wird eingespart.

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt wie vorgegeben 2 mm/min. (DIN EN ISO 527-5:2010-01)

7.1.2 Versuchsdurchführung

Im ersten Schritt wird die Prüfmaschine sowohl hardware- als auch softwareseitig eingerichtet. Das richtige Spannzeug muss eingebaut und das Spannzeug und die Kameras in die Startposition für den Versuch gebracht werden. Anschließend wird die Steuerungssoftware der Maschine eingerichtet. Hier wird eingestellt, welche Hardwarekomponenten eingebaut sind und welche Messstellen ausgelesen werden sollen. Außerdem werden der Versuchsablauf und die Parameter wie beispielsweise der Spanndruck des hydraulischen Probenhalters, die Prüfgeschwindigkeit, die Bedingung für das Prüfungsende und die Startposition eingestellt.

Ist alles vorbereitet kann der Versuch beginnen. Die Doppler sind mit Klebeband zusammengeklebt, sodass sie auf die Probe aufgeschoben werden können und nicht verrutschen (siehe Abbildung 7.3). Die Traverse wird in die Startposition gefahren und die Kraft genullt. Anschließend wird die Probe eingespannt, wobei mit Hilfe des Kamerabildes kontrolliert wird, dass die Probe gerade eingespannt ist. Abschließend werden noch Probenname, Breite und Dicke eingetragen und der Versuch wird gestartet. Ist der Versuch beendet, kann die Probe ausgespannt werden. Dieser Ablauf wird für alle Proben wiederholt.



Abbildung 7.3: Krafteinleitungselemente an einer 0° Zugprobe

7.1.3 Versuchsauswertung

Für die folgende Auswertung der Ergebnisse werden die Formeln aus der DIN EN ISO 527-1 entnommen. (DIN EN ISO 527-1:2012-06) Einige Bezeichnungen wurden jedoch entsprechend DIN EN ISO 527-5 angepasst. So wird der Index 1 für die 0° Richtung (in Faserrichtung) verwendet und der Index 2 für die 90° Richtung (senkrecht zur Faserrichtung). (DIN EN ISO 527-5:2010-01)

Im ersten Schritt wird die Zugspannung σ_1 aus der gemessenen Kraft F , der Anfangsbreite b_0 und der Anfangsdicke h_0 des Probekörpers für jeden Messpunkt berechnet:

$$\sigma_1 = \frac{F}{b_0 \cdot h_0} \quad (7.1)$$

Anschließend wird die Längsdehnung ε_{t1} aus dem Traversenweg berechnet.

$$\varepsilon_{t1} = \frac{L_t}{L \cdot k} \quad (7.2)$$

Hierbei ist L der Anfangsabstand zwischen den Probenhaltern und L_t der Weg der zurückgelegt wird. k ist ein Korrekturfaktor, der erst einmal 1 entspricht. Wofür er verwendet werden kann, wird später erläutert.

Außerdem wird die Querdehnung ε_2 und Längsdehnung ε_1 mit den Messwerten des VideoXtend Kamerasystem ermittelt.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (7.3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta b_0}{b_0} \quad (7.4)$$

Hierbei entspricht L_0 dem Ursprünglicher Abstand zwischen den Messmarken, ΔL_0 der Verlängerung des Probekörpers zwischen den Messmarken, b_0 der Anfangsbreite und Δb_0 der Verringerung der Breite.

Mit den zuvor berechneten Werten kann der Zugmodul E_1 bestimmt werden.

Der Zugmodul wird ermittelt mit der Zugspannung σ'_{t1} bei einer Längsdehnung von $\varepsilon'_{t1} = 0,5\text{‰}$ und σ''_{t1} bei $\varepsilon''_{t1} = 2,5\text{‰}$. Die Dehnungswerte sind mit der Traverse gemessen.

$$E_{t1} = \frac{\sigma''_{t1} - \sigma'_{t1}}{\varepsilon''_{t1} - \varepsilon'_{t1}} \quad (7.5)$$

Für die mit der Kamera ermittelten Längsdehnung erfolgt die Berechnung in gleicher Weise.

$$E_1 = \frac{\sigma''_1 - \sigma'_1}{\varepsilon''_1 - \varepsilon'_1} \quad (7.6)$$

Außerdem kann die Poissonzahl μ_{12} aus der Querdehnung ε'_2 bei einer Längsdehnung $\varepsilon'_1 = 0,5\text{‰}$ und ε''_2 bei $\varepsilon''_1 = 2,5\text{‰}$ berechnet werden.

$$\mu_{12} = \frac{\varepsilon''_2 - \varepsilon'_2}{\varepsilon''_1 - \varepsilon'_1} \quad (7.7)$$

Anschließend an die Berechnung wird ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellt.

In Anhang C.1 sind die Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Abbildung C.1 bis Abbildung C.3 dargestellt und jeweils darunter die Ergebnisse der Messungen in Tabelle C.1 bis Tabelle C.3.

In Tabelle 7.1 ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den 0° Zugversuchen für die Probenplatten P2, P2P und P2P4.

Die Zugfestigkeit der Probenplatte P2P4 ist höher als die der Platte P2P. Das war aufgrund der Ultraschallbilder (siehe Abschnitt 7.6.2.1) zu erwarten, da die Porosität deutlich geringer ist. Unerwartet ist, dass die Zugfestigkeit der Probenplatte P2 niedriger ausfällt. Die verwendete Faser hat eine höhere Zugfestigkeit (4,4 GPa) als die des Prepreg-Materials (4,0 GPa). Eine Erklärung hierfür wäre, dass das trockenen Kohlenstofffaser-Gelege relativ lose ist und die einzelnen Rovings nicht immer dicht beieinander liegen. Außerdem könnte der Dickenunterschied zu Spannungsspitzen führen.

Tabelle 7.1: Zusammenfassung der 0° Zugversuche

Probenplatte	Herstellung	σ_{m1} / MPa	ε_{m1} / ‰	E_1 / GPa	μ_{12}
P2	Infusion	1231	13,3	120	0,28
P2P	Prepreg mit Vlies	1580	14,4	128	0,39
P2P4	Prepreg nur mit Abreißgewebe	1739	15,5	134	0,34

7.2 90° Zugversuche

7.2.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen

Für die 90° Zugversuche wird für die Proben P1P_1 bis P1P_3 der gleiche Aufbau wie für die 0° Zugversuche (siehe Abschnitt 7.1.1) verwendet. Da die Probe P1P_2 an der oberen Einspannung und P1P_3 in der unteren Einspannung gerissen ist, muss der Spanndruck reduziert werden, um die Probe im Spannungsbereich weniger zu belasten. Da der hydraulische Probenhalter einen Mindestdruck von 40 bar erfordert, wird für alle weiteren 90° Zugproben ein Schraub-Probenhalter verwendet, der für eine maximale Nennlast von 10 kN ausgelegt ist. Es wird weiterhin der Traversenweg, die Spannung und die mit der Kamera gemessene Längs- und Querdehnung aufgenommen.

Die 90° Zugversuche erfolgen in Anlehnung an die DIN EN 527-5 / B / 1. Die Probekörpergeometrie weicht in den folgenden Merkmalen von der DIN ab:

- Die Probekörperdicke entspricht mit drei Lagen nicht $2\pm 0,2$ mm
- Es wird statt Krafteinleitungselemente Schleifpapier verwendet, welches die Spannung auf die unebenen Proben etwas besser verteilt

In Abbildung 7.6 ist die verwendete Probekörpergeometrie zu sehen.

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt wie in der DIN vorgegeben 1 mm/min. (*DIN EN ISO 527-5:2010-01*)

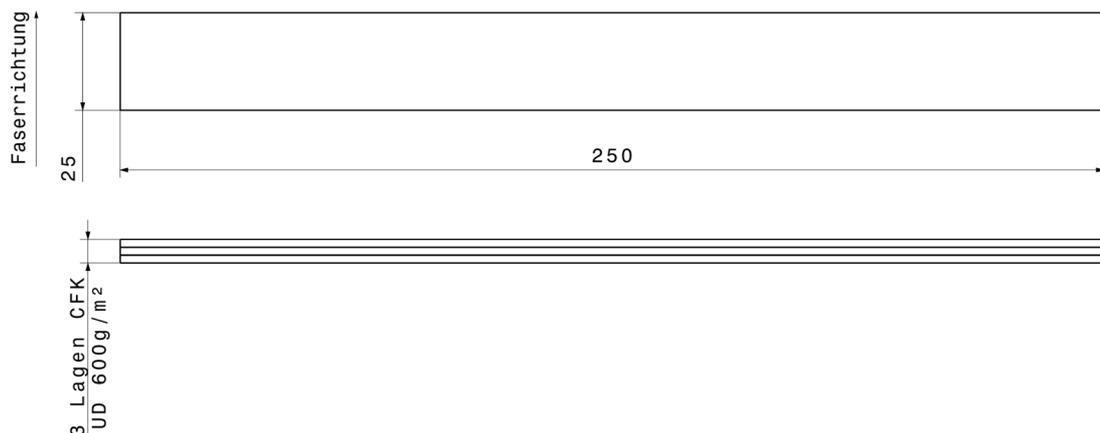


Abbildung 7.6: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN ISO 527-5/B
(Quelle: Eigene Darstellung nach *DIN EN ISO 527-5:2010-01*)

7.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung entspricht der in Abschnitt 7.1.2 beschriebenen, mit zwei Unterschieden. Statt den hydraulischen Probenhaltern werden Schraub-Probenhalter

verwendet, die per Hand gespannt werden müssen. Außerdem wird statt den Krafteinleitungselementen aus GFK Schleifpapier verwendet. Dieses wird mit der gekörnten Seite auf die Probe gelegt und mit eingespannt. Es passt sich gut an die Probe an, gleicht leichte Unebenheiten aus und rutscht nicht. Außerdem entschärft es die starke Perforierung des Probenhalters etwas.

7.2.3 Versuchsauswertung

Das Vorgehen bei der Auswertung der 90° Zugversuche entspricht dem der 0° Zugversuche, beschrieben in Abschnitt 7.1.3. Die verwendeten Formeln sind die gleichen, es wird nur der Index 1 für die 0° Richtung mit dem Index 2 für die 90° Richtung getauscht. So wird beispielsweise σ_2 statt σ_1 in Formel 7.1 berechnet oder μ_{21} statt μ_{12} in Formel 7.7. (*DIN EN ISO 527-5:2010-01*)

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der 90° Zugversuche sind im Anhang C.2 in Abbildung C.4 bis Abbildung C.7 dargestellt. Die Messergebnisse der jeweiligen Probenplatten sind unter dem jeweiligen Diagramm in den Tabelle C.4 bis Tabelle C.7 aufgelistet. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse befindet sich in Tabelle 7.2.

Die Zugfestigkeit für die 90° Proben aus Platte P1P ist in deutlich geringer als die von Platte P1P4. Dies war aufgrund der höheren Porosität (siehe 7.6.2.1) auch zu erwarten. Da die Zugfestigkeit bei 90° Zugversuchen ein matrixdominierter Wert ist, hat die Porosität hier einen besonders großen Einfluss.

Bei den 90° Zugversuchen der Probenplatte P1 hat die Dickenvariation senkrecht zur Faserrichtung einen großen Einfluss. Die Proben sind alle an der dünnsten Stelle gerissen. Die mittlere Dicke der Proben lag im Schnitt bei 1,97 mm, wobei die Dicke an den Bruchstellen bei etwa 1,37 mm lag. Werden die Spannungswerte mit dieser minimalen Dicke an der Bruchstelle berechnet, ist auch die Zugspannung deutlich höher (siehe Tabelle 7.2 und Tabelle C.7).

Tabelle 7.2: Zusammenfassung der 90° Zugversuche

Probenplatte	Herstellung	σ_{m2} / MPa	ε_{m2} / ‰	E_2 / GPa	μ_{21}
P1 (mittlere Dicke)	Infusion	28,9	4,0	7,5	0,12
P1 (minimale Dicke)	Infusion	41,7	4,0	10,9	0,12
P1P	Prepreg mit Vlies	28,2	3,5	8,2	0,04
P1P4	Prepreg nur mit Abreißgewebe	41,0	4,9	8,6	0,07

7.3 $\pm 45^\circ$ Zugversuche

7.3.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen

Für die $\pm 45^\circ$ Zugversuche werden die hydraulischen Probenhalter und GFK-Doppler verwendet.

Die Versuche werden angelehnt an die DIN EN ISO 14129 durchgeführt. Dabei weicht die Probengeometrie in den folgenden Punkten von der DIN ab:

- Vorgegebene Dicke von $2 \pm 0,2$ mm kann nicht eingehalten werden, da symmetrischen $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau mindestens vier Lagen benötigt
 - Nach Gleichung 4.1 ist die theoretische Dicke für Platte P3 2,70 mm und für die Platte P3P und P3P4 2,38 mm
- Die Krafteinleitungselemente sind 60 mm statt 50 mm lang

Die verwendete Probengeometrie ist in Abbildung 7.7 gezeigt.

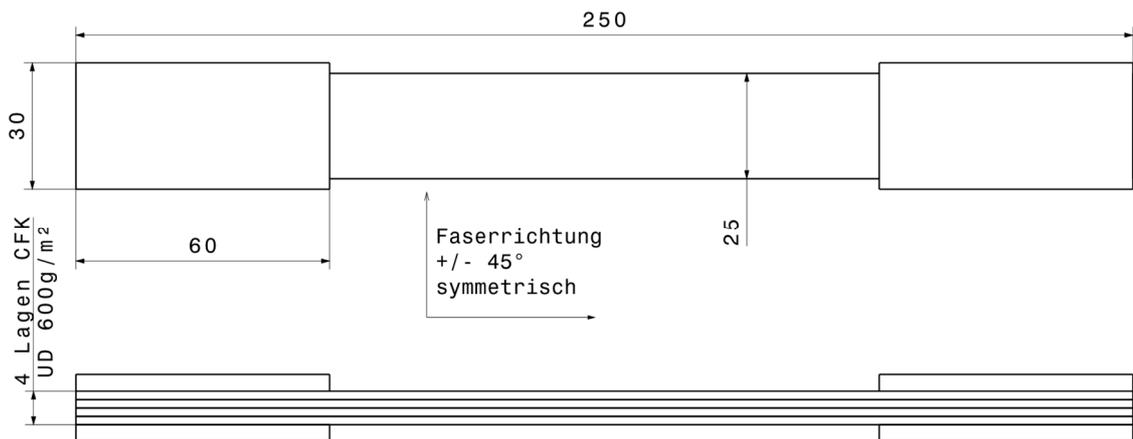


Abbildung 7.7: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN ISO 14129
(Quelle: Eigene Darstellung nach *DIN EN ISO 14129:1998-02*)

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 2 mm/min. (*DIN EN ISO 14129:1998-02*)

7.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung ist analog zu den 0° Zugversuchen, beschrieben in Abschnitt 7.1.2.

7.3.3 Versuchsauswertung

Die in der folgenden Auswertung verwendeten Formeln sind aus der DIN EN ISO 14129 entnommen. (*DIN EN ISO 14129:1998-02*)

Die Schubspannung τ_{12} für jeden Messpunkt lässt sich aus der Zugkraft F , der Anfangsbreite b_0 und der Anfangsdicke h_0 des Probekörpers berechnen.

$$\tau_{12} = \frac{F}{b_0 \cdot h_0} \quad (7.8)$$

Die Schubverformung γ_{12} wird mit der Längsdehnung ε_1 und der Querdehnung ε_2 berechnet.

$$\gamma_{12} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (7.9)$$

Mit der Schubspannung τ''_{12} bei einer Schubverformung $\gamma''_{12} = 5 \text{ ‰}$ und τ'_{12} bei $\gamma'_{12} = 1 \text{ ‰}$ wird der Schubmodul berechnet.

$$G_{12} = \frac{\tau''_{12} - \tau'_{12}}{\gamma''_{12} - \gamma'_{12}} \quad (7.10)$$

Mit dieser Berechnung werden die Schubspannungs-Schubverformungs-Diagramme erstellt. Diese sind Anhang C.3 in Abbildung C.8 bis Abbildung C.10 zu sehen. Die Ergebnisse sind in Tabelle C.8 bis Tabelle C.10 unter dem jeweiligen Diagramm dargestellt.

In Tabelle 7.3 sind die Ergebnisse der drei Platten zusammengefasst. Die Platte P3P4 weist eine höhere Scherfestigkeit auf als Platte P3P. Das ist aufgrund der höheren Porosität von Platte P3P (siehe Abschnitt 7.6.2.1) auch zu erwarten. Die Infusionsplatte P3 liegt mit der Scherfestigkeit zwischen den beiden Prepregplatten.

Tabelle 7.3: Zusammenfassung der $\pm 45^\circ$ Zugversuche

Probenplatte	Herstellung	τ_{12m} / MPa	$\gamma_{12} / \text{‰}$	G_{12} / GPa
P3	Infusion	50,2	28,3	4,9
P3P	Prepreg mit Vlies	46,2	15,4	4,8
P3P4	Prepreg nur mit Abreißgewebe	54,8	25,3	4,5

7.4 Zugversuch mit einschichtig überlappten Proben

7.4.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen

Die Zugversuche mit den einschichtig überlappten Proben werden mit den Schraub-Probenhaltern durchgeführt.

Die Versuche werden angelehnt an die DIN EN 6066 II.1B durchgeführt.

Dabei wird in den folgenden Punkten von der DIN abgewichen:

- Die Dicke entspricht mit zwei mal drei Lagen nicht 4 mm
- Es wird Schleifpapier zwischen Probe und Probenhalter verwendet, Krafteinleitungselemente sind nicht gefordert

Die gewählte Probenkörpergeometrie ist in Abbildung 7.8 dargestellt.

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min. (*DIN EN 6060:1996-04*)

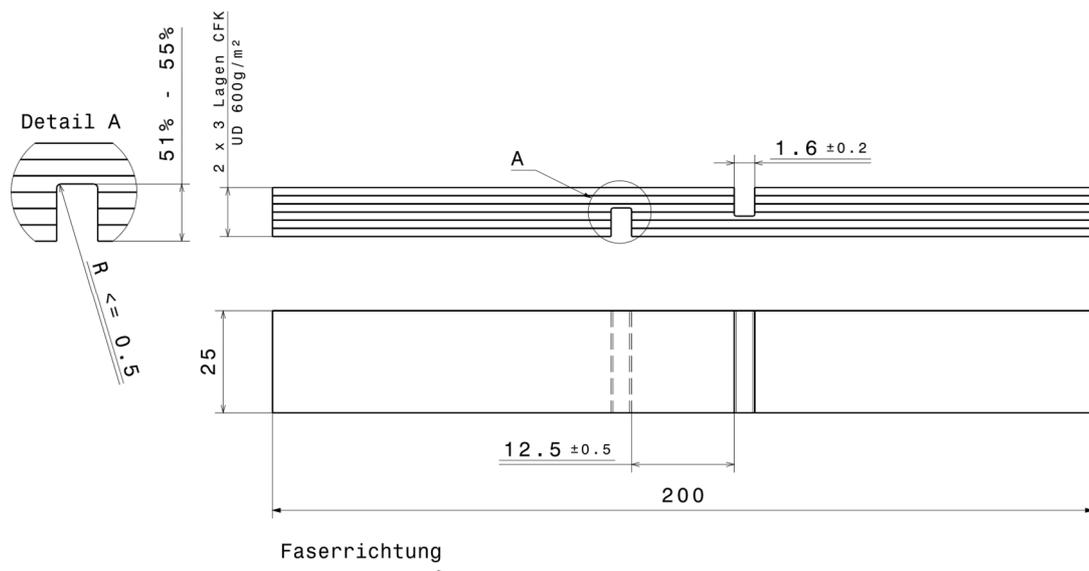


Abbildung 7.8: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN 6060 II.1 B
(Quelle: Eigene Darstellung nach *DIN EN 6060:1996-04*)

7.4.2 Versuchsdurchführung

Bei den Zugversuchen mit den einschichtig überlappten Proben wird eine Biegestütze verwendet (siehe Abbildung 7.9). Sie besteht aus zwei Metallplatten, wovon eine in der Mitte eine Führungsnut hat. Die Probe wird zwischen die zwei Platten geschoben und die Platten werden mit Schrauben um die Probe gespannt. Hierbei ist wichtig, dass die Schrauben so fest angezogen werden, dass die Biegestütze nicht herunter rutscht. Gleichzeitig müssen die Schrauben so lose wie möglich sein, sodass die Probe nicht in der

Bewegung gehindert wird und Reißen kann. Abgesehen von der Biegestütze ist der Versuchsablauf analog zu den vorherigen Zugversuchen.

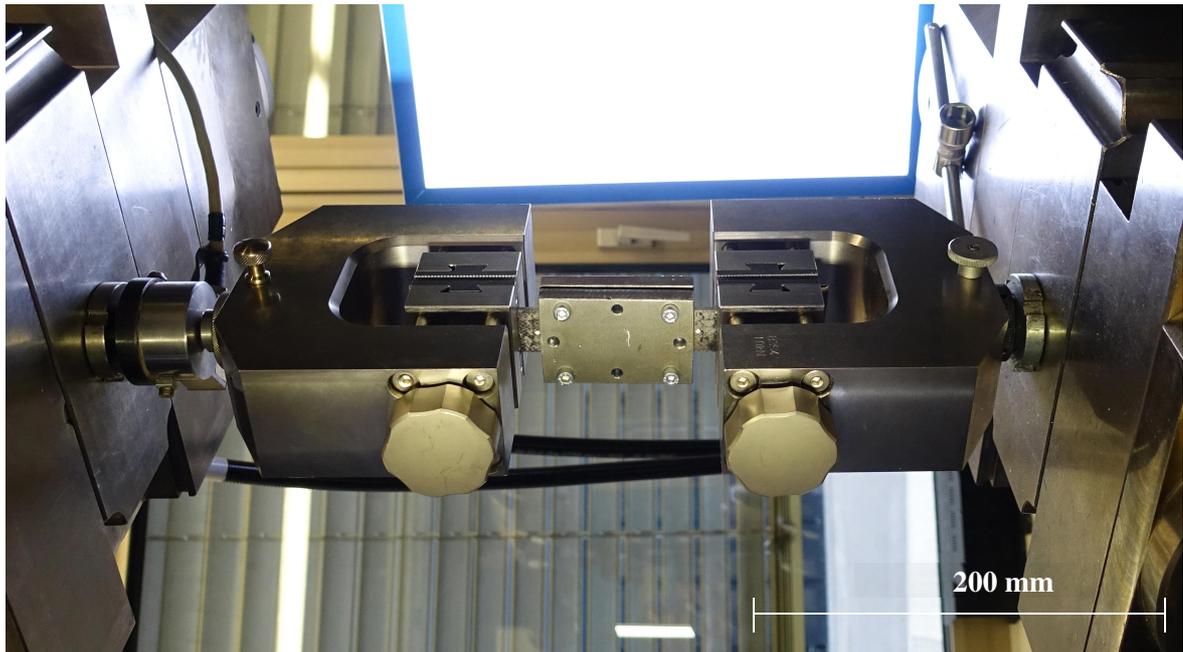


Abbildung 7.9: Biegestützen bei Zugversuchen mit einschichtig überlappten Proben

7.4.3 Versuchsauswertung

Nach DIN EN 6060 wird die Bindefestigkeit τ_m mit der Maximalkraft F_m , der Überlappungslänge $L_{\ddot{u}}$ und der Überlappungsbreite $b_{\ddot{u}}$ bestimmt.

$$\tau_m = \frac{F_m}{L_{\ddot{u}} \cdot b_{\ddot{u}}} \quad (7.11)$$

Im Anhang C.4 befindet sich ein Kraft-Weg-Diagramm für die Probenplatte P4A (Abbildung C.11) und P5A (Abbildung C.12), sowie die Ergebnisse zu den Platte in Tabelle C.11 und Tabelle C.12 jeweils unter dem Kraft-Weg-Diagramm. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse befindet sich auch in Tabelle 7.4.

Tabelle 7.4: Ergebnisse Zugversuche einlagig überlappende Proben

Platte	Herstellung	F_m / N	τ_m / MPa	Variationskoeffizient $\tau_m / \%$
P4A	Infusion	6611	21,5	22,92
P5A	Prepreg mit Vlies	5476	18,3	9,58

Aufgrund der unebenen Probenoberflächen ist sehr schwierig, bei der Probenherstellung die Schlitzte genau auf 52-55% der Probendicke zu sägen. Daher ist es nicht immer gewährleistet, dass genau die Mittelebene, in der die zwei neuen Lagen auf laminiert wurden, getroffen wird. Es besteht die Gefahr, dass einzelne Fasern noch mittragen und nicht die reine Bindefestigkeit ermittelt wird. Zusätzlich zu den nicht optimalen Schlitzten, gab es auch

bei der Plattenherstellung selbst Probleme. Bei der Probenplatte P4A kam es während der Infusion zu einem Harzvorlauf und somit zu Lufteinschlüssen. Bei Probenplatte P5A wurde der erste Prepreg Aufbau (mit Vlies auf dem Abreißgewebe) verwendet und die Porosität ist relativ hoch. (siehe Abschnitt 7.6.2)

Aufgrund der oben genannten Unsicherheiten sollten die hier gewonnen Ergebnisse mit weiteren Versuchen überprüft werden.

7.5 Zugversuch mit gestuften Schäftproben

7.5.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen

Die Zugversuche der gestuften Schäftproben werden mit den hydraulischen Probenhaltern durchgeführt. Die Spannkraft beträgt anfangs 450 kN und wird im Laufe der Versuche erhöht.

Die Versuche sind an die DIN EN 6066 – BI angelehnt, wobei die in den folgenden Punkten von der DIN abgewichen wird:

- Die Überlappungslänge beträgt 34 mm (siehe Abschnitt 5.1.4)
- Die Reparaturlagen werden auf Stoß gelegt, d.h. die erste Lage überlappt nicht. Zum Ausgleich wird eine zusätzliche Dopplertlage verwendet.
- Die Einspannlänge beträgt 120 mm statt 50 mm, um die Kräfte bei der großen Probe einleiten zu können
- Die Krafteinleitungselemente werden nicht aufgeklebt sondern nur aufgelegt
- Die Krafteinleitungselemente sind 130 mm statt 50 mm lang

Die verwendete Probengeometrie ist in Abbildung 7.10 dargestellt.

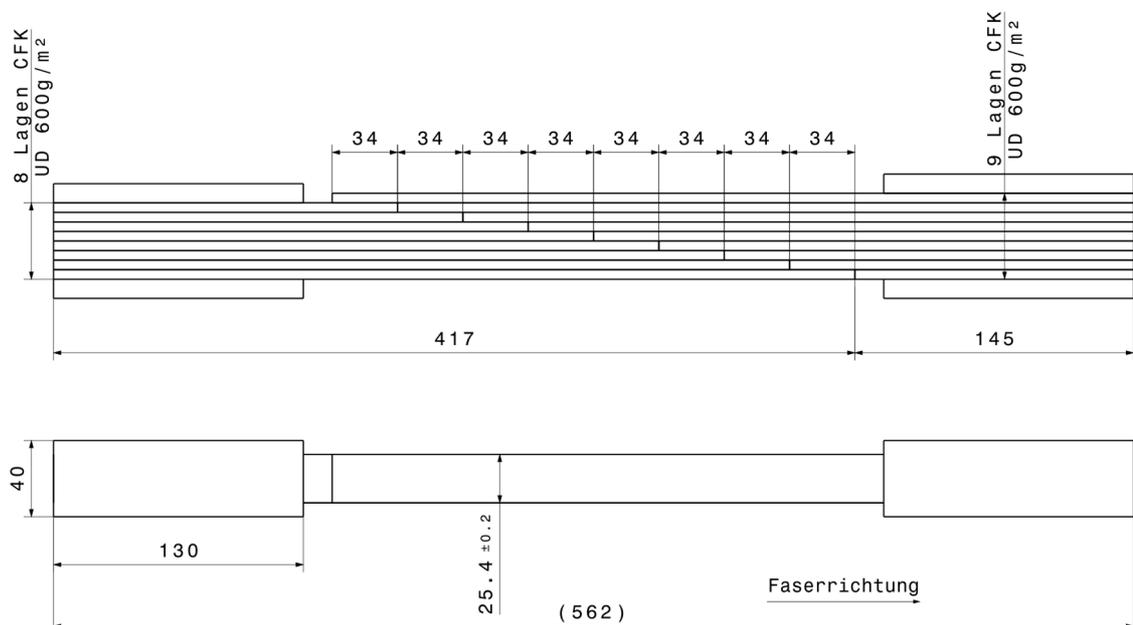


Abbildung 7.10: Probengeometrie angelehnt an die DIN EN 6066-BI
(Quelle: eigene Darstellung nach *DIN EN 6066:1996-04*)

7.5.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung entspricht der der 0° Zugversuche (siehe Abschnitt 7.1.2).

7.5.3 Versuchsauswertung

Für die gestuften Schäftproben wird die Zugfestigkeit σ_m mit der maximalen Kraft F_m , der mittleren Probenbreite im Schäftungsbereich b_0 und der theoretischen Dicke des Primärkörpers h_{th} bestimmt.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{b_0 \cdot h_{th}} \quad (7.12)$$

Die theoretische Dicke wird nach Gleichung 4.1 berechnet und beträgt für 8 Lagen 5,39 mm.

Die Kraft-Weg-Diagramme der Versuche sind im Anhang C.5 in Abbildung C.13 und Abbildung C.14. Unter den Abbildungen sind die Ergebnisse in Tabelle C.13 und Tabelle C.14 aufgeführt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse befindet sich in Tabelle 7.5.

Bei den Zugversuchen der gestuften Schäftproben sind alle Proben genau in der Schäftung gerissen. Dabei kam es zu keinem Faserausriss. Die erreichte Zugfestigkeit der Platte P7A mit dem Prepreg Material ist größer.

Tabelle 7.5: Zusammenfassung gestufte Schäftproben

Platte	Herstellung	F_m / N	σ_m / MPa	Variationskoeffizient / %
P6A	Infusion	68120	501	2,65
P7A	Prepreg mit semipermeabler Membran	79490	584	3,55

7.6 Ultraschalluntersuchung

7.6.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Jede Platte, die in dieser Arbeit hergestellt wurde, wird in einer Ultraschalluntersuchung mit dem OmniScan MX2 von Olympus geprüft.

Wichtig ist, dass das Ultraschallmessgerät vor der Prüfung kalibriert wird. Um die Ergebnisse vergleichbar zu halten, werden alle Platten nach Möglichkeit mit den gleichen Parametern gescannt. Die zwei wichtigsten Parameter für eine qualitative Prüfung sind die Spannung und die Verstärkung. Für eine genaue Dickenmessung muss auch die Schallgeschwindigkeit in dem zu prüfenden Material ermittelt werden. Ein genaues einstellen der Schallgeschwindigkeit ist für eine qualitative Überprüfung aber nicht notwendig. Bei der Spannung kann zwischen 40 V, 80 V und 115 V gewählt werden. Hiermit wird die in das Bauteil eingebrachte Leistung reguliert. Über die Verstärkung kann das empfangene Signal verstärkt werden. Grundsätzlich wird das gesamte Signal verstärkt. Soll ein bestimmter Bereich besser sichtbar gemacht werden, kann jedoch auch eine linienförmige Verstärkung eingestellt werden. Die meisten Platten konnten mit einer Spannung von 80 V und ohne Verstärkung (0 dB) gescannt werden. Bei den dickeren Platten und bei den Prepregplatten mit dem ersten Aufbau reicht diese Leistung nicht aus. Hier muss die Spannung auf 115 V und die Verstärkung auf +3 dB erhöht werden, um die Rückwand zu erkennen.

Eingestellt wird außerdem der Bereich, in dem aufgenommen wird. Dieser definiert den maximalen Schallweg bzw. die Tiefe. Es ist wichtig, dass er mindestens der Plattendicke entspricht. Als letztes wird noch die Länge der Scan- und Indexachse eingestellt. Diese entsprechen den durch die Führungsschienen vorgegebenen Bewegungsrichtungen. Von oben auf die zu untersuchende Platte gesehen, verläuft die Scanachse von oben nach unten und die Indexachse von links nach rechts.

Für die Prüfung wird die Probenplatte mit der glatten Seite, die bei der Herstellung auf der Metallplatte lag, nach oben gelegt. Für eine einfache Platzierung parallel zu den Führungsschienen des Ultraschallkopfes ist auf dem Tisch ein Anschlag angebracht (siehe Abbildung 7.11). Dadurch kommt der Ultraschallkopf nicht ganz an den Rand und es werden etwa 20 mm vom unteren Rand und 10 mm vom rechten Rand nicht gescannt. Da die Proben aus dem mittleren Bereich der Probenplatte entnommen werden ist das aber kein Problem. Als erstes wird die Oberfläche der Probenplatte mit Wasser benetzt. Das Wasser ist wichtig für die Einkopplung in die Platte. Ein Luftspalt würde das Signal reflektieren und somit eine Messung unmöglich machen. Der Ultraschallkopf wird bahweise von oben nach unten (in

Scanachsenrichtung) über die Probenplatte bewegt. Zwischen den einzelnen Bahnen wird der Ultraschallkopf 50 mm nach rechts (in Indexachsenrichtung) bewegt. Dadurch überlappt jeder Bahn etwa 20 mm mit der vorherigen und es ist ein Lückenloses Bild sichergestellt. Da der Ultraschallkopf in der Führung ein bisschen Spiel hat, muss jede Bahn in der gleichen Richtung abgefahren werden.

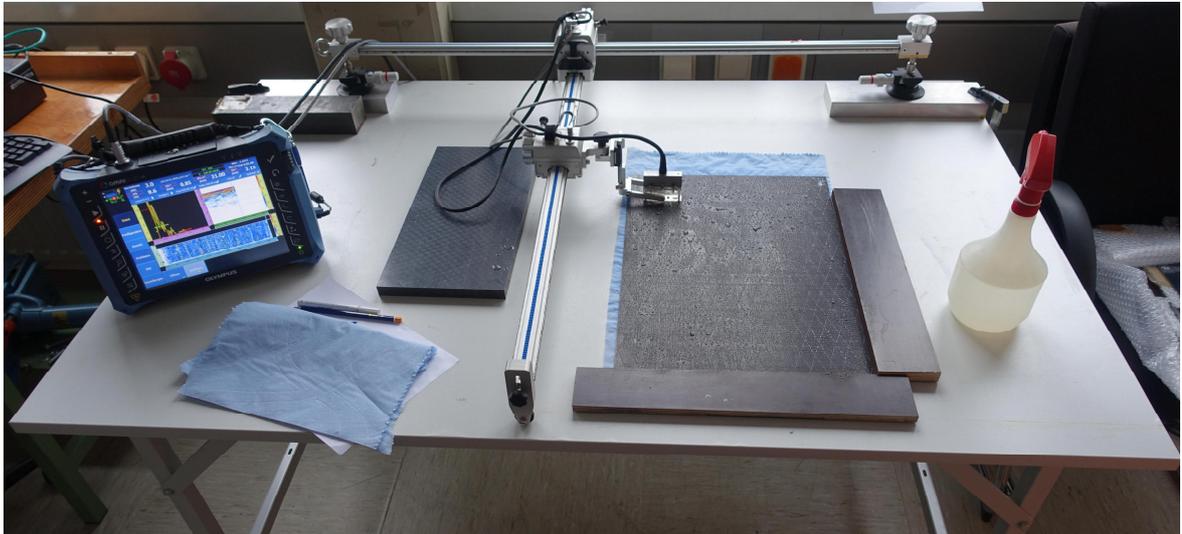


Abbildung 7.11: Aufbau des Ultraschall Prüfstandes

7.6.2 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Ultraschalldaten erfolgt mit der TomoView Software von Olympus. Dabei wird das A, B, C, und D Bild angezeigt.

In dem A Bild wird die Amplitude in % über der Distanz in mm dargestellt. Die Distanz stellt hierbei die Zeit multipliziert mit der eingestellten Schallgeschwindigkeit dar. Im A Bild wird außerdem die Blende eingestellt, die den Bereich definiert, der in dem C Bild dargestellt werden soll.

Das C Bild zeigt die maximalen Amplituden im Blendenbereich über die gesamte gescannte Oberfläche. Hierbei ist auf den Achsen die Länge der Scanachse über der Länge der Indexachse aufgetragen. Die Amplituden werden mit Hilfe einer Farbskala dargestellt, wobei rot eine starke, blau eine schwache und weiß keine Amplitude bedeutet. Die Farbskala ist auch am oberen Bildrand aufgetragen. Im C Bild werden außerdem die Schnittachsen für das B und D Bild ausgewählt

Das B Bild ist eine Schnittdarstellung entlang der vertikalen Auswahllinie im C Bild. Dargestellt wird die farbcodierte Amplitude für die Scanrichtung über der Tiefe.

Das D Bild ist eine Schnittdarstellung entlang der horizontalen Auswahllinie im C Bild. Hier ist die Amplitude farbcodiert für die Tiefe über der Indexrichtung dargestellt.

Alle Ultraschallbilder sind im Anhang A aufgeführt.

7.6.2.1 Einfluss des Aufbaus und der Temperatur bei der Herstellung der Prepreg Probenplatten

Im Folgenden wird auf die Platten P1, P1P, P1P2, P1P3, P1P4, P1P5 und P1P6 eingegangen, da die Platten P1P bis P1P6 die Veränderungen im Aufbau und den Temperzyklen bei den Prepregplatten abbilden und P1 die Infusionsplatte mit dem gleichen Lagenaufbau ist.

Bei der Untersuchung von Platte P1P (siehe Abbildung A.1) ist trotz einer Spannung von 115 V und einer Verstärkung von +3 dB kein gleichmäßiges Rückwandsignal zu sehen. Es sind viele Poren in der gesamten Platte zu erkennen. Die Vermutung ist, dass die Luft beim Aushärten nicht aus dem Gelege abgesaugt werden konnte. Im Datenblatt des Prepreg Harzsystems E501 (SGL Carbon SE 2018a) ist zu sehen, dass die Viskosität bei einer Erhöhung der Temperatur stark sinkt (siehe Abbildung 7.12). Bei einer Erhöhung der Temperatur von 70°C auf 85°C sinkt die Viskosität von 12000 mPas auf 4000 mPas. Um sicherzustellen, dass die Viskosität beim Aushärten nicht zu hoch war, wird die Probenplatte P1P2 mit einem neuen Aushärtezyklus getempert. Hier wird die Temperatur mit 2°C/min auf 85°C erhöht und für 6 Stunden gehalten.

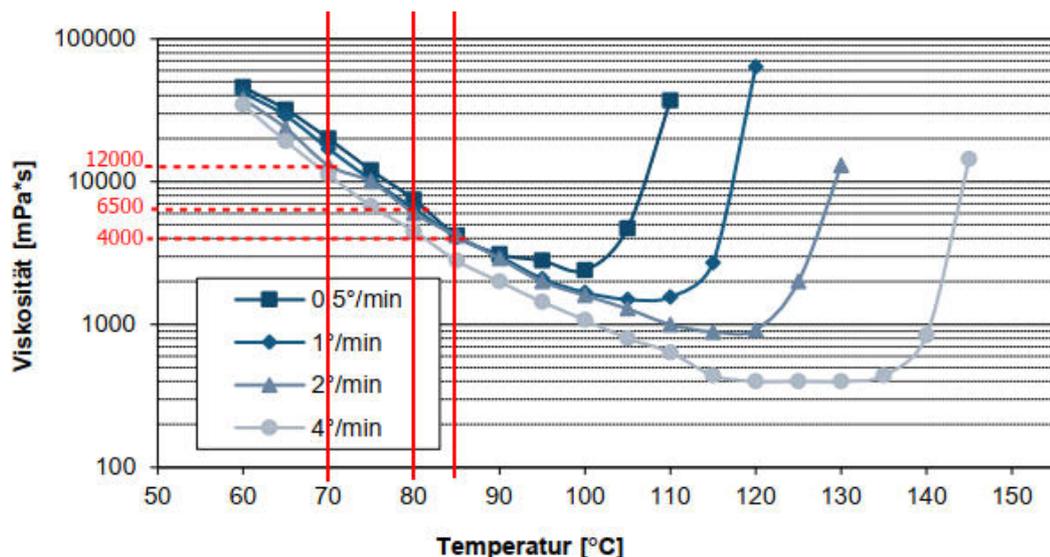


Abbildung 7.12: Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur E501 Harz
(Quelle: bearbeitet nach SGL Carbon SE 2018a)

In den Ultraschallbildern (siehe Abbildung A.2) ist dadurch keine Verbesserung zu Platte P1P zu sehen, das Rückwandsignal ist sogar eher noch etwas schlechter als bei Probenplatte P1P.

Ein Gespräch mit dem Hersteller des Prepregs hat ergeben, dass in der Vergangenheit für einen Aufbau mit wenigen Lagen die Temperatur mit $0,8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ erhöht wurde und bei einer finalen Temperatur von 95°C - 115°C ausgehärtet wurde. Für mehr Lagen (z.B. 20 Lagen) wird eine Aufheizrate von $1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ empfohlen, mit einer Plateaustufe bei 45°C für 30 bis 45 min und eine zweite Plateaustufe bei 70°C , für 30 bis 60 min. In der ersten Plateaustufe ist die Viskosität herabgesetzt und die Restluft kann entweichen, in der zweiten Plateaustufe können verbliebene Poren aufgrund der sehr niedrigen Viskosität mit Harz gefüllt werden. Außerdem sei ein Vlies über dem Aufbau nicht notwendig und durch das Abreißgewebe könne genug Luft entweichen.

Bei der Herstellung der Platte P2P wird daher nur noch ein Streifen Vlies um die Probe herum gelegt. Außerdem wird der Aushärtezyklus geändert, die Aufheizrate entspricht jetzt $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ und es werden 45°C für 30 min gehalten, 70°C für 30 min und 85°C für 6 h.

In den Ultraschallbildern (siehe Abbildung A.3) ist eine deutliche Verbesserung zu sehen. Die Spannung kann auf 85 V reduziert werden und die Verstärkung ist nicht mehr notwendig (0 dB). Im Randbereich ist die Rückwand nur schlecht zu sehen und insbesondere im Randbereich sind viele Poren. Daher ist der Verdacht, dass durch das Vlies zu viel Harz aus dem Gelege gesogen wird. Zumindest ist gut sichtbar, dass Harz in das Vlies gesogen wurde (siehe Abbildung 7.13).

Für die Probenplatte P1P4 wird der Temperzyklus beibehalten und auf das Vlies verzichtet. Nur unter dem Schlauch der Absaugung liegt ein kurzer Streifen, um die Absaugung der Luft zu gewährleisten.

Im Ultraschallbild (siehe Abbildung A.4) ist jetzt eine gleichmäßige Rückwand zu sehen. Es gibt jedoch weiterhin einige Poren. Bei genauerer Betrachtung scheinen die Poren ein Karomuster zu bilden. Beim Überlagern eines Fotos der Platte P1P4 mit dem C Bild mit der Blende 0,5 mm bis 1,0 mm stimmt dieses Muster mit dem der Nähfäden überein (siehe Abbildung 7.14). Der Nähfaden selbst ist zu schmal, um dieses Signal zu verursachen und eine reine Ondulation der Fasern ist auch eher nicht die Ursache für das Signal. Die Poren scheinen sich an den Nähfäden und insbesondere deren Kreuzungspunkten zu sammeln. Mit Hilfe von Schlifffbildern soll dies genauer untersucht werden (siehe Abschnitt 7.7).

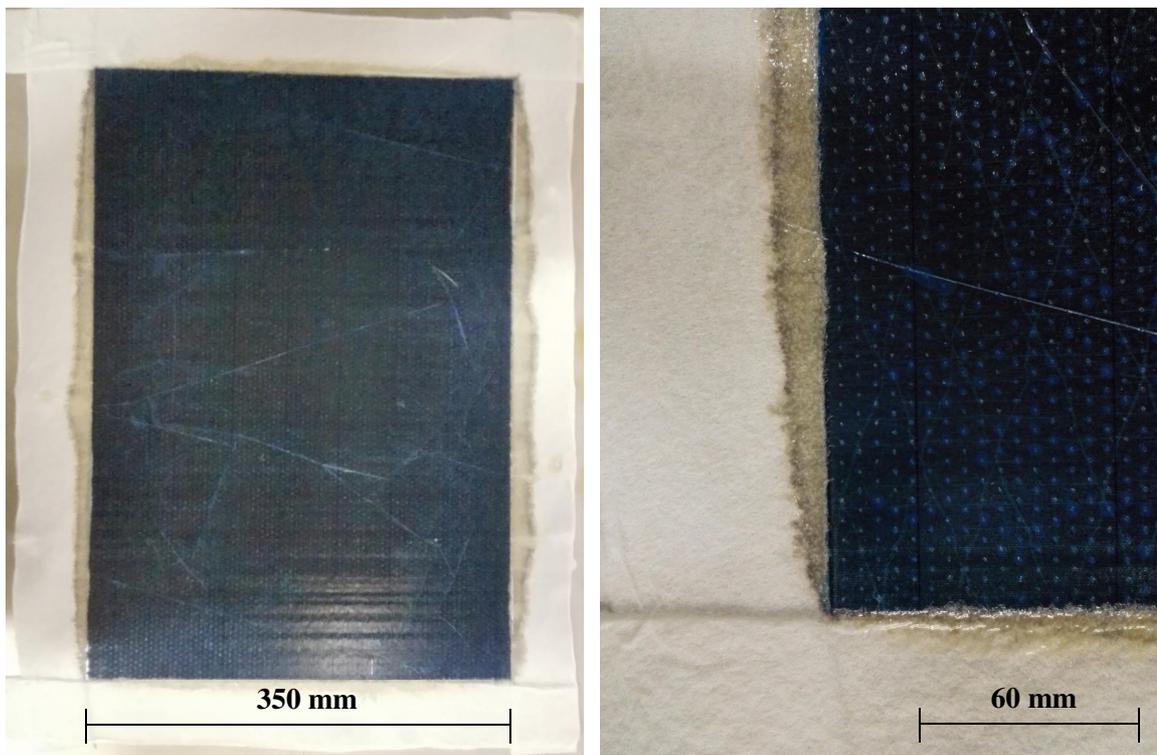


Abbildung 7.13: Harz im Vlies der Platte P1P3

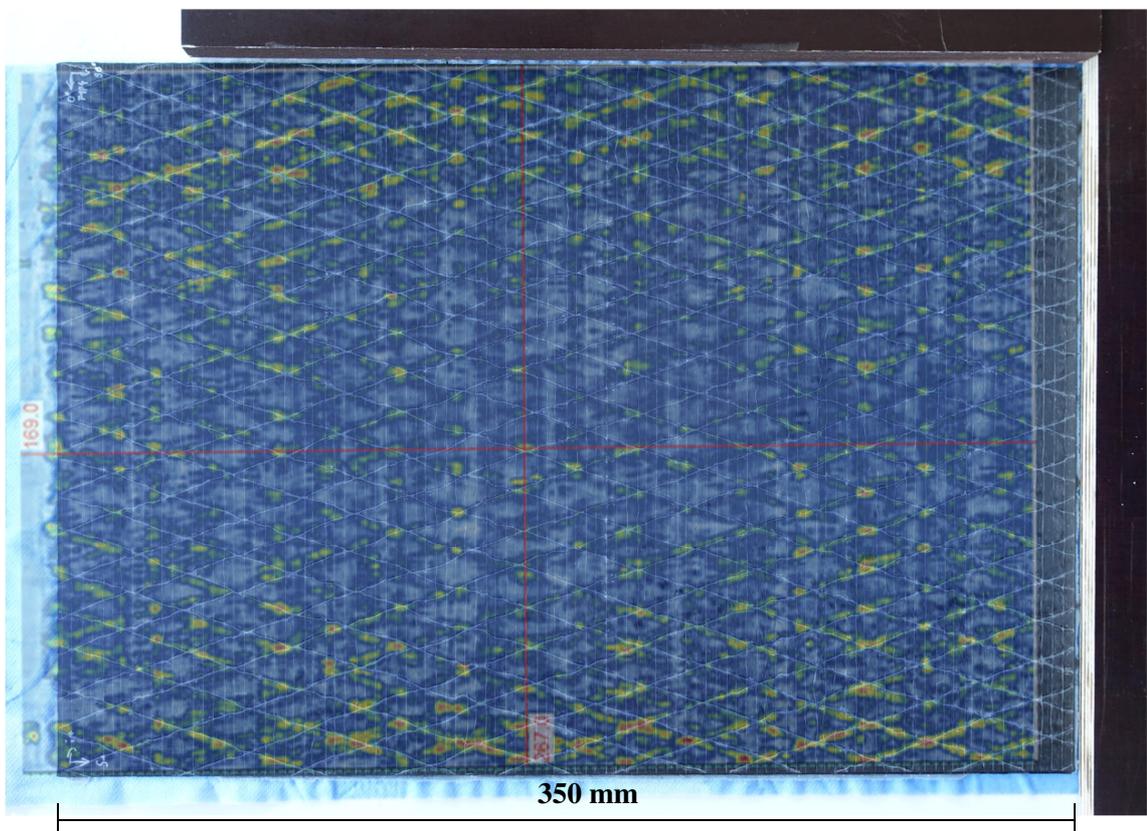


Abbildung 7.14: Überlagerung Foto und Ultraschallbild Platte P1P4

Um zu überprüfen, ob dem Gelege immer noch zu viel Harz entzogen wird und daher Poren entstehen, wird bei Platte P1P5 statt dem Abreißgewebe eine Lochfolie und eine

semipermeable Membran verwendet. Die semipermeable Membran ist luftdurchlässig, verhindert jedoch den Harzdurchfluss. Auf die semipermeable Membran wird Vlies gelegt, damit die Luft gut abgesaugt werden kann. Bei diesem Aufbau kann aus dem Gelege kein Harz rausgezogen werden.

In den Ultraschallbildern (siehe Abbildung A.5) ist noch einmal eine klare Verbesserung zu Platte P1P4 zu sehen. Die Rückwand ist sehr gleichmäßig. Es sind immer noch einige Poren entlang der Nähfäden zu sehen, jedoch deutlich weniger als zuvor. Das Prepregsystem scheint mit den 33% Harzmassenanteil (SGL Carbon SE 2018b) sehr knapp eingestellt zu sein.

Um noch einmal den Einfluss der Temperaturführung zu überprüfen, wird P1P6 mit dem Aufbau von Platte P1P5, jedoch mit dem Aushärtezyklus von Platte P1P hergestellt.

In den Ultraschallbild (siehe Abbildung A.6) ist genau wie bei P1P5 eine gleichmäßige Rückwand zu erkennen und die Anzahl der Poren ist nicht gestiegen. Das unterstützt die Vermutung, dass dem Prepreg mit dem anfänglichen Aufbau zu viel Harz entzogen wurde. Der Temperaturzyklus scheint keinen großen Einfluss auf die Porosität zu haben.

Im Vergleich dazu sind im Ultraschallbild bei Platte P1 deutlich weniger Poren zu sehen (siehe Abbildung A.7). Hier ist auch kein Muster für die Poren zu erkennen. Die Rückwand ist klar und gleichmäßig. Da die Oberfläche entgegen der Faserrichtung sehr uneben ist, wird die Rückwand in zwei Bildern dargestellt, bei einer Blende von 1,5 bis 1,7mm und einer Blende von 1,9 bis 2,0mm. Das Infusionsharz wurde bei der Herstellung von Platte P1 etwas kürzer entgast als bei allen weiteren Platten. Daher sind beispielsweise in Platte P4, die aus dem gleichen Lagenaufbau besteht, noch einmal deutlich weniger Poren zu sehen (siehe Abbildung A.16).

7.7 Untersuchung der Schlißproben

7.7.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Mikroskopaufnahmen wird das Mikroskop VHX-5000 der Firma Keyence mit dem Objektiv VH-ZST verwendet. Das Mikroskop wird eingeschaltet und kalibriert. Im Panoramamodus kann der Bereich für die Aufnahme und die Anzahl der Bilder definiert werden. Die Aufnahme läuft automatisch ab.

7.7.2 Versuchsauswertung

In Abbildung 7.15 sind Proben der Prepregplatten P1P, P1P2, P1P3, P1P4, P1P5 und eine Probe der Infusionsplatte P1 übereinander dargestellt. Die Poren sind in den Mikroskopbildern als schwarze Punkte sichtbar.

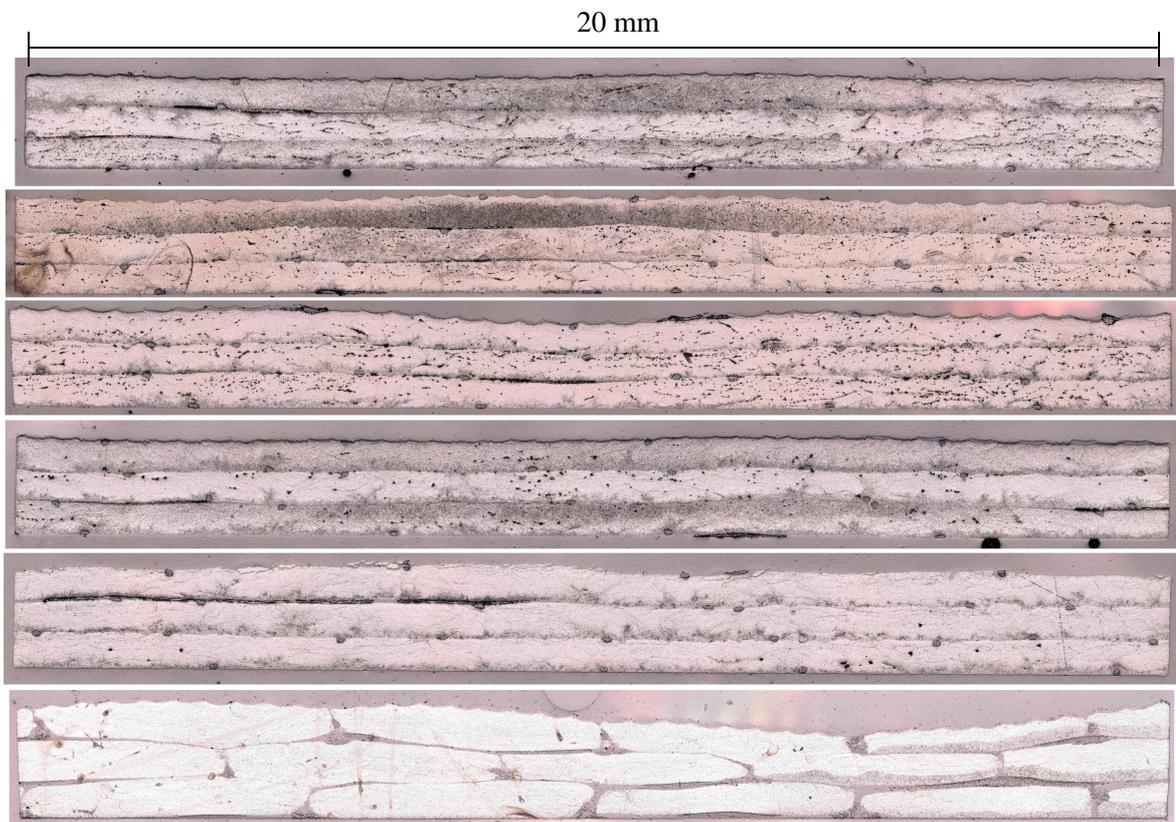


Abbildung 7.15: Mikroskopbilder, von oben nach unten: P1P, P1P2, P1P3, P1P4, P1P5, P1

In der Probe der Platte P1P (oberste Probe) sind sehr viele Poren zu erkennen. Die Probe aus Platte P1P2 darunter sieht ähnlich aus. Bei der Probe zu Platte P1P3 (dritte Probe von oben) sind immer noch sehr viele Poren zu sehen. Auf dem Ultraschallbild (siehe Abbildung A.3) ist zu sehen, dass die Probenplatte schon deutlich weniger Poren hat. Allerdings sind insbesondere im Randbereich noch sehr viele Poren zu sehen und die Probe ist aus dem Randbereich entnommen worden. Bei der Probe der Platte P1P4 (dritte Probe von unten)

sind deutlich weniger Poren im sichtbar. Bei der Probe aus Platte P1P5 (zweite Probe von unten) ist dann erneut eine sehr starke Verbesserung sichtbar. Es sind hier nur noch wenige Poren zu sehen. Bei der Probe aus Platte P1 (unterste Probe) ist ein strukturell anderer Aufbau sichtbar. Hier sind die einzelnen Rovings klar zu erkennen und durch Harzbereiche getrennt. Es sind nur wenige Poren zu sehen.

Bei genauerer Betrachtung der Prepregproben fallen runde dunkle Bereiche auf, in denen Fasern von Luft umringt sind (siehe Abbildung 7.16). Außerdem ist zwischen der obersten und mittleren Lage ein Bereich zu sehen, in dem sich Luft gesammelt hat. Die Luft einschüsse sind auch hier in einem klaren Muster angeordnet.

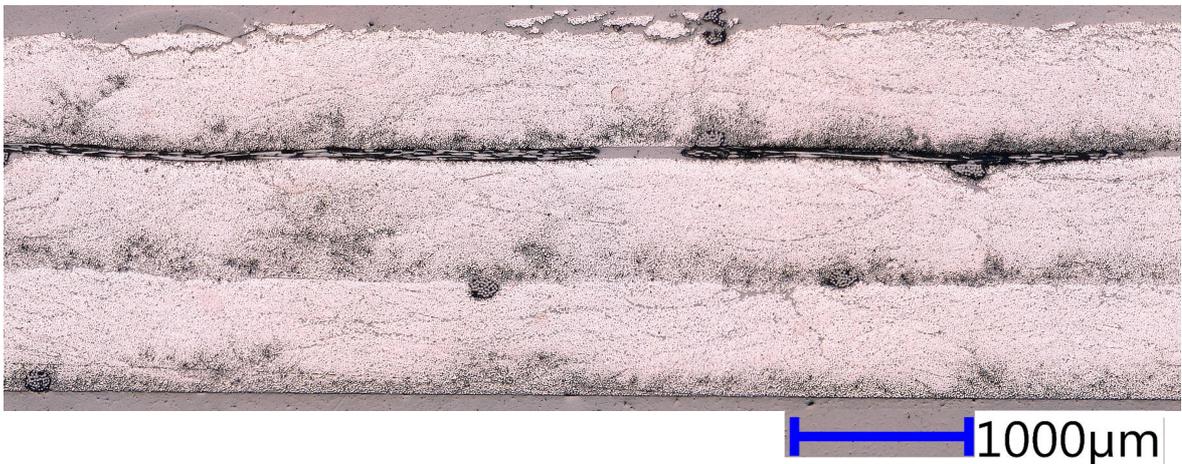


Abbildung 7.16: Nähfäden mit Poren in Platte P1P5

Wird das Mikroskopbild dieser Probe mit einem Foto der Probe vor dem Einbetten überlagert, können die runden Anordnungen den Nähfäden zugeordnet werden, die parallel zu den Fasern verlaufen (siehe Abbildung 7.17). Um diese herum scheint sich Luft gesammelt zu haben. Bei dem längeren Bereich zwischen den Lagen könnte es sich um Nähfäden handeln, die in einem Karomuster über jede Lage verlaufen. Die Nähfäden in einem Karomuster sind auch gut in dem Ultraschallbildern zu sehen, die Längsfäden nicht.

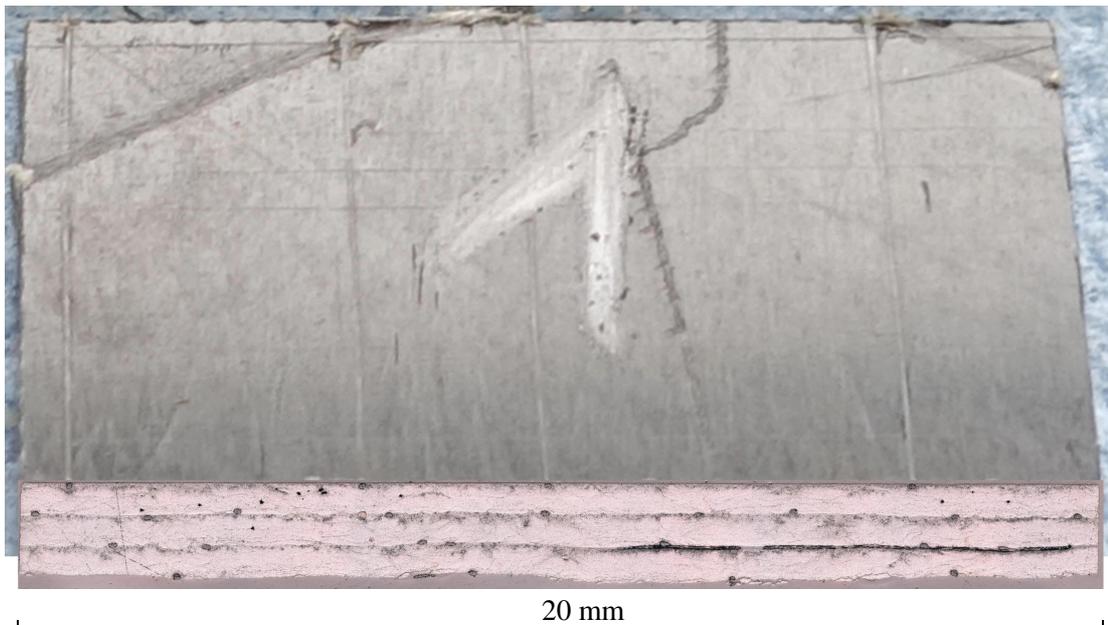


Abbildung 7.17: Mikroskopbild und Foto von Probe 1 aus Platte P1P5

Bei den Infusionsplatten sind in den Harzbereichen viele kleine Bläschen zu sehen. Abbildung 7.18 zeigt einen Ausschnitt der bereits in Abbildung 7.15 gezeigten Probe der Platte P1. Hier sind die kleinen Poren im Harz gut zu sehen.

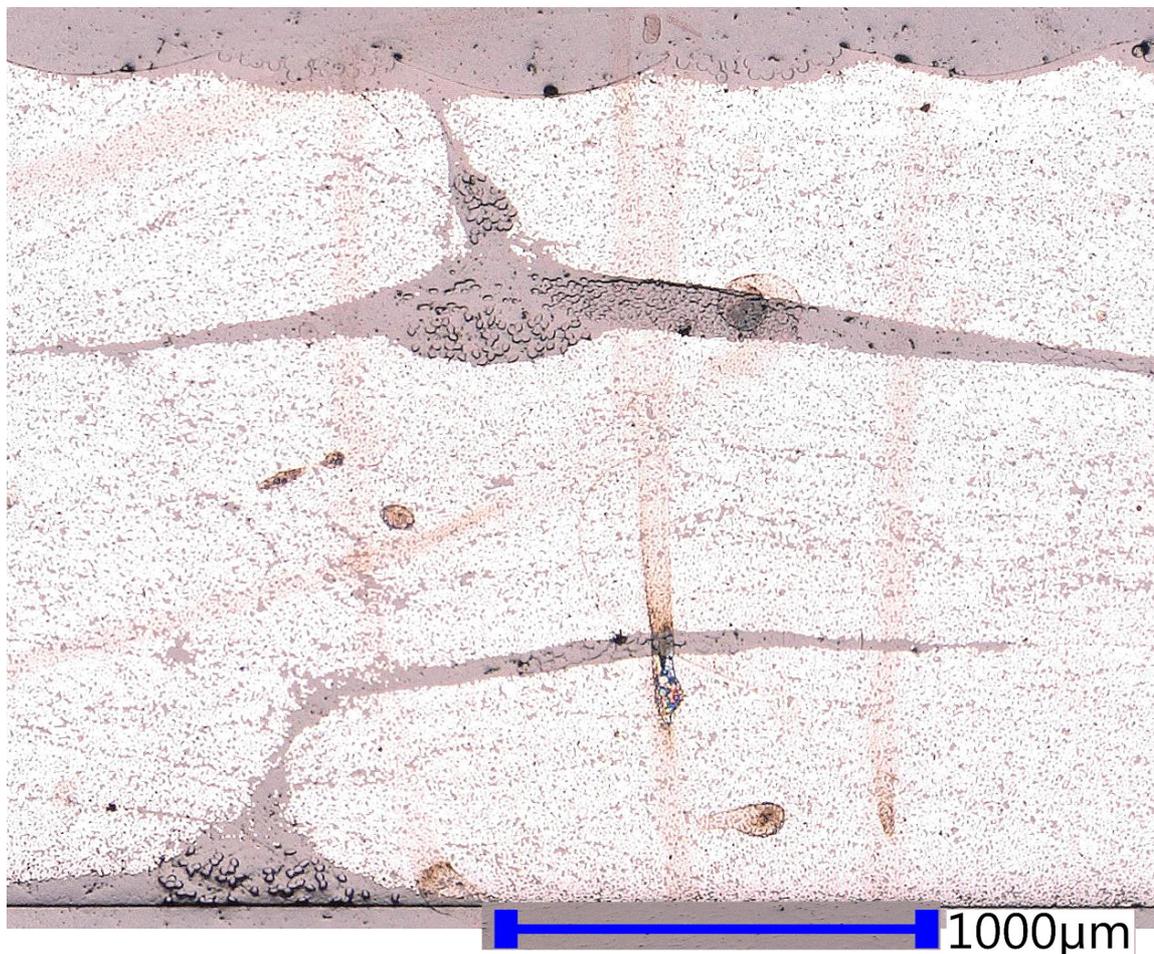


Abbildung 7.18: Kleine Poren im Harzbereich der Platte P1

Abbildung 7.19 zeigt einen Bildausschnitt einer Schlifffbildprobe von Platte P5A. Hier ist oben das Infusionsmaterial zu sehen, auf das mit dem Prepreg auflaminiert wurde. Für das auflaminiere mit dem Prepreg wurde das erste Verfahren (siehe Abschnitt 5.1.2.3) verwendet und es sind sehr viele Poren zu sehen. In dem Infusionsmaterial sind nur wenige größere Poren zu sehen und in den Harzgebieten viele sehr kleine. Es ist möglich, dass sich diese ähnlich wie beim Prepreg an den Nähfäden gesammelt haben. Bei dem trockenen Gelge verlaufen Nähfäden senkrecht zur Faserrichtung, das würde zu den Porenansammlungen passen. In den Ultraschallbildern sind allerdings keine Porenansammlungen entlang der Nähfäden zu sehen. Das könnte auch daran liegen, dass die Poren sehr klein sind.

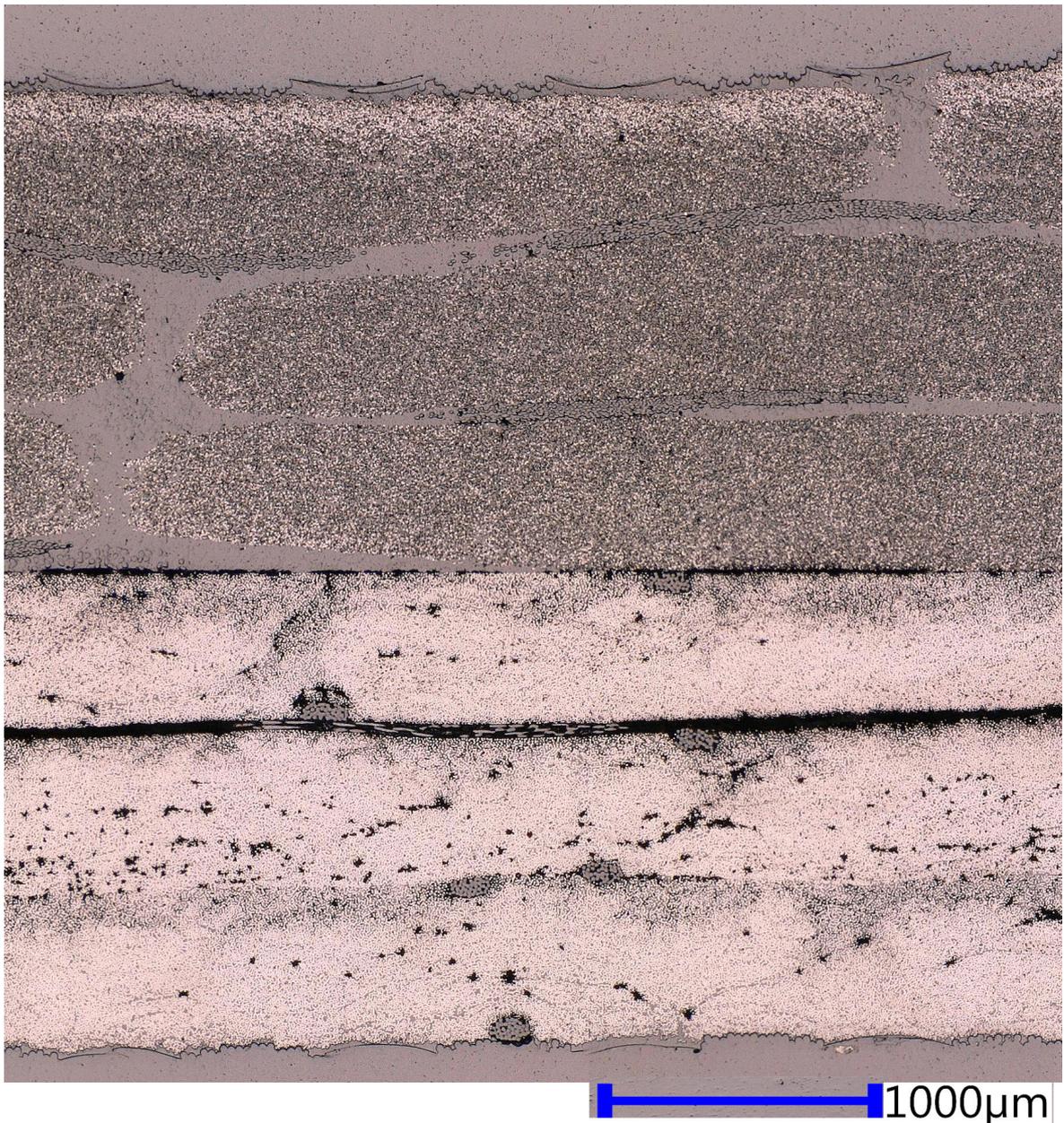


Abbildung 7.19: Poren in Platte P5A

Interessant sind auch die Schlifffbilder von Platte P3 und P3P (Abbildung E.3 und Abbildung E.6). Die obere und untere Lage liegen in 0° Richtung und die mittleren Lagen in 90° Richtung. Dadurch ist gut zu sehen, dass die Prepreglagen (Abbildung E.6) glatt und gleichmäßig liegen und die Infusionslagen (Abbildung E.3) eher wellig. Die Wellenhöhe ist nicht sehr hoch, es muss jedoch je nach Anwendung definiert werden, welche Wellenhöhen toleriert werden können.

Insgesamt stimmen die Mikroskopbilder gut mit den Ultraschallbildern überein und unterstützen die Vermutung, dass sich Poren an den Nähfäden sammeln. Die Mikroskopbilder zeigen eine klare Verbesserung der Porosität der Prepregplatte von P1P zu P1P5 bzw. P1P6. Die Porosität bei den Infusionsproben ist jedoch geringer als bei den Prepregproben. Die Prepreglagen sind eben und durchgängig, wohingegen das trockene Gelege zwischen den Rovings Harzbereiche aufweist und sehr uneben ist.

7.8 Bestimmung der Glasübergangstemperatur

7.8.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Glasübergangstemperatur wird angelehnt an die DIN 6546-A bestimmt. (*DIN 65467:1999-03*)

Als erstes wird eine in Abschnitt 5.2.3 hergestellte Probe aus dem Ofen genommen. Die Probe muss eine maximale Höhe von etwa 1,5 mm haben, um in den Probentiegel zu passen. Sollte die Probe höher sein, wird ein Teil mit einem Seitenschneider entfernt.

Anschließend wird in den Deckel eines Aluminiumtiegels ein Loch gestochen. Dadurch wird sichergestellt, dass sich im Tiegel kein Druck aufbaut. Falls es zu einer Gasbildung kommt, kann dieses entweichen. Der Tiegel wird mit Deckel auf einer Feinwaage gewogen. Anschließend wird die Probe gewogen und in den Tiegel gelegt. Der Deckel wird mit Hilfe einer kleinen Presse auf den Tiegel gedrückt und so aufgrund der hohen Oberflächengüte kaltverschweißt. Der Probentiegel wird in den Ofen des Differenzkalorimeters auf den Sensor gestellt und der Ofen geschlossen.

Anschließend muss der Temperaturzyklus für die Messung eingestellt werden. Der Ofen wird auf 20°C gebraucht. Der Temperaturzyklus besteht aus zwei Aufheizungen auf 150°C, jeweils mit einer anschließenden Abkühlung auf 20°C. Die Heizrate beträgt 10 °C/min. Ist der Temperaturzyklus ausgewählt, werden noch der Probenname, die Probenmasse und die Tiegelmasse eingegeben. Wichtig ist, dass für den leeren Referenztiegel ebenfalls die richtige Masse eingetragen wurde und die Kalibrierung des Differenzkalorimeters nicht zu lange zurückliegt. Abschließend wird die Messung gestartet.

Nach Abschluss der Messung wird die Probe entnommen und der zuvor beschriebene Vorgang für alle weiteren Proben wiederholt.

7.8.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Glasübergangstemperatur ist im Standard 0376 des Germanischen Lloyd für Harze festgelegt, die in Rotorblättern für Windkraftanlagen eingesetzt werden. Hier ist definiert, dass, wenn die Glasübergangstemperatur mindestens 15°C über der maximal erwarteten Temperatur in der Blattstruktur liegt, keine weiteren Untersuchungen hinsichtlich der thermischen Beständigkeit erforderlich sind. (*DNVGL-ST-0376*, 40) Dabei ist die maximale Temperatur mit 50°C anzunehmen. (*DNVGL-ST-0376*, 14) Daraus ergibt sich eine minimale Glasübergangstemperatur von 65°C, die in jedem Fall eingehalten werden muss.

In der NETZSCH Proteus Thermal Analysis Software kann für jede Messung ein Temperaturbereich ausgewählt werden, in dem die Glasübergangstemperatur ermittelt wird. Da sichergestellt werden soll, dass diese über 65°C liegt, wird insbesondere auf die Onset Temperatur geachtet. Diese stellt die Temperatur dar, bei der der Übergang anfängt und ist daher immer die niedrigste. Im Anhang D sind in Abbildung D.1 bis Abbildung D.7 die Messkurven dargestellt. Jeweils unter der Abbildung sind Tabelle D.1 bis Tabelle D.7, in denen die ermittelten Glasübergangstemperaturen aufgelistet sind. Dort wird ein Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Die Mittelwerte und die Standardabweichung der Glasübergangstemperaturen sind in Tabelle 7.6 dargestellt.

In der ersten Aufheizung kann eine Aussage über die thermische Vorgeschichte getroffen werden. Hier ist z.B. bei den meisten Proben noch eine Enthalpielaxation zu sehen. Die Standardabweichung für die Onset Glasübergangstemperatur der ersten Aufheizung liegt für alle Probenplatten zwischen 0,4°C und 2,2°C. Es ist zu berücksichtigen, dass die Auswahl der Grenzen für die Glasübergangstemperatur teils eine sehr große Auswirkung hat.

In der zweiten Aufheizung ist die thermische Vorgeschichte nicht mehr zu sehen und die Verläufe sind glatter.

Die Platte P1P und P1P6 wurden mit einer Endtemperatur von 80°C getempert, die Platten P1P2, P1P4 und P1P5 mit 85°C (siehe Tabelle 5.2). Dieser 5°C Unterschied in der Aushärtetemperatur zeigt keinen Einfluss auf die Glasübergangstemperatur. Bei größeren Unterschieden in der Aushärtetemperatur ist jedoch ein Effekt zu erwarten, insbesondere wenn die Aushärtezeiten knapp gewählt werden. Bei den untersuchten Proben liegt die Glasübergangstemperatur immer über 65°C. Damit ist nach DNVGL Standard keine weitere Untersuchung hinsichtlich der thermischen Stabilität notwendig.

Tabelle 7.6: Ergebnisse der DSC Auswertung

Platte	Erste Aufheizung						Zweite Aufheizung					
	Tg Onset °C	Stabw °C	Tg Midpk °C	Stabw °C	Tg End °C	Stabw °C	Tg Onset °C	Stabw °C	Tg Midpk °C	Stabw °C	Tg End °C	Stabw °C
P1	70	2,2	72	1,7	75	1,4	71	2,7	79	0,5	85	1,0
P2	72	1,9	73	2,4	75	3,0	74	1,3	80	1,0	85	1,1
P1P	71	1,9	78	4,7	82	5,5	80	16,2	103	4,1	111	1,3
P1P2	77	1,3	83	0,9	86	1,3	80	0,2	96	2,4	106	2,5
P1P4	78	0,9	82	1,1	85	1,2	79	1,2	96	3,9	109	2,5
P1P5	74	1,4	77	0,7	80	1,4	76	2,6	94	2,3	106	2,9
P1P6	78	0,4	82	0,8	86	1,4	72	2,1	95	0,8	108	1,7

7.9 Bestimmung des Faservolumengehalts

7.9.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Faservolumengehalt für CFK-Proben wird in der Regel mit einem nasschemischen Verfahren bestimmt, wie z.B. in der DIN EN 2559 beschrieben wird. (*DIN EN 2559:1997-05*)

Da ein solches Verfahren für diese Arbeit nicht zur Verfügung steht, wird eine einfache Alternative gewählt, die ein angenähertes Ergebnis liefern soll.

Die ausgeschnittenen Proben werden nach dem Sägen mit einem Papiertuch abgetrocknet und für eine Stunde bei 50°C im Ofen getrocknet. Dadurch soll sichergestellt werden, dass von Aussägen keine Feuchtigkeit an der Probe verbleibt.

Die Proben werden nach dem Trocknen auf einer Analysenwaage MS104TS/00 der Firma Mettler Toledo gewogen. Anschließend werden sie mit einem Messschieber gemessen.

7.9.2 Versuchsauswertung

Die gewogene Gesamtmasse m_{ges} der Probe setzt sich zusammen aus dem ebenfalls gemessenen Volumen V_{ges} und der unbekanntem Dichte ρ_{ges} .

$$m_{ges} = V_{ges} \cdot \rho_{ges} \quad (7.13)$$

Über den Faservolumenanteil φ und die Harz- und Faserdichte ρ_m und ρ_f lässt sich die Gesamtdichte beschreiben.

$$\rho_{ges} = \varphi \cdot \rho_f + (1 - \varphi) \cdot \rho_m \quad (7.14)$$

Mit 7.14 eingesetzt in 7.13 ergibt sich:

$$m_{ges} = V_{ges} \cdot (\varphi \cdot \rho_f + (1 - \varphi) \cdot \rho_m) \quad (7.15)$$

Formel 7.15 lässt sich nach dem Faservolumengehalt auflösen.

$$\varphi = \frac{\frac{m_{ges}}{V_{ges}} - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \quad (7.16)$$

Die Faserdichte für das Prepreg beträgt 1,80 g/cm³ und für das trockene Gelege 1,78 g/cm³ (SGL Carbon SE). Die Harzdichte für das Infusionsharz beträgt 1,13 g/cm³ (ebalta Kunststoff GmbH 2017). Die Berechnung des Faservolumengehalt für alle Proben ist in Anhang F in Tabelle F.1 bis Tabelle F.4 durchgeführt, eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist auch in Tabelle 7.7 dargestellt.

Tabelle 7.7: Ergebnisse der Faservolumenbestimmung

Aufbau	Platte	$V_f / \%$	Stabw. / %
Infusion	P1	55,3	3,6
	P2	55,3	3,4
	P3	56,1	3,2
Prepreg mit Abreißgewebe und Vlies bei 80°C	P1P	55,9	1,2
	P2P	54,1	1,6
	P3P	55,2	1,1
Prepreg mit Abreißgewebe und Vlies bei 85°C	P1P2	54,0	1,4
Prepreg mit Vlies am Rand	P1P3	54,2	1,8
Prepreg nur mit Abreißgewebe	P1P4	56,1	2,2
	P2P4	52,2	1,9
	P3P4	51,9	4,1
Prepreg mit semipermeabler Membran	P1P5	55,8	2,7

Für die Infusionsproben wird ein Faservolumenanteil von etwa 55% erwartet und die Ergebnisse der Messung stimmen hier auch sehr gut überein.

Bei dem Prepreg Material wird vom Hersteller ein Harzmassenanteil von 33% vorgegeben. Der Faservolumenanteil φ wie folgt aus dem Fasermassenanteil ψ berechnet werden (Schürmann 2007, 164):

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (7.17)$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - 0,67}{0,67} \cdot \frac{1,80 \frac{g}{cm^3}}{1,13 \frac{g}{cm^3}}} = 56\%$$

Es ist also ein Faservolumenanteil von 56% zu erwarten.

Aufgrund der vorherigen Versuchsergebnisse wird erwartet, dass aus den ersten Prepregplatten zu viel Harz gezogen wurde und somit der Faservolumenanteil hoch sein müsste. Bei der letzten Platte müsste der Faservolumenanteil bei 56% liegen. Für die letzte Prepregplatte stimmt dies auch, es wurde kein Harz entzogen und der mittlere gemessene Faservolumenanteil liegt bei 55,8%. Die Ergebnisse der vorherigen Prepregplatten stimmen allerdings nicht mit den Erwartungen überein. Der Faservolumenanteil ist z.B. bei dem ersten Aufbau gleich hoch wie bei dem letzten Aufbau.

Bei dieser Berechnung wird nicht berücksichtigt, dass die Proben eine gewisse Porosität besitzen. Diese kann von der Formel nicht abgebildet werden. Wenn die Porosität größer wird, wächst das Volumen an, ohne dass die Masse ansteigt. Nach Gleichung 7.16 sinkt somit der Faservolumenanteil. Da die Porosität nicht quantitativ sondern nur qualitativ ermittelt wurde, kann sie hier nicht exakt berücksichtigt werden. Der wahre Faservolumengehalt wird für die Prepregproben allerdings höher sein, als in der Messung ermittelt. Als relativ genau können nur die Messungen der Proben aus den Infusionsplatten und der letzten Prepregplatte angenommen werden, da hier die Porosität sehr gering ist.

7.10 Diskussion der Ergebnisse

In der folgenden Diskussion sollen die die Prepregproben, die mit dem Vlies zum Entlüften hergestellt wurden (siehe Tabelle 5.2) als erste Prepregproben bezeichnet werden. Die Proben, die nur mit Abreißgewebe zum Entlüften hergestellt wurden, werden als zweite Prepregproben bezeichnet.

Sowohl in den Ultraschalluntersuchungen als auch in den Schliffbildern ist zu sehen, dass in den ersten Prepregproben deutlich mehr Poren enthalten sind als in den zweiten Prepregproben. Mit dem Vlies wird zu viel Harz aus dem Gelege gesogen und es können nicht alle Hohlräume gefüllt werden. In allen durchgeführten Zugversuchen ist zu sehen, dass die ersten Prepregproben schlechtere Ergebnisse erzielen als die zweiten Prepregproben. Das ist mit der höheren Porosität zu erklären. Die Infusionsproben haben in den Zugversuchen bessere Ergebnisse als die ersten Prepregproben, jedoch schlechtere als die zweiten Prepregproben. Das könnte mit dem ungleichmäßigeren Aufbau der Infusionsproben zusammenhängen. Die variierende Dicke ist in den Ultraschallbildern gut zu sehen. In den Schliffbilder sind auch zwischen den Rovings größere Harzbereiche zu sehen, die bei den Prepregproben nicht vorhanden sind. Hier sind die Rovings sehr eng und gleichmäßig verteilt.

Mit den 0° Zugversuche wurde für das Infusionsgelege eine Zugfestigkeit von 1231 MPa ermittelt. Das Ziel bei der gestuften Schäftung ist es, eine vergleichbare Festigkeit zu erreichen. Die Prepregproben (Platte P7A) erreichen mit einer Zugfestigkeit von 584 MPa 47,4% der Festigkeit der Referenzprobe. Die Infusionsproben erreichen mit 501 MPa 40,7% der Festigkeit der Referenzprobe. Wünschenswert wäre eine Festigkeit von 90% oder mehr. 100% der ursprünglichen Festigkeit ist nicht unbedingt notwendig, da in der Regel nur wenige Lagen repariert werden müssen. Eine Festigkeit von unter 50% im Vergleich zur Referenzprobe ist so nicht für den Reparatursatz verwendbar. Da die Proben im Schäftbereich ohne Faserausriss versagt haben, sollte die Schäftlänge vergrößert werden. Durch eine größere Schäftlänge kann die Schubspannung zwischen den Lagen besser aufgenommen werden. Außerdem kann der Einfluss der Oberflächenvorbehandlung untersucht werden. Es ist denkbar z.B. durch Filmkleber die Anbindung an das Primärlaminat zu verbessern. Aus den Versuchen lässt sich erkennen, dass die gestuften Schäftproben mit dem Prepreg als Reparaturmaterial bei gleicher Schäftlänge und Oberflächenvorbehandlung ein besseres Ergebnis erzielt. Dies ist auch bei einer vergrößerten Schäftlänge zu erwarten.

Durch die Variation des Aushärtezyklus für das Prepreg konnte in den DSC Messungen kein großer Unterschied bei der Glasübergangstemperatur festgestellt werden. Auch in den Ultraschallbildern ist kein Unterschied aufgrund der Aushärtezyklen zu erkennen. Es wurde allerdings sowohl die Temperatur als auch die Aushärtezeit nicht sehr stark variiert. Bei größeren Variationen ist hier ein Unterschied zu erwarten.

Die Firma Hexcel hat Probenplatten aus hauseigenem Prepreg mit im Infusionsverfahren hergestellten Probenplatten verglichen. Hier ging es insbesondere um dicke Aufbauten mit vielen Lagen. Die Ergebnisse der Versuche von Hexcel unterstützen die Ergebnisse dieser Arbeit sehr gut. Sie zeigen ebenfalls, dass die Infusionsplatten eine geringere Porosität aufweisen als die Prepregplatten. In den Schnittbildern von Hexcel zeigt sich ein viel gleichmäßigerer und homogenerer Lagenaufbau bei der Prepregplatten als bei der Infusionsplatte. Bei der Infusionsplatte befinden sich harzreiche Regionen zwischen den Rovings. Außerdem erreichen die Prepregproben bessere Festigkeitswerte als die Infusionsproben. (Shennan 2013)

8 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Prepreg einfacher zu verarbeiten und besser zu handhaben ist als trockenes Gelege mit dem Infusionsverfahren. Die Verarbeitung von Prepreg birgt außerdem ein geringeres Risiko für Fehler. Das Harz ist bereits gleichmäßig verteilt, wohingegen beim Infusionsverfahren durch kleine Probleme im Aufbau beispielsweise das Harz am Rand entlanglaufen kann und das Bauteil so unbrauchbar wird.

Ein Nachteil des Prepregs ergibt sich jedoch aus der begrenzten Lagerzeit bei Raumtemperatur. Insbesondere im Hinblick auf Reparaturen, bei denen die Serviceteams in der Regel aus einem zentralen Lager das benötigte Material geliefert bekommen, kann dies ein Problem darstellen.

Die in den Zugversuchen ermittelten Materialkennwerte sprechen auch für das Prepreg. Mit dem Aufbau, bei dem nur Abreißgewebe zum Absaugen der Luft verwendet wurde, konnten durchweg bessere Ergebnisse erzielt werden, als mit dem Infusionslaminat.

Die Ultraschalluntersuchungen und die Schlifffbilder zeigen einen gleichmäßigeren Aufbau bei den Prepregplatten als bei den Infusionsplatten. Bei der Porosität zeigt das Infusionsgelege ein leicht besseres Ergebnis, wobei das Prepreg bei der Verarbeitung mit einer semipermeablen Membran auch eine sehr geringe Porosität aufweist. Das Infusionsverfahren hat den Vorteil, dass prinzipiell alle Hohlräume mit Harz gefüllt werden. Das kann besonders für Reparaturen interessant sein, bei denen die Reparaturstelle eventuell nicht perfekt vorbereitet wurde, sodass diese vom Gelege nicht komplett ausgefüllt wird. Das Prepreg verfügt möglicherweise nicht über genug Harz um alle kleinen Hohlräume zu füllen.

Bei den Versuchen mit gestuften Schäftproben hat das Prepreg eine höhere Festigkeit erzielt. Es ist daher eher für eine Reparatur geeignet. Mit dem verwendeten Schäftverhältnis von 1:50 konnte jedoch keine ausreichende Festigkeit erreicht werden. Es ist zu erwarten, dass bei einer größeren Schäftlänge eine deutlich bessere Festigkeit erreicht werden kann. Eventuell helfen hier auch eine andere Oberflächenvorbehandlung und beispielsweise der Einsatz eines Filmklebers.

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass alle Platten unter Laborbedingungen hergestellt wurden. Durch die Umwelteinflüsse ist die Verarbeitung bei Reparaturen generell etwas schwieriger. Bei Reparaturen ist es beispielsweise meist nicht möglich, einen absolut dichten Vakuumaufbau zu realisieren und somit werden die in dieser Arbeit verwendeten Drücke

nicht erreicht. Auch die Temperatur wird bei einer Reparatur nicht mit einem Ofen zugeführt, sondern mit einer Heizmatte auf der Oberfläche. In den Versuchen konnte kein Einfluss der Temperaturführung festgestellt werden, die Variationen waren jedoch auch gering. Beim Tempern mit einer Heizmatte muss eventuell etwas länger getempert werden, um sicherzustellen, dass das Laminat vollständig ausgehärtet ist. Außerdem ist eine gestufte Schäftung für eine Reparatur nur schwer umsetzbar. Daher werden in der Regel ebene Schäftungen verwendet.

Es müssen in jedem Fall weitere Versuche durchgeführt werden, um ein optimales Schäftverhältnis und Oberflächenvorbehandlung zu untersuchen. Außerdem sollte untersucht werden, welchen Einfluss eine Variation des Aushärtezyklus hat, insbesondere in Bezug auf die Wärmezufuhr mit einer Heizmatte. Erst wenn die zuvor genannten Punkte untersucht sind, sollte ein Reparaturversuch am Rotorblatt durchgeführt werden.

Aufgrund der einfacheren Verarbeitung, der besseren Materialwerte, des gleichmäßigeren Aufbaus und des geringeren Fehlerrisikos sollte Prepreg für eine Reparatur bevorzugt werden.

Literaturverzeichnis- und Quellenverzeichnis

Bonnet, Martin (2016). Kunststofftechnik. Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele, Wiesbaden.

Bundesverband WindEnergie e.V. Funktionsweise von Windenergieanlagen, Online: <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/> (08.06.2019).

Cherif, Chokri (2011). Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften, Berlin, Heidelberg.

DIN 65467:1999-03. Luft- und Raumfahrt – Prüfung von Reaktionsharzsystemen mit und ohne Verstärkung – DSC-Verfahren.

DIN EN 2559:1997-05. Luft- und Raumfahrt – Kohlenstofffaser-Prepregs – Bestimmung des Harz- und Fasermasseanteils und der flächenbezogenen Fasermasse; Deutsche Fassung EN 2559:1997, Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 6060:1996-04. Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren – Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen im Zugversuch.

DIN EN 6066:1996-04. Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren; Bestimmung der Zugfestigkeit von ebenen und gestuften Schäftverbindungen.

DIN EN ISO 14129:1998-02. Faserverstärkte Kunststoffe - Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve, des Schubmoduls in der Lagenebene; (ISO 14129:1997); Deutsche Fassung EN ISO 14129:1997.

DIN EN ISO 527-1:2012-06. Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012.

DIN EN ISO 527-5:2010-01. Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-5:2009); Deutsche Fassung EN ISO 527-5:2009.

DNVGL-ST-0376. Rotor blades for wind turbines (27.05.2019).

ebalta Kunststoff GmbH (2017). Technisches Datenblatt AH 120 / IP 430.

Gebr. Käufer GmbH. Produktblatt Windkraft.

- Gebr. Käufer GmbH. Rotorblattbefahranlagen - KÄUFER Befahranlagen, Online:
https://www.kaeuffer.de/files/cto_layout/img/rotorblattbefahranlagen/windkraftbefahranlage-k-bp-2-1.jpg (10.06.2019).
- Hau, Erich (2016). Windkraftanlagen. Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit, Berlin, Heidelberg.
- Heier, Siegfried (2018). Windkraftanlagen. Systemauslegung, Netzintegration und Regelung, Wiesbaden.
- Jamieson, Peter/Hassan, Garrad (2011). Innovation in wind turbine design, Hoboken, N.J.
- Katnam, K. B. et al. (2015). Composite Repair in Wind Turbine Blades: An Overview, The Journal of Adhesion, 113–139, Online: 10.1080/00218464.2014.900449.
- Lange+Ritter GmbH. Technisches Datenblatt Mikon 205, Online:
https://lphe.epfl.ch/scifimats/matprod/chem_safety/Mikon_205_TDS_DE.pdf
(06.04.2019).
- Neitzel, Manfred/Mitschang, Peter/Breuer, Ulf (Hg.) (2014). Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, München.
- Rösler, Joachim/Harders, Harald/Bäker, Martin (2016). Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, Wiesbaden.
- Schürmann, Helmut (2007). Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Berlin, Heidelberg.
- Science Services GmbH. Epofix Datenblatt. DATA SHEET Epofix™ Cold-Setting Embedding Resin, Online:
https://scienceservices.de/media/pdf/ScienceServices_E1232_Epofix.pdf (24.05.2019).
- SGL Carbon SE. SIGRAFIL Carbon-Endlosfasern, Online:
<https://www.sglcarbon.com/loesungen/material/sigrafil-carbon-endlosfasern/> (27.05.2019).
- SGL Carbon SE (2018a). Datenblatt E501. Harzsysteme E500/E501/E502/E503, Epoxid-Harzsysteme für SIGRAPREG® Prepregs.
- SGL Carbon SE (2018b). Materialdaten SIGRAPREG® C U600 0/SD E501/33%. Unidirektionales Epoxid Carbonfaser Gelege Prepreg.
- Shennan, Chris (2013). Prepreg and Infusion: Processes for Modern Wind Turbine Blades, Online:

<https://www.hexcel.com/innovation/Documents/Prepreg%20and%20Infusion%20%20Processes%20for%20Modern%20Wind%20Turbine%20Blades%20.pdf> (10.06.2019).

Teschner, Roman (2013). Glasfasern, Berlin, Heidelberg/s.l.

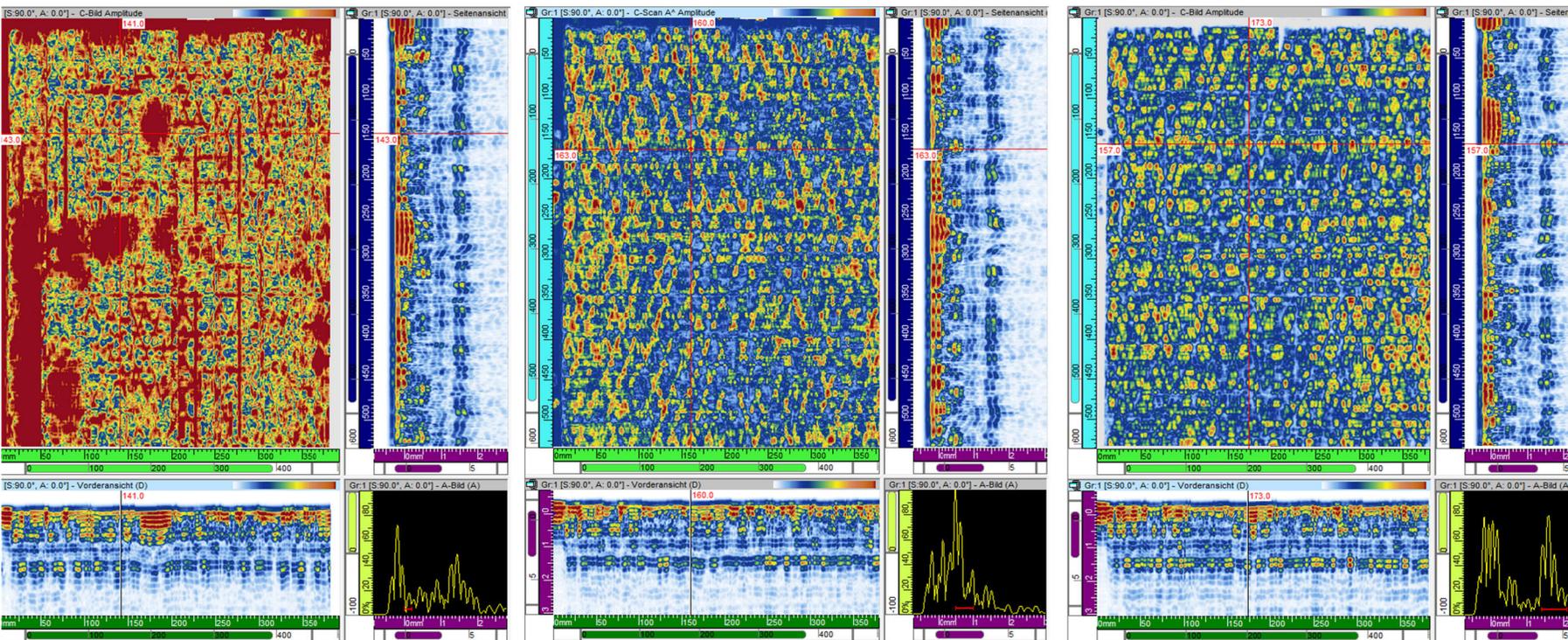
Wesselak, Viktor (2017). Handbuch Regenerative Energietechnik, Berlin, Heidelberg.

Witten, Elmar (Hg.) (2014). Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, Wiesbaden.

Witten, Elmar/Schuster, Alfons (2017). Composites-Marktbericht 2017. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen.

Anhang

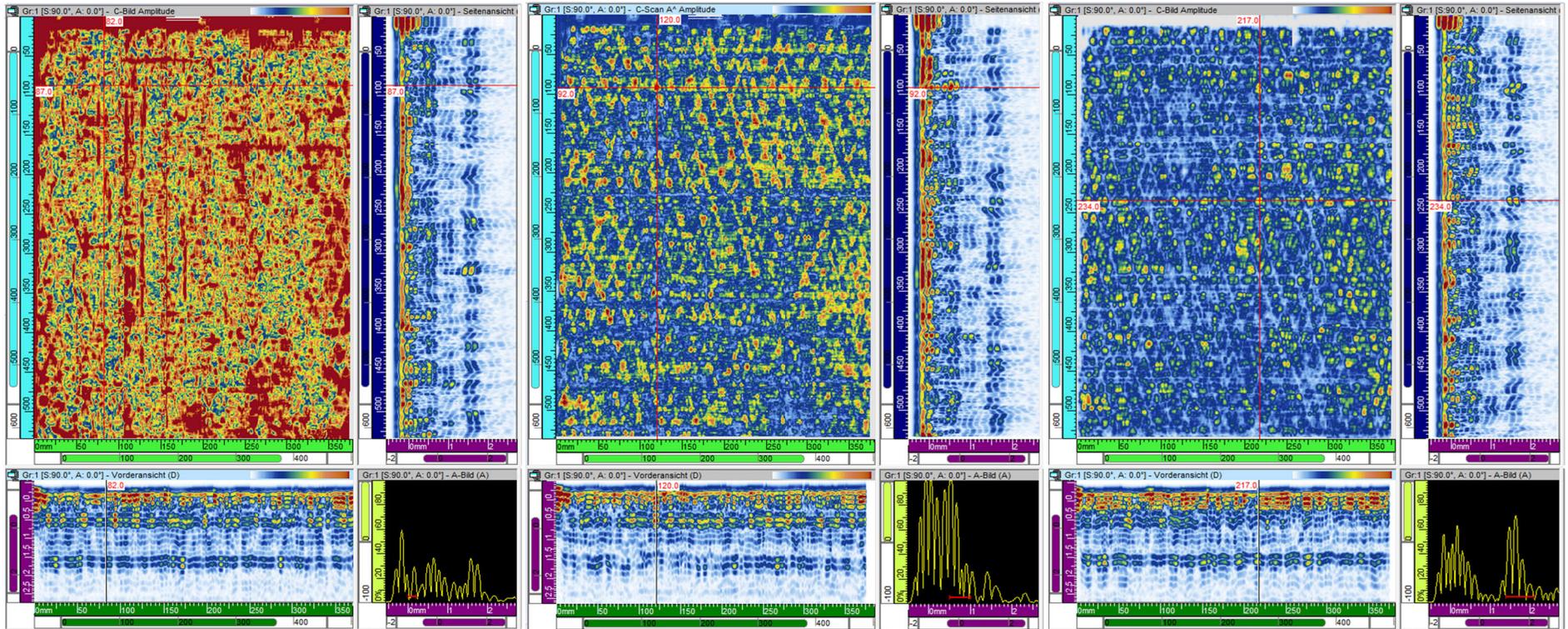
A Ultraschallbilder



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0
Abbildung A.1: Ultraschallbilder Platte P1P

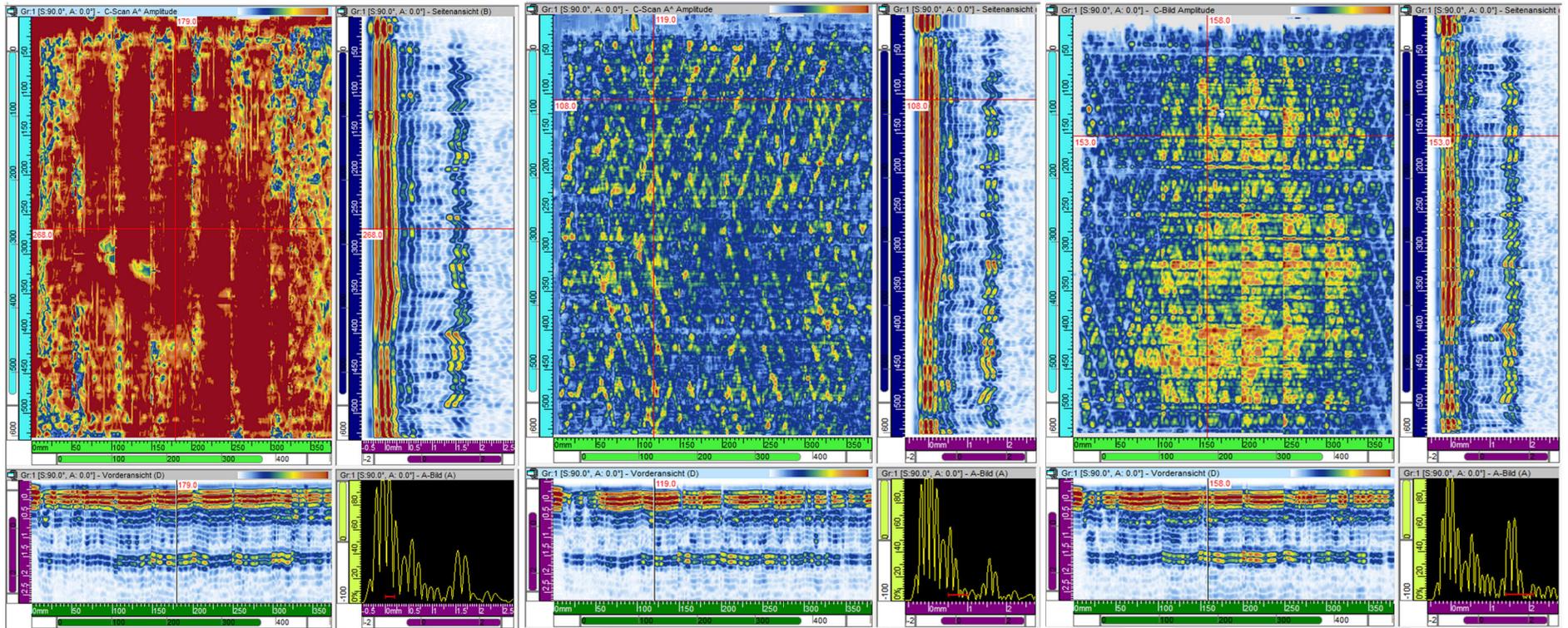
Rückwand
Blende 1.4 bis 2.1



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0
Abbildung A.2: Ultraschallbilder Platte P1P2

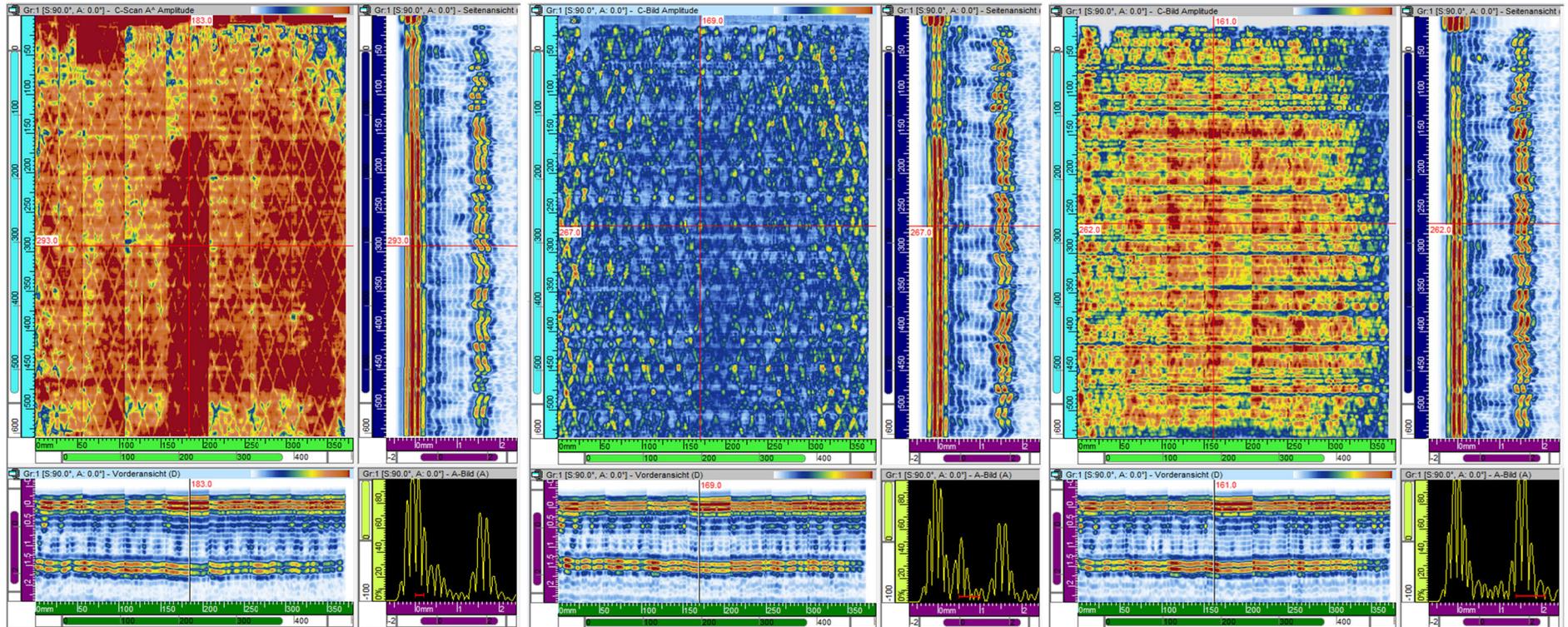
Rückwand
Blende 1.4 bis 2.1



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0
Abbildung A.3: Ultraschallbilder Platte P1P3

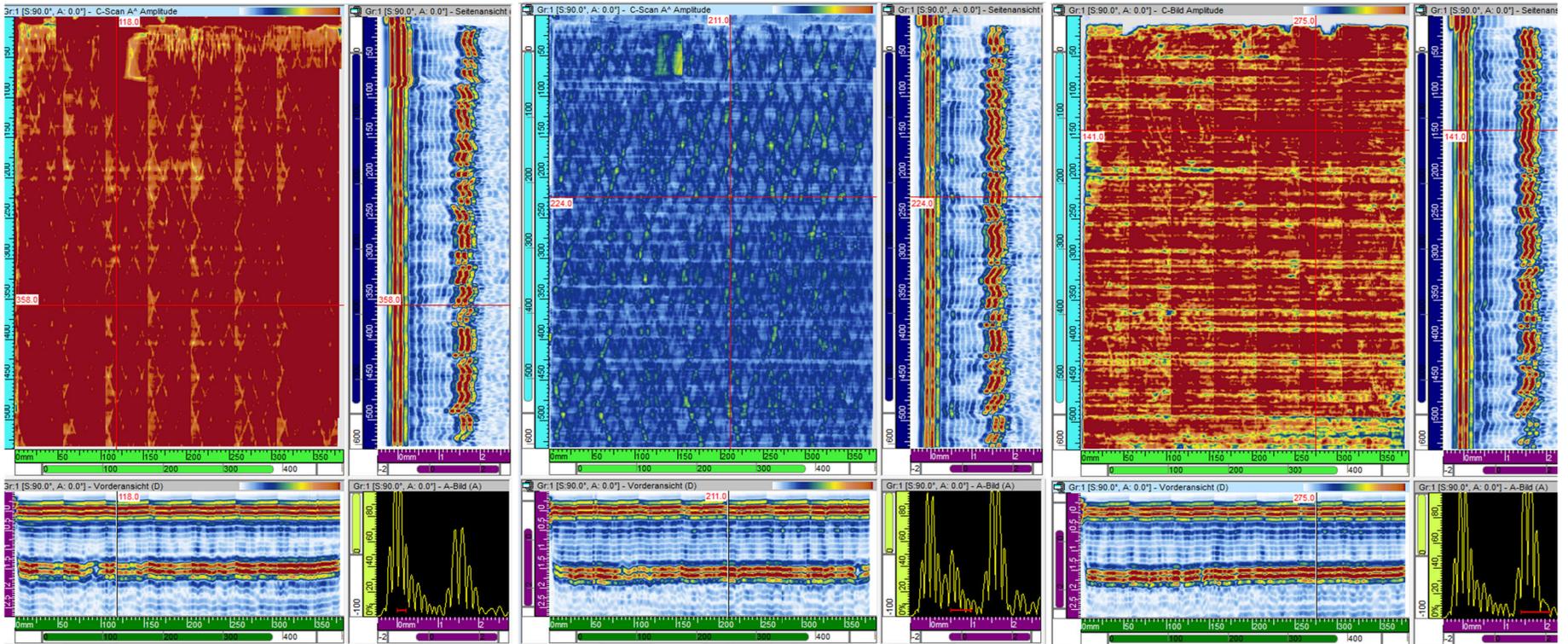
Rückwand
Blende 1.4 bis 2.1



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0
Abbildung A.4: Ultraschallbilder Platte P1P4

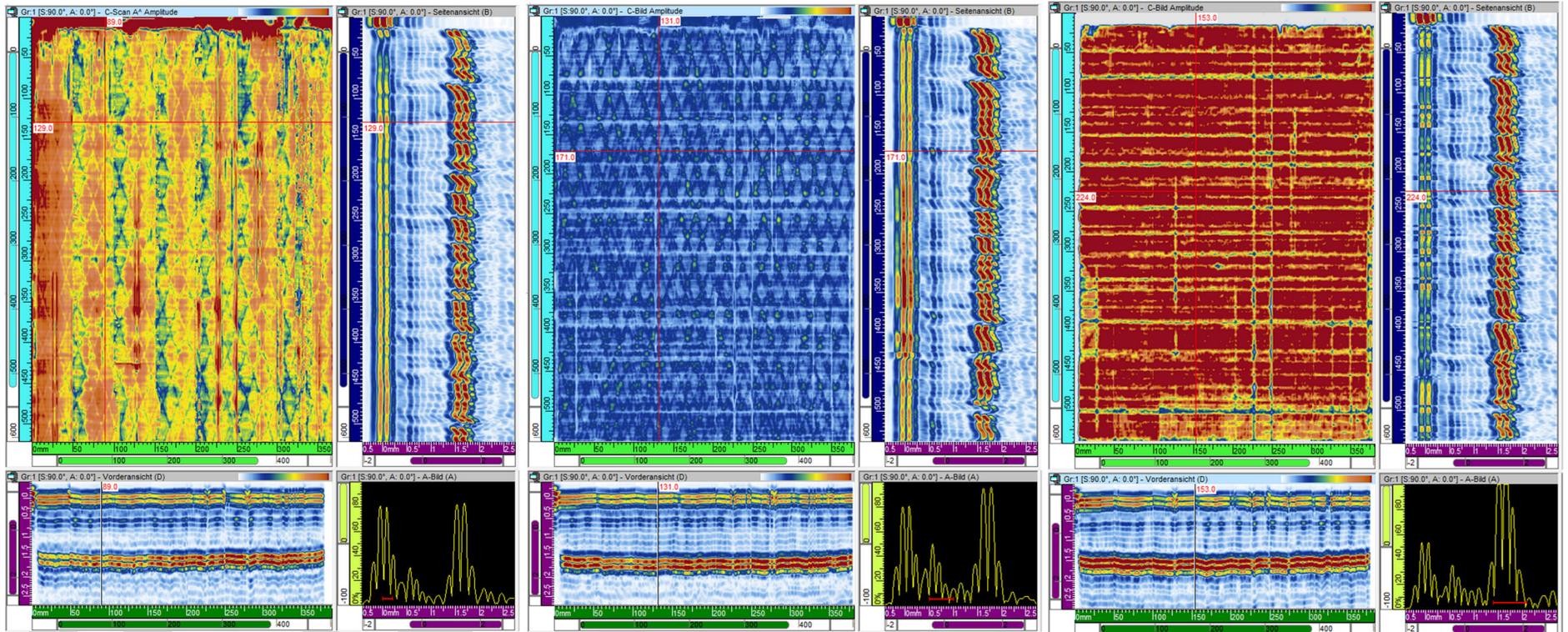
Rückwand
Blende 1.4 bis 2.1



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0
Abbildung A.5: Ultraschallbilder Platte P1P5

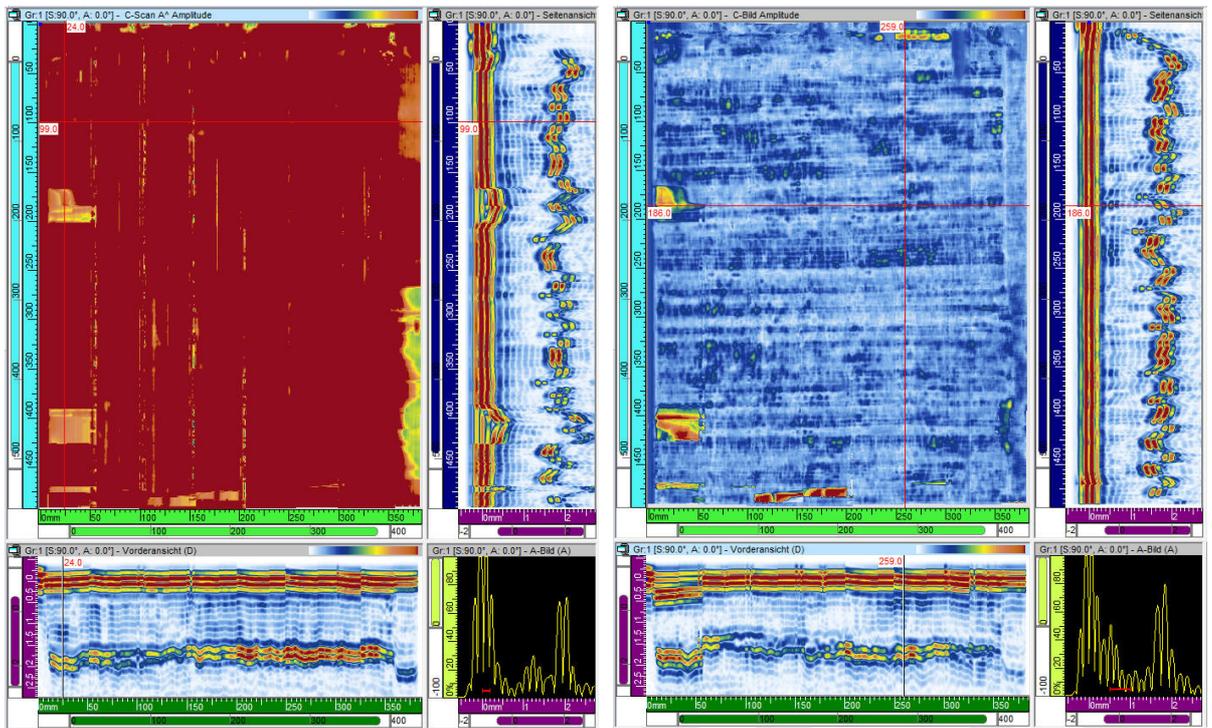
Rückwand
Blende 1.4 bis 2.1



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

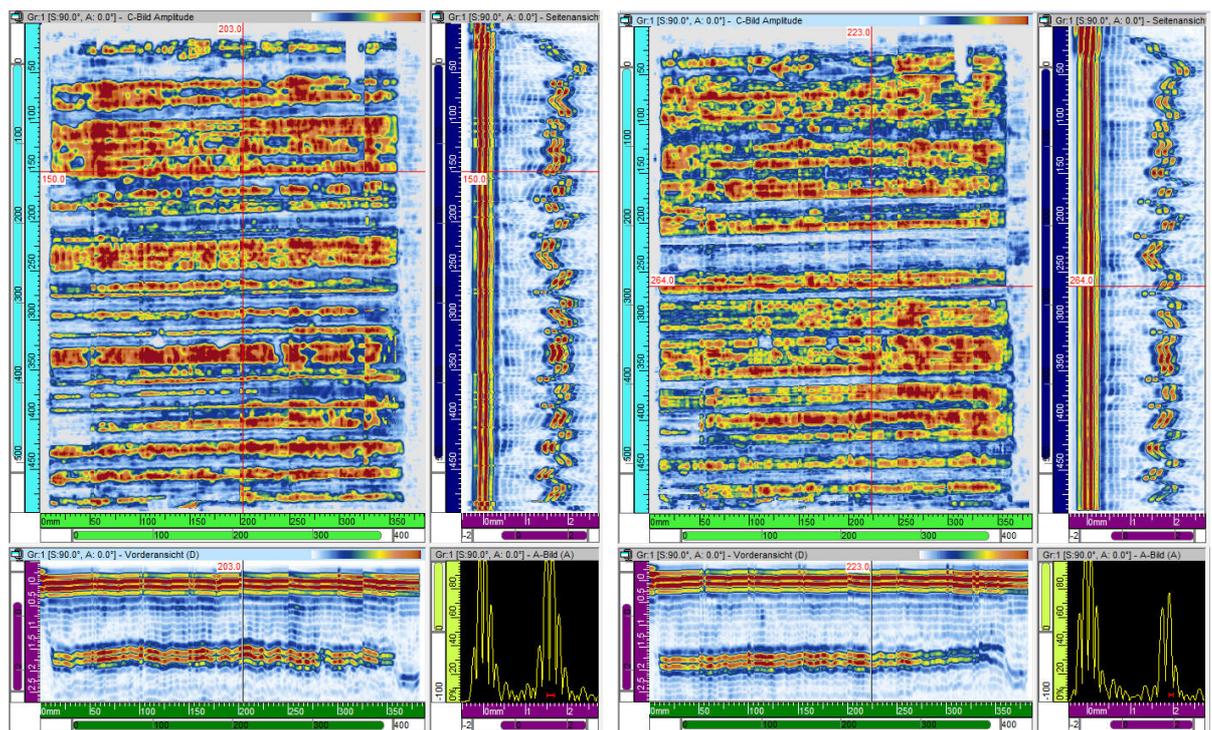
Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0
Abbildung A.6: Ultraschallbilder Platte P1P6

Rückwand
Blende 1.4 bis 2.1



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

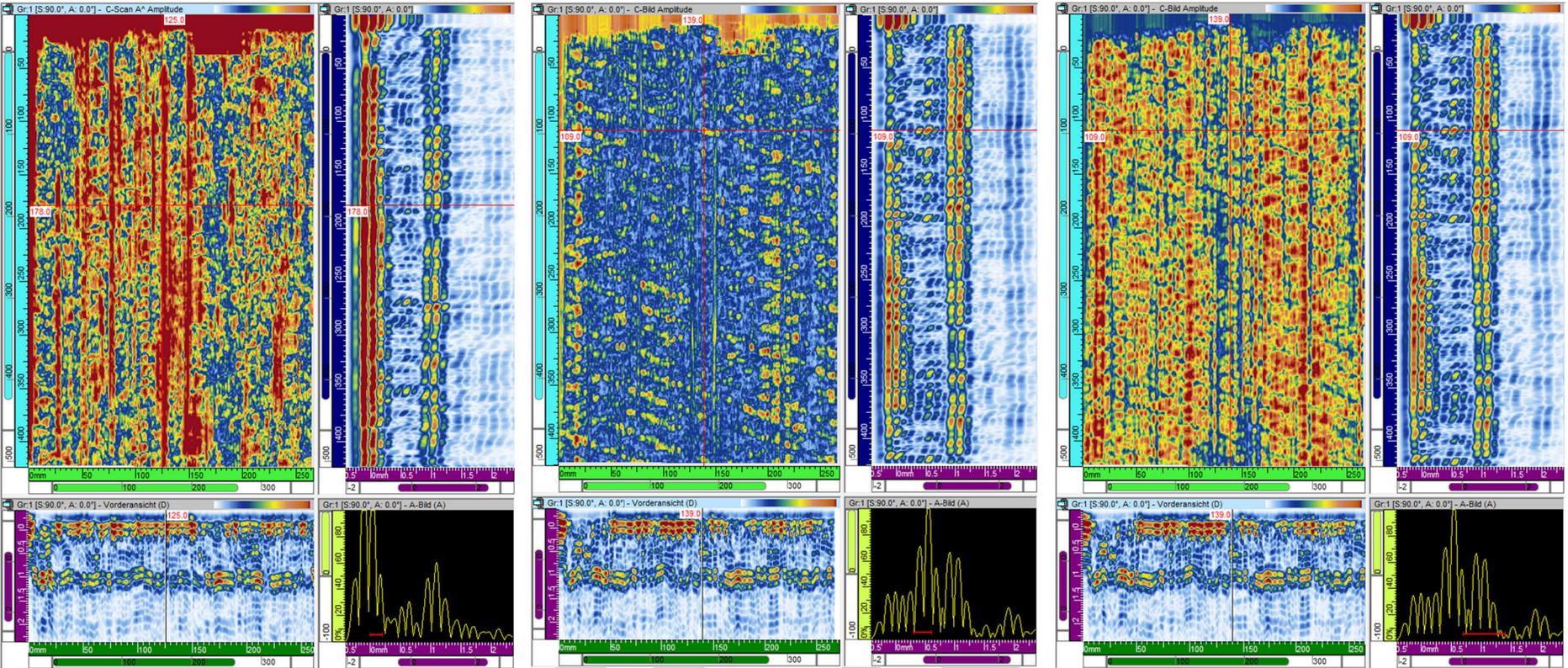
Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0



Rückwand
Blende 1.5 bis 1.7

Rückwand
Blende 1.9 bis 2.0

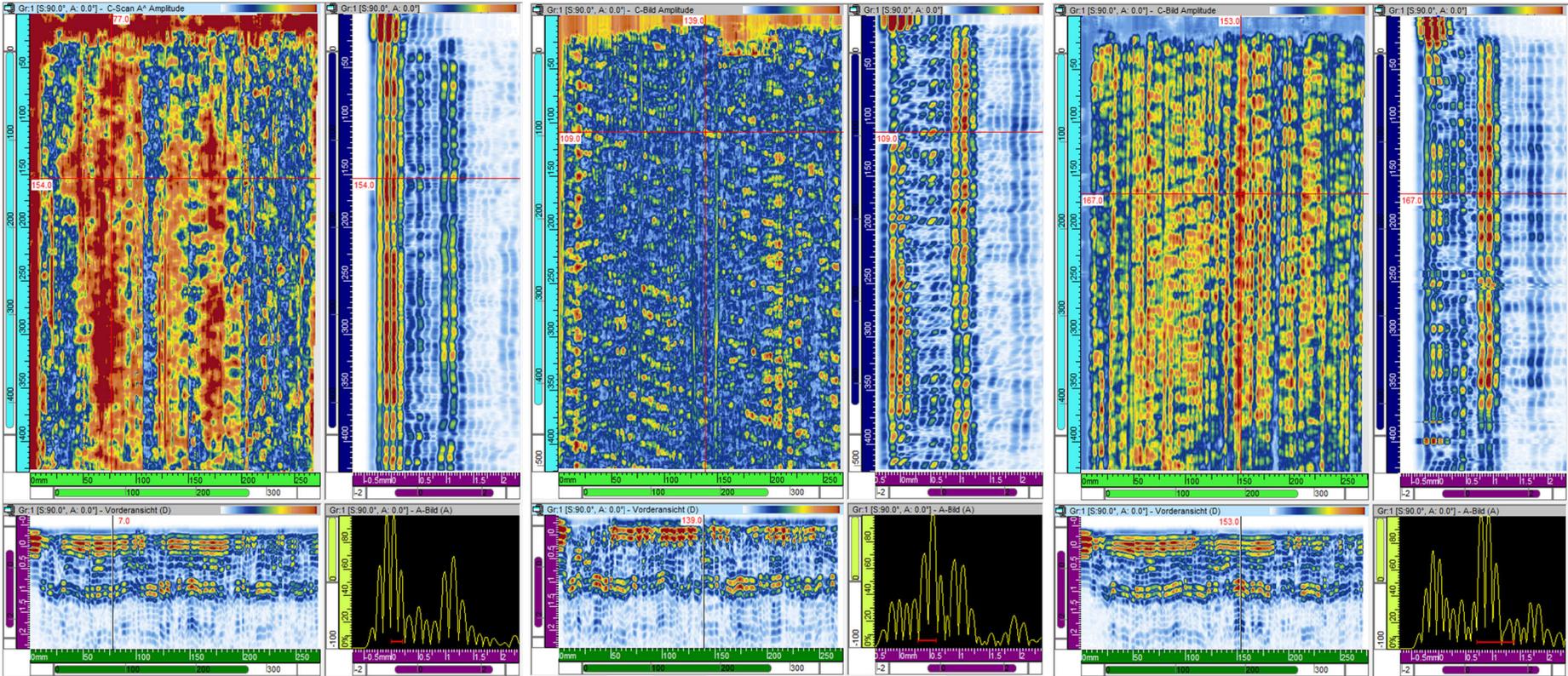
Abbildung A.7: Ultraschallbilder Platte P1



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0,3 bis 0,6
Abbildung A.8: Ultraschallbilder Platte P2P

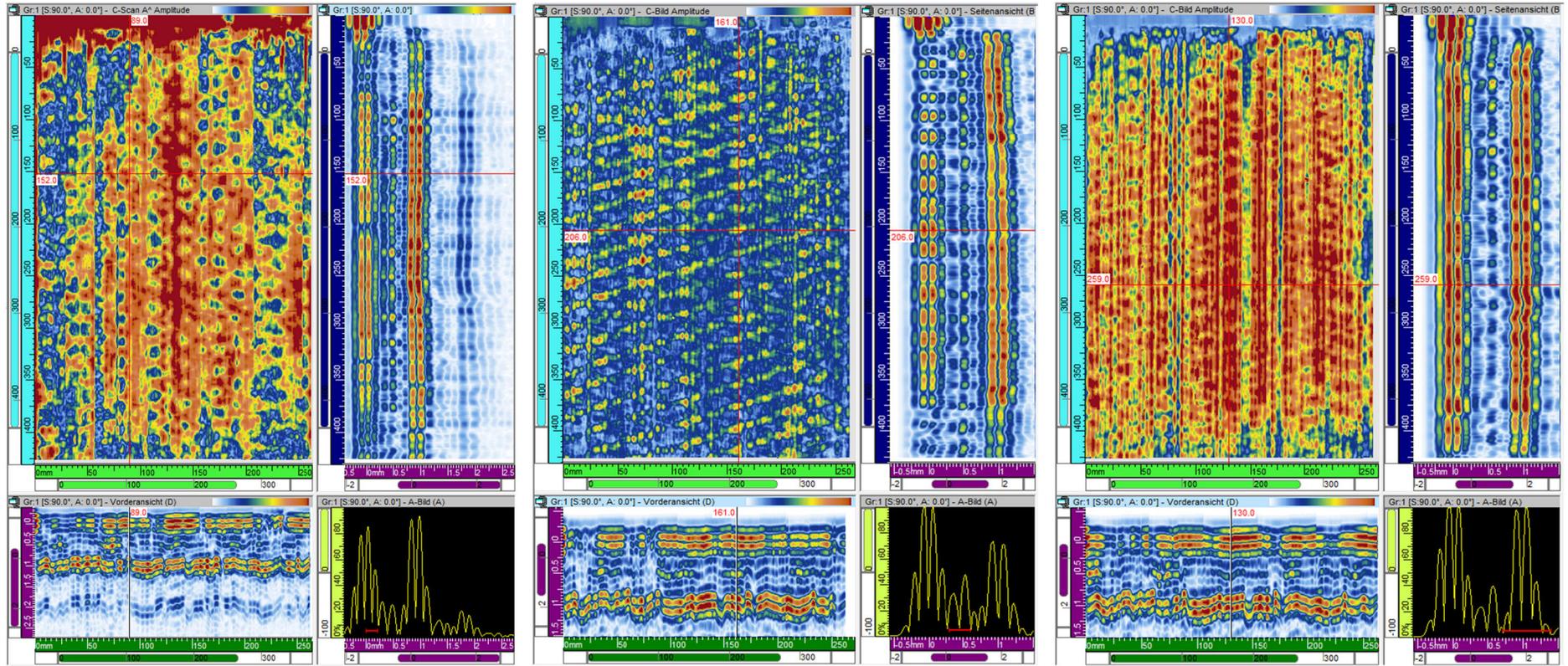
Rückwand
Blende 0,7 bis 1,4



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0,3 bis 0,6
Abbildung A.9: Ultraschallbilder Platte P2P3

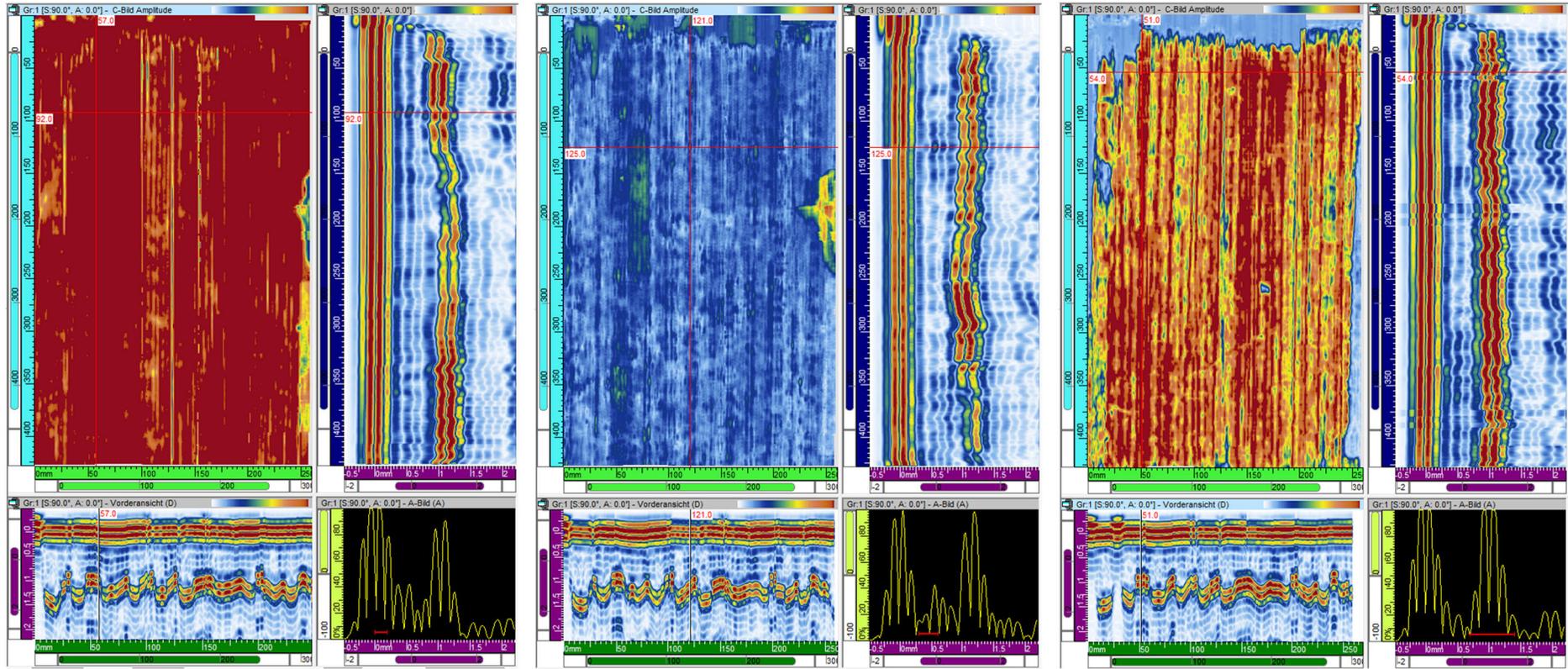
Rückwand
Blende 0,7 bis 1,4



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0,3 bis 0,6
Abbildung A.10: Ultraschallbilder Platte P1P4

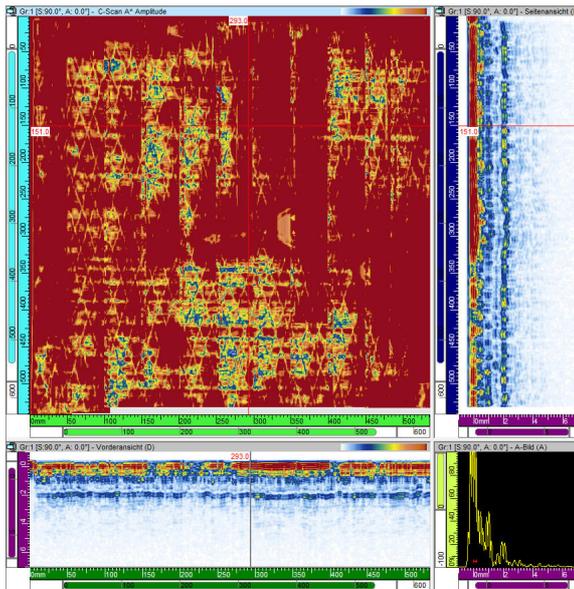
Rückwand
Blende 0,7 bis 1,4



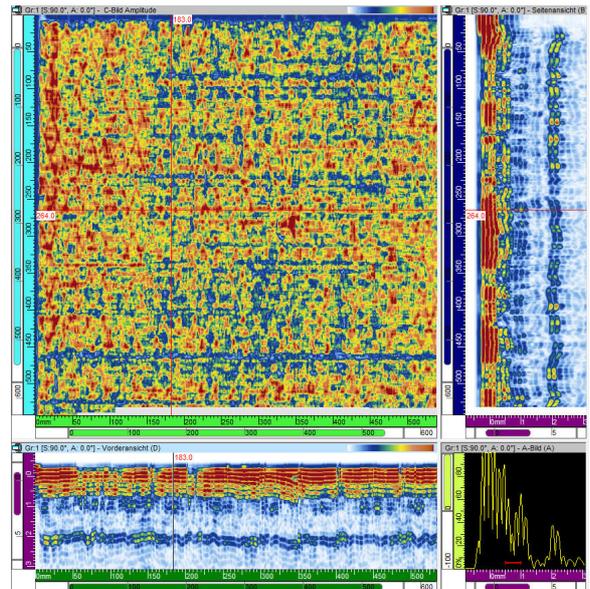
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

Poren in der Plattenmitte
Blende 0,3 bis 0,6
Abbildung A.11: Ultraschallbilder Platte P2

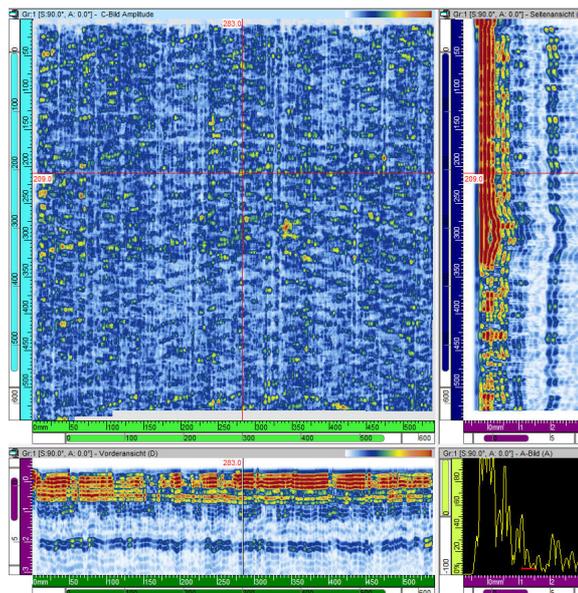
Rückwand
Blende 0,7 bis 1,4



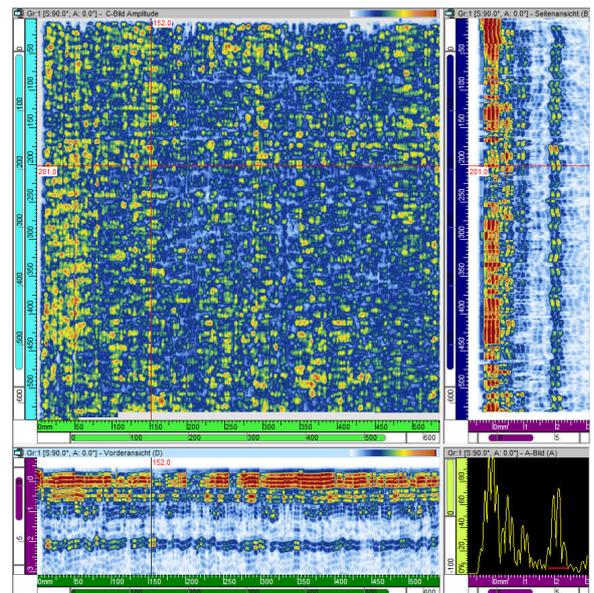
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2



Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0

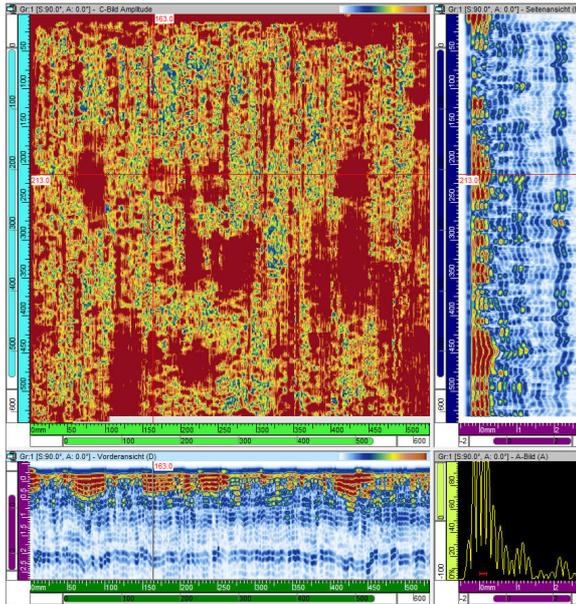


Poren in der Plattenmitte
Blende 1,1 bis 1,5

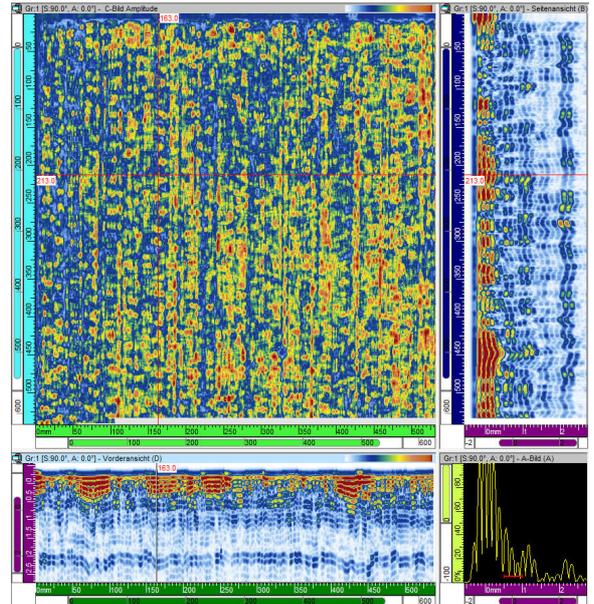


Rückwand
Blende 1,8 bis 2,4

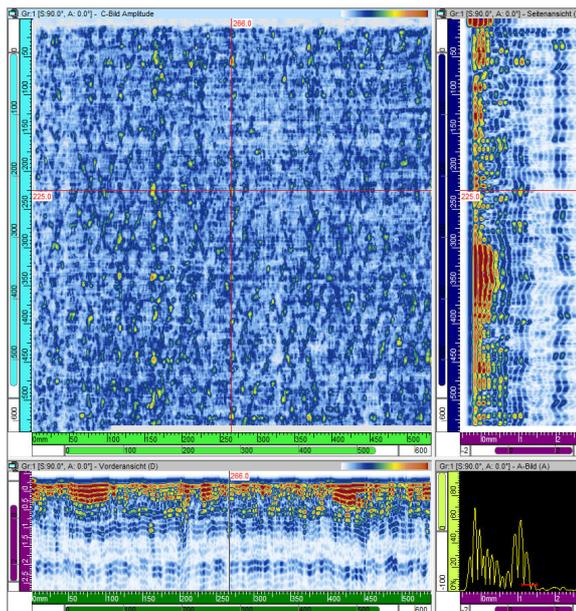
Abbildung A.12: Ultraschallbilder Platte P3P



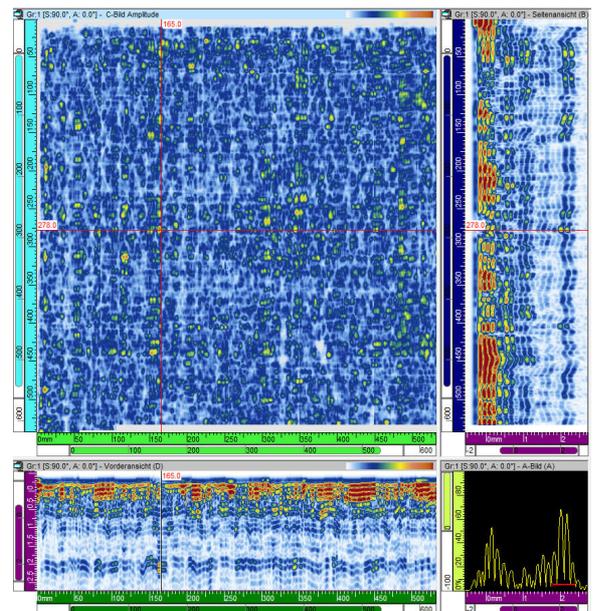
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2



Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0

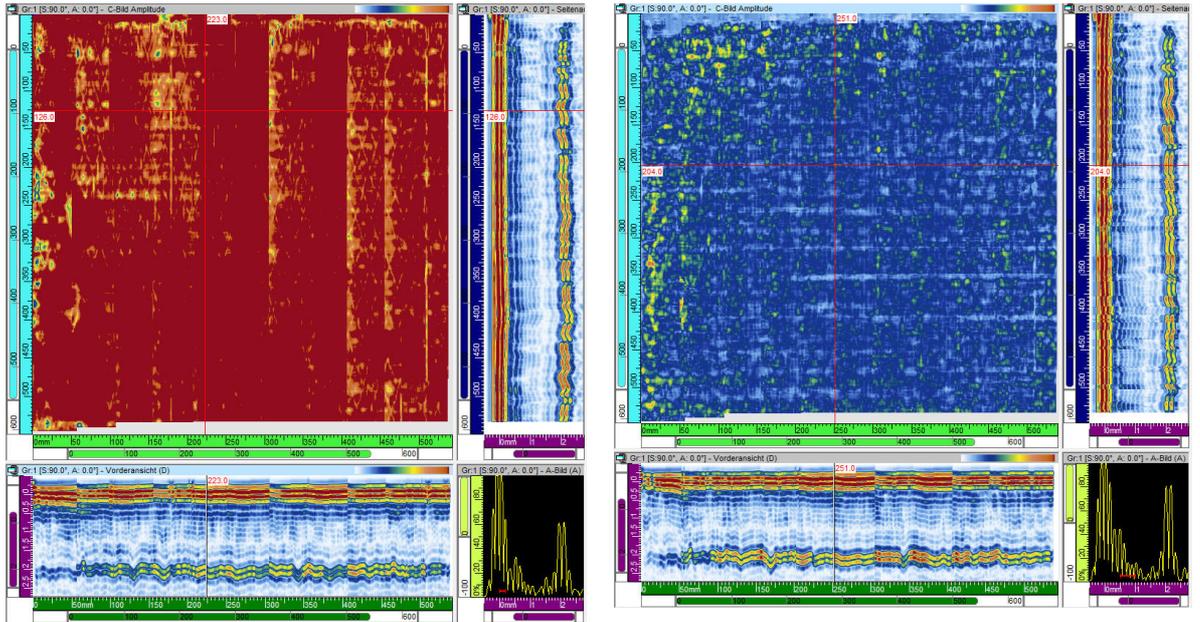


Poren in der Plattenmitte
Blende 1,1 bis 1,5



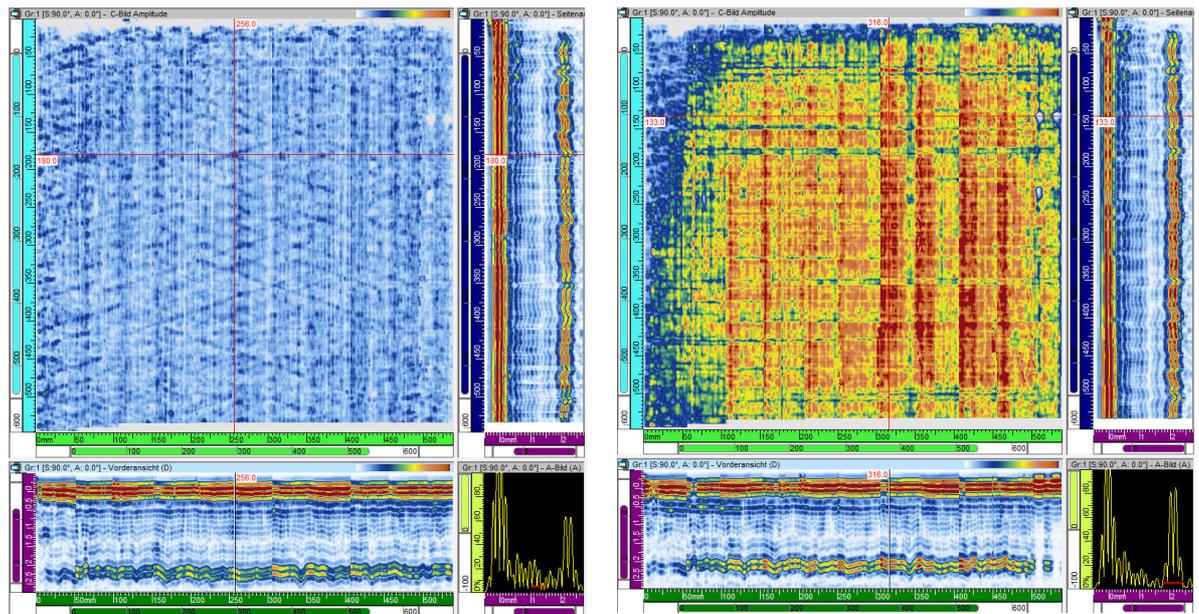
Rückwand
Blende 1,8 bis 2,4

Abbildung A.13: Ultraschallbilder Platte P3P2



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

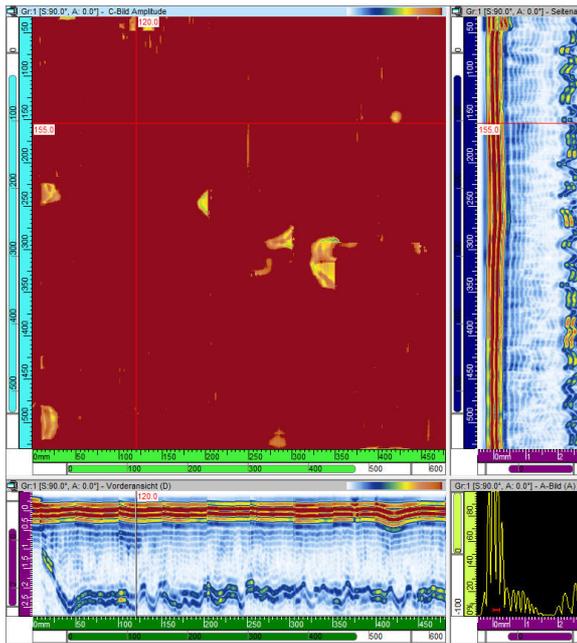
Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0



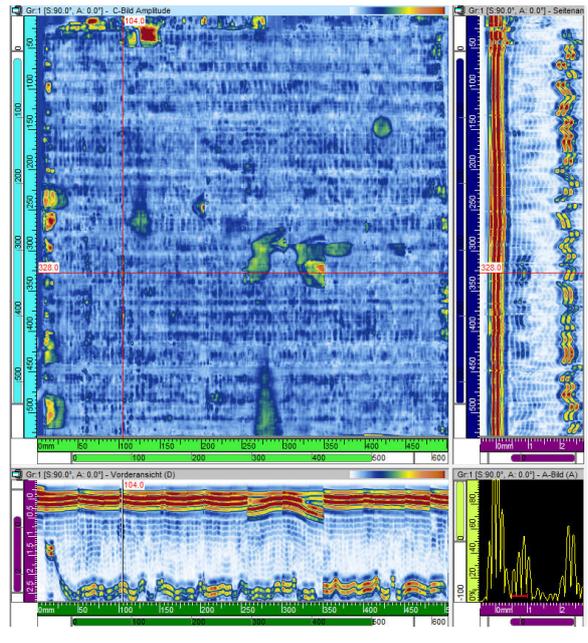
Poren in der Plattenmitte
Blende 1,1 bis 1,5

Rückwand
Blende 1,8 bis 2,4

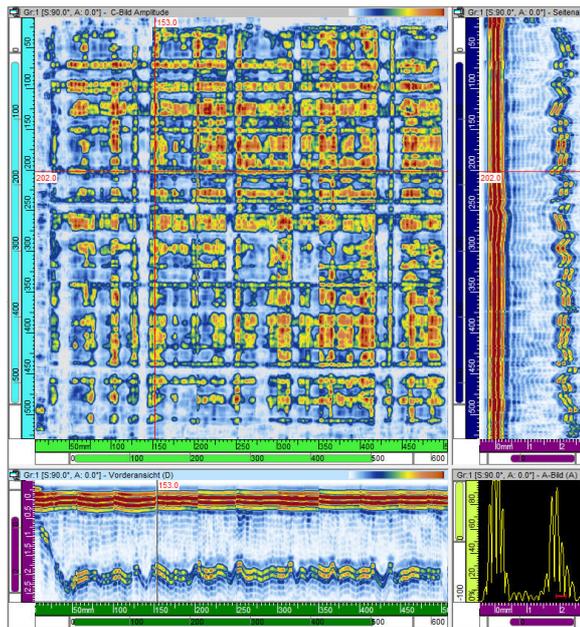
Abbildung A.14: Ultraschallbilder Platte P3P4



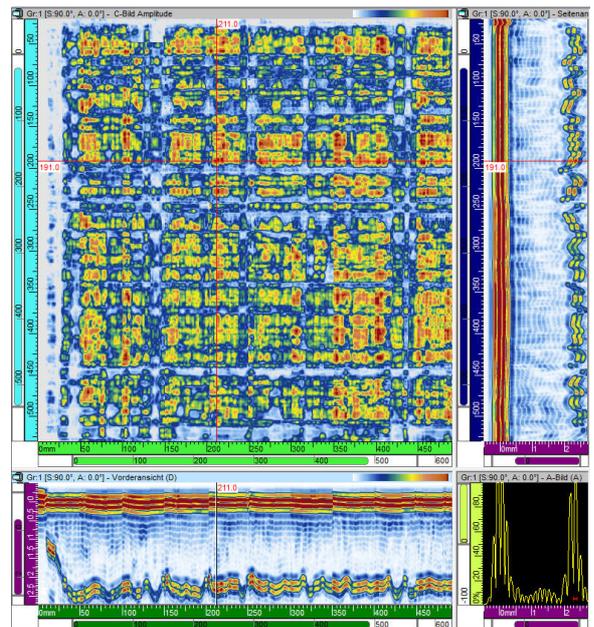
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2



Poren in der Plattenmitte
Blende 0,5 bis 1,0

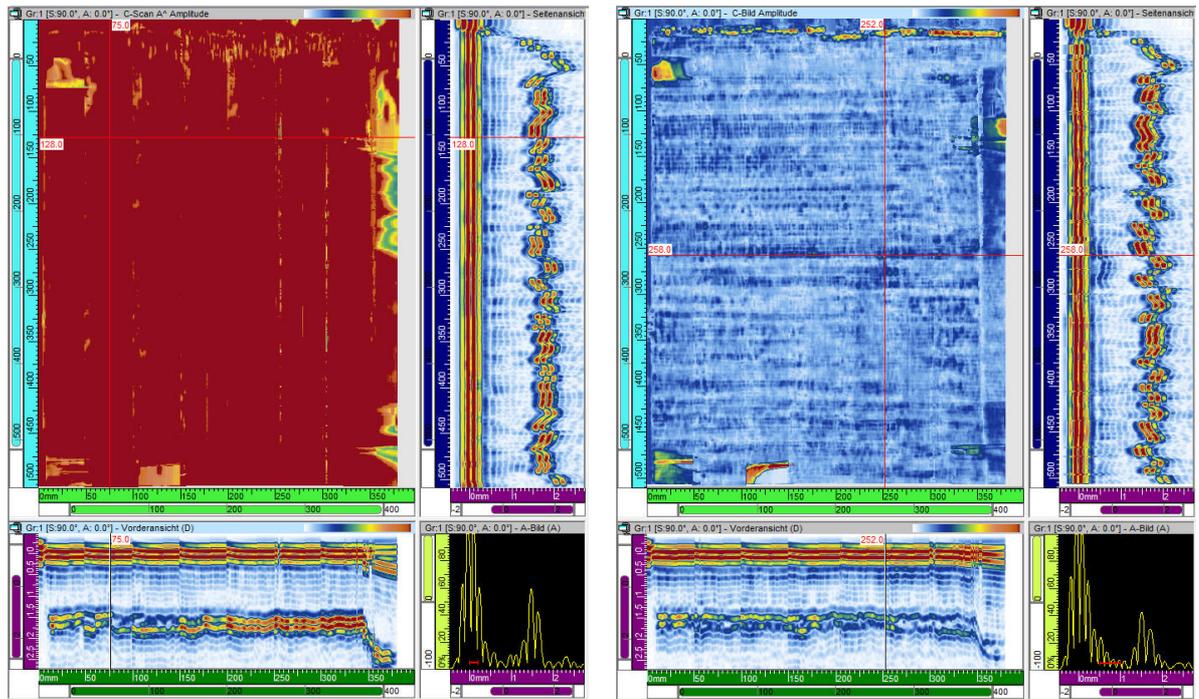


Rückwand
Blende 1,9 bis 2,2



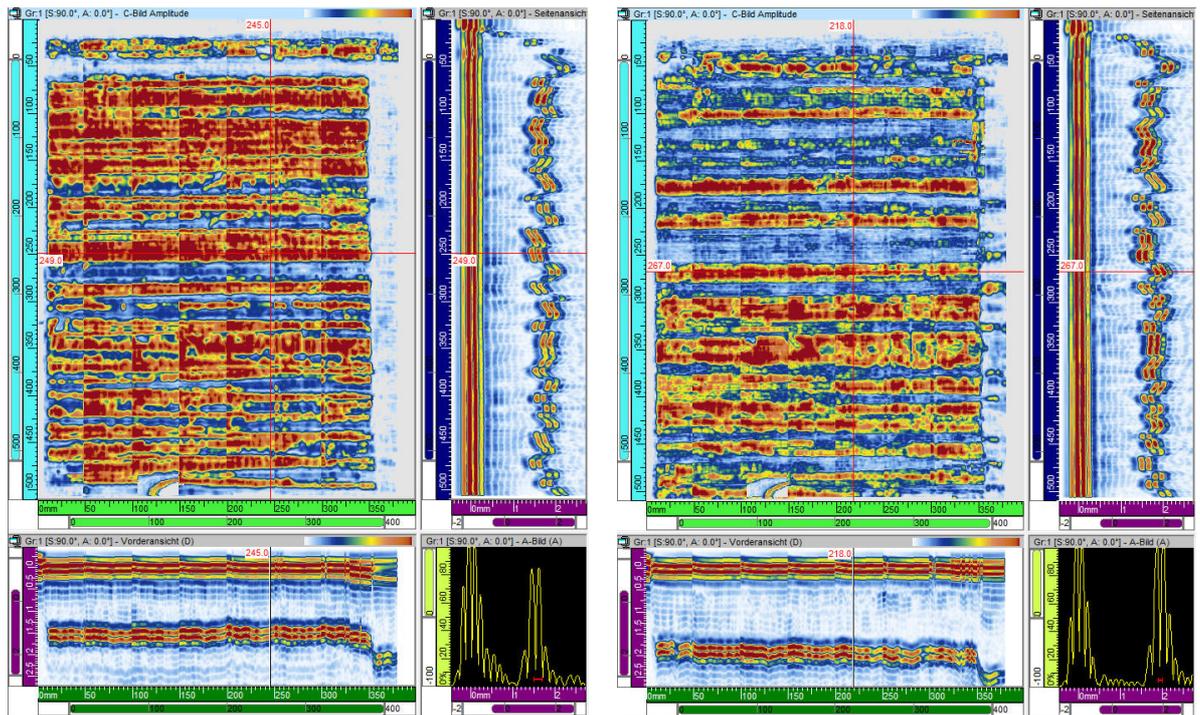
Rückwand
Blende 2,2 bis 2,3

Abbildung A.15: Ultraschallbilder Platte P3



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

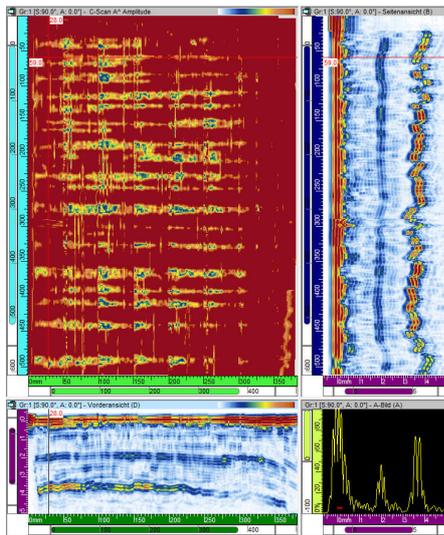
Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0



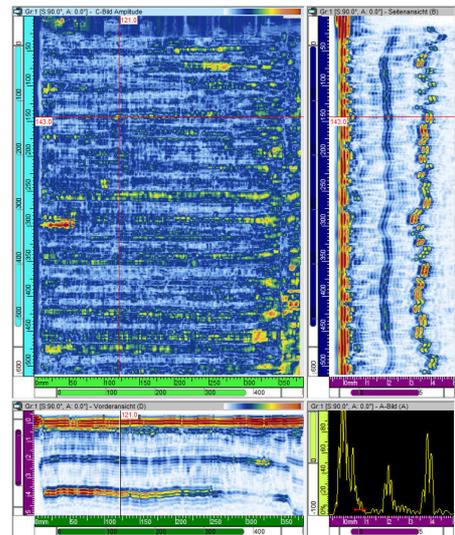
Rückwand
Blende 1.5 bis 1.7

Rückwand
Blende 1.9 bis 2.0

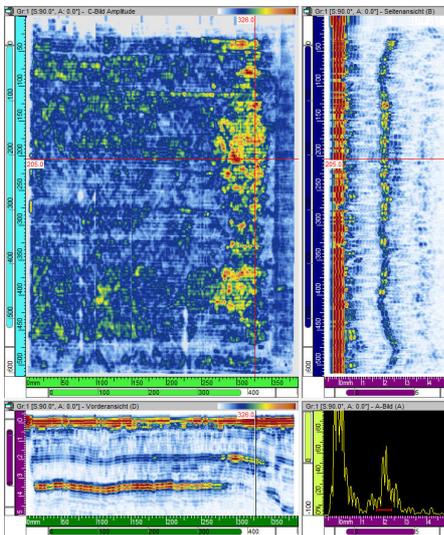
Abbildung A.16: Ultraschallbilder Platte P4



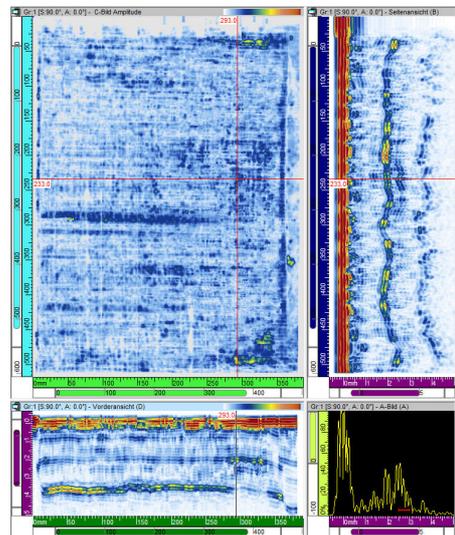
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2



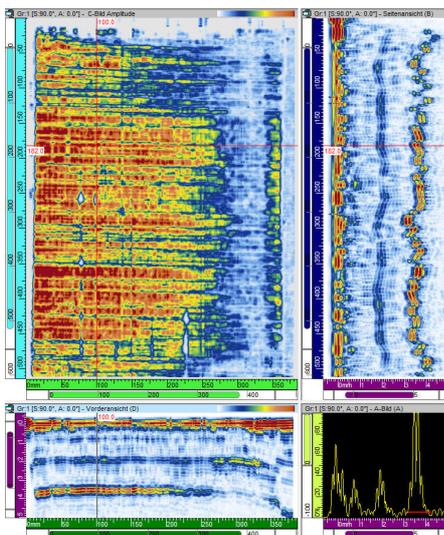
Poren in der Plattenmitte
Blende 0,5 bis 1,0



Poren in der Plattenmitte
Blende 1,7 bis 2,4

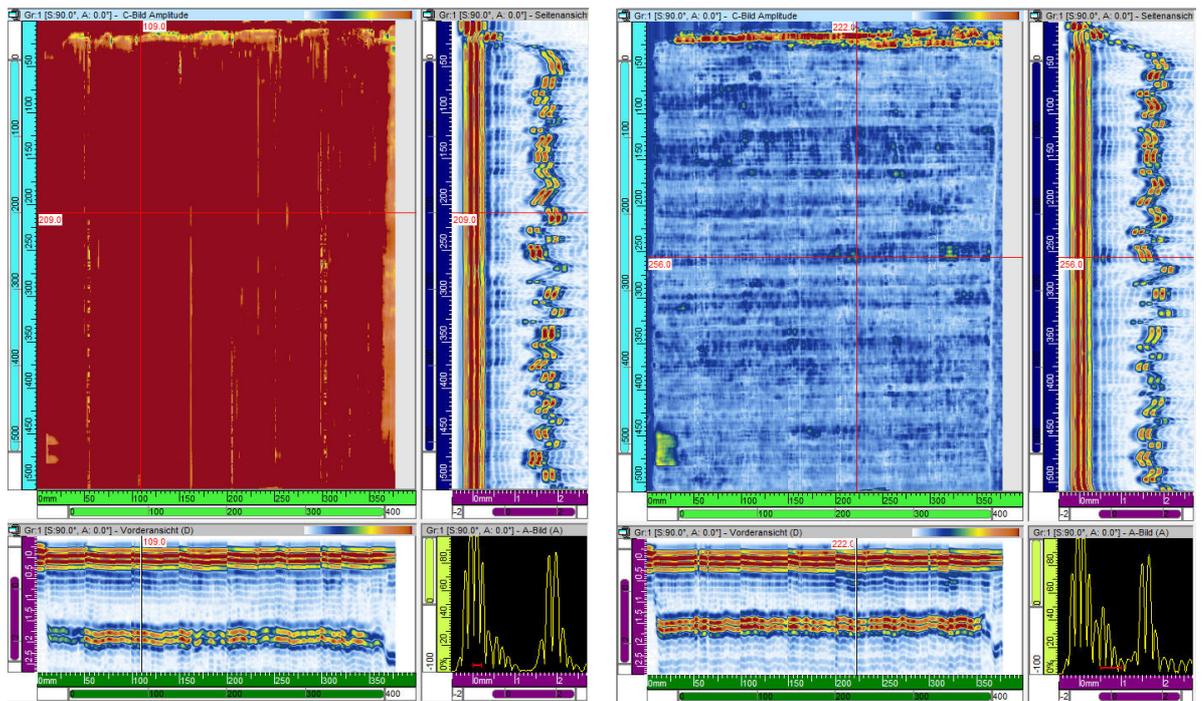


Poren in der Plattenmitte
Blende 2,5 bis 3,0



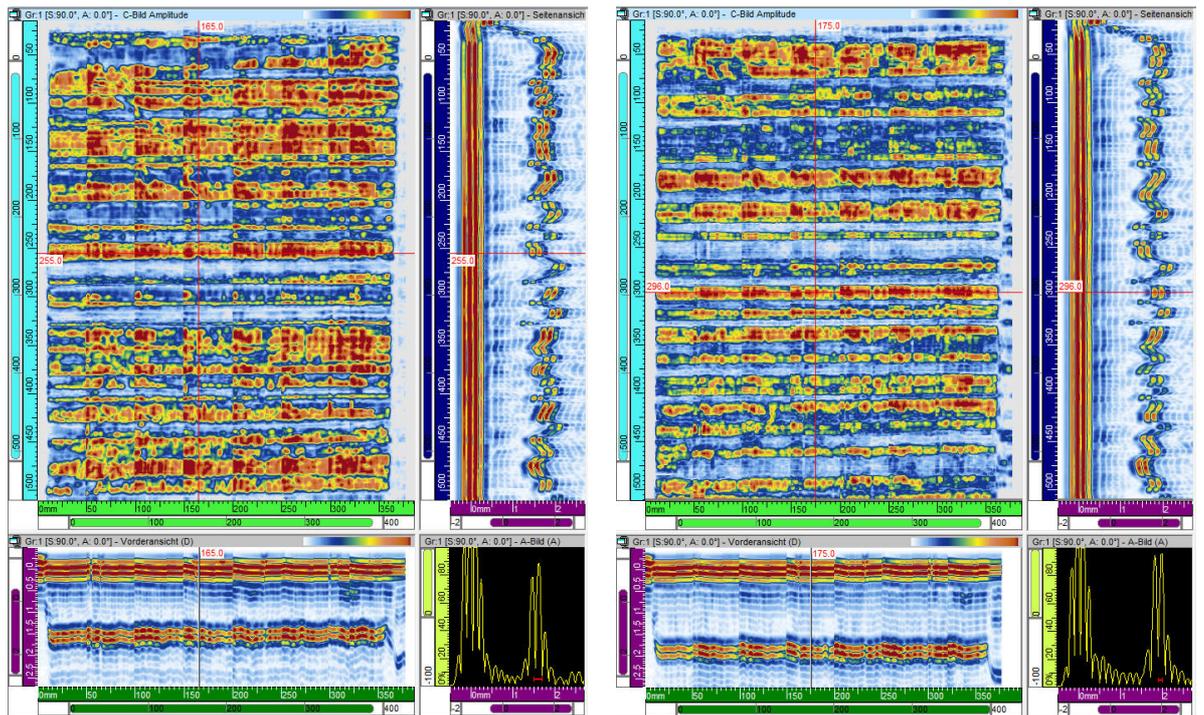
Rückwand
Blende 3,2 bis 4,2

Abbildung A.17: Ultraschallbilder Platte P4A



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

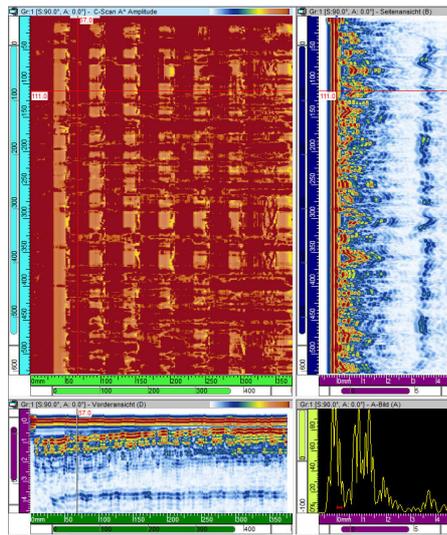
Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0



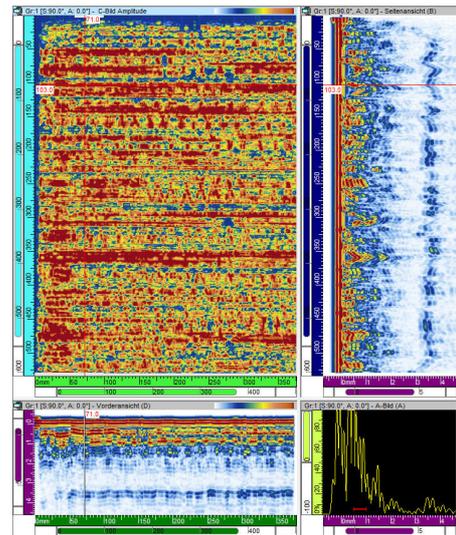
Rückwand
Blende 1.5 bis 1.7

Rückwand
Blende 1.9 bis 2.0

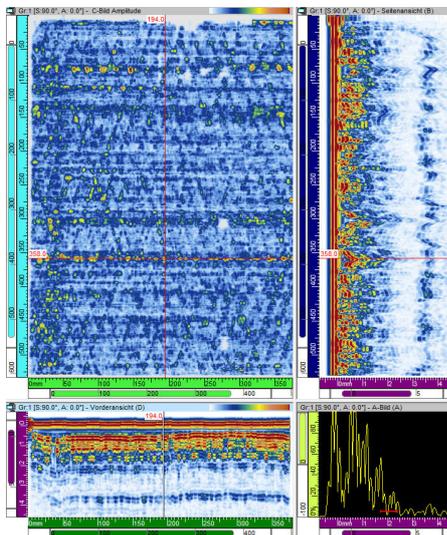
Abbildung A.18: Ultraschallbilder Platte P5



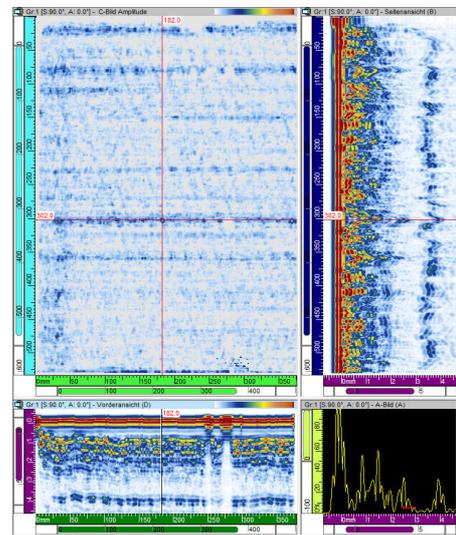
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2



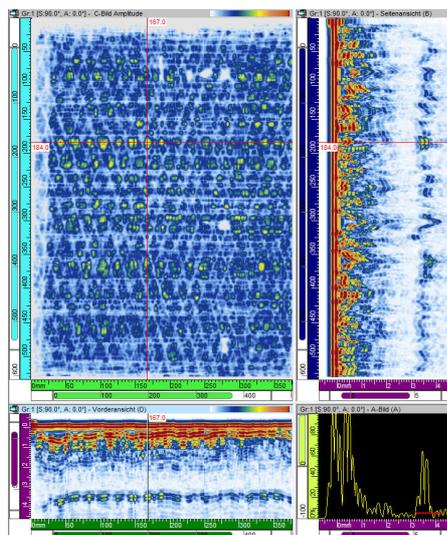
Poren in der Plattenmitte
Blende 0,5 bis 1,0



Poren in der Plattenmitte
Blende 1,7 bis 2,4

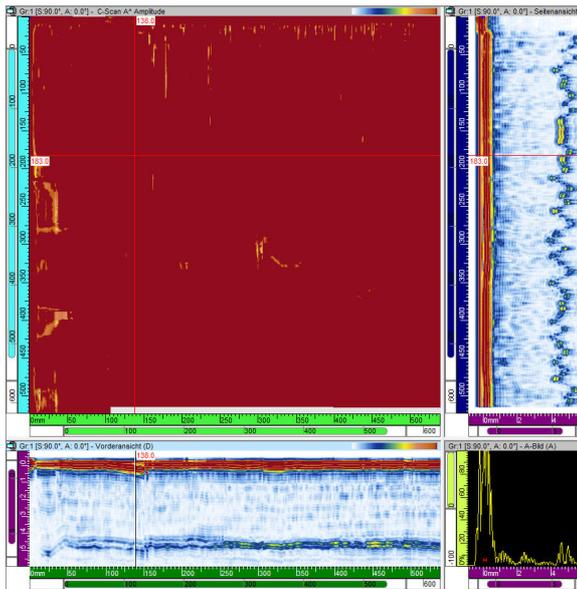


Poren in der Plattenmitte
Blende 2,5 bis 3,0

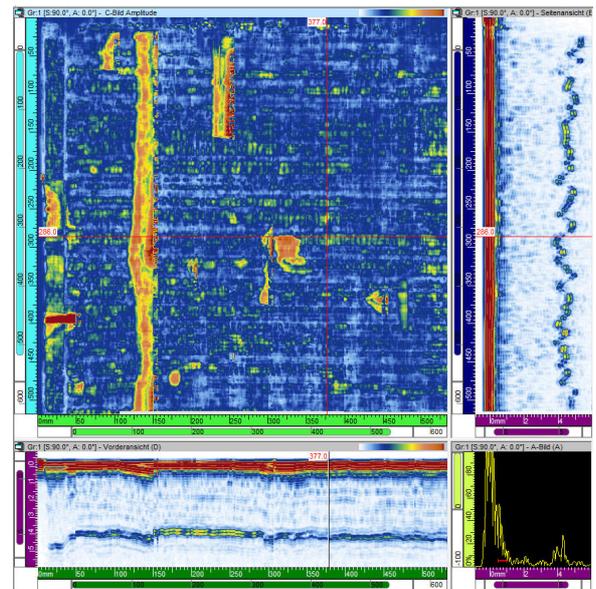


Rückwand
Blende 3,2 bis 4,2

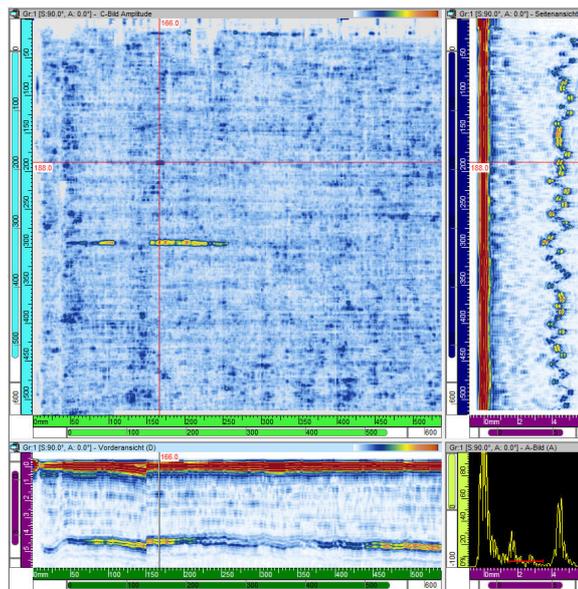
Abbildung A.19: Ultraschallbilder Platte P5A



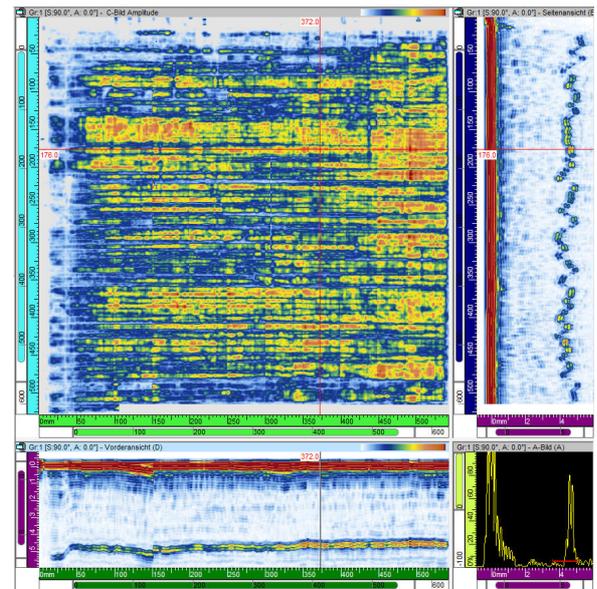
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2



Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0

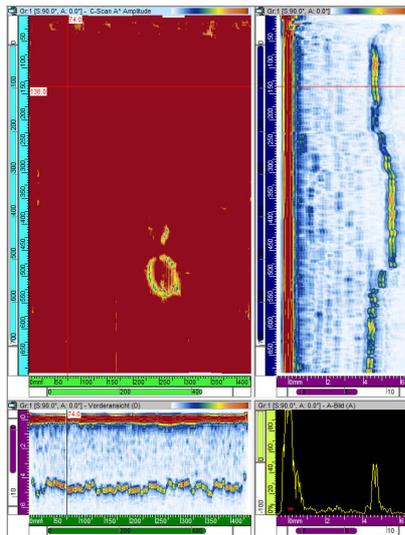


Poren in der Plattenmitte
Blende 1,5 bis 3,5

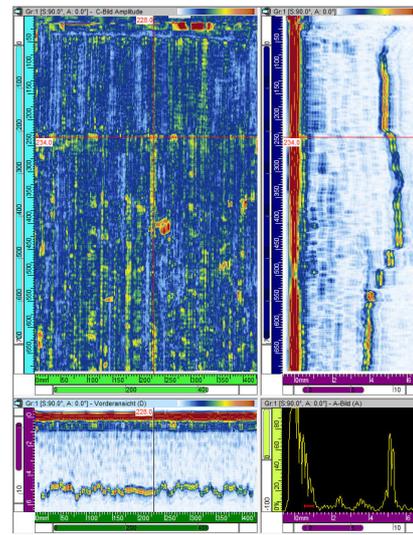


Rückwand
Blende 3,6 bis 5,0

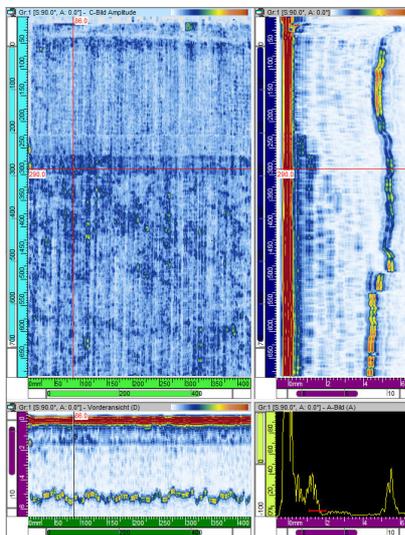
Abbildung A.20: Ultraschallbilder Platte P6



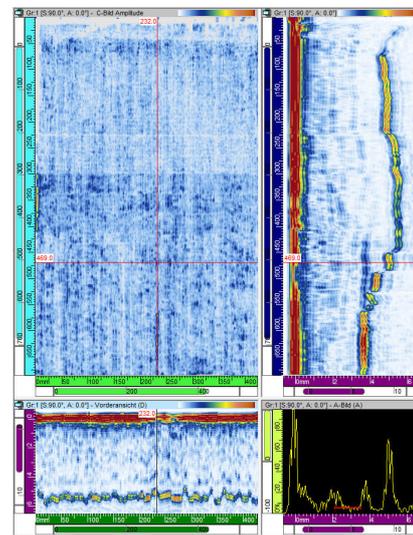
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2



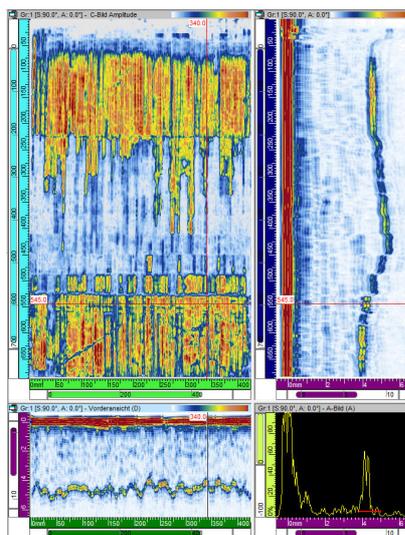
Poren in der Plattenmitte
Blende 0,5 bis 1,0



Poren in der Plattenmitte
Blende 1,1 bis 2,0

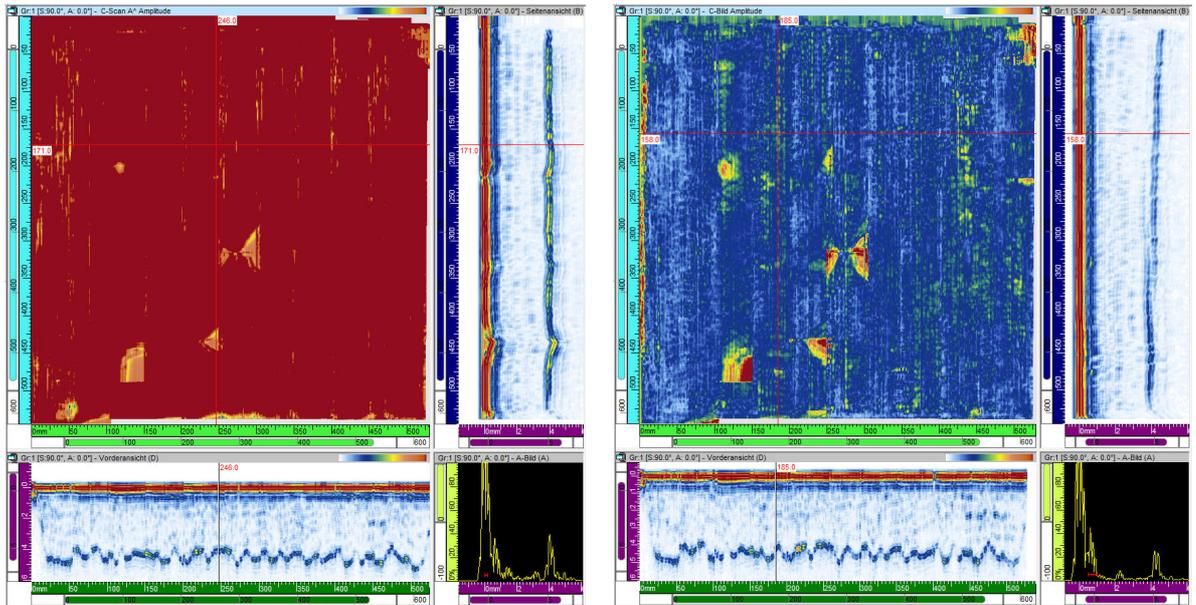


Poren in der Plattenmitte
Blende 2,1 bis 3,5



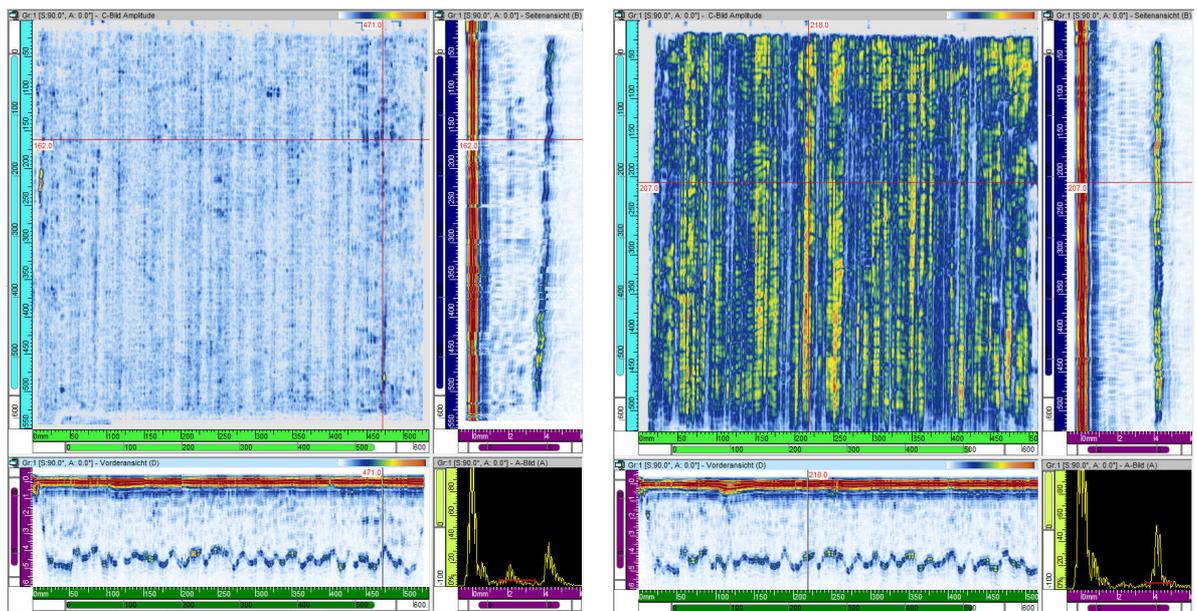
Rückwand
Blende 3,8 bis 5,0

Abbildung A.21: Ultraschallbilder Platte P6A



Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2

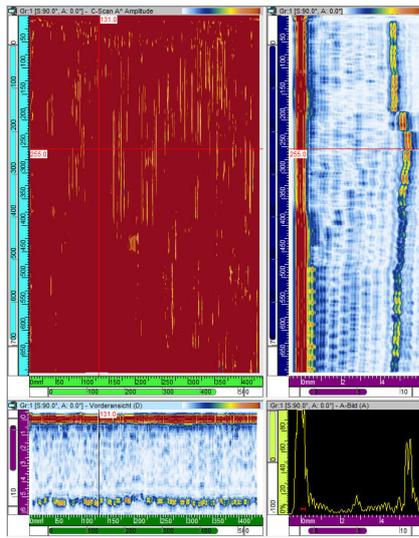
Poren in der Plattenmitte
Blende 0.5 bis 1.0



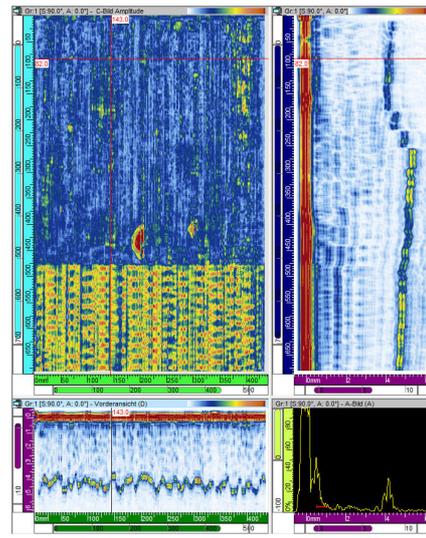
Poren in der Plattenmitte
Blende 1,5 bis 3,5

Rückwand
Blende 3,6 bis 5,0

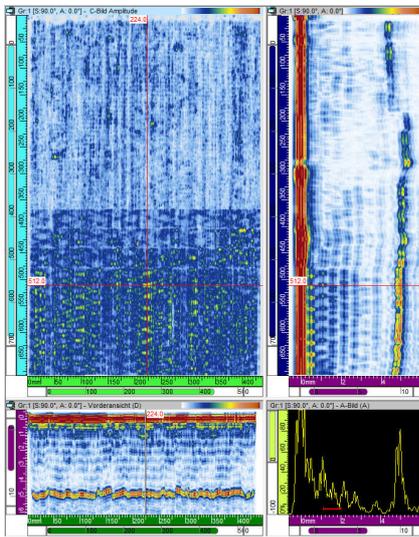
Abbildung A.22: Ultraschallbilder Platte P7



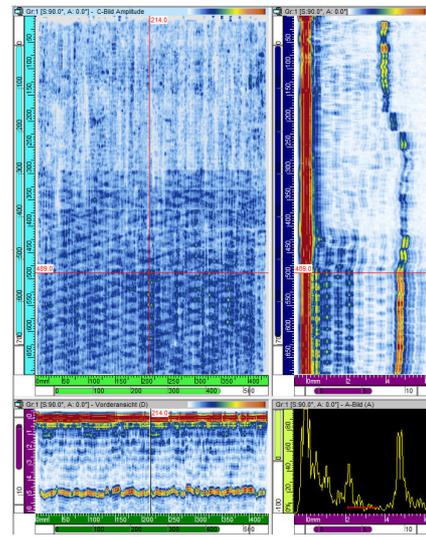
Einkopplung
Blende 0,0 bis 0,2



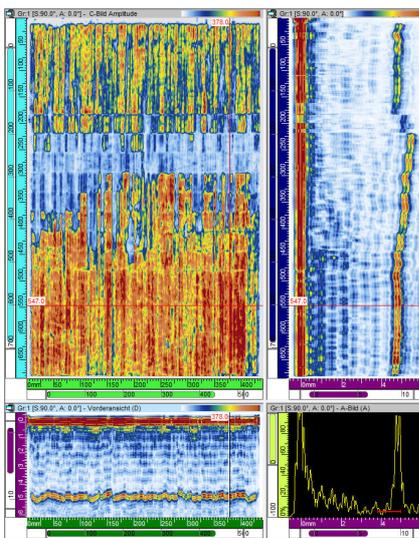
Poren in der Plattenmitte
Blende 0,5 bis 1,0



Poren in der Plattenmitte
Blende 1,1 bis 2,0



Poren in der Plattenmitte
Blende 2,1 bis 3,5



Rückwand
Blende 3,8 bis 5,0

Abbildung A.23: Ultraschallbilder Platte P7A

B Größenmessung der Zugversuch-Proben

Tabelle B.1: Probenmaße der Platte P1P

Probe	Breite / mm					Dicke / mm									Breite / mm			Dicke / mm		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	mittlere	min	max	mittlere	min	max
PIP_1	24,97	24,97	24,95	24,96	24,93	1,62	1,60	1,57	1,59	1,61	1,72	1,63	1,62	1,66	24,96	24,93	24,97	1,62	1,57	1,72
PIP_2	24,96	24,95	24,95	24,94	24,96	1,62	1,61	1,58	1,68	1,66	1,64	1,68	1,64	1,67	24,95	24,94	24,96	1,64	1,58	1,68
PIP_3	25,00	24,98	24,98	24,97	24,95	1,60	1,61	1,58	1,67	1,60	1,66	1,69	1,63	1,65	24,98	24,95	25,00	1,63	1,58	1,69
PIP_4	24,98	24,99	24,99	24,99	25,00	1,61	1,64	1,59	1,63	1,59	1,69	1,69	1,64	1,69	24,99	24,98	25,00	1,64	1,59	1,69
PIP_5	25,00	24,97	24,96	24,98	24,97	1,63	1,67	1,62	1,66	1,60	1,69	1,67	1,64	1,66	24,98	24,96	25,00	1,65	1,60	1,69
PIP_6	24,97	24,98	24,97	24,99	24,99	1,68	1,61	1,57	1,66	1,65	1,69	1,70	1,68	1,64	24,98	24,97	24,99	1,65	1,57	1,70
PIP_7	25,05	25,01	24,99	24,99	24,98	1,64	1,68	1,65	1,64	1,61	1,68	1,66	1,60	1,67	25,00	24,98	25,05	1,65	1,60	1,68
PIP_8	24,99	24,98	24,98	24,97	24,97	1,58	1,67	1,63	1,58	1,64	1,73	1,67	1,66	1,67	24,98	24,97	24,99	1,65	1,58	1,73
PIP_9	24,98	25,00	25,00	25,01	25,01	1,58	1,70	1,65	1,55	1,62	1,73	1,71	1,64	1,68	25,00	24,98	25,01	1,65	1,55	1,73
Anzahl Proben															9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Mittelwert															24,98	24,96	25,00	1,64	1,58	1,70
Standardabweichung															0,018	0,019	0,025	0,009	0,016	0,020
Variationskoeffizient / %															0,070	0,074	0,102	0,576	1,00	1,19
Min															24,95	24,93	24,96	1,62	1,55	1,68
Max															25,00	24,98	25,05	1,65	1,60	1,73

Tabelle B.2: Probenmaße der Platte P1P4

Probe	Breite / mm					Dicke / mm									Breite / mm			Dicke / mm		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P1P4_1	24,93	24,92	24,94	24,96	24,96	1,64	1,71	1,65	1,68	1,73	1,66	1,69	1,74	1,62	24,94	24,92	24,96	1,68	1,62	1,74
P1P4_2	24,97	24,95	24,96	24,94	24,94	1,60	1,72	1,68	1,74	1,65	1,68	1,66	1,76	1,64	24,95	24,94	24,97	1,68	1,60	1,76
P1P4_3	25,01	24,99	24,97	24,97	24,96	1,72	1,70	1,66	1,76	1,67	1,75	1,65	1,71	1,72	24,98	24,96	25,01	1,70	1,65	1,76
P1P4_4	24,97	24,95	24,93	24,95	24,94	1,75	1,67	1,66	1,71	1,73	1,78	1,61	1,71	1,74	24,95	24,93	24,97	1,71	1,61	1,78
P1P4_5	24,96	24,97	24,97	24,95	24,96	1,76	1,71	1,69	1,71	1,72	1,78	1,66	1,72	1,76	24,96	24,95	24,97	1,72	1,66	1,78
P1P4_6	24,96	24,97	24,98	24,96	24,97	1,81	1,67	1,69	1,75	1,73	1,77	1,64	1,73	1,75	24,97	24,96	24,98	1,73	1,64	1,81
P1P4_7	24,95	24,94	24,94	24,96	24,96	1,82	1,69	1,67	1,77	1,71	1,77	1,65	1,71	1,76	24,95	24,94	24,96	1,73	1,65	1,82
P1P4_8	24,90	24,93	24,98	24,95	24,93	1,83	1,70	1,64	1,69	1,66	1,73	1,62	1,70	1,75	24,94	24,90	24,98	1,70	1,62	1,83
P1P4_9	24,91	24,89	24,87	24,85	24,82	1,78	1,65	1,65	1,76	1,69	1,73	1,68	1,66	1,77	24,87	24,82	24,91	1,71	1,65	1,78
Anzahl Proben															9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Mittelwert															24,95	24,92	24,97	1,71	1,63	1,78
Standardabweichung															0,032	0,044	0,026	0,018	0,021	0,030
Variationskoeffizient / %															0,128	0,175	0,106	1,039	1,30	1,68
Min															24,87	24,82	24,91	1,68	1,60	1,74
Max															24,98	24,96	25,01	1,73	1,66	1,83

Tabelle B.3: Probenmaße der Platte P1

Probe	Breite / mm					Dicke / mm									Breite / mm			Dicke / mm			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	mittlere	min	max	mittlere	min	max	min
P1_1	24,98	24,96	24,97	24,95	24,95	2,14	2,17	2,02	1,83	2,06	1,55	1,73	2,40	1,99	24,96	24,95	24,98	1,99	1,55	2,40	1,40
P1_2	24,99	24,97	24,98	24,96	24,96	2,22	2,16	2,00	1,94	2,03	1,50	1,66	2,33	2,02	24,97	24,96	24,99	1,98	1,50	2,33	1,37
P1_3	24,97	24,97	24,97	24,96	24,97	2,15	2,13	1,98	1,42	2,33	1,61	1,82	2,46	2,11	24,97	24,96	24,97	2,00	1,42	2,46	1,34
P1_4	25,00	24,97	24,98	25,00	24,99	2,01	1,97	1,92	1,79	2,15	1,55	1,72	2,51	2,12	24,99	24,97	25,00	1,97	1,55	2,51	1,30
P1_5	24,97	24,97	24,98	24,98	24,98	2,04	1,98	1,94	1,64	2,23	1,51	1,63	2,47	2,11	24,98	24,97	24,98	1,95	1,51	2,47	1,34
P1_6	25,00	24,97	24,98	24,98	24,99	2,04	2,09	1,90	1,64	2,18	1,59	1,79	2,39	2,09	24,98	24,97	25,00	1,97	1,59	2,39	1,35
P1_7	24,98	24,97	24,98	25,00	24,99	2,02	2,00	1,98	1,62	2,02	1,64	1,75	2,48	2,14	24,98	24,97	25,00	1,96	1,62	2,48	1,34
P1_8	24,99	24,97	24,98	24,99	24,96	1,97	2,01	1,99	1,63	2,25	1,61	1,74	2,47	2,08	24,98	24,96	24,99	1,97	1,61	2,47	1,43
P1_9	24,98	24,96	24,96	24,97	24,96	1,89	2,12	1,85	1,82	2,18	1,65	1,81	2,38	2,10	24,97	24,96	24,98	1,98	1,65	2,38	1,43
Anzahl Proben															9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Mittelwert															24,98	24,96	24,99	1,97	1,56	2,43	1,37
Standardabweichung															0,009	0,007	0,011	0,015	0,071	0,059	0,045
Variationskoeffizient / %															0,036	0,028	0,044	0,767	4,59	2,43	3,27
Min															24,96	24,95	24,97	1,95	1,42	2,33	1,30
Max															24,99	24,97	25,00	2,00	1,65	2,51	1,43

Tabelle B.4: Probenmaße der Platte P2P

Probe	Breite / mm					Dicke / mm								Breite / mm			Dicke / mm		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P2P_1	9,98	9,99	9,98	9,99	9,99	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,09	1,15	1,13	9,99	9,98	9,99	1,09	1,04	1,15
P2P_2	10,02	10,00	10,01	10,00	10,00	1,04	1,09	1,04	1,08	1,12	1,13	1,12	1,17	10,01	10,00	10,02	1,10	1,04	1,17
P2P_3	9,94	9,97	9,98	9,99	9,98	1,14	1,15	1,14	1,10	1,10	1,09	1,15	1,10	9,97	9,94	9,99	1,12	1,09	1,15
P2P_4	10,00	10,00	9,99	10,00	10,00	1,12	1,14	1,12	1,14	1,15	1,16	1,25	1,21	10,00	9,99	10,00	1,16	1,12	1,25
P2P_5	10,01	10,02	10,01	10,02	10,00	1,21	1,24	1,23	1,08	1,06	1,11	1,15	1,11	10,01	10,00	10,02	1,15	1,06	1,24
P2P_6	9,99	10,00	10,00	9,99	9,97	1,14	1,10	1,08	1,17	1,20	1,19	1,12	1,08	9,99	9,97	10,00	1,14	1,08	1,20
P2P_7	9,98	10,00	10,00	9,99	9,99	1,08	1,09	1,11	1,19	1,21	1,17	1,07	1,03	9,99	9,98	10,00	1,12	1,03	1,21
P2P_8	9,99	9,99	10,00	9,99	9,99	1,17	1,17	1,15	1,07	1,03	1,02	1,16	1,17	9,99	9,99	10,00	1,12	1,02	1,17
P2P_9	9,96	9,96	9,97	9,96	9,97	0,98	1,04	1,06	1,06	1,05	1,03	1,00	1,00	9,96	9,96	9,97	1,03	0,98	1,06
P2P_10	9,99	9,97	9,99	9,99	9,99	1,12	1,14	1,10	1,06	1,11	1,09	1,14	1,12	9,99	9,97	9,99	1,11	1,06	1,14
P2P_11	9,96	9,96	9,96	9,94	9,94	1,13	1,15	1,13	1,13	1,13	1,11	1,16	1,17	9,95	9,94	9,96	1,14	1,11	1,17
P2P_12	10,00	9,99	10,00	9,99	10,00	1,09	1,10	1,07	1,17	1,17	1,18	1,16	1,16	10,00	9,99	10,00	1,14	1,07	1,18
Anzahl Proben														12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Mittelwert														9,99	9,98	10,00	1,12	1,06	1,17
Standardabweichung														0,017	0,021	0,017	0,035	0,040	0,050
Variationskoeffizient / %														0,17	0,21	0,17	3,10	3,73	4,26
Min														9,95	9,94	9,96	1,03	0,98	1,06
Max														10,01	10,00	10,02	1,16	1,12	1,25

Tabelle B.5: Probenmaße der Platte P2P4

Probe	Breite / mm					Dicke / mm								Breite / mm			Dicke / mm		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P2P4_1	9,96	9,96	9,95	9,95	9,95	1,18	1,17	1,14	1,16	1,12	1,12	1,03	1,07	9,95	9,95	9,96	1,12	1,03	1,18
P2P4_2	9,96	9,97	9,96	9,98	9,97	1,23	1,21	1,24	1,22	1,22	1,22	1,22	1,24	9,97	9,96	9,98	1,23	1,21	1,24
P2P4_3	9,97	9,96	9,96	9,97	9,97	1,22	1,15	1,17	1,04	1,08	1,08	1,11	1,09	9,97	9,96	9,97	1,12	1,04	1,22
P2P4_4	9,97	9,98	9,96	9,97	9,97	1,18	1,15	1,14	1,13	1,12	1,10	1,09	1,05	9,97	9,96	9,98	1,12	1,05	1,18
P2P4_5	9,98	9,97	9,97	9,96	9,96	1,08	1,09	1,04	1,19	1,18	1,18	1,06	1,09	9,97	9,96	9,98	1,11	1,04	1,19
P2P4_6	9,96	9,96	9,98	9,98	9,99	1,24	1,19	1,23	1,14	1,14	1,13	1,11	1,10	9,97	9,96	9,99	1,16	1,10	1,24
P2P4_7	9,97	9,97	9,98	9,99	9,98	1,12	1,15	1,14	1,02	1,01	1,03	1,10	1,12	9,98	9,97	9,99	1,09	1,01	1,15
P2P4_8	9,95	9,95	9,94	9,94	9,96	1,12	1,10	1,16	1,10	1,06	1,04	1,14	1,21	9,95	9,94	9,96	1,12	1,04	1,21
P2P4_9	9,98	9,98	9,99	9,98	9,99	1,06	1,07	1,10	1,08	1,09	1,09	1,09	1,04	9,98	9,98	9,99	1,08	1,04	1,10
P2P4_10	9,99	10,00	10,00	9,99	9,99	1,12	1,13	1,08	1,16	1,17	1,18	1,17	1,16	9,99	9,99	10,00	1,15	1,08	1,18
P2P4_11	10,00	9,99	10,00	9,99	9,98	1,20	1,20	1,18	1,22	1,23	1,24	1,20	1,18	9,99	9,98	10,00	1,21	1,18	1,24
P2P4_12	9,98	9,98	9,99	9,99	9,98	1,14	1,13	1,15	1,05	1,13	1,13	1,14	1,13	9,98	9,98	9,99	1,13	1,05	1,15
P2P4_13	9,94	9,95	9,95	9,97	9,98	1,18	1,17	1,17	1,24	1,21	1,20	1,17	1,19	9,96	9,94	9,98	1,19	1,17	1,24
Anzahl Proben														13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
Mittelwert														9,97	9,96	9,98	1,14	1,08	1,19
Standardabweichung														0,014	0,016	0,013	0,045	0,065	0,044
Variationskoeffizient / %														0,14	0,16	0,13	3,94	6,04	3,64
Min														9,95	9,94	9,96	1,08	1,01	1,10
Max														9,99	9,99	10,00	1,23	1,21	1,24

Tabelle B.6: Probenmaße der Platte P2

Probe	Breite / mm					Dicke / mm								Breite / mm			Dicke / mm		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P2_1	9,93	9,95	9,93	9,94	9,95	1,32	1,27	1,35	1,15	1,15	1,21	1,20	1,27	9,94	9,93	9,95	1,24	1,15	1,35
P2_2	9,99	9,98	9,98	9,97	9,97	1,43	1,40	1,33	1,36	1,35	1,31	1,49	1,45	9,98	9,97	9,99	1,39	1,31	1,49
P2_3	9,90	9,92	9,91	9,94	9,95	1,27	1,22	1,24	1,59	1,55	1,50	1,17	1,34	9,92	9,90	9,95	1,36	1,17	1,59
P2_4	9,96	9,97	9,97	9,96	9,96	1,50	1,45	1,47	1,27	1,19	1,33	1,41	1,40	9,96	9,96	9,97	1,38	1,19	1,50
P2_5	9,98	9,97	9,96	9,96	9,97	1,15	1,05	1,13	1,53	1,57	1,56	1,27	1,34	9,97	9,96	9,98	1,33	1,05	1,57
P2_6	9,98	9,98	9,98	9,99	9,98	1,28	1,26	1,25	1,35	1,30	1,37	1,28	1,25	9,98	9,98	9,99	1,29	1,25	1,37
P2_7	9,98	9,97	10,00	9,99	9,98	1,38	1,39	1,38	1,28	1,34	1,38	1,43	1,44	9,98	9,97	10,00	1,38	1,28	1,44
P2_8	9,98	9,98	9,97	9,98	9,99	1,41	1,32	1,35	1,24	1,25	1,24	1,19	1,23	9,98	9,97	9,99	1,28	1,19	1,41
P2_9	9,91	9,90	9,87	9,84	9,80	1,29	1,28	1,21	1,50	1,51	1,48	1,35	1,37	9,86	9,80	9,91	1,37	1,21	1,51
P2_10	9,91	9,92	9,92	9,95	9,94	1,23	1,25	1,17	1,46	1,47	1,47	1,35	1,44	9,93	9,91	9,95	1,36	1,17	1,47
P2_11	9,97	9,98	9,98	9,99	10,00	1,06	1,07	1,09	1,41	1,44	1,37	1,20	1,29	9,98	9,97	10,00	1,24	1,06	1,44
P2_12	9,96	9,98	9,99	9,99	10,00	1,47	1,43	1,48	1,28	1,22	1,31	1,39	1,37	9,98	9,96	10,00	1,37	1,22	1,48
Anzahl Proben														12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Mittelwert														9,96	9,94	9,97	1,33	1,19	1,47
Standardabweichung														0,037	0,051	0,028	0,055	0,078	0,072
Variationskoeffizient / %														0,37	0,51	0,28	4,12	6,53	4,91
Min														9,86	9,80	9,91	1,24	1,05	1,35
Max														9,98	9,98	10,00	1,39	1,31	1,59

Tabelle B.7: Probenmaße der Platte P3P

Probe	Breite / mm					Dicke / mm								Breite / mm			Dicke / mm		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P3P_1	24,96	24,95	24,95	24,97	24,95	2,20	2,18	2,18	2,22	2,23	2,23	2,31	2,18	24,96	24,95	24,97	2,22	2,18	2,31
P3P_2	24,96	24,96	24,97	24,98	24,98	2,25	2,27	2,16	2,15	2,16	2,22	2,13	2,20	24,97	24,96	24,98	2,19	2,13	2,27
P3P_3	24,96	24,97	24,95	24,95	24,94	2,28	2,25	2,18	2,21	2,16	2,10	2,20	2,20	24,95	24,94	24,97	2,20	2,10	2,28
P3P_4	24,97	24,99	24,98	25,00	24,98	2,28	2,20	2,23	2,20	2,22	2,10	2,29	2,15	24,98	24,97	25,00	2,21	2,10	2,29
P3P_5	24,99	24,99	24,98	24,98	24,99	2,14	2,27	2,21	2,21	2,12	2,29	2,26	2,24	24,99	24,98	24,99	2,22	2,12	2,29
P3P_6	24,98	24,99	25,00	24,99	24,99	2,20	2,06	2,24	2,21	2,25	2,18	2,20	2,15	24,99	24,98	25,00	2,19	2,06	2,25
P3P_7	24,97	24,98	24,99	25,00	25,00	2,30	2,18	2,14	2,25	2,20	2,17	2,25	2,10	24,99	24,97	25,00	2,20	2,10	2,30
P3P_8	24,99	25,00	24,98	24,96	24,97	2,19	2,24	2,21	2,28	2,19	2,23	2,17	2,24	24,98	24,96	25,00	2,22	2,17	2,28
P3P_9	24,99	24,99	24,99	25,00	25,00	2,24	2,22	2,26	2,22	2,24	2,18	2,22	2,21	24,99	24,99	25,00	2,22	2,18	2,26
P3P_10	24,95	24,97	24,98	24,97	25,01	2,21	2,19	2,16	2,19	2,11	2,19	2,37	2,22	24,98	24,95	25,01	2,21	2,11	2,37
Anzahl Proben														10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Mittelwert														24,98	24,97	24,99	2,21	2,13	2,29
Standardabweichung														0,014	0,016	0,014	0,013	0,040	0,033
Variationskoeffizient / %														0,056	0,063	0,056	0,569	1,89	1,46
Min														24,95	24,94	24,97	2,19	2,06	2,25
Max														24,99	24,99	25,01	2,22	2,18	2,37

Tabelle B.8: Probenmaße der Platte P3P4

Probe	Breite / mm					Dicke / mm								Breite / mm			Dicke / mm		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P3P4_1	24,98	24,96	24,96	24,95	24,96	2,35	2,35	2,34	2,45	2,38	2,33	2,28	2,25	24,96	24,95	24,98	2,34	2,25	2,45
P3P4_2	24,98	24,97	24,91	24,90	24,89	2,37	2,28	2,37	2,29	2,42	2,34	2,41	2,37	24,93	24,89	24,98	2,36	2,28	2,42
P3P4_3	24,98	24,95	24,96	24,95	24,97	2,32	2,34	2,23	2,31	2,32	2,38	2,26	2,27	24,96	24,95	24,98	2,30	2,23	2,38
P3P4_4	24,99	24,98	24,97	24,95	24,95	2,34	2,30	2,31	2,34	2,33	2,33	2,38	2,36	24,97	24,95	24,99	2,34	2,30	2,38
P3P4_5	24,93	24,92	24,94	24,95	24,95	2,28	2,27	2,34	2,31	2,35	2,33	2,35	2,30	24,94	24,92	24,95	2,32	2,27	2,35
P3P4_6	24,96	24,92	24,95	24,93	24,91	2,26	2,28	2,27	2,30	2,32	2,30	2,33	2,39	24,93	24,91	24,96	2,31	2,26	2,39
P3P4_7	24,96	24,97	24,99	24,97	24,98	2,42	2,22	2,34	2,33	2,23	2,33	2,29	2,28	24,97	24,96	24,99	2,31	2,22	2,42
P3P4_8	25,01	25,00	25,00	25,00	25,01	2,24	2,39	2,25	2,25	2,36	2,25	2,40	2,33	25,00	25,00	25,01	2,31	2,24	2,40
P3P4_9	24,99	24,98	24,97	24,98	25,00	2,29	2,28	2,26	2,28	2,25	2,30	2,34	2,33	24,98	24,97	25,00	2,29	2,25	2,34
P3P4_10	24,93	24,92	24,91	24,92	24,92	2,31	2,28	2,30	2,27	2,34	2,30	2,28	2,27	24,92	24,91	24,93	2,29	2,27	2,34
Anzahl Proben														10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Mittelwert														24,96	24,94	24,98	2,32	2,26	2,39
Standardabweichung														0,027	0,033	0,024	0,022	0,024	0,037
Variationskoeffizient / %														0,107	0,133	0,096	0,932	1,07	1,54
Min														24,92	24,89	24,93	2,29	2,22	2,34
Max														25,00	25,00	25,01	2,36	2,30	2,45

Tabelle B.9: Probenmaße der Platte P3

Probe	Breite / mm					Dicke / mm								Breite / mm			Dicke / mm		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P3_1	24,99	25,00	25,00	24,99	24,99	2,56	2,63	2,33	2,35	2,47	2,42	2,63	2,58	24,99	24,99	25,00	2,50	2,33	2,63
P3_2	24,96	24,94	24,95	24,95	24,93	2,58	2,43	2,21	2,23	2,52	2,40	2,30	2,80	24,95	24,93	24,96	2,43	2,21	2,80
P3_3	24,98	24,97	24,98	25,00	24,99	2,50	2,34	2,36	2,60	2,20	2,38	2,04	2,47	24,98	24,97	25,00	2,36	2,04	2,60
P3_4	24,99	25,00	24,97	24,95	24,96	2,38	2,43	2,50	2,31	2,37	2,30	2,68	2,58	24,97	24,95	25,00	2,44	2,30	2,68
P3_5	24,93	24,92	24,90	24,91	24,90	2,27	2,66	2,26	2,62	2,46	2,40	2,40	2,49	24,91	24,90	24,93	2,45	2,26	2,66
P3_6	24,94	24,93	24,93	24,91	24,90	2,54	2,06	2,64	2,25	2,65	2,47	2,45	2,49	24,92	24,90	24,94	2,44	2,06	2,65
P3_7	24,99	24,98	24,97	25,00	24,98	2,32	2,47	2,32	2,27	2,33	2,54	2,46	2,63	24,98	24,97	25,00	2,42	2,27	2,63
P3_8	24,97	24,98	25,00	24,98	24,99	2,14	2,68	2,67	2,77	2,23	2,30	2,47	2,53	24,98	24,97	25,00	2,47	2,14	2,77
P3_9	24,97	24,99	24,98	24,99	24,99	2,59	2,39	2,57	2,34	2,66	2,18	2,38	2,57	24,98	24,97	24,99	2,46	2,18	2,66
P3_10	24,99	25,00	24,98	25,01	24,97	2,57	2,66	1,98	2,46	2,52	2,71	2,33	2,76	24,99	24,97	25,01	2,50	1,98	2,76
Anzahl Proben													10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	
Mittelwert													24,97	24,95	24,98	2,45	2,18	2,68	
Standardabweichung													0,030	0,032	0,029	0,040	0,119	0,068	
Variationskoeffizient / %													0,119	0,126	0,115	1,635	5,47	2,54	
Min													24,91	24,90	24,93	2,36	1,98	2,60	
Max													24,99	24,99	25,01	2,50	2,33	2,80	

Tabelle B.10: Probenmaße der Platte P4A

Platte	Breite / mm			Überlappungslänge / mm		Breite / mm			Überlappungslänge / mm		
	1	2	3	1	2	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P4A_1	24,99	25,00	25,01	12,31	12,30	25,00	24,99	25,01	12,31	12,30	12,31
P4A_2	24,99	24,99	24,98	12,45	12,46	24,99	24,98	24,99	12,46	12,45	12,46
P4A_3	25,01	25,00	24,99	12,36	12,40	25,00	24,99	25,01	12,38	12,36	12,40
P4A_4	25,00	25,01	24,99	12,18	12,27	25,00	24,99	25,01	12,23	12,18	12,27
P4A_5	25,02	25,01	25,01	12,38	12,38	25,01	25,01	25,02	12,38	12,38	12,38
P4A_6	24,96	24,94	24,95	12,32	12,34	24,95	24,94	24,96	12,33	12,32	12,34
P4A_7	25,02	25,01	25,01	12,30	12,27	25,01	25,01	25,02	12,29	12,27	12,30
P4A_8	25,01	24,97	24,99	12,36	12,36	24,99	24,97	25,01	12,36	12,36	12,36
P4A_9	24,90	24,91	24,90	12,37	12,34	24,90	24,90	24,91	12,36	12,34	12,37
Anzahl Proben						9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Mittelwert						24,98	24,98	24,99	12,34	12,33	12,35
Standardabweichung						0,036	0,035	0,036	0,066	0,076	0,057
Variationskoeffizient / %						0,143	0,142	0,146	0,533	0,614	0,465
Min						24,90	24,90	24,91	12,23	12,18	12,27
Max						25,01	25,01	25,02	12,46	12,45	12,46

Tabelle B.11: Probenmaße der Platte P5A

Platte	Breite / mm			Überlappungslänge / mm		Breite / mm			Überlappungslänge / mm		
	1	2	3	1	2	mittlere	min	max	mittlere	min	max
P5A_1	25,02	25,01	25,01	11,98	12,00	25,01	25,01	25,02	11,99	11,98	12,00
P5A_2	25,02	25,02	25,02	12,00	11,97	25,02	25,02	25,02	11,99	11,97	12,00
P5A_3	25,00	25,00	25,01	11,94	11,85	25,00	25,00	25,01	11,90	11,85	11,94
P5A_4	24,98	25,01	25,00	12,17	12,05	25,00	24,98	25,01	12,11	12,05	12,17
P5A_5	24,99	24,99	24,99	12,08	12,00	24,99	24,99	24,99	12,04	12,00	12,08
P5A_6	25,01	25,00	24,98	12,21	12,10	25,00	24,98	25,01	12,16	12,10	12,21
P5A_7	25,00	25,00	25,02	11,90	11,91	25,01	25,00	25,02	11,91	11,90	11,91
P5A_8	24,97	25,01	24,96	12,00	11,95	24,98	24,96	25,01	11,98	11,95	12,00
P5A_9	25,01	25,01	25,00	11,90	11,89	25,01	25,00	25,01	11,90	11,89	11,90
P5A_10	24,97	24,99	24,94	11,98	12,00	24,97	24,94	24,99	11,99	11,98	12,00
Anzahl Proben						10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Mittelwert						25,00	24,99	25,01	11,99	11,97	12,02
Standardabweichung						0,016	0,024	0,011	0,088	0,075	0,104
Variationskoeffizient / %						0,064	0,096	0,044	0,733	0,625	0,862
Min						24,97	24,94	24,99	11,90	11,85	11,90
Max						25,02	25,02	25,02	12,16	12,10	12,21

C Ergebnisse der Zugversuche

In den folgenden Tabellen mit den Versuchsergebnissen werden die Werte mit einer Farbscala markiert. Dabei wird der Mittelwert weiß dargestellt, die Standardabweichung addiert zum Mittelwert rot und der Mittelwert abzüglich der Standardabweichung blau. Wenn Proben nicht für die Mittelwertbildung verwendet werden, sind diese grau markiert.

C.1 Versuchsergebnisse 0° Zugversuche

Die Proben P2_7, P2_9 und P2_10 sind im Probenhalter gerutscht. Das ist gut in dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Probenplatte P2 in Abbildung C.3 zu sehen. Hier verlaufen die Kurven dieser drei Proben am Ende sehr rund. Der Zugmodul ist von dem Rutschen nicht beeinflusst, da er im Anfangsbereich ermittelt wird. Da die maximale Spannung bei den Proben relativ hoch und mit den übrigen Proben vergleichbar ist (siehe Tabelle C.3), werden sie aus der Wertung nicht entfernt. Allerdings wäre die Zugfestigkeit ohne rutschen voraussichtlich höher gewesen. Zu dem Rutschen konnte es höchst wahrscheinlich aufgrund der unebenen Probenoberfläche kommen. Diese führt dazu, dass die Kraft trotz Krafteinleitungselementen und den hydraulischen Probenhaltern nur schwer in die Probe eingeleitet werden kann.

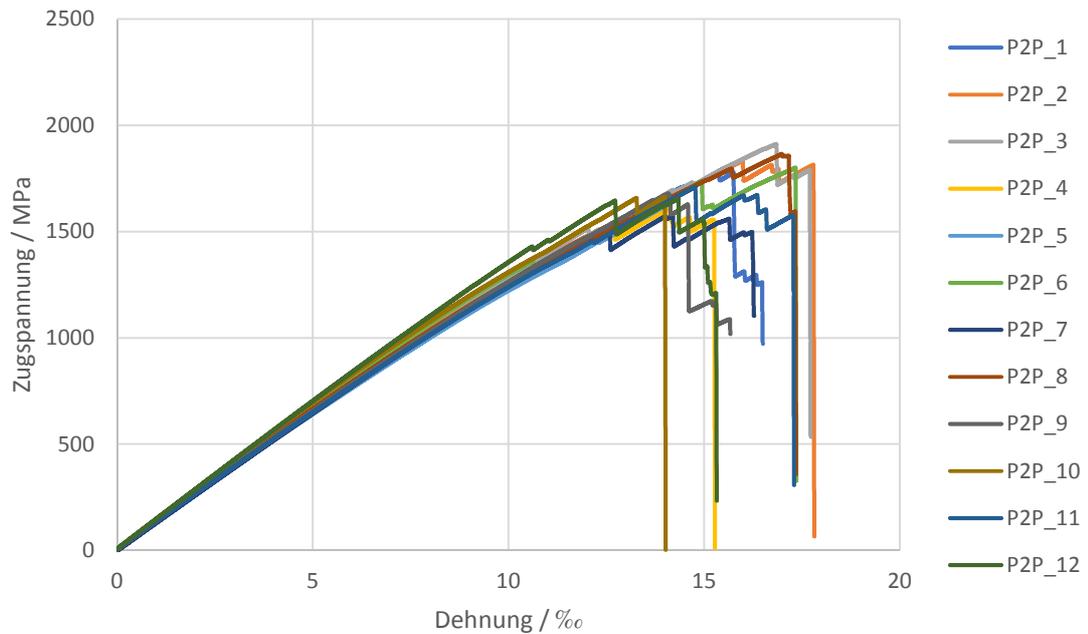


Abbildung C.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P2P

Tabelle C.1: Ergebnisse Platte P2P

Probe	h / mm	b / mm	F_m / N	σ_{m1} / MPa	$\epsilon_{m1} / ‰$	E_1 / GPa	μ_{12}
P2P_1	1,09	9,99	19400	1778	15,8	132	0,39
P2P_2	1,10	10,01	20163	1834	16,0	134	0,35
P2P_3	1,12	9,97	21372	1911	16,8	139	0,38
P2P_4	1,16	10,00	18654	1607	14,1	133	0,32
P2P_5	1,15	10,01	20588	1790	17,8	129	0,15
P2P_6	1,14	9,99	20421	1801	17,3	138	0,21
P2P_7	1,12	9,99	17590	1574	14,2	131	0,43
P2P_8	1,12	9,99	20829	1865	17,0	134	0,25
P2P_9	1,03	9,96	17198	1680	14,1	132	0,58
P2P_10	1,11	9,99	18440	1664	14,0	141	0,43
P2P_11	1,14	9,95	19387	1711	14,8	130	0,09
P2P_12	1,14	10,00	18361	1656	14,3	140	0,47
Anzahl Proben	12	12	12	12	12	12	12
Mittelwert	1,12	9,99	19367	1739	15,52	134	0,34
Stabw.	0,03	0,02	1336	106	1,44	4,1	0,14
VarKo / %	3,10	0,17	6,9	6,1	9,2	3,0	41,9
Min	1,03	9,95	17198	1574	14,0	129	0,09
Max	1,16	10,01	21372	1911	17,8	141	0,58

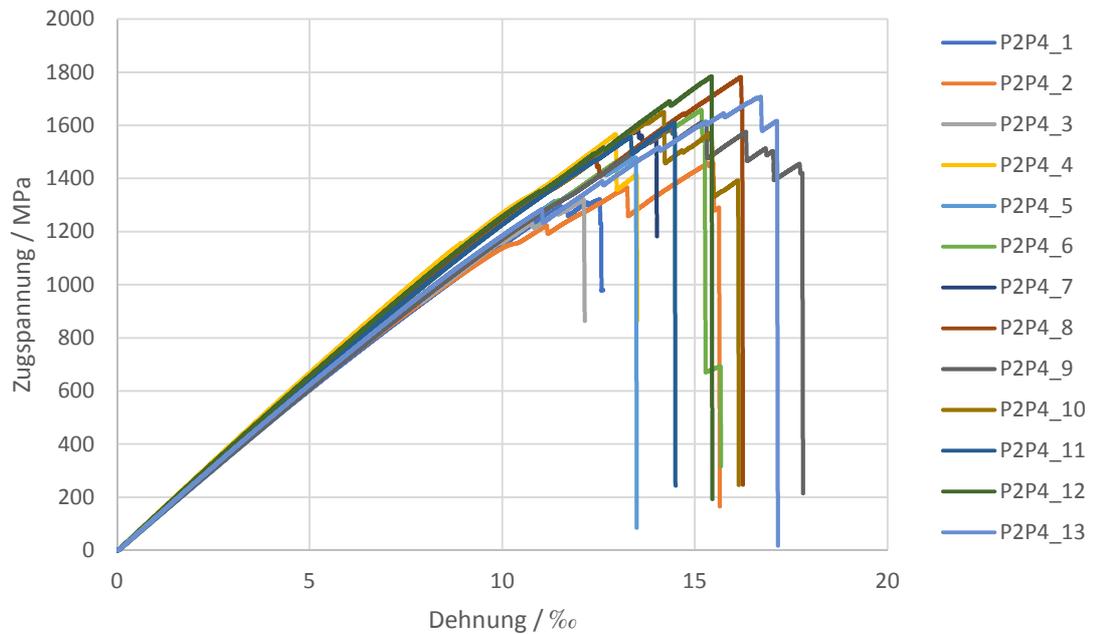


Abbildung C.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P2P4

Tabelle C.2: Ergebnisse Platte P2P4

Probe	h / mm	b / mm	F _m / N	σ _{m1} / MPa	ε _{mt1} / ‰	E ₁ / GPa	μ ₁₂
P2P4_1	1,12	9,95	14788	1322	12,5	125	0,36
P2P4_2	1,23	9,97	17804	1458	15,3	126	0,44
P2P4_3	1,12	9,97	14708	1321	12,1	127	0,39
P2P4_4	1,12	9,97	17503	1567	13,0	135	0,48
P2P4_5	1,11	9,97	16419	1479	13,5	123	0,16
P2P4_6	1,16	9,97	19190	1659	15,2	125	0,29
P2P4_7	1,09	9,98	17150	1582	13,5	131	0,32
P2P4_8	1,12	9,95	19794	1783	16,2	130	0,48
P2P4_9	1,08	9,98	17354	1613	15,2	124	0,47
P2P4_10	1,15	9,99	18907	1650	14,2	129	0,45
P2P4_11	1,21	9,99	19402	1610	14,5	130	0,53
P2P4_12	1,13	9,98	20045	1785	15,4	133	0,37
P2P4_13	1,19	9,96	20253	1707	16,7	128	0,32
Anzahl Proben	13	13	13	13	13	13	13
Mittelwert	1,14	9,97	17947	1580	14,41	128	0,39
Stabw.	0,04	0,01	1865	150	1,42	3,8	0,10
VarKo / %	3,94	0,14	10,4	9,5	9,9	2,9	26,1
Min	1,08	9,95	14708	1321	12,1	123	0,16
Max	1,23	9,99	20253	1785	16,7	135	0,53

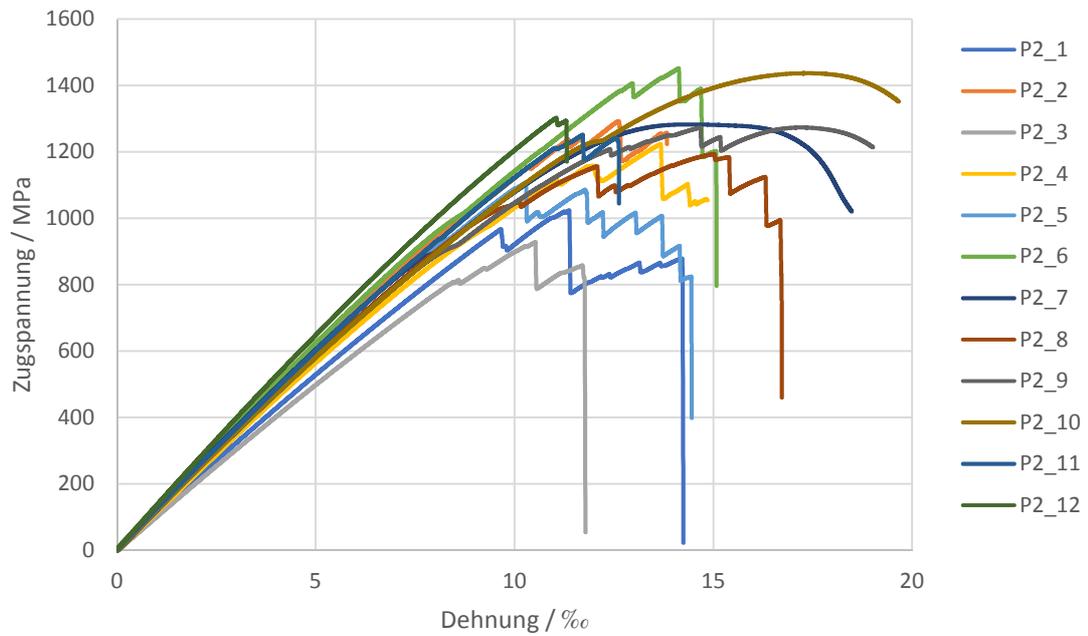


Abbildung C.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P2

Tabelle C.3: Ergebnisse Platte P2

Probe	h / mm	b / mm	F _m / N	σ _{m1} / MPa	ε _{mt1} / ‰	E ₁ / GPa	μ ₁₂
P2_1	1,24	9,94	12624	1024	11,4	107	0,50
P2_2	1,39	9,98	17923	1292	12,6	126	0,25
P2_3	1,36	9,92	12538	929	10,5	103	0,17
P2_4	1,38	9,96	16800	1224	13,7	117	0,39
P2_5	1,33	9,97	14633	1108	10,3	123	0,26
P2_6	1,29	9,98	18730	1452	14,1	127	0,16
P2_7	1,38	9,98	17641	1283	14,4	122	0,10
P2_8	1,28	9,98	15227	1194	15,0	121	0,18
P2_9	1,37	9,86	17259	1274	17,2	120	0,43
P2_10	1,36	9,93	19330	1437	17,4	118	0,03
P2_11	1,24	9,98	15513	1252	11,7	122	0,53
P2_12	1,37	9,98	17805	1303	11,1	132	0,31
Anzahl Proben	12	12	12	12	12	12	12
Mittelwert	1,33	9,96	16335	1231	13,28	120	0,28
Stabw.	0,05	0,04	2239	152	2,43	8,1	0,16
VarKo / %	4,12	0,37	13,7	12,4	18,3	6,8	57,5
Min	1,24	9,86	12538	929	10,3	103	0,03
Max	1,39	9,98	19330	1452	17,4	132	0,53

C.2 Ergebnisse der 90° Zugversuche

Die Proben P1P_5 und P1P_6 wurden nicht stark genug gespannt und sind gerutscht. Die Probe P1P_6 ist allerdings vor dem Rutschen schon zum Teil gerissen. Die Probe P1P_5 wird nicht in der Auswertung berücksichtigt, da sie gerutscht ist und so einen zu niedrigen Zugspannungswert erreicht. Probe P1P_6 wird in der Auswertung berücksichtigt, da hier bereits eine hohe Spannung erreicht wurde (siehe Tabelle C.4). Außerdem ist an dem Sprung in der Spannung zu sehen, dass hier bereits ein Teil der Probe gerissen ist (siehe Abbildung C.4).

Die Proben P1P_1, P1P_2 und P1P_3 werden aus der Wertung entfernt, da sie durch das hydraulische Spannzeug geschwächt wurden und so zu niedrige Zugspannungswerte erzielt haben.

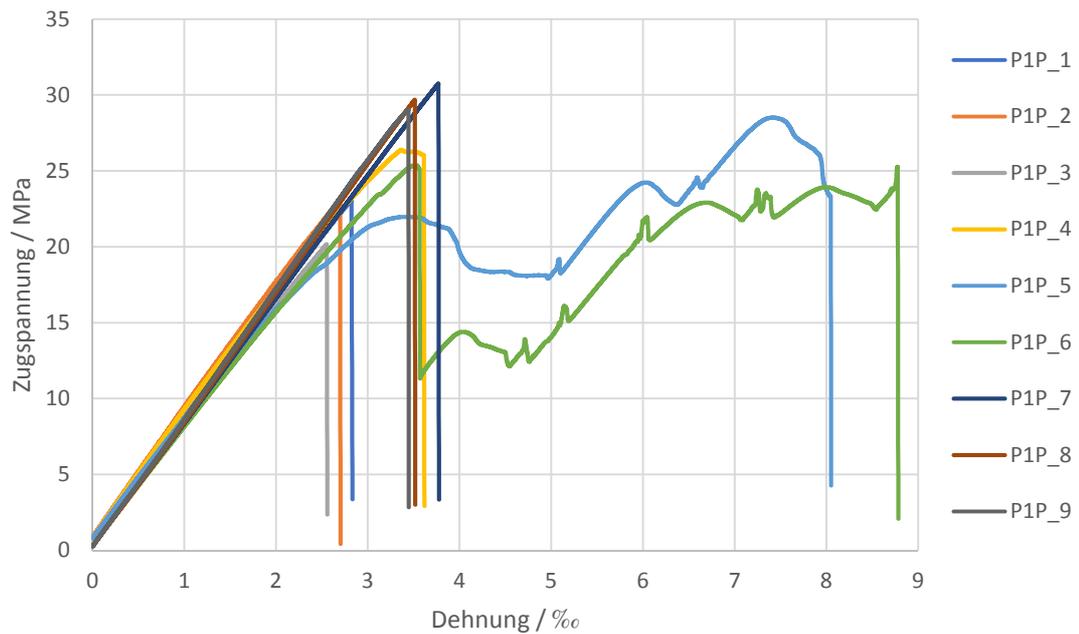


Abbildung C.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P1P

Tabelle C.4: Ergebnisse Platte P1P

Probe	h / mm	b / mm	F_m / N	σ_{m2} / MPa	ϵ_{m2} / ‰	E_2 / GPa	μ_{21}
P1P_1	1,62	24,96	937	23,1	2,8	8	0,09
P1P_2	1,64	24,95	950	23,2	2,7	8	-0,06
P1P_3	1,63	24,98	822	20,2	2,6	8	-0,10
P1P_4	1,64	24,99	1082	26,4	3,4	8	-0,04
P1P_5	1,65	24,98	1175	27,8	7,2	7	-0,16
P1P_6	1,65	24,98	1048	25,4	3,5	8	-0,02
P1P_7	1,65	25,00	1267	30,8	3,8	8	-0,09
P1P_8	1,65	24,98	1222	29,7	3,5	8	0,20
P1P_9	1,65	25,00	1198	29,0	3,4	9	0,15
Anzahl Proben	5	5	5	5	5	5	5
Mittelwert	1,65	24,99	1163	28,2	3,53	8	0,04
Stabw.	0,00	0,01	94	2,3	0,15	0,4	0,13
VarKo / %	0,28	0,05	8,1	8,0	4,3	4,4	326,8
Min	1,64	24,98	1048	25,4	3,4	8	-0,09
Max	1,65	25,00	1267	30,8	3,8	9	0,20

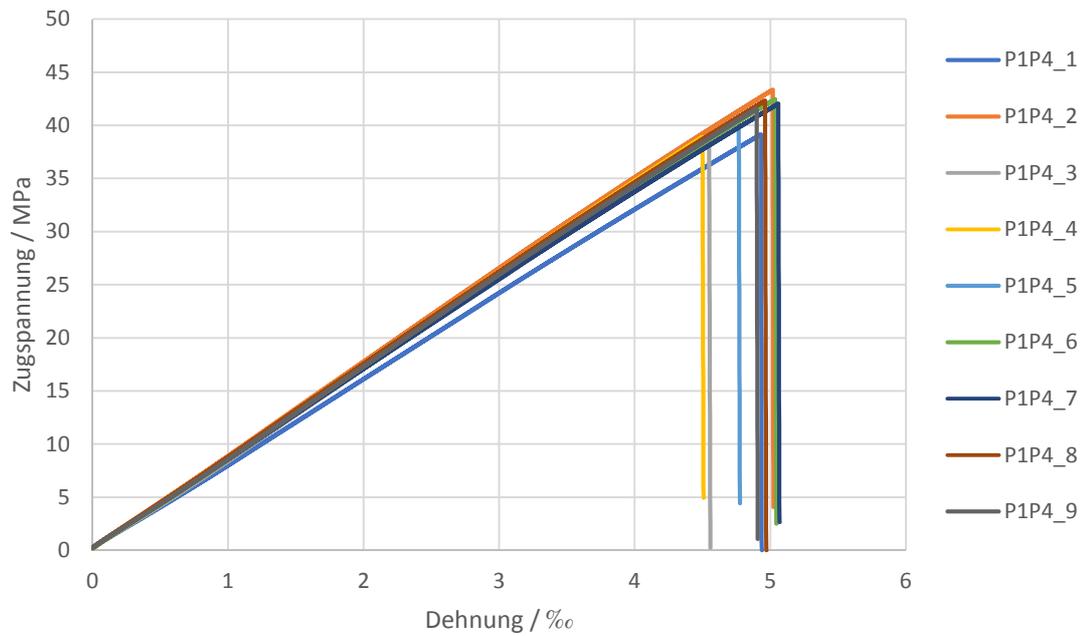


Abbildung C.5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P1P4

Tabelle C.5: Ergebnisse Platte P1P4

Probe	h / mm	b / mm	F _m / N	σ _{m2} / MPa	ε _{m2} / ‰	E ₂ / GPa	μ ₂₁
P1P4_1	1,68	24,94	1641	39	4,9	8	-0,04
P1P4_2	1,68	24,95	1819	43	5,0	9	0,06
P1P4_3	1,70	24,98	1647	39	4,5	9	0,16
P1P4_4	1,71	24,95	1657	39	4,5	9	0,16
P1P4_5	1,72	24,96	1748	41	4,8	9	0,00
P1P4_6	1,73	24,97	1831	42	5,0	9	0,03
P1P4_7	1,73	24,95	1812	42	5,1	8	0,10
P1P4_8	1,70	24,94	1797	42	5,0	9	0,07
P1P4_9	1,71	24,87	1765	42	4,9	9	0,14
Anzahl Proben	9	9	9	9	9	9	9
Mittelwert	1,71	24,95	1746	41	4,86	9	0,07
Stabw.	0,02	0,03	78	2	0,21	0,2	0,07
VarKo / %	1,04	0,13	4,5	4,2	4,3	2,6	96,0
Min	1,68	24,87	1641	39	4,5	8	-0,04
Max	1,73	24,98	1831	43	5,1	9	0,16

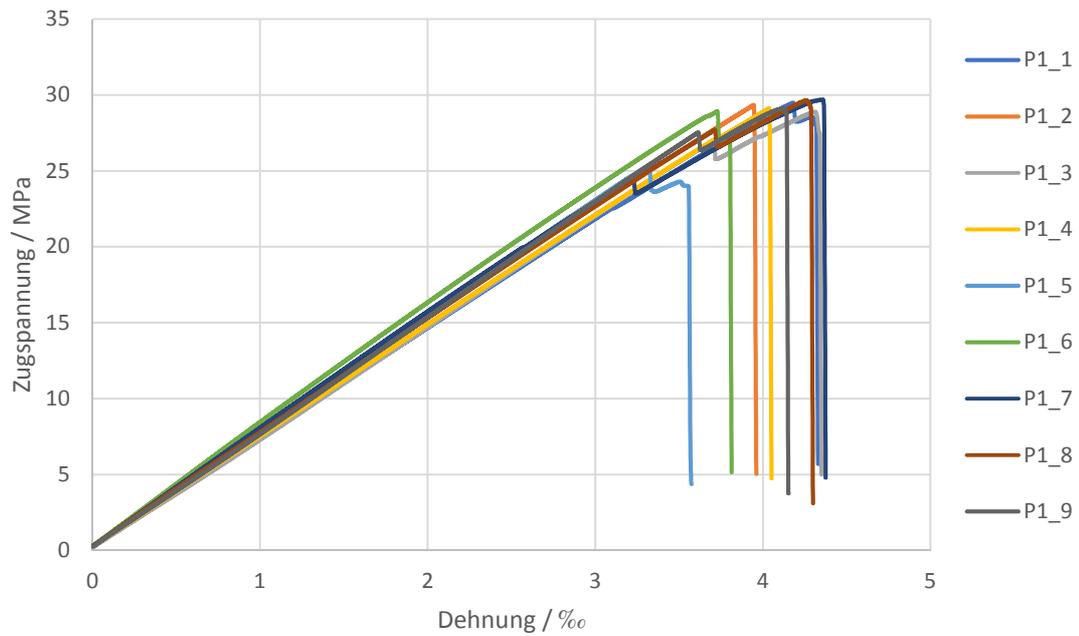


Abbildung C.6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P1 mit mittlerer Dicke

Tabelle C.6: Ergebnisse Platte P1 mit mittlerer Dicke

Probe	h / mm	h _{min} / mm	b / mm	F _m / N	σ _{m2} / MPa	ε _{mt2} / ‰	E ₂ / GPa	μ ₂₁
P1_1	1,99	1,40	24,96	1463	29,5	4,2	7,2	0,21
P1_2	1,98	1,37	24,97	1454	29,3	3,9	7,5	0,07
P1_3	2,00	1,34	24,97	1444	28,9	4,3	7,3	0,11
P1_4	1,97	1,30	24,99	1434	29,1	4,0	7,3	0,06
P1_5	1,95	1,34	24,98	1238	25,4	3,3	7,7	0,21
P1_6	1,97	1,35	24,98	1423	28,9	3,7	7,9	0,06
P1_7	1,96	1,34	24,98	1455	29,7	4,4	7,6	0,08
P1_8	1,97	1,43	24,98	1460	29,6	4,3	7,5	0,13
P1_9	1,98	1,43	24,97	1438	29,1	4,1	7,6	0,15
Anzahl Proben	9	9	9	9	9	9	9	9
Mittelwert	1,97	1,37	24,98	1423	28,9	4,03	7,5	0,12
Stabw.	0,02	0,04	0,01	71	1,3	0,33	0,2	0,06
VarKo / %	0,77	3,27	0,04	5,0	4,6	8,2	2,7	51,5
Min	1,95	1,30	24,96	1238	25,4	3,3	7,2	0,06
Max	2,00	1,43	24,99	1463	29,7	4,4	7,9	0,21

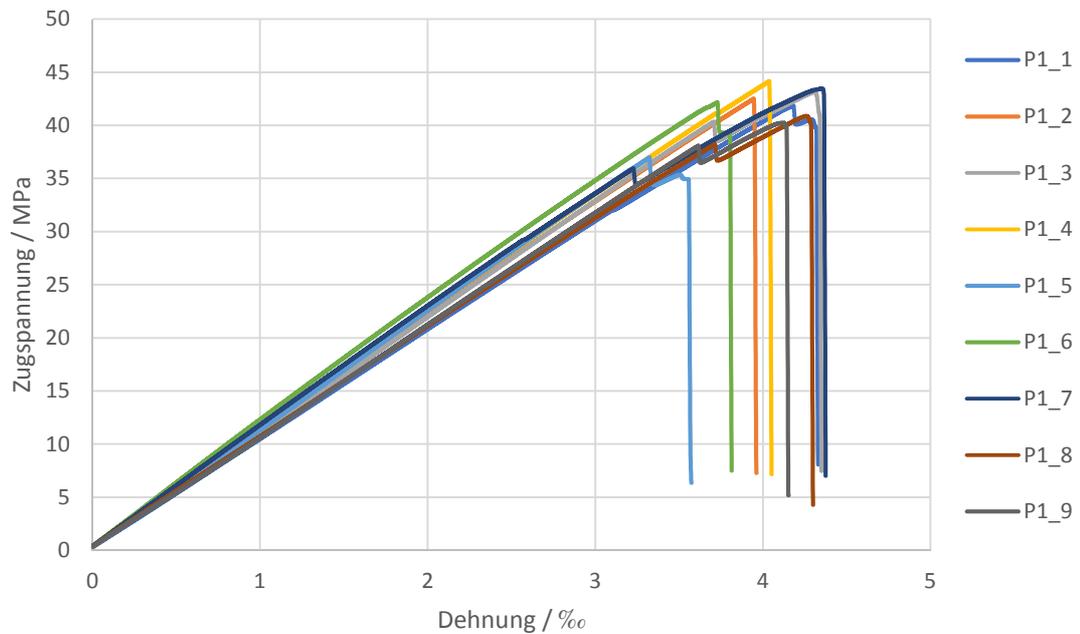


Abbildung C.7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Platte P1 mit minimaler Dicke

Tabelle C.7: Ergebnisse Platte P1 mit minimaler Dicke

Probe	h_{\min} / mm	b / mm	F_m / N	σ_{m2} / MPa	ε_{m2} / ‰	E_2 / GPa	μ_{21}
P1_1	1,40	24,96	1455	41,9	4,2	10,3	0,21
P1_2	1,37	24,97	1454	42,5	3,9	10,9	0,07
P1_3	1,34	24,97	1444	43,2	4,3	11,0	0,11
P1_4	1,30	24,99	1434	44,2	4,0	11,1	0,06
P1_5	1,34	24,98	1238	37,0	3,3	11,1	0,21
P1_6	1,35	24,98	1423	42,2	3,7	11,5	0,06
P1_7	1,34	24,98	1455	43,5	4,4	11,2	0,08
P1_8	1,43	24,98	1460	40,9	4,3	10,3	0,13
P1_9	1,43	24,97	1438	40,3	4,1	10,6	0,15
Anzahl Proben	9	9	9	9	9	9	9
Mittelwert	1,37	24,98	1422	41,7	4,03	10,9	0,12
Stabw.	0,04	0,01	70	2,2	0,33	0,4	0,06
VarKo / %	3,27	0,04	4,9	5,2	8,2	3,8	51,5
Min	1,30	24,96	1238	37,0	3,3	10,3	0,06
Max	1,43	24,99	1460	44,2	4,4	11,5	0,21

C.3 Ergebnisse der $\pm 45^\circ$ Zugversuche

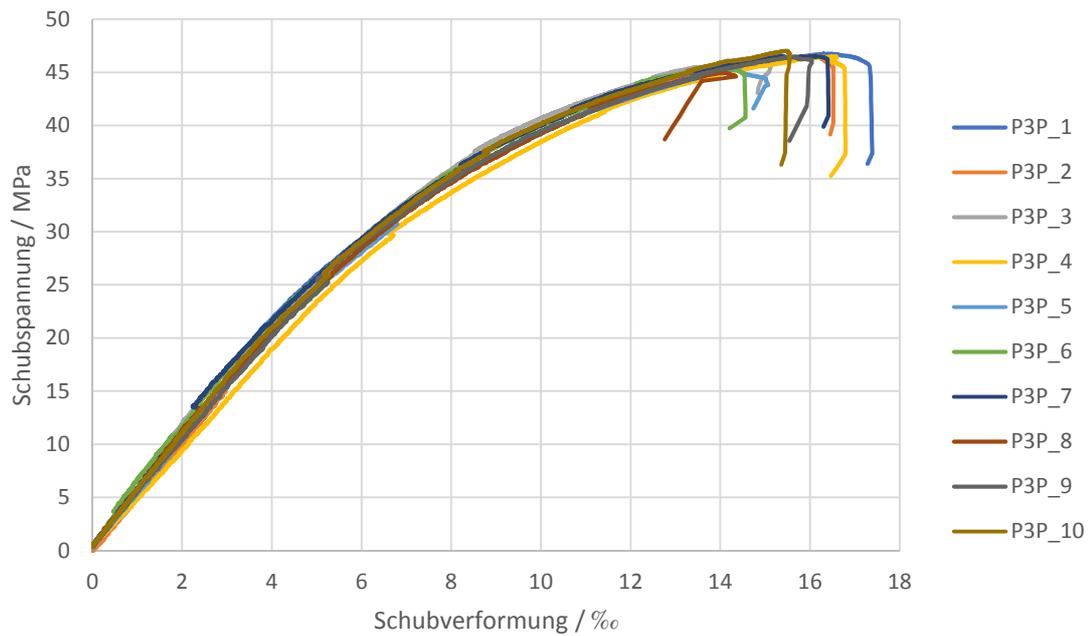


Abbildung C.8: Schubspannungs-Schubverformungs-Diagramm Platte P3P

Tabelle C.8: Ergebnisse Platte P3P

Probe	h / mm	b / mm	F_m / N	τ_{12m} / MPa	γ_{12} / ‰	G_{12} / GPa
P3P_1	2,22	24,96	5171	47	16,4	5
P3P_2	2,19	24,97	5096	47	16,1	5
P3P_3	2,20	24,95	5079	46	14,7	5
P3P_4	2,21	24,98	5134	47	16,6	5
P3P_5	2,22	24,99	5018	45	14,4	5
P3P_6	2,19	24,99	4957	45	14,3	5
P3P_7	2,20	24,99	5110	47	16,1	5
P3P_8	2,22	24,98	4985	45	14,1	5
P3P_9	2,22	24,99	5163	46	15,7	5
P3P_10	2,21	24,98	5180	47	15,5	5
Anzahl						
Proben	10	10	10	10	10	10
Mittelwert	2,21	24,98	5089	46,2	15,4	4,8
Stabw.	0,01	0,01	79	0,7	0,9	0,2
VarKo / ‰	0,6	0,06	1,6	1,5	6,2	3,3
Min	2,19	24,95	4957	45,0	14,1	4,7
Max	2,22	24,99	5180	47,0	16,6	5,1

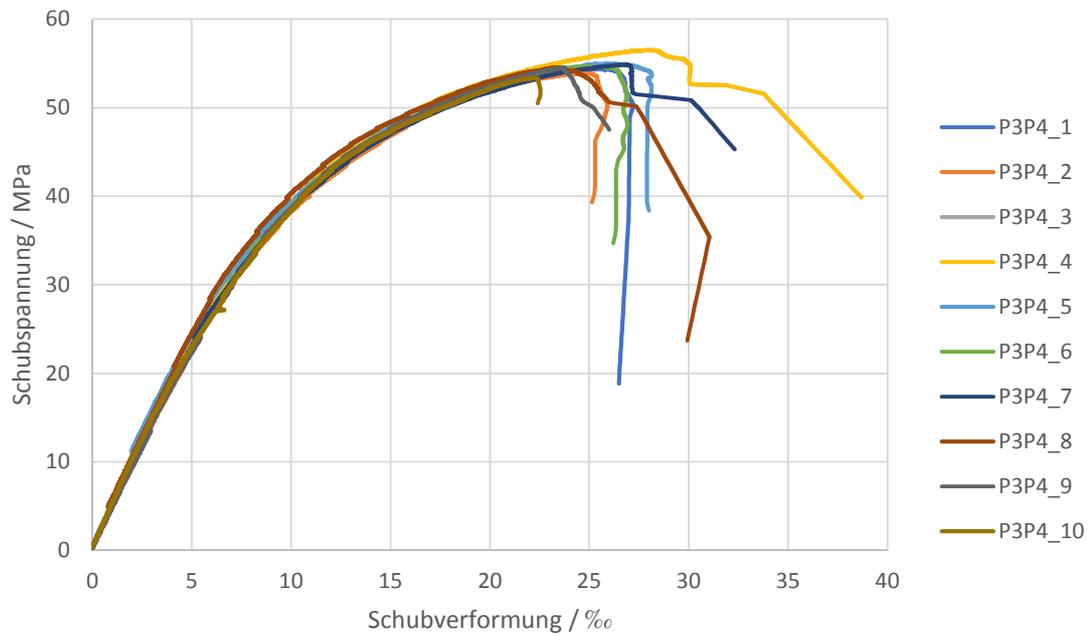


Abbildung C.9: Schubspannungs-Schubverformungs-Diagramm Platte P3P4

Tabelle C.9: Ergebnisse Platte P3P4

Probe	h / mm	b / mm	F_m / N	τ_{12m} / MPa	γ_{12} / ‰	G_{12} / GPa
P3P_1	2,22	24,96	5171	47	16,4	5
P3P_2	2,19	24,97	5096	47	16,1	5
P3P_3	2,20	24,95	5079	46	14,7	5
P3P_4	2,21	24,98	5134	47	16,6	5
P3P_5	2,22	24,99	5018	45	14,4	5
P3P_6	2,19	24,99	4957	45	14,3	5
P3P_7	2,20	24,99	5110	47	16,1	5
P3P_8	2,22	24,98	4985	45	14,1	5
P3P_9	2,22	24,99	5163	46	15,7	5
P3P_10	2,21	24,98	5180	47	15,5	5
Anzahl						
Proben	10	10	10	10	10	10
Mittelwert	2,21	24,98	5089	46,2	15,4	4,8
Stabw.	0,01	0,01	79	0,7	0,9	0,2
VarKo / %	0,6	0,06	1,6	1,5	6,2	3,3
Min	2,19	24,95	4957	45,0	14,1	4,7
Max	2,22	24,99	5180	47,0	16,6	5,1

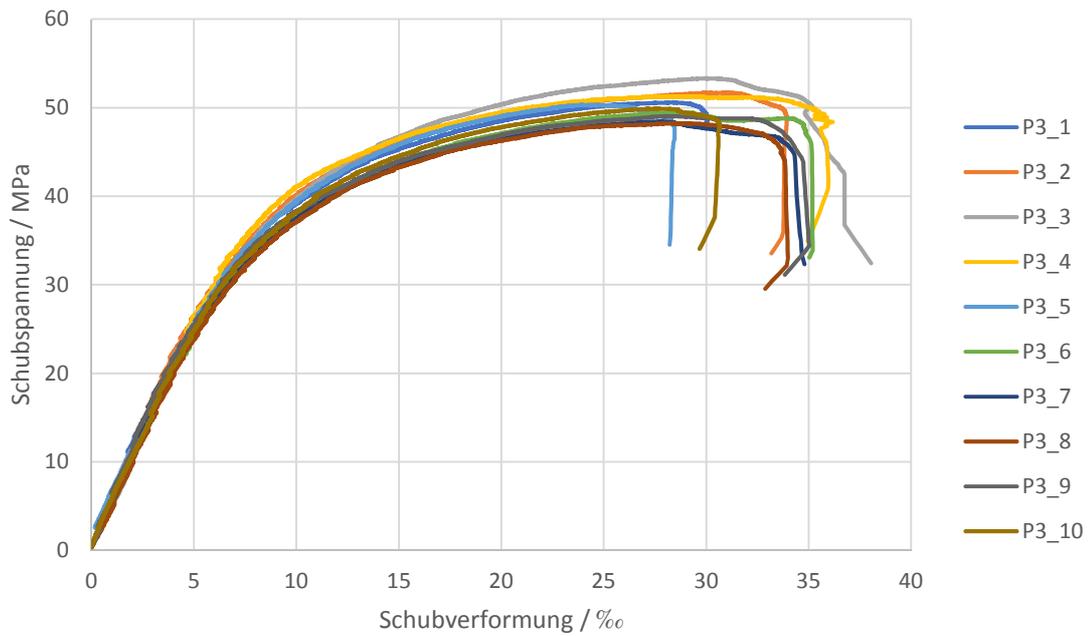


Abbildung C.10: Schubspannungs-Schubverformungs-Diagramm Platte P3

Tabelle C.10: Ergebnisse Platte P3

Probe	h / mm	b / mm	F _m / N	τ _{12m} / MPa	γ ₁₂ / ‰	G ₁₂ / GPa
P3_1	2,50	24,99	6314	51	28,4	5
P3_2	2,43	24,95	6276	52	31,0	5
P3_3	2,36	24,98	6289	53	30,0	5
P3_4	2,44	24,97	6254	51	29,3	5
P3_5	2,45	24,91	6129	50	24,0	5
P3_6	2,44	24,92	6028	49	28,7	5
P3_7	2,42	24,98	5849	48	27,3	5
P3_8	2,47	24,98	5961	48	29,0	5
P3_9	2,46	24,98	6026	49	28,1	5
P3_10	2,50	24,99	6231	50	27,7	5
Anzahl Proben	10	10	10	10	10	10
Mittelwert	2,45	24,97	6136	50,2	28,3	4,9
Stabw.	0,04	0,03	161	1,6	1,9	0,2
VarKo / %	1,6	0,12	2,6	3,1	6,6	4,5
Min	2,36	24,91	5849	48,2	24,0	4,7
Max	2,50	24,99	6314	53,3	31,0	5,4

C.4 Ergebnisse der Zugversuche mit einschichtig überlappten Proben

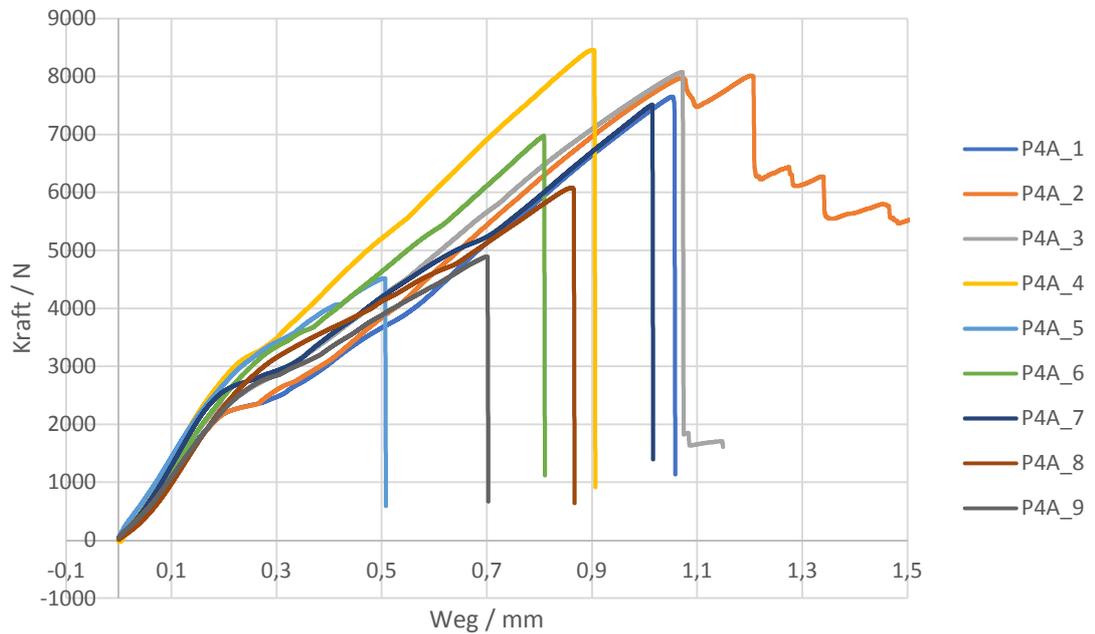


Abbildung C.11: Kraft-Weg-Diagramm Platte P4A

Tabelle C.11: Ergebnisse Platte P4A

Probe	$L_{\ddot{u}}$ / mm	$b_{\ddot{u}}$ / mm	F_m / N	τ_m / GPa
P5A_1	12,31	25,00	4966	17
P4A_2	12,46	24,99	8013	26
P4A_3	12,38	25,00	8074	26
P4A_4	12,23	25,00	8456	28
P4A_5	12,38	25,01	4519	15
P4A_6	12,33	24,95	6978	23
P4A_7	12,29	25,01	7513	24
P4A_8	12,36	24,99	6083	20
P4A_9	12,36	24,90	4893	16
Anzahl Proben	9	9	9	9
Mittelwert	12,34	24,98	6611	21,5
Stabw.	0,07	0,04	1532	4,9
VarKo / %	0,5	0,14	23,2	22,9
Min	12,23	24,90	4519	14,6
Max	12,46	25,01	8456	27,7

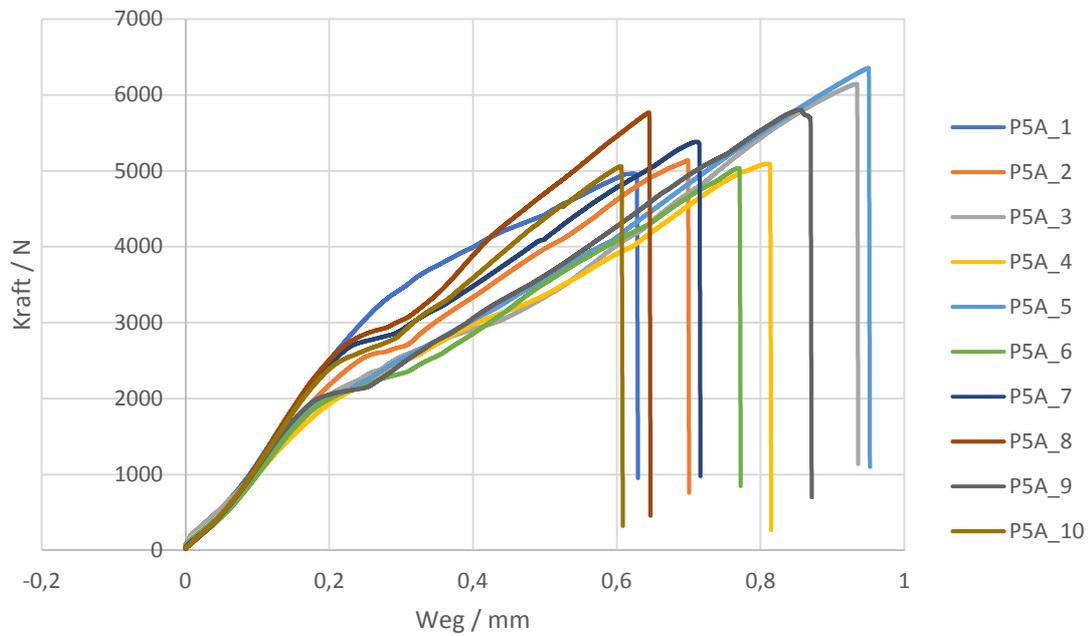


Abbildung C.12: Kraft-Weg-Diagramm Platte P5A

Tabelle C.12: Ergebnisse Platte P5A

Probe	$L_{\ddot{u}}$ / mm	$b_{\ddot{u}}$ / mm	F_m / N	τ_m / GPa
P5A_1	11,99	25,01	4966	17
P5A_2	11,99	25,02	5141	17
P5A_3	11,90	25,00	6146	21
P5A_4	12,11	25,00	5095	17
P5A_5	12,04	24,99	6357	21
P5A_6	12,16	25,00	5035	17
P5A_7	11,91	25,01	5384	18
P5A_8	11,98	24,98	5769	19
P5A_9	11,90	25,01	5806	20
P5A_10	11,99	24,97	5059	17
Anzahl Proben	10	10	10	10
Mittelwert	11,99	25,00	5476	18,3
Stabw	0,09	0,02	507	1,7
VarKo / %	0,7	0,06	9,3	9,6
Min	11,90	24,97	4966	16,6
Max	12,16	25,02	6357	21,1

C.5 Ergebnisse der Zugversuche mit gestuften Schäftproben

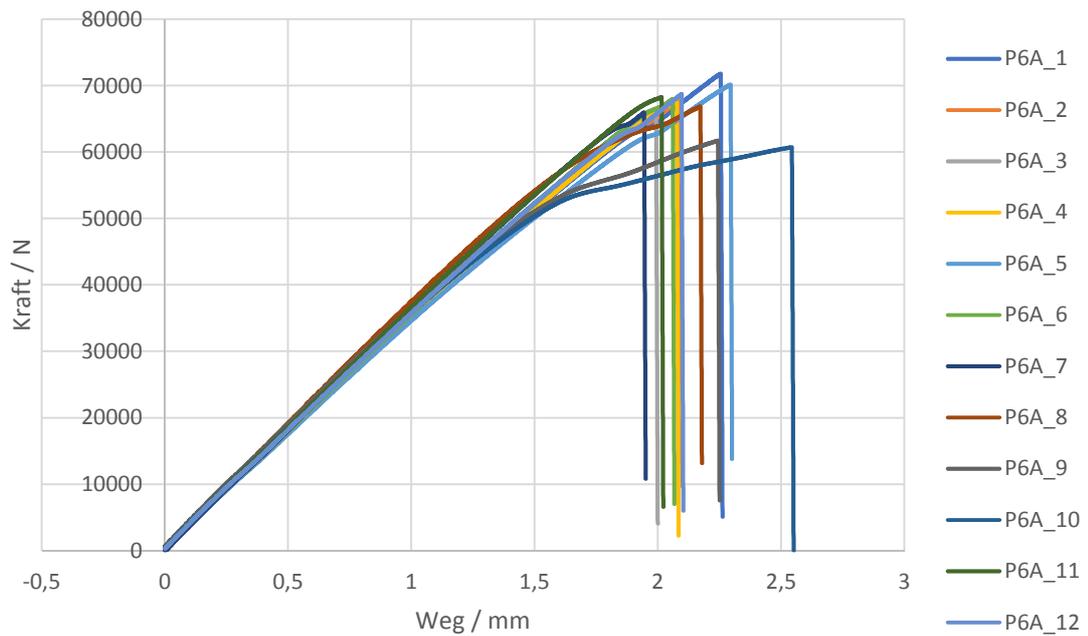


Abbildung C.13: Kraft-Weg-Diagramm Platte P6A

Tabelle C.13: Ergebnisse Platte P6A

Probe	h / mm	b / mm	F_m / N	σ_{m1} / MPa
P6A_1	5,39	25,22	71814	528
P6A_2	5,39	25,22	67750	498
P6A_3	5,39	25,22	66060	486
P6A_4	5,39	25,22	67484	496
P6A_5	5,39	25,22	70189	516
P6A_6	5,39	25,22	68007	500
P6A_7	5,39	25,22	65954	485
P6A_8	5,39	25,22	66882	492
P6A_9	5,39	25,22	61733	454
P6A_10	5,39	25,22	60734	447
P6A_11	5,39	25,22	68309	502
P6A_12	5,39	25,22	68752	505
Anzahl Proben	10	10	10	10
Mittelwert	5,39	25,22	68120	501
Stabw	0,00	0,00	1807	13
VarKo / %	0,00	0,00	2,7	2,7
Min	5,39	25,22	65954	485
Max	5,39	25,22	71814	528

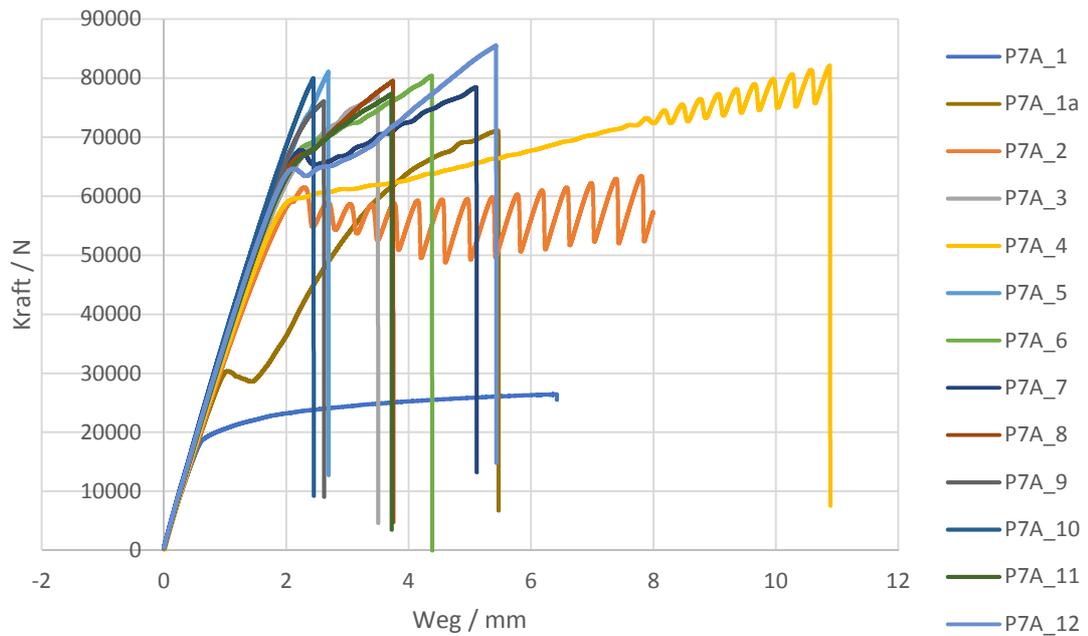


Abbildung C.14: Kraft-Weg-Diagramm Platte P7A

Tabelle C.14: Ergebnisse Platte P7A

Probe	h / mm	b / mm	F_m / N	σ_{m1} / MPa
P7A_1a	5,39	25,22	57653	424
P7A_2	5,39	25,22	63429	466
P7A_3	5,39	25,22	76986	566
P7A_4	5,39	25,22	82154	604
P7A_5	5,39	25,22	81090	596
P7A_6	5,39	25,22	80415	591
P7A_7	5,39	25,22	78482	577
P7A_8	5,39	25,22	79520	585
P7A_9	5,39	25,22	76062	559
P7A_10	5,39	25,22	79983	588
P7A_11	5,39	25,22	77342	569
P7A_12	5,39	25,22	85534	629
Anzahl Proben	9	9	9	9
Mittelwert	5,39	25,22	79490	584
Stabw	0,00	0,00	2825	21
VarKo / %	0,00	0,00	3,6	3,6
Min	5,39	25,22	76062	559
Max	5,39	25,22	85534	629

Bei Probenplatte P6A (siehe Abbildung C.13 und Tabelle C.13) sind die Ergebnisse sehr gleichmäßig. Die Proben P6A_9 und P6A_10 sind jedoch gerutscht und werden aus der Wertung ausgeschlossen.

Bei Probenplatte P7A (siehe Abbildung C.14 und Tabelle C.14) ist die Zugfestigkeit größer. Die Probe P7A_1 ist gerutscht und wurde nach dem Rutschen noch einmal mit einer auf 470 kN erhöhte Spannkraft geprüft. Die erreichte Zugfestigkeit der Probe ist im Vergleich zu den Anderen aber sehr gering (siehe Tabelle C.14). Da die Probe in dem vorangegangenen Versuch bereits belastet wurde, wird sie aus der Wertung entfernt. Die Probe P7A_2 ist auch gerutscht und wird aus der Wertung entfernt. Um das Rutschen zu verhindern wird die Spannkraft auf 480 kN erhöht. Probe P7A_4 ist auch gerutscht und wird aus der Wertung entfernt. Die Spannkraft wird auf 500 kN erhöht. P7A_5 hat einen sehr guten Verlauf. Da die Probe P7A_6 wieder einen etwas abflachenden Verlauf aufweist wird die Spannkraft für alle weiteren Proben auf 550k N erhöht.

D Tg-Ermittlung mittels DSC

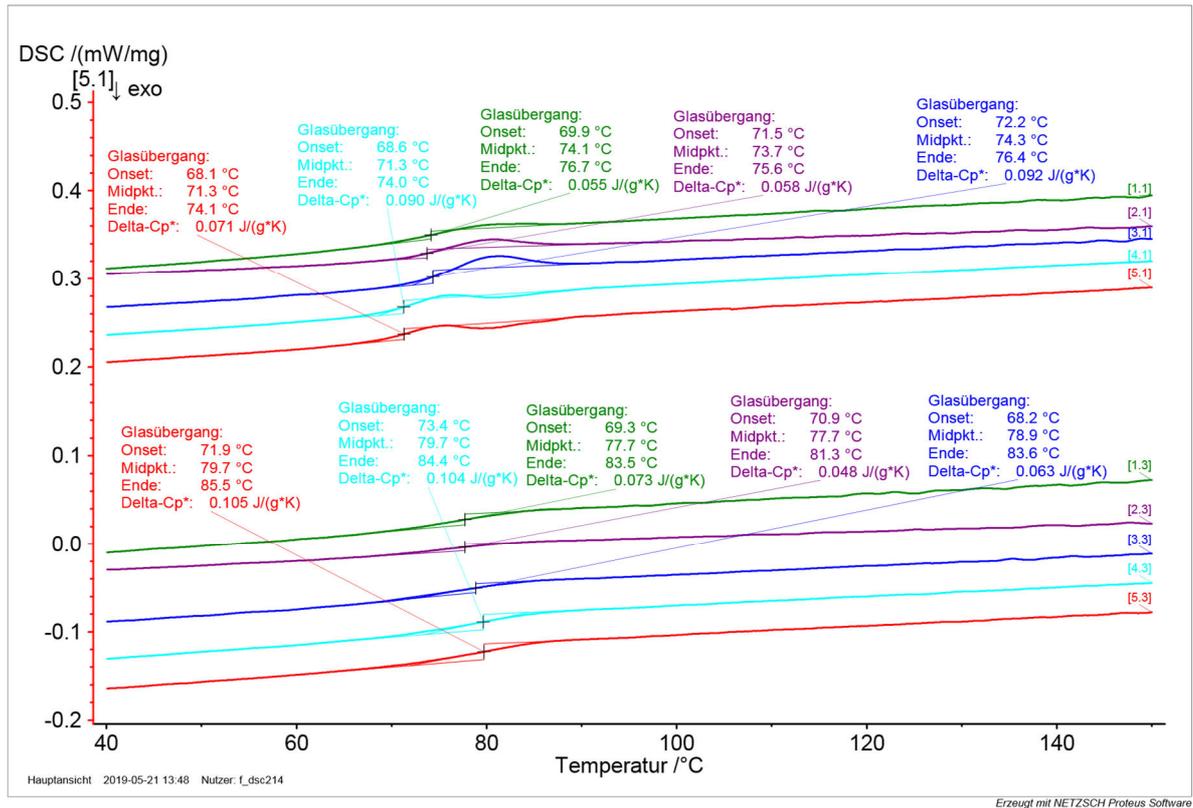


Abbildung D.1: DSC-Kurven der Platte P1

Die Probe 1 der Platte P1 wird für die Mittelwertbildung nicht berücksichtigt, da sie vor dem Testen nicht im Ofen getrocknet wurden. Außerdem wird die Probe 2 der Platte P1 ebenfalls nicht berücksichtigt, da bei der Messung fälschlicherweise 29,6 g statt 19,6 g als Probenmasse eingetragen wurden.

Tabelle D.1: Glasübergangstemperatur Platte P1

Platte; Probe	Probenmasse / mg	Erste Aufheizung				Zweite Aufheizung				Bemerkung
		Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK	Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK	
P1; 1	21,2	69,9	74,1	76,7	0,055	69,3	77,7	83,5	0,073	Nicht getrocknet, aus der Wertung entfernt
P1; 2	19,6	71,5	73,7	75,6	0,058	70,9	77,7	81,3	0,048	Falsche Masse eingetragen (29,6g), aus der Wertung entfernt
P1; 3	21,8	72,2	74,3	76,4	0,092	68,2	78,9	83,6	0,063	
P1; 4	20,5	68,6	71,3	74,0	0,090	73,4	79,7	84,4	0,104	
P1; 5	14,7	68,1	71,3	74,1	0,071	71,9	79,7	85,5	0,105	
Mittelwert		69,6	72,3	74,8		71,2	79,4	84,5		
Standardabweichung		2,2	1,7	1,4		2,7	0,5	1,0		
Variationskoeffizient / %		3,2	2,4	1,8		3,8	0,6	1,1		
Min		68,1	71,3	74,0		68,2	78,9	83,6		
Max		72,2	74,3	76,4		73,4	79,7	85,5		

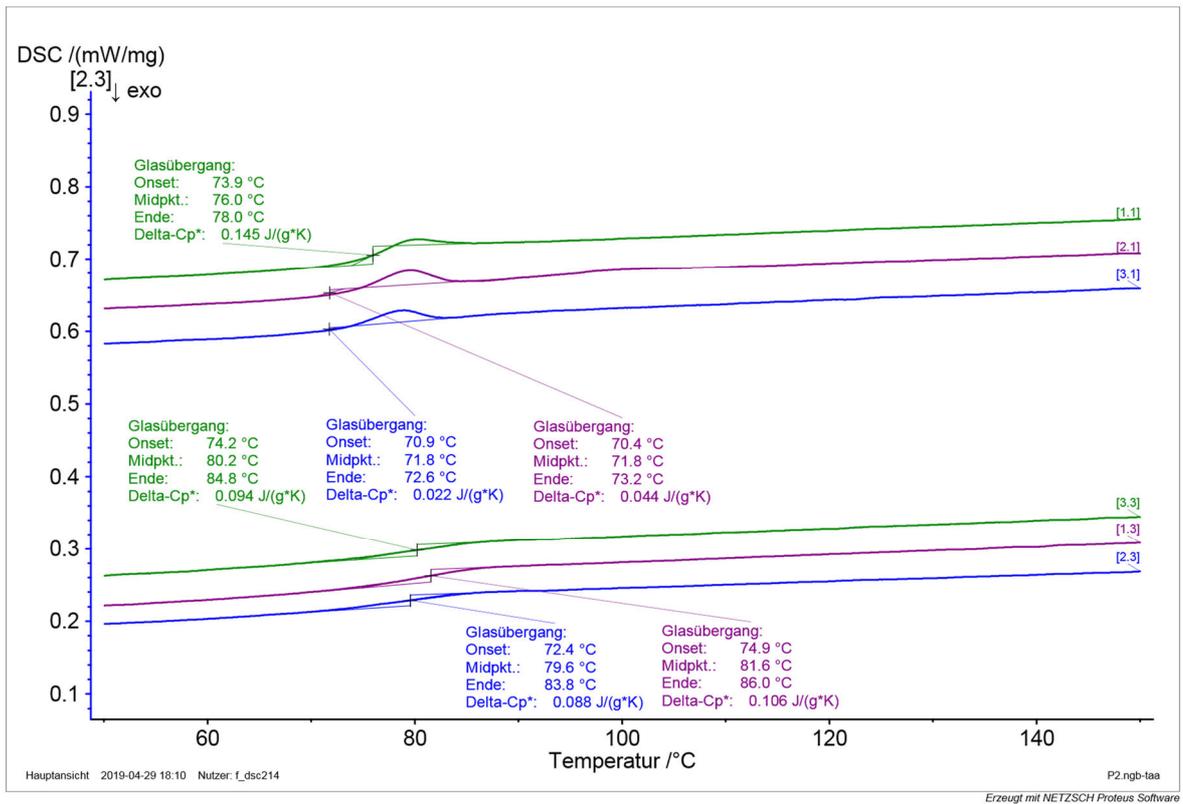


Abbildung D.2: DSC-Kurven der Platte P2

Tabelle D.2: Glasübergangstemperatur Platte P2

Platte; Probe	Probenmasse / mg	Erste Aufheizung				Zweite Aufheizung			
		Tg Onset / °C	TG Midpct / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK	Tg Onset / °C	TG Midpct / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK
P2; 1	19,3	73,9	76,0	78,0	0,145	74,2	80,2	84,8	0,094
P2; 2	17,7	70,4	71,8	73,2	0,044	74,9	81,6	86,0	0,106
P2; 3	8,7	70,9	71,8	72,6	0,022	72,4	79,6	83,8	0,088
Mittelwert		71,7	73,2	74,6		73,8	80,5	84,9	
Standardabweichung		1,9	2,4	3,0		1,3	1,0	1,1	
Variationskoeffizient / %		2,6	3,3	4,0		1,7	1,3	1,3	
Min		70,4	71,8	72,6		72,4	79,6	83,8	
Max		73,9	76,0	78,0		74,9	81,6	86,0	

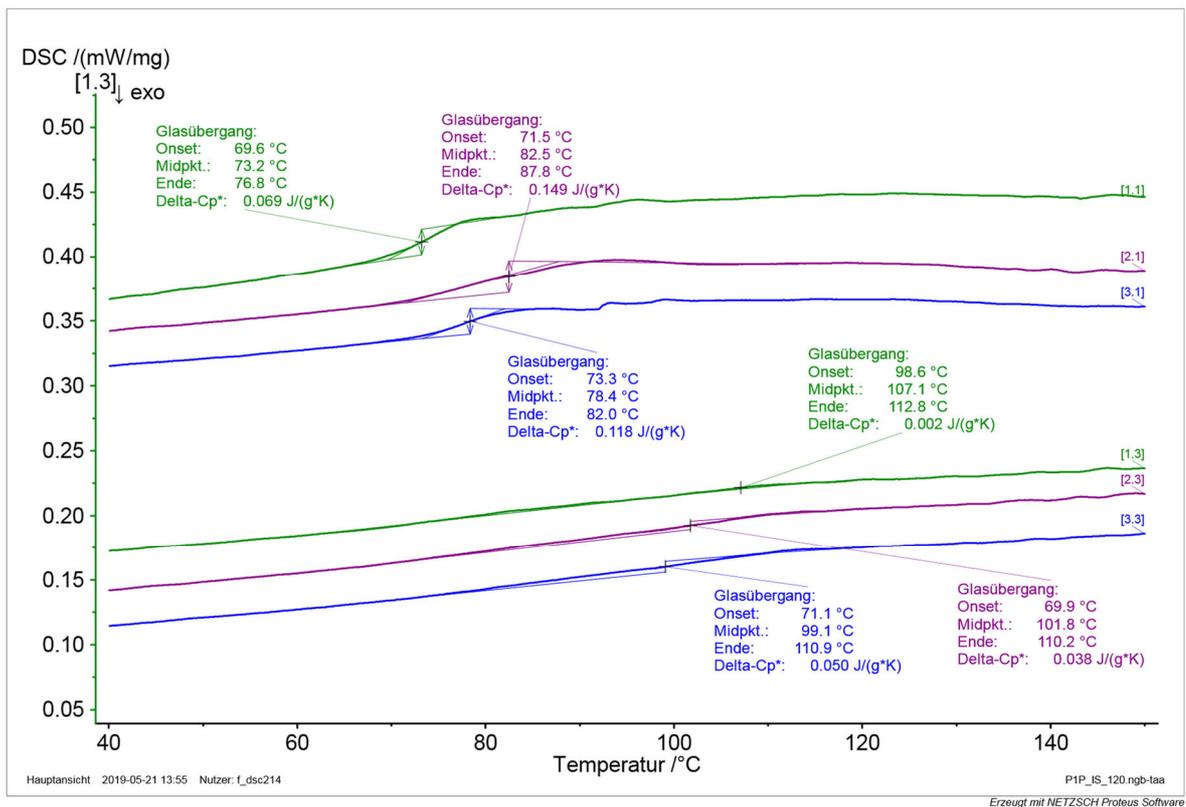


Abbildung D.3: DSC-Kurven der Platte P1P

Tabelle D.3: Glasübergangstemperatur Platte P1P

Platte; Probe	Probenmasse / mg	Erste Aufheizung				Zweite Aufheizung			
		Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK	Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK
P1P; 1	20,1	69,6	73,2	76,8	0,069	98,6	107,1	112,8	0,002
P1P; 2	19,5	71,5	82,5	87,8	0,149	69,9	101,8	110,2	0,038
P1P; 3	17,3	73,3	78,4	82,0	0,118	71,1	99,1	110,9	0,050
Mittelwert		71,5	78,0	82,2		79,9	102,7	111,3	
Standardabweichung		1,9	4,7	5,5		16,2	4,1	1,3	
Variationskoeffizient / %		2,6	6,0	6,7		20,3	4,0	1,2	
Min		69,6	73,2	76,8		69,9	99,1	110,2	
Max		73,3	82,5	87,8		98,6	107,1	112,8	

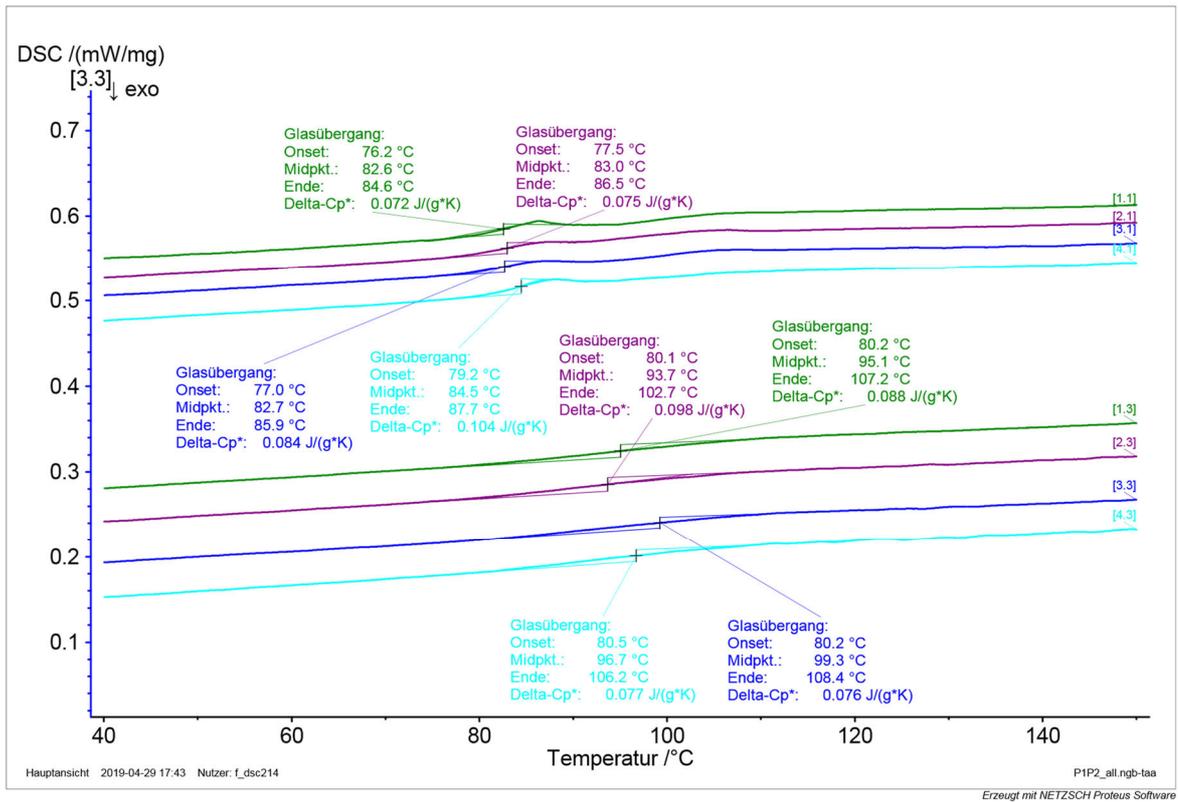


Abbildung D.4: DSC-Kurven der Platte P1P2

Tabelle D.4: Glasübergangstemperatur Platte P1P2

Platte; Probe	Probenmasse / mg	Erste Aufheizung				Zweite Aufheizung			
		Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK	Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK
P1P2; 1	16,2	76,2	82,6	84,6	0,072	80,2	95,1	107,2	0,088
P1P2; 2	16,5	77,5	83,0	86,5	0,075	80,1	93,7	102,7	0,098
P1P2; 3	17,8	77,0	82,7	85,9	0,084	80,2	99,3	108,4	0,076
P1P2; 4	15,8	79,2	84,5	87,7	0,104	80,5	96,7	106,2	0,077
Mittelwert		77,5	83,2	86,2		80,3	96,2	106,1	
Standardabweichung		1,3	0,9	1,3		0,2	2,4	2,5	
Variationskoeffizient / %		1,6	1,1	1,5		0,2	2,5	2,3	
Min		76,2	82,6	84,6		80,1	93,7	102,7	
Max		79,2	84,5	87,7		80,5	99,3	108,4	

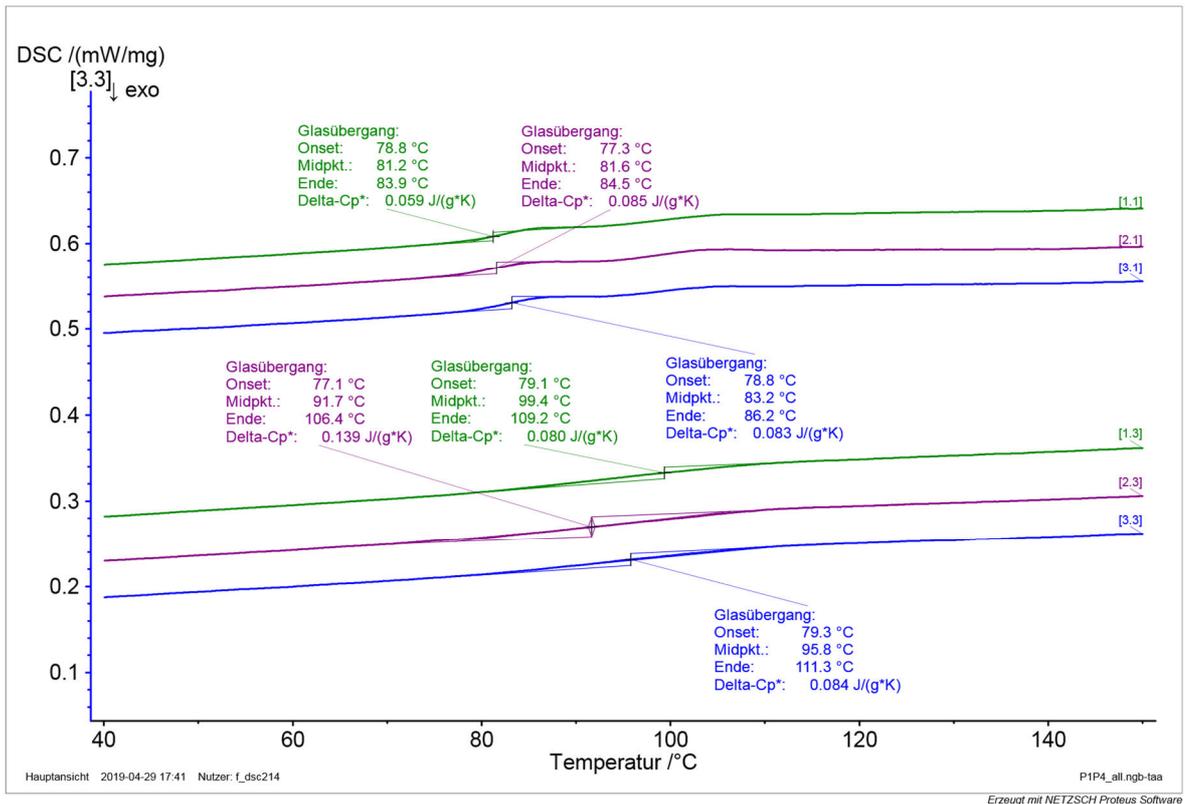


Abbildung D.5: DSC-Kurven der Platte P1P4

Tabelle D.5: Glasübergangstemperatur Platte P1P4

Platte; Probe	Probenmasse / mg	Erste Aufheizung				Zweite Aufheizung			
		Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK	Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK
P1P4; 1	18,9	78,8	81,2	83,9	0,059	79,1	99,4	109,2	0,080
P1P4; 2	17,8	77,3	81,6	84,5	0,085	77,1	91,7	106,4	0,139
P1P4; 3	19,9	78,8	83,2	86,2	0,083	79,3	95,8	111,3	0,084
Mittelwert		78,3	82,0	84,9		78,5	95,6	109,0	
Standardabweichung		0,9	1,1	1,2		1,2	3,9	2,5	
Variationskoeffizient / %		1,1	1,3	1,4		1,5	4,0	2,3	
Min		77,3	81,2	83,9		77,1	91,7	106,4	
Max		78,8	83,2	86,2		79,3	99,4	111,3	

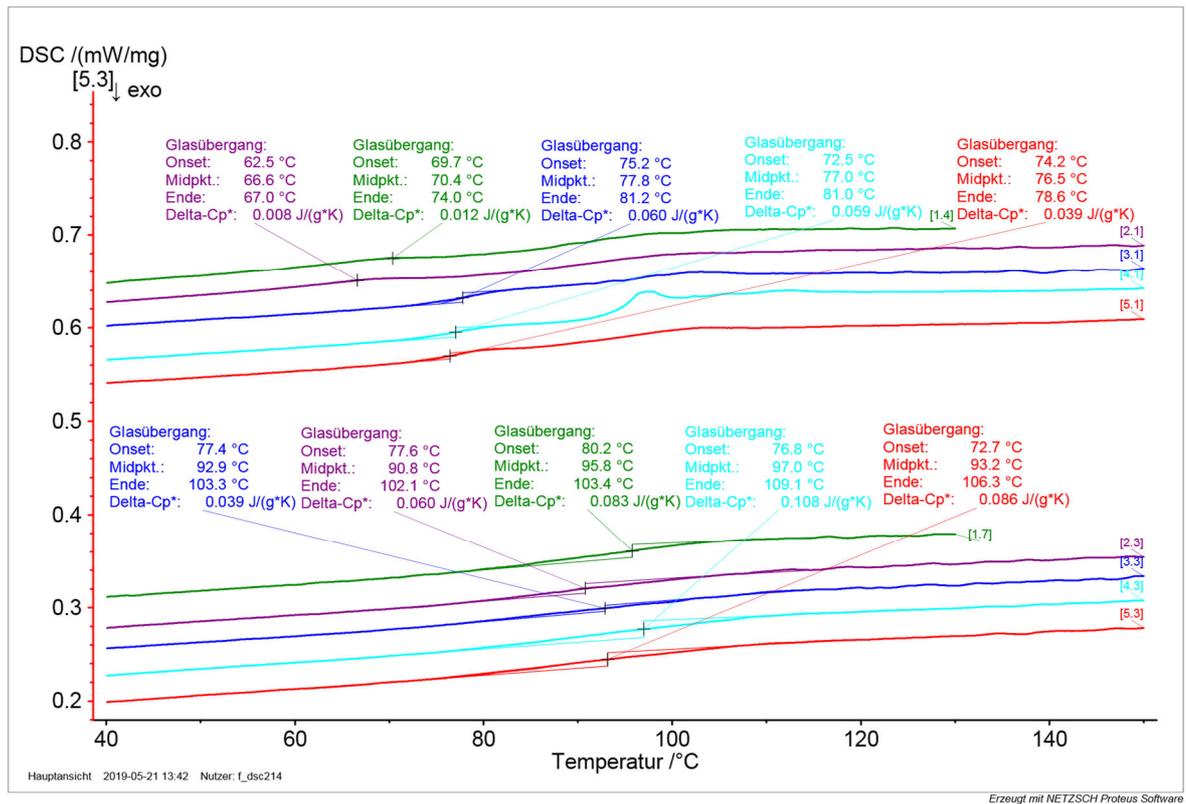


Abbildung D.6: DSC-Kurven der Platte P1P5

Die Proben 1 und 2 der Platte P1P5 werden für die Mittelwertbildung nicht berücksichtigt, da sie vor dem Testen nicht im Ofen getrocknet wurden. Bei den Proben 1 und 2 ist auch ein endothermer Bereich bei etwa 60°C bis 75°C zu sehen, der bei den getrockneten Proben 3 bis 5 nicht vorhanden ist (siehe Abbildung D.6)

Tabelle D.6: Glasübergangstemperatur Platte P1P5

Platte; Probe	Probenmasse / mg	Erste Aufheizung				Zweite Aufheizung				Bemerkung
		Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta-Cp / J/gK	Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta-Cp / J/gK	
PIP5; 1	19,4	69,7	70,4	74,0	0,012	80,2	95,8	103,4	0,083	Nicht getrocknet, aus der Wertung entfernt
PIP5; 2	19,5	62,5	66,6	67,0	0,008	77,6	90,8	102,1	0,060	Nicht getrocknet, aus der Wertung entfernt
PIP5; 3	21,6	75,2	77,8	81,2	0,060	77,4	92,9	103,3	0,039	
PIP5; 4	18,4	72,5	77,0	81,0	0,059	76,8	97,0	109,1	0,108	
PIP5; 5	17,5	74,2	76,5	78,6	0,039	72,7	93,2	106,3	0,086	
Mittelwert		74,0	77,1	80,3		75,6	94,4	106,2		
Standardabweichung		1,4	0,7	1,4		2,6	2,3	2,9		
Variationskoeffizient / %		1,8	0,9	1,8		3,4	2,4	2,7		
Min		72,5	76,5	78,6		72,7	92,9	103,3		
Max		75,2	77,8	81,2		77,4	97,0	109,1		

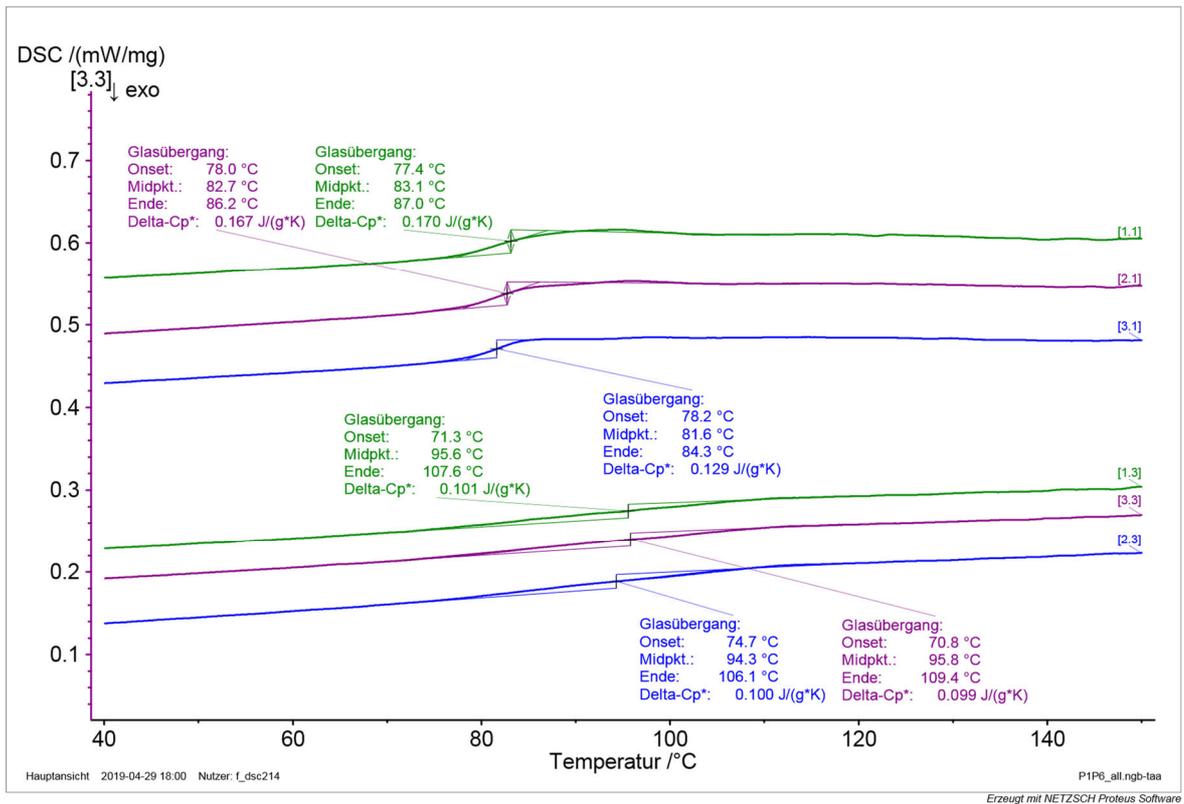


Abbildung D.7: DSC-Kurven der Platte P1P6

Tabelle D.7: Glasübergangstemperatur Platte P1P6

Platte; Probe	Probenmasse / mg	Erste Aufheizung				Zweite Aufheizung			
		Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK	Tg Onset / °C	TG Midpkt / °C	TG Ende / °C	Delta- Cp / J/gK
P1P6; 1	20,4	77,4	83,1	87,0	0,170	71,3	95,6	107,6	0,101
P1P6; 2	20,5	78,0	82,7	86,2	0,167	70,8	95,8	109,4	0,099
P1P6; 3	18,4	78,2	81,6	84,3	0,129	74,7	94,3	106,1	0,100
Mittelwert		77,9	82,5	85,8		72,3	95,2	107,7	
Standardabweichung		0,4	0,8	1,4		2,1	0,8	1,7	
Variationskoeffizient / %		0,5	0,9	1,6		2,9	0,9	1,5	
Min		77,4	81,6	84,3		70,8	94,3	106,1	
Max		78,2	83,1	87,0		74,7	95,8	109,4	

E Mikroskopbilder

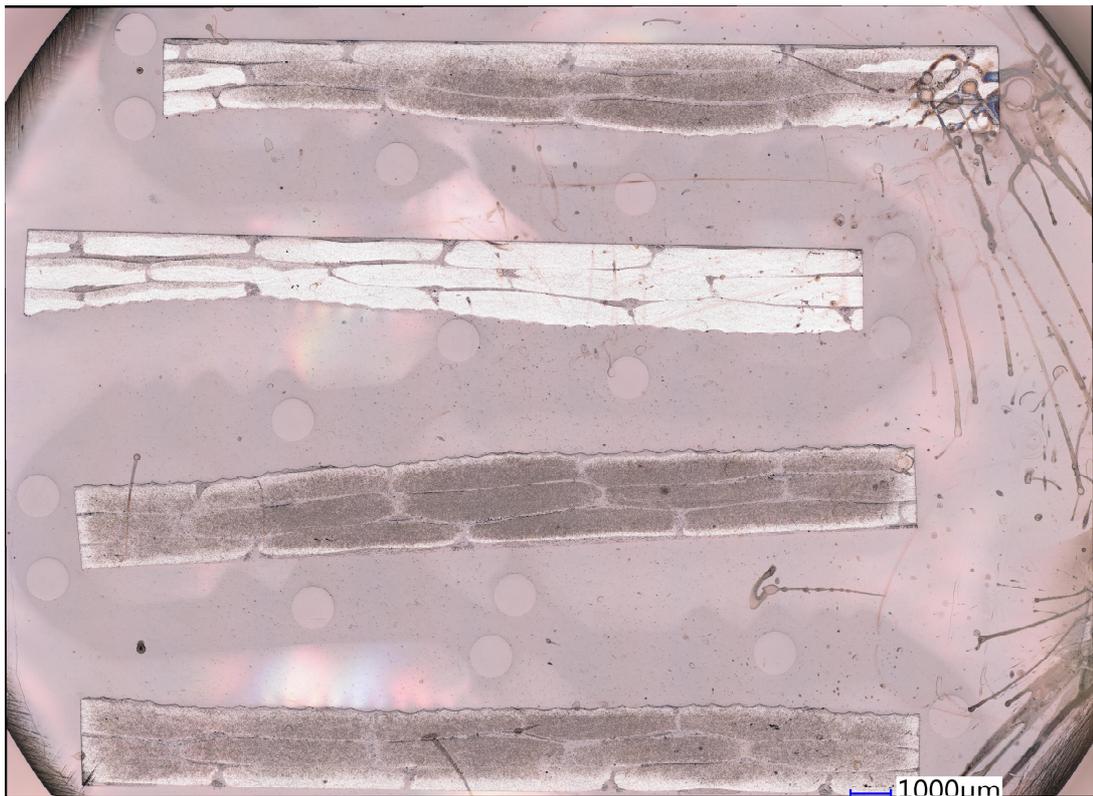


Abbildung E.1: Schliffbild Platte P1

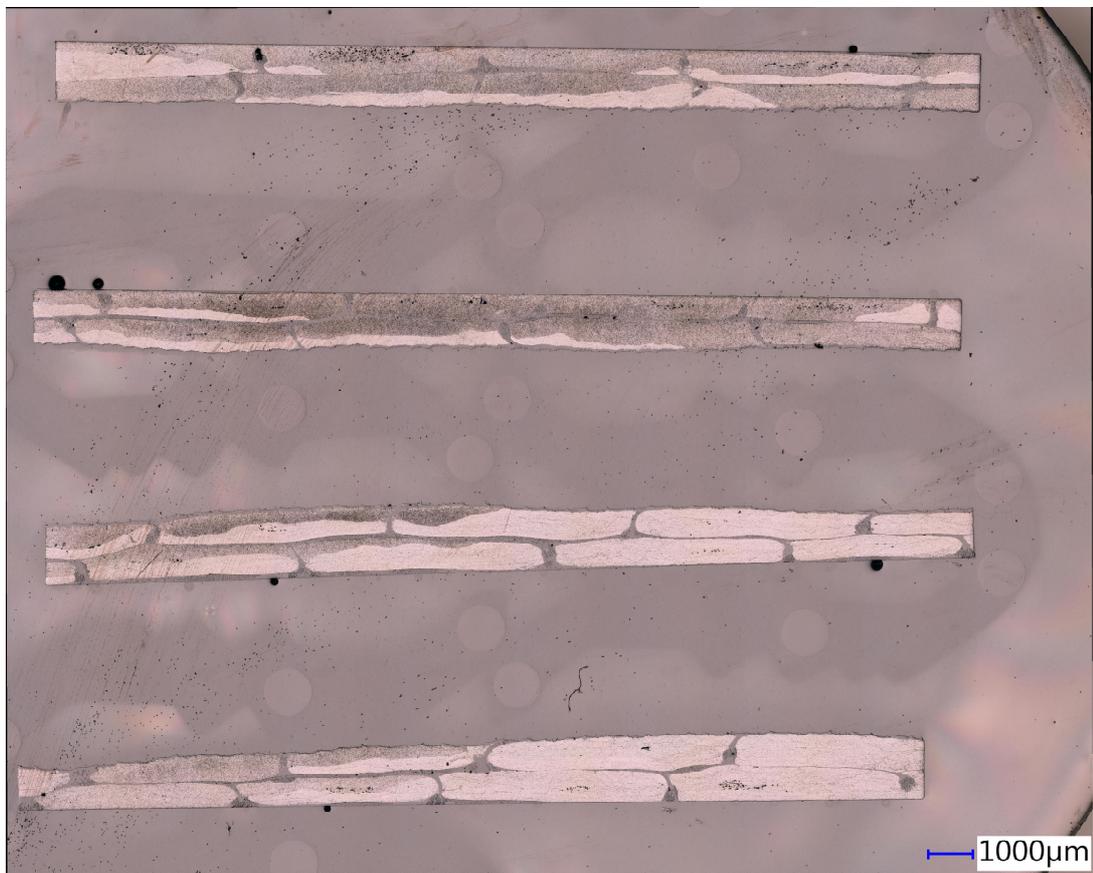


Abbildung E.2: Schliffbild Platte P2

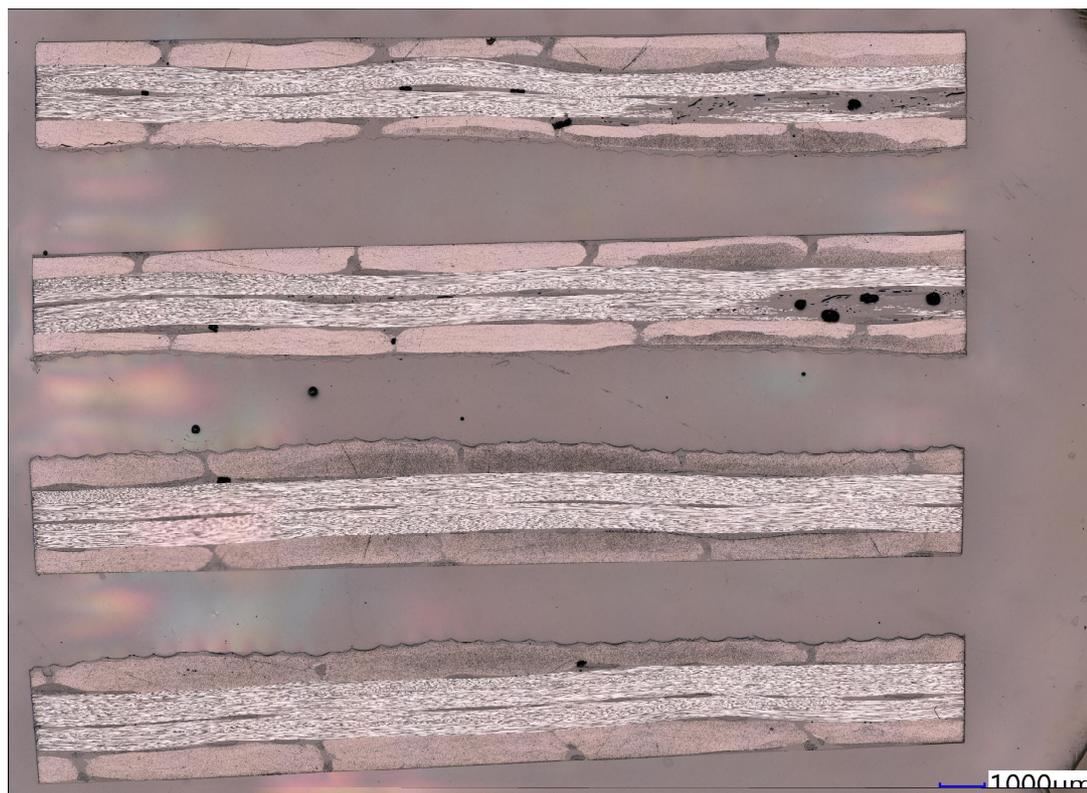


Abbildung E.3: Schliffbild Platte P3

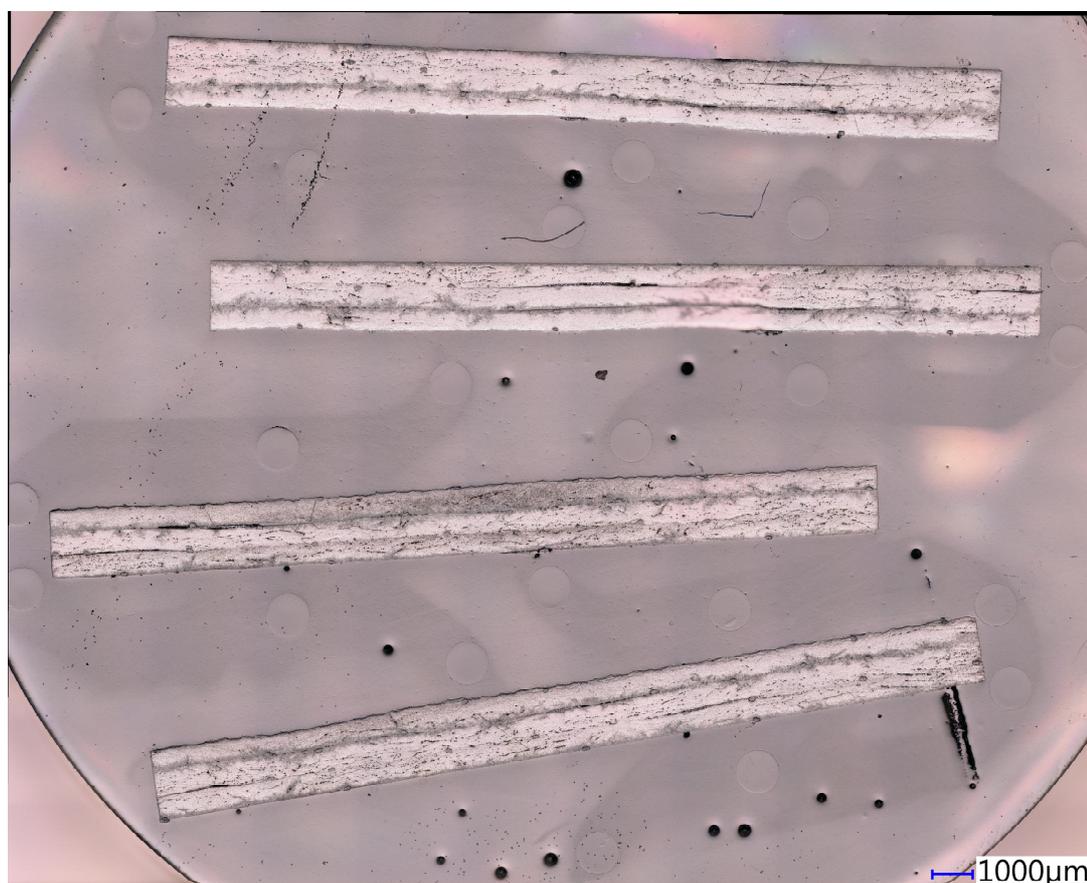


Abbildung E.4: Schliffbild Platte P1P

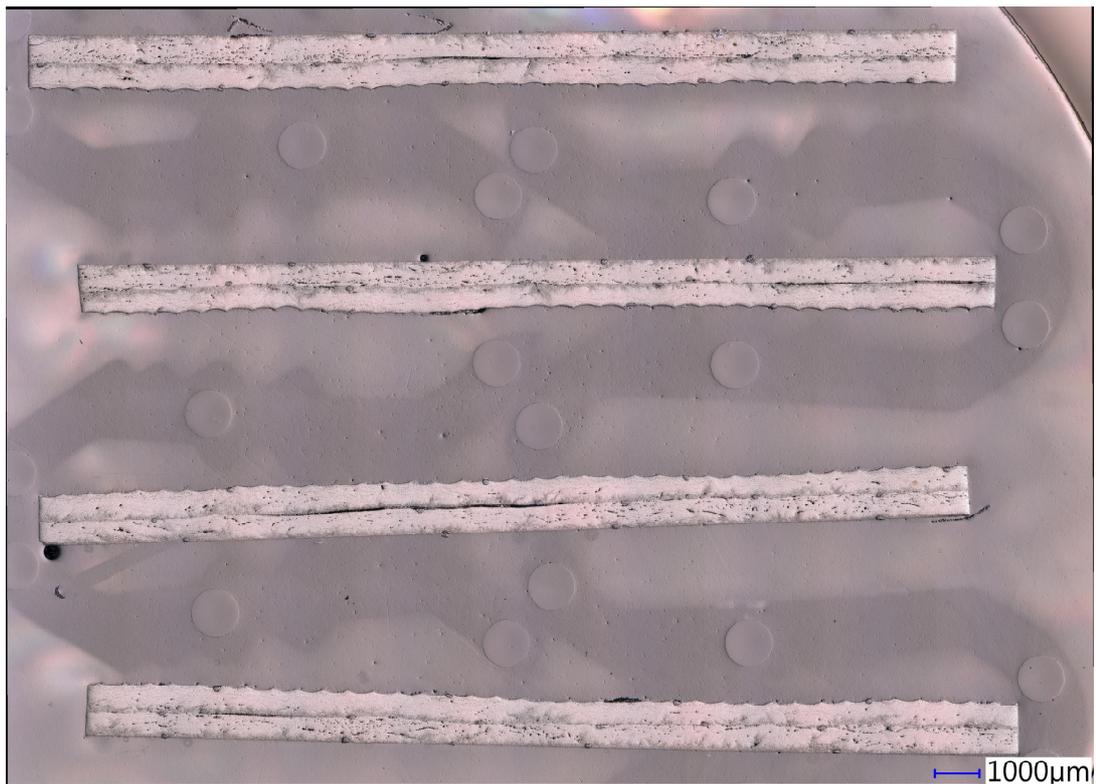


Abbildung E.5: Schliffbild Platte P2P

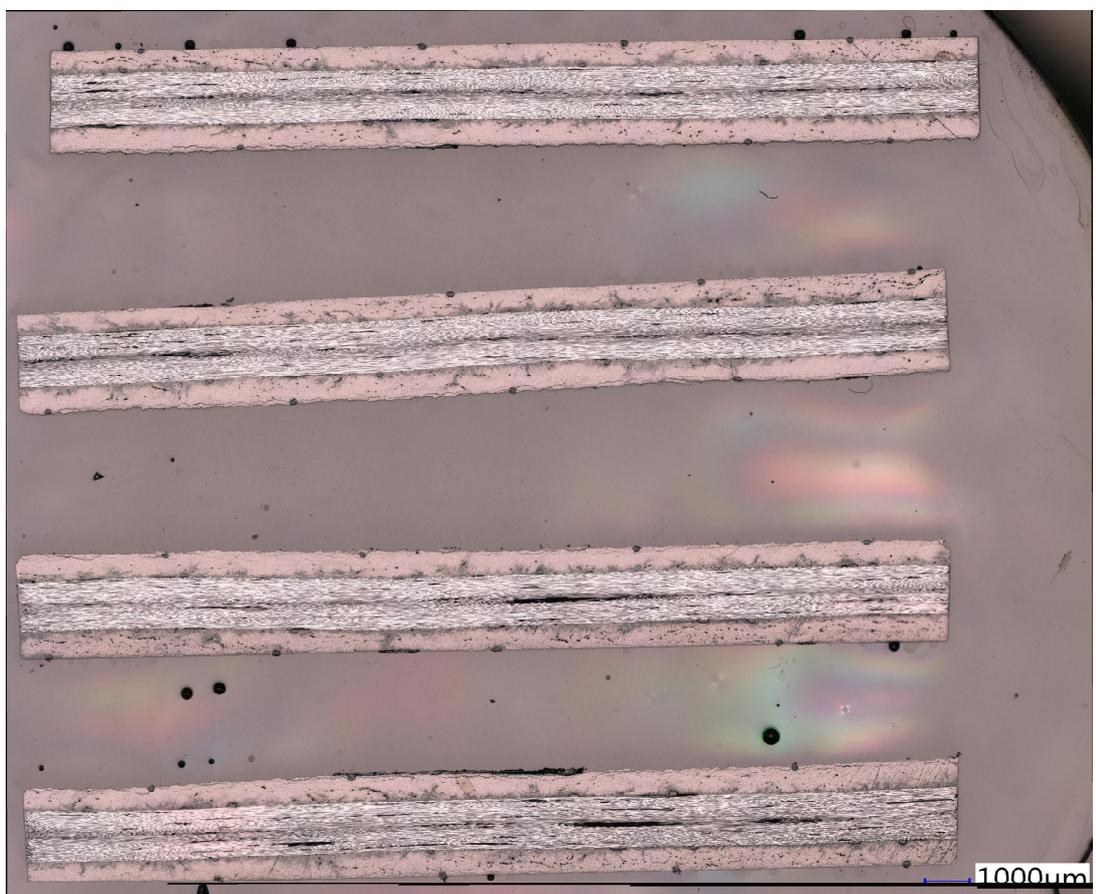


Abbildung E.6: Schliffbild Platte P3P

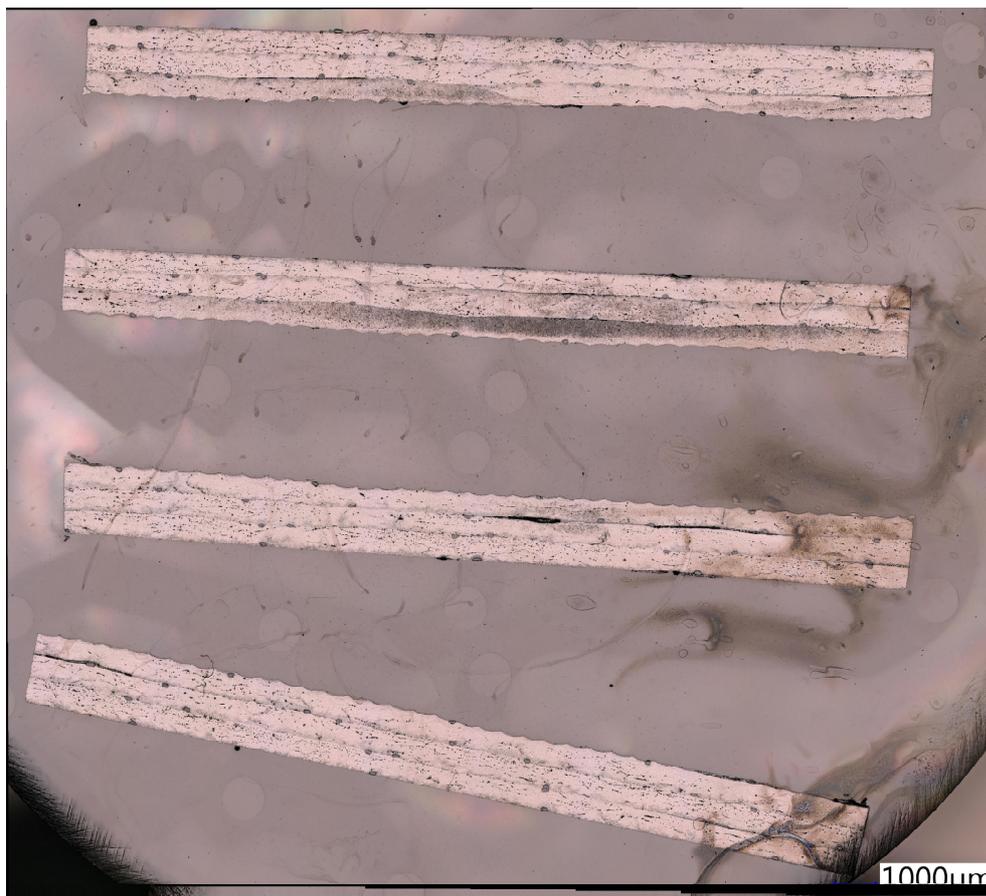


Abbildung E.7: Schliffbild Platte P1P2

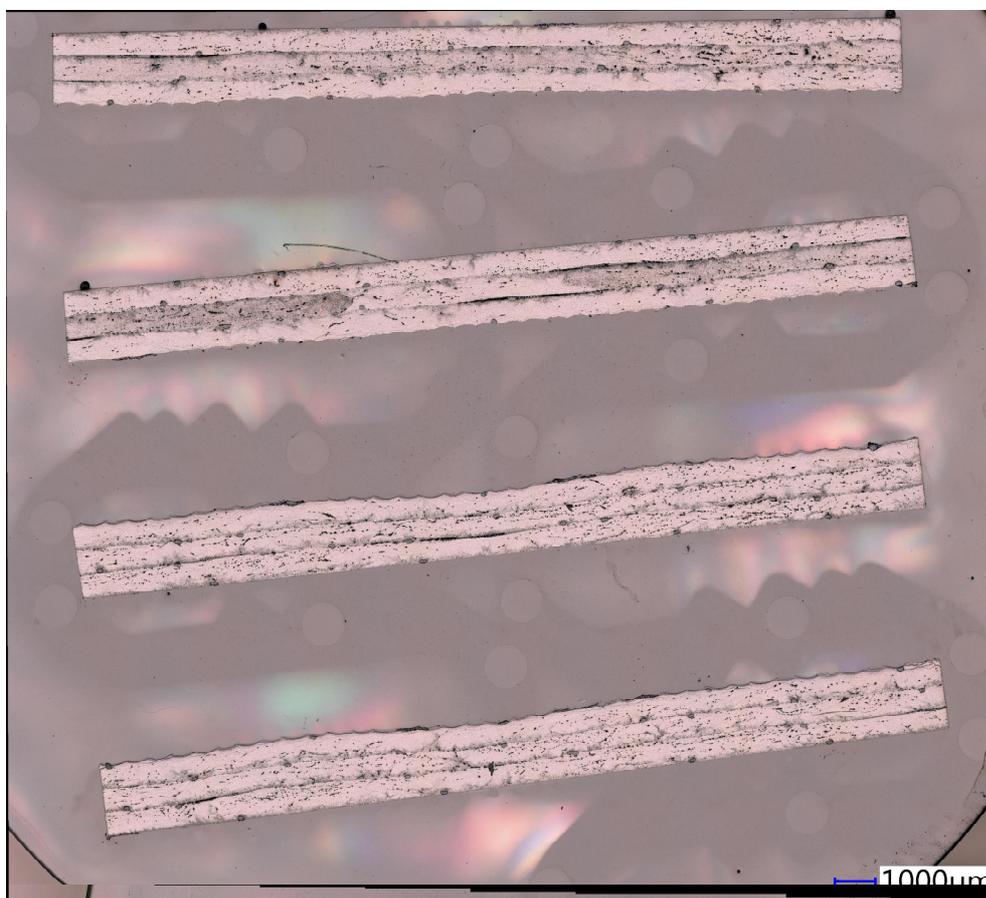


Abbildung E.8: Schliffbild Platte P1P3

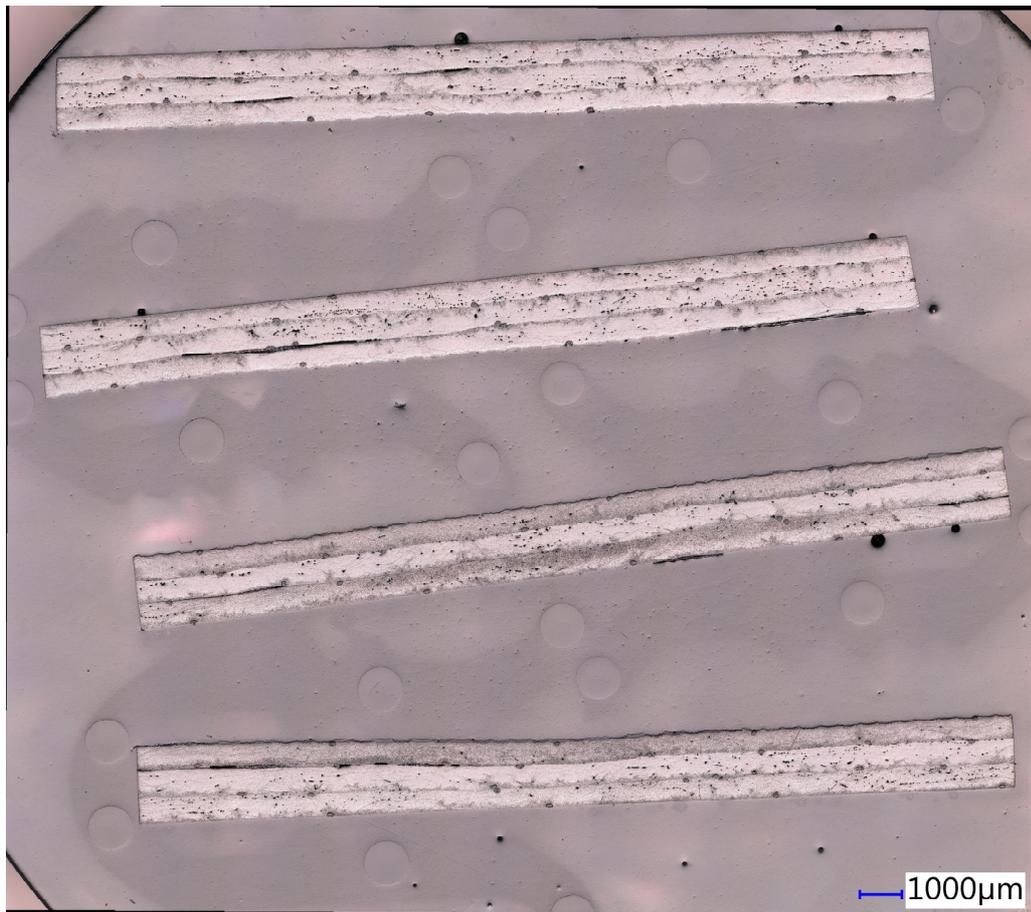


Abbildung E.9: Schliffbild Platte P1P4

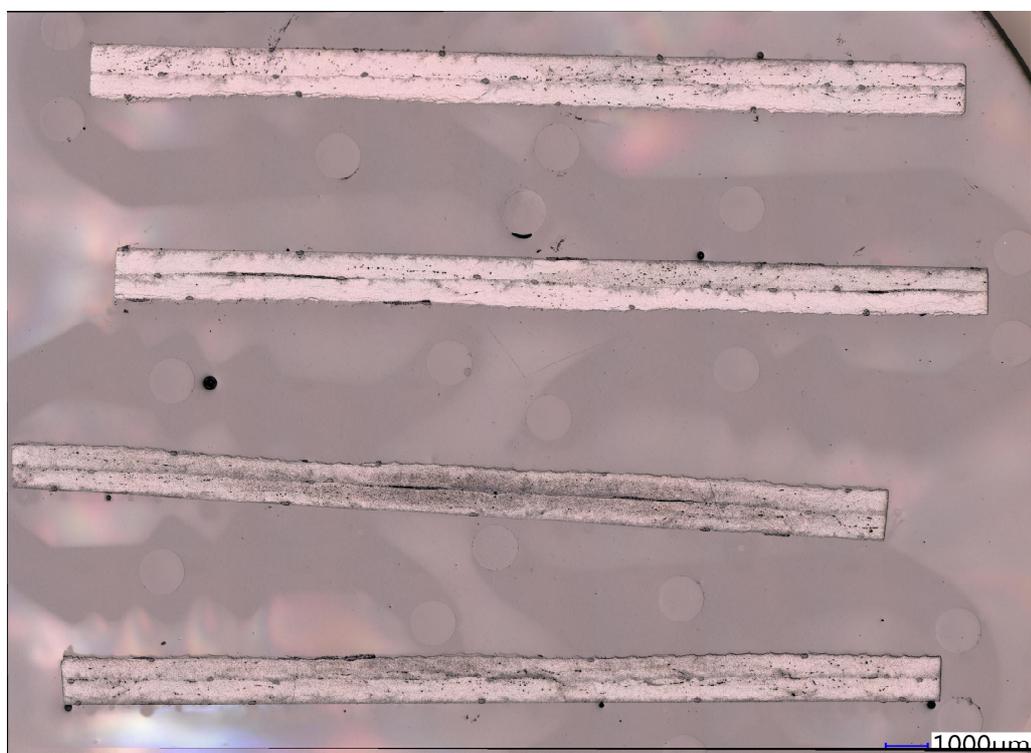


Abbildung E.10: Schliffbild Platte P2P4

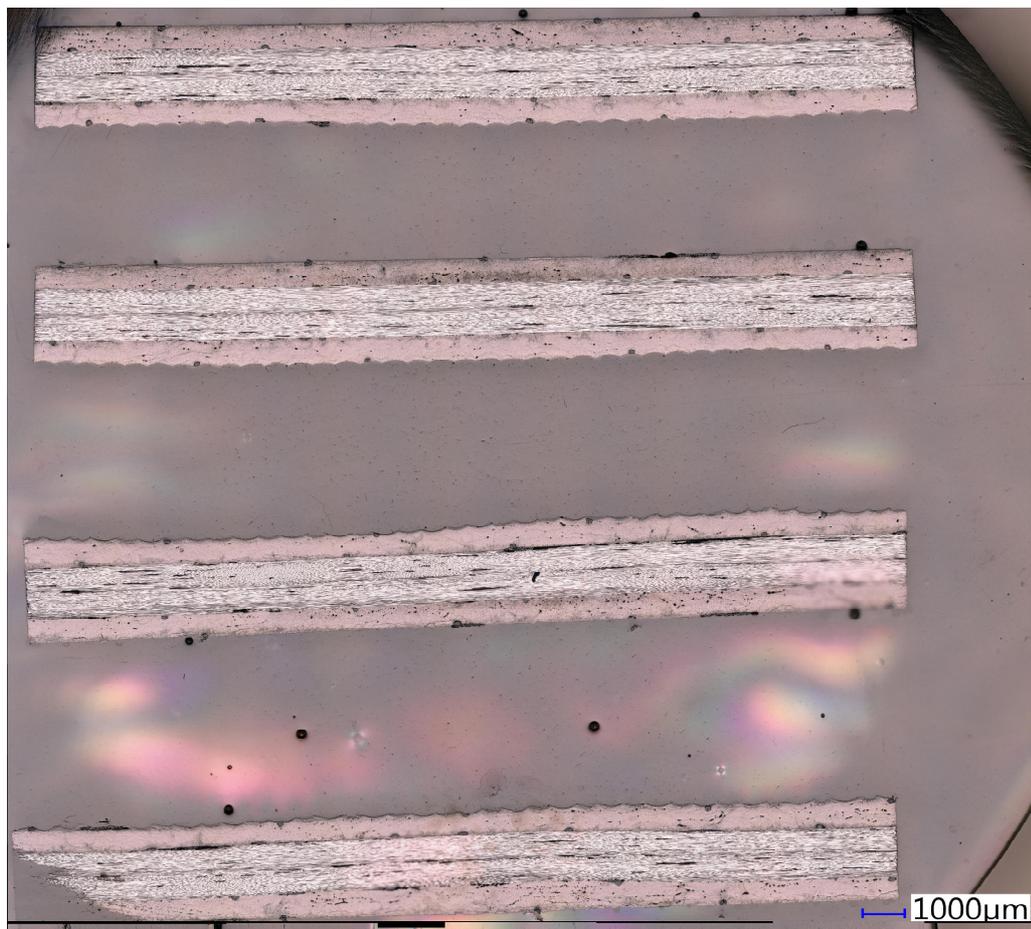


Abbildung E.11: Schliffbild Platte P3P4

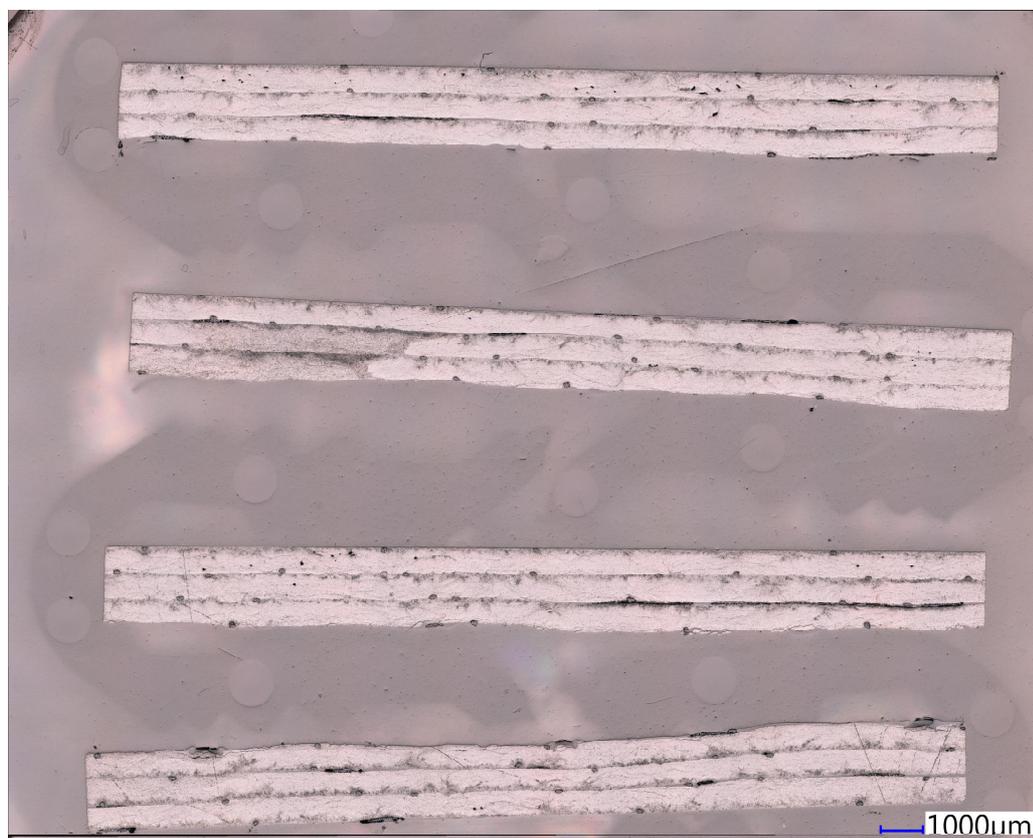


Abbildung E.12: Schliffbild Platte P1P5

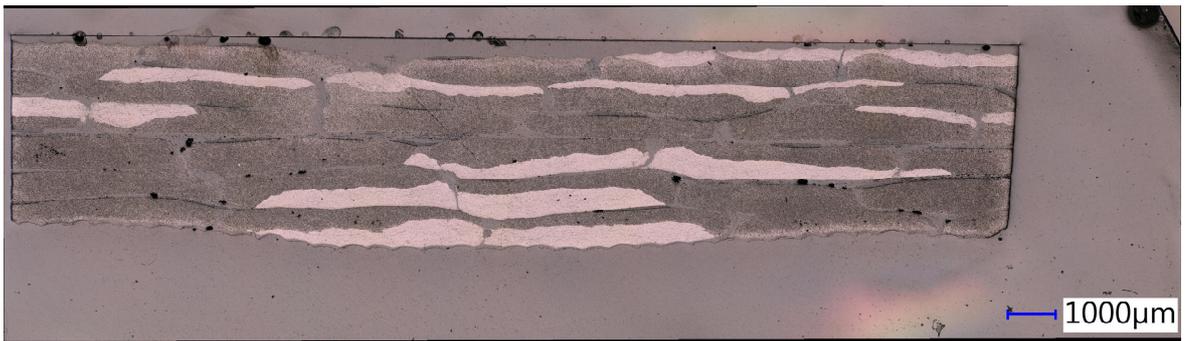


Abbildung E.13: Schliffbild Platte P4A Probe 1

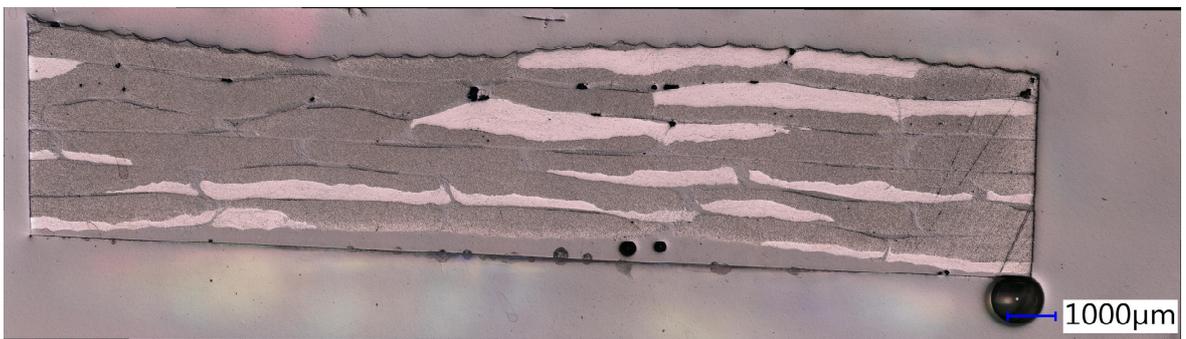


Abbildung E.14: Schliffbild Platte P4A Probe 2



Abbildung E.15: Schliffbild Platte P4A Probe 3



Abbildung E.16: Schliffbild Platte P4A Probe 4

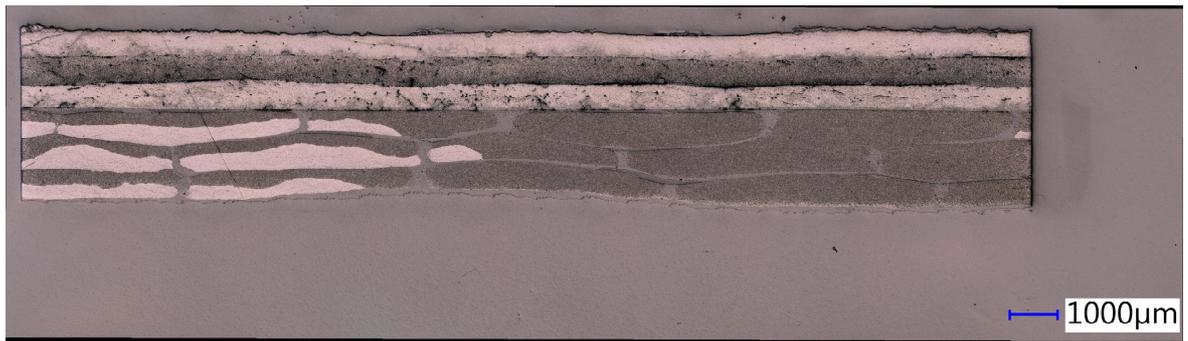


Abbildung E.17: Schliffbild Platte P5A Probe 1



Abbildung E.18: Schliffbild Platte P5A Probe 2

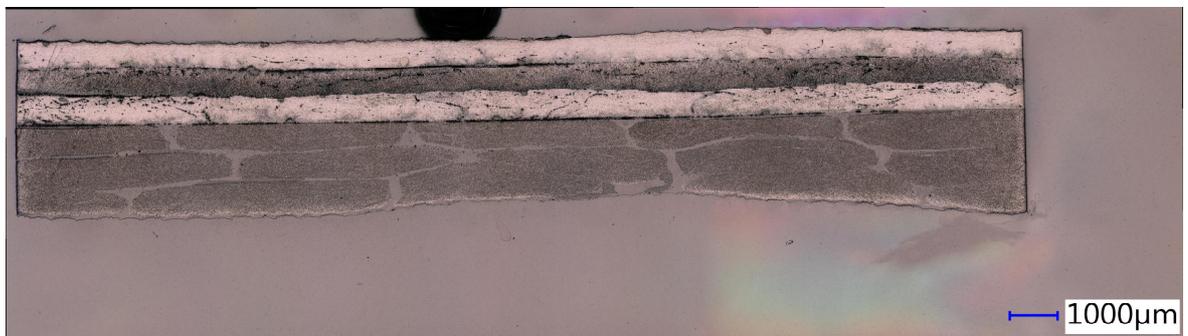


Abbildung E.19: Schliffbild Platte P5A Probe 3

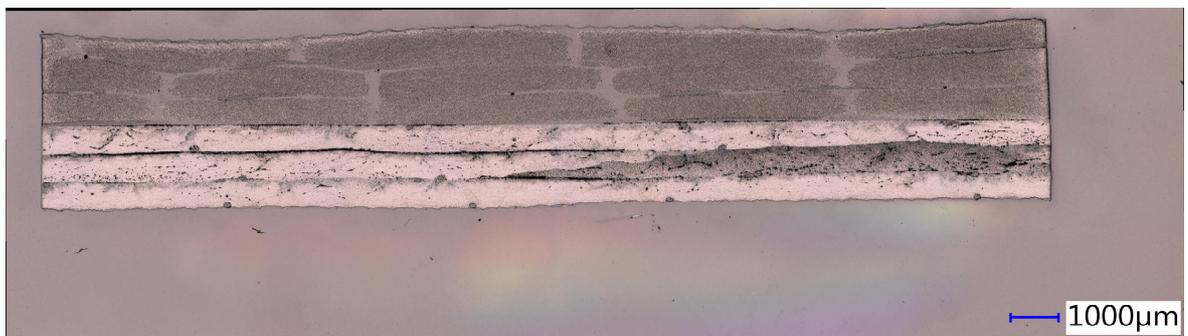


Abbildung E.20: Schliffbild Platte P5A Probe 4

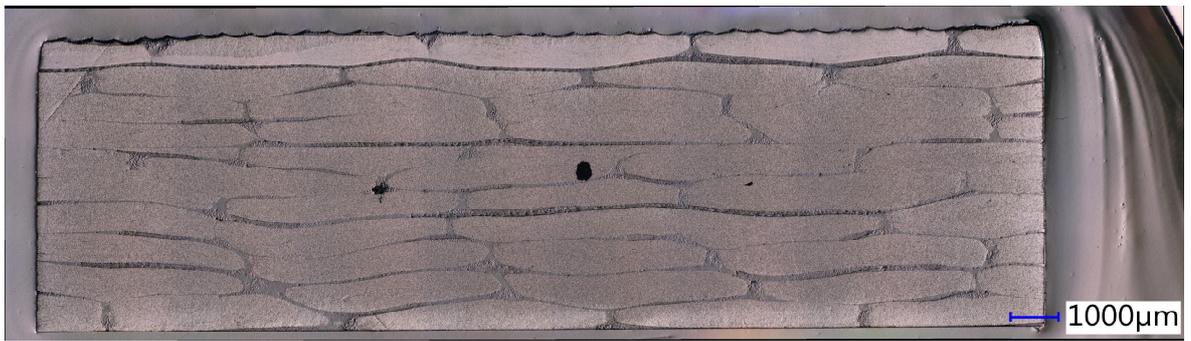


Abbildung E.21: Schliffbild Platte P6A Probe 1

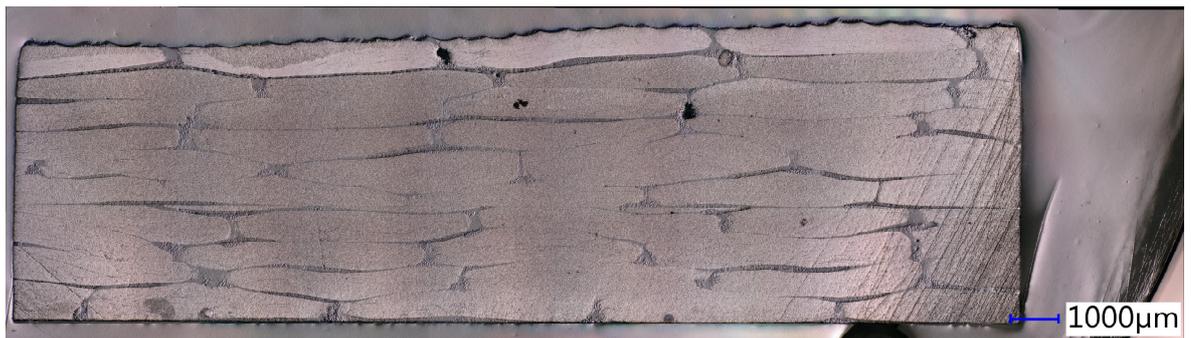


Abbildung E.22: Schliffbild Platte P6A Probe 2



Abbildung E.23: Schliffbild Platte P7A Probe 1



Abbildung E.24: Schliffbild Platte P7A Probe 2

F Ergebnisse der Faservolumengehalt Bestimmung**Tabelle F.1: Faservolumengehalt Messungen (1/4)**

Probe	Feinwaage			Messschieber										Mittleres Gewicht / g	Mittlere Breite / mm	Mittlere Länge / mm	Mittlere Dicke / mm	Volumen / mm ³	Faservolumenanteil / %	Mittelwert / %	Stabw. / %
	Gewicht / g			Breite / mm		Länge / mm			Dicke / mm												
	1	2	3	oben	unten	links	mitte	rechts	links	2	3	4	rechts								
P1 1	0,5803	0,5803	0,5803	19,80	19,82	9,77	9,77	9,80	2,04	2,01	2,04	2,07	1,99	0,5803	19,81	9,78	2,03	393	53,2	55,3	3,6
P1 2	0,6050	0,6050	0,6050	19,80	19,83	9,82	9,81	9,83	2,02	2,02	2,22	1,97	1,87	0,6050	19,82	9,82	2,02	393	63,0		
P1 3	0,6010	0,6012	0,6010	19,82	19,85	9,96	9,95	9,95	2,02	1,97	2,00	2,13	2,05	0,6011	19,84	9,95	2,03	402	56,4		
P1 4	0,6232	0,6232	0,6232	19,89	19,92	9,95	9,94	9,94	1,99	2,07	2,25	2,11	2,05	0,6232	19,91	9,94	2,09	414	57,5		
P1 5	0,5510	0,5509	0,5509	19,82	19,88	9,93	9,94	9,92	2,07	2,03	1,90	1,58	2,01	0,5509	19,85	9,93	1,92	378	50,3		
P1 6	0,5677	0,5678	0,5677	19,81	19,79	9,95	9,94	9,94	2,00	2,07	1,98	1,73	1,77	0,5677	19,80	9,94	1,91	376	58,4		
P1 7	0,5476	0,5476	0,5476	19,83	19,85	9,95	9,94	9,94	2,08	2,01	1,75	1,53	1,87	0,5476	19,84	9,94	1,85	365	57,2		
P1 8	0,5714	0,5714	0,5714	19,84	19,80	9,94	9,95	9,95	2,06	2,01	2,03	1,79	1,73	0,5714	19,82	9,95	1,92	379	57,9		
P1 9	0,5541	0,5542	0,5541	19,63	19,56	9,91	9,92	9,93	2,20	1,99	1,96	1,65	1,90	0,5541	19,60	9,92	1,94	377	52,2		
P1 10	0,6124	0,6123	0,6124	19,78	19,79	9,95	9,96	9,94	2,25	2,11	1,86	2,07	2,27	0,6124	19,79	9,95	2,11	416	52,7		
P1 11	0,5582	0,5583	0,5582	19,70	19,73	9,91	9,91	9,92	2,23	2,02	1,90	1,63	1,90	0,5582	19,72	9,91	1,94	378	53,1		
P1 12	0,6105	0,6104	0,6105	19,86	19,87	9,95	9,95	9,96	2,28	2,08	1,81	2,08	2,26	0,6105	19,87	9,95	2,10	416	52,1		
PIP 1	0,4840	0,4840	0,4840	19,81	19,82	9,98	9,98	9,98	1,62	1,68	1,61	1,62	1,59	0,4840	19,82	9,98	1,62	321	56,3	55,9	1,2
PIP 2	0,4847	0,4846	0,4846	19,90	19,89	9,98	9,97	9,98	1,66	1,62	1,61	1,62	1,63	0,4846	19,90	9,98	1,63	323	55,2		
PIP 3	0,4832	0,4832	0,4832	19,80	19,80	9,96	9,97	9,97	1,69	1,62	1,61	1,62	1,59	0,4832	19,80	9,97	1,63	321	56,1		
PIP 4	0,4780	0,4781	0,4780	19,70	19,77	9,94	9,94	9,93	1,66	1,62	1,63	1,64	1,63	0,4780	19,74	9,94	1,64	321	53,7		
PIP 5	0,4820	0,4821	0,4821	19,85	19,86	9,96	9,95	9,96	1,68	1,59	1,59	1,64	1,59	0,4821	19,86	9,96	1,62	320	56,3		
PIP 6	0,4842	0,4843	0,4843	19,87	19,88	9,97	9,98	9,94	1,68	1,60	1,57	1,56	1,64	0,4843	19,88	9,96	1,61	319	58,1		
PIP 7	0,4771	0,4772	0,4771	19,67	19,65	9,94	9,94	9,95	1,66	1,62	1,57	1,65	1,62	0,4771	19,66	9,94	1,62	317	55,7		
PIP 8	0,4814	0,4815	0,4814	19,75	19,77	9,95	9,95	9,95	1,69	1,68	1,56	1,58	1,62	0,4814	19,76	9,95	1,63	320	56,1		
PIP2 1	0,5135	0,5134	0,5135	19,87	19,90	10,18	10,19	10,20	1,70	1,70	1,69	1,68	1,71	0,5135	19,89	10,19	1,70	344	54,3	54,0	1,4
PIP2 2	0,4990	0,4991	0,4991	19,91	19,93	10,21	10,20	10,21	1,73	1,66	1,62	1,63	1,65	0,4991	19,92	10,21	1,66	337	52,3		
PIP2 3	0,5176	0,5177	0,5177	19,94	19,94	10,26	10,25	10,24	1,70	1,71	1,67	1,69	1,70	0,5177	19,94	10,25	1,69	346	54,5		
PIP2 4	0,5034	0,5034	0,5034	19,97	19,98	10,23	10,23	10,23	1,73	1,62	1,61	1,64	1,68	0,5034	19,98	10,23	1,66	338	53,4		
PIP2 5	0,4924	0,4925	0,4925	19,94	19,94	10,00	10,00	10,01	1,69	1,74	1,70	1,58	1,53	0,4925	19,94	10,00	1,65	329	54,9		
PIP2 6	0,4932	0,4932	0,4932	19,93	19,95	10,01	10,00	9,99	1,73	1,61	1,62	1,70	1,67	0,4932	19,94	10,00	1,67	332	52,9		
PIP2 7	0,4915	0,4916	0,4915	19,95	19,93	10,01	10,00	9,98	1,68	1,68	1,72	1,67	1,56	0,4915	19,94	10,00	1,66	331	52,8		
PIP2 8	0,4911	0,4911	0,4911	19,91	19,91	10,00	9,99	10,00	1,68	1,58	1,63	1,65	1,64	0,4911	19,91	10,00	1,64	326	56,4		

Tabelle F.2: Faservolumengehalt Messungen (2/4)

Probe	Feinwaage			Messschieber										Mittleres Gewicht / g	Mittlere Breite / mm	Mittlere Länge / mm	Mittlere Dicke / mm	Volumen / mm ³	Faservolumenanteil / %	Mittelwert / %	Stabw. / %
	Gewicht / g			Breite / mm		Länge / mm			Dicke / mm												
	1	2	3	oben	unten	links	mitte	rechts	links	2	3	4	rechts								
PIP3 1	0,5013	0,5013	0,5013	19,95	19,95	10,04	10,05	10,06	1,71	1,68	1,62	1,64	1,66	0,5013	19,95	10,05	1,66	333	55,9	54,2	1,8
PIP3 2	0,5186	0,5187	0,5187	19,96	19,96	10,05	10,05	10,06	1,75	1,70	1,67	1,71	1,69	0,5187	19,96	10,05	1,70	342	57,7		
PIP3 3	0,5072	0,5073	0,5072	19,96	19,97	10,12	10,14	10,14	1,71	1,65	1,64	1,69	1,71	0,5072	19,97	10,13	1,68	340	54,1		
PIP3 4	0,5218	0,5219	0,5218	20,00	19,99	10,14	10,14	10,14	1,73	1,75	1,69	1,70	1,70	0,5218	20,00	10,14	1,71	348	55,5		
PIP3 5	0,5034	0,5035	0,5035	19,90	19,89	10,06	10,06	10,07	1,73	1,74	1,55	1,77	1,66	0,5035	19,90	10,06	1,69	338	53,4		
PIP3 6	0,5043	0,5043	0,5044	20,01	19,97	10,08	10,09	10,10	1,75	1,75	1,56	1,72	1,64	0,5043	19,99	10,09	1,68	340	53,0		
PIP3 7	0,5039	0,5041	0,5040	19,95	19,96	10,05	10,06	10,06	1,76	1,77	1,57	1,71	1,64	0,5040	19,96	10,06	1,69	339	53,1		
PIP3 8	0,5032	0,5033	0,5033	19,96	19,96	10,04	10,04	10,05	1,74	1,76	1,58	1,74	1,65	0,5033	19,96	10,04	1,69	340	52,5		
PIP3 9	0,4997	0,4997	0,4998	19,92	19,91	10,02	10,04	10,05	1,73	1,74	1,59	1,73	1,64	0,4997	19,92	10,04	1,69	337	52,7		
PIP4 1	0,5058	0,5059	0,5058	19,82	19,77	9,99	9,99	10,00	1,69	1,63	1,72	1,70	1,71	0,5058	19,80	9,99	1,69	334	57,2	56,1	2,2
PIP4 2	0,5096	0,5095	0,5096	19,86	19,86	10,01	10,01	10,02	1,76	1,79	1,69	1,61	1,63	0,5096	19,86	10,01	1,70	337	56,8		
PIP4 3	0,5134	0,5135	0,5135	19,88	19,85	9,98	9,97	9,98	1,70	1,69	1,70	1,70	1,73	0,5135	19,87	9,98	1,70	338	58,3		
PIP4 4	0,5069	0,5069	0,5069	19,88	19,87	9,98	9,96	9,97	1,71	1,78	1,67	1,61	1,63	0,5069	19,88	9,97	1,68	333	58,6		
PIP4 5	0,5067	0,5067	0,5067	19,84	19,87	9,98	9,98	9,99	1,68	1,78	1,73	1,69	1,71	0,5067	19,86	9,98	1,72	341	53,4		
PIP4 6	0,5092	0,5093	0,5092	19,87	19,86	9,98	9,98	9,98	1,73	1,68	1,57	1,70	1,84	0,5092	19,87	9,98	1,70	338	56,3		
PIP4 7	0,5088	0,5087	0,5088	19,89	19,87	9,95	9,94	9,95	1,69	1,79	1,71	1,68	1,71	0,5088	19,88	9,95	1,72	339	55,1		
PIP4 8	0,5049	0,5049	0,5049	19,88	19,88	9,96	9,95	9,96	1,87	1,76	1,56	1,67	1,74	0,5049	19,88	9,96	1,72	340	52,7		
PIP5 1	0,5408	0,5409	0,5409	19,92	19,92	9,96	9,97	9,98	1,77	1,81	1,78	1,84	1,69	0,5409	19,92	9,97	1,78	353	60,0	55,8	2,7
PIP5 2	0,5209	0,5209	0,5209	19,89	19,89	9,98	9,98	9,97	1,85	1,75	1,66	1,80	1,77	0,5209	19,89	9,98	1,77	350	53,2		
PIP5 3	0,5422	0,5423	0,5423	19,96	19,96	9,89	9,89	9,89	1,80	1,81	1,80	1,85	1,81	0,5423	19,96	9,89	1,81	358	57,4		
PIP5 4	0,5195	0,5196	0,5195	19,91	19,91	9,88	9,88	9,89	1,91	1,80	1,67	1,78	1,79	0,5195	19,91	9,88	1,79	352	51,5		
PIP5 5	0,5299	0,5298	0,5298	19,94	19,94	9,92	9,92	9,91	1,84	1,72	1,81	1,75	1,87	0,5298	19,94	9,92	1,80	356	53,8		
PIP5 6	0,5362	0,5362	0,5362	19,93	19,93	9,92	9,92	9,92	1,76	1,89	1,82	1,78	1,71	0,5362	19,93	9,92	1,79	354	57,2		
PIP5 7	0,5277	0,5278	0,5278	19,88	19,88	9,84	9,83	9,84	1,86	1,69	1,82	1,73	1,83	0,5278	19,88	9,84	1,79	349	56,9		
PIP5 8	0,5297	0,5297	0,5297	19,84	19,79	9,85	9,85	9,84	1,79	1,91	1,82	1,73	1,75	0,5297	19,82	9,85	1,80	351	56,5		

Tabelle F.3: Faservolumengehalt Messungen (3/4)

Probe	Feinwaage			Messschieber										Mittleres Gewicht / g	Mittlere Breite / mm	Mittlere Länge / mm	Mittlere Dicke / mm	Volumen / mm ³	Faservolumenanteil / %	Mittelwert / %	Stabw. / %
	Gewicht / g			Breite / mm		Länge / mm			Dicke / mm												
	1	2	3	oben	unten	links	mitte	rechts	links	2	3	4	rechts								
P2 1	0,3917	0,3917	0,3917	19,84	19,77	10,03	10,03	10,01	0,99	1,15	1,31	1,51	1,44	0,3917	19,81	10,02	1,28	254	63,3	55,3	3,4
P2 2	0,3828	0,3828	0,3828	19,93	19,91	9,97	9,98	9,96	1,35	1,47	1,46	1,26	1,00	0,3828	19,92	9,97	1,31	260	52,9		
P2 3	0,3869	0,3869	0,3869	19,39	19,46	10,42	10,21	10,12	0,96	1,21	1,35	1,53	1,51	0,3869	19,43	10,25	1,31	261	54,0		
P2 4	0,3925	0,3926	0,3926	19,85	19,83	10,06	10,04	10,05	1,33	1,53	1,36	1,32	1,07	0,3926	19,84	10,05	1,32	264	55,3		
P2 5	0,3638	0,3638	0,3639	19,95	20,02	9,62	9,65	9,70	1,24	1,21	1,31	1,33	1,29	0,3638	19,99	9,66	1,28	246	53,5		
P2 6	0,3854	0,3854	0,3854	19,81	19,96	9,59	9,58	9,52	1,30	1,37	1,33	1,43	1,38	0,3854	19,89	9,56	1,36	259	55,1		
P2 7	0,3694	0,3694	0,3694	19,85	19,81	10,04	10,04	10,03	1,13	1,23	1,22	1,39	1,31	0,3694	19,83	10,04	1,26	250	53,0		
P2 8	0,3986	0,3986	0,3985	19,80	19,87	10,06	10,06	10,06	1,28	1,33	1,34	1,40	1,37	0,3986	19,84	10,06	1,34	268	55,0		
P2P 1	0,3442	0,3443	0,3443	19,91	19,87	10,05	10,03	10,00	1,21	1,22	1,10	1,15	1,15	0,3443	19,89	10,03	1,17	233	52,3	54,1	1,6
P2P 2	0,3222	0,3223	0,3223	19,85	19,65	9,97	9,95	9,96	1,07	1,13	1,05	1,06	1,17	0,3223	19,75	9,96	1,10	216	54,4		
P2P 3	0,3465	0,3466	0,3466	19,97	19,95	10,09	10,07	10,04	1,18	1,18	1,08	1,16	1,16	0,3466	19,96	10,07	1,15	231	54,8		
P2P 4	0,3254	0,3254	0,3255	19,92	19,98	9,96	9,96	9,99	1,07	1,05	1,10	1,07	1,14	0,3254	19,95	9,97	1,09	216	56,2		
P2P 5	0,3345	0,3345	0,3345	19,92	19,91	9,90	9,91	9,91	1,16	1,10	1,15	1,18	1,13	0,3345	19,92	9,91	1,14	226	52,5		
P2P 6	0,3290	0,3290	0,3291	19,89	19,92	9,89	9,88	9,75	1,23	1,08	1,04	1,14	1,16	0,3290	19,91	9,84	1,13	221	53,2		
P2P 7	0,3350	0,3351	0,3350	19,81	19,87	9,97	9,96	9,96	1,13	1,10	1,16	1,18	1,14	0,3350	19,84	9,96	1,14	226	52,9		
P2P 8	0,3323	0,3323	0,3324	19,86	19,84	9,95	9,97	9,96	1,18	1,13	1,01	1,08	1,18	0,3323	19,85	9,96	1,12	221	56,2		
P2P4 1	0,3434	0,3434	0,3434	19,90	19,85	10,00	9,99	9,99	1,20	1,09	1,13	1,18	1,20	0,3434	19,88	9,99	1,16	230	53,8	52,2	1,9
P2P4 2	0,3397	0,3397	0,3397	19,86	19,79	10,00	10,01	10,01	1,19	1,15	1,17	1,13	1,10	0,3397	19,83	10,01	1,15	228	54,0		
P2P4 3	0,3414	0,3414	0,3414	19,93	19,88	10,04	10,01	10,03	1,24	1,10	1,16	1,20	1,18	0,3414	19,91	10,03	1,18	235	48,4		
P2P4 4	0,3386	0,3386	0,3387	19,86	19,88	10,00	10,00	10,01	1,18	1,15	1,18	1,14	1,11	0,3386	19,87	10,00	1,15	229	52,1		
P2P4 5	0,3326	0,3326	0,3326	19,95	19,89	10,02	10,00	9,99	1,18	1,20	1,15	1,04	1,10	0,3326	19,92	10,00	1,13	226	51,0		
P2P4 6	0,3216	0,3216	0,3216	19,92	19,93	10,00	9,99	10,00	1,09	1,10	1,10	1,08	1,09	0,3216	19,93	10,00	1,09	218	52,0		
P2P4 7	0,3296	0,3296	0,3296	19,71	19,65	10,03	10,03	10,05	1,17	1,20	1,13	1,04	1,10	0,3296	19,68	10,04	1,13	223	52,1		
P2P4 8	0,3241	0,3241	0,3241	19,88	19,83	10,05	10,06	10,05	1,10	1,09	1,08	1,07	1,09	0,3241	19,86	10,05	1,09	217	54,5		

Tabelle F.4: Faservolumengehalt Messungen (4/4)

Probe	Feinwaage			Messschieber										Mittleres Gewicht / g	Mittlere Breite / mm	Mittlere Länge / mm	Mittlere Dicke / mm	Volumen / mm ³	Faservolumenanteil / %	Mittelwert / %	Stabw. / %
	Gewicht / g			Breite / mm		Länge / mm			Dicke / mm												
	1	2	3	oben	unten	links	mitte	rechts	links	2	3	4	rechts								
P3 1	0,7546	0,7546	0,7546	19,90	19,91	9,93	9,91	9,91	2,64	2,68	2,72	2,50	2,41	0,7546	19,91	9,92	2,59	511	53,2	56,1	3,2
P3 2	0,7303	0,7303	0,7303	19,86	19,89	9,90	9,89	9,89	2,42	2,53	2,72	2,38	2,30	0,7303	19,88	9,89	2,47	486	57,5		
P3 3	0,7584	0,7584	0,7584	19,95	19,95	9,97	9,95	9,96	2,61	2,62	2,71	2,48	2,32	0,7584	19,95	9,96	2,55	506	56,6		
P3 4	0,7553	0,7554	0,7554	19,93	19,95	9,98	9,99	9,98	2,51	2,65	2,61	2,32	2,32	0,7554	19,94	9,98	2,48	494	61,4		
P3 5	0,6999	0,7000	0,7000	19,94	19,98	9,88	9,87	9,88	2,55	2,35	2,43	2,39	2,19	0,7000	19,96	9,88	2,38	470	55,5		
P3 6	0,6969	0,6969	0,6970	20,01	19,98	9,88	9,88	9,87	2,67	2,53	2,24	2,31	2,34	0,6969	20,00	9,88	2,42	478	50,7		
P3 7	0,7187	0,7187	0,7188	19,91	19,89	9,93	9,93	9,93	2,70	2,42	2,44	2,41	2,17	0,7187	19,90	9,93	2,43	480	56,6		
P3 8	0,7191	0,7192	0,7191	19,89	19,87	9,95	9,94	9,93	2,68	2,53	2,18	2,35	2,36	0,7191	19,88	9,94	2,42	478	58,0		
P3P 1	0,6717	0,6718	0,6717	19,96	19,91	10,05	10,02	10,02	2,26	2,25	2,22	2,27	2,26	0,6717	19,94	10,03	2,25	450	54,0	55,2	1,1
P3P 2	0,6700	0,6701	0,6700	19,88	19,91	10,04	10,03	10,02	2,23	2,20	2,24	2,21	2,23	0,6700	19,90	10,03	2,22	443	56,9		
P3P 3	0,6669	0,6669	0,6669	19,99	19,98	10,04	10,05	10,05	2,25	2,21	2,17	2,21	2,24	0,6669	19,99	10,05	2,22	445	55,1		
P3P 4	0,6624	0,6624	0,6624	19,98	19,97	10,05	10,03	10,03	2,19	2,21	2,21	2,18	2,23	0,6624	19,98	10,04	2,20	442	55,1		
P3P 5	0,6703	0,6704	0,6703	20,04	19,98	10,07	10,07	10,07	2,25	2,21	2,17	2,22	2,26	0,6703	20,01	10,07	2,22	448	54,8		
P3P 6	0,6619	0,6619	0,6619	20,03	20,02	10,07	10,08	10,09	2,25	2,22	2,20	2,23	2,09	0,6619	20,03	10,08	2,20	444	54,0		
P3P 7	0,6669	0,6669	0,6669	19,96	19,93	10,10	10,09	10,10	2,22	2,16	2,15	2,17	2,26	0,6669	19,95	10,10	2,19	441	56,8		
P3P 8	0,6636	0,6636	0,6637	19,93	19,91	10,10	10,10	10,10	2,25	2,23	2,21	2,21	2,11	0,6636	19,92	10,10	2,20	443	54,9		
P3P4 1	0,6847	0,6847	0,6847	19,96	19,93	10,17	10,16	10,15	2,19	2,29	2,31	2,23	2,18	0,6847	19,95	10,16	2,24	454	56,5	51,9	4,1
P3P4 2	0,6796	0,6796	0,6796	19,93	19,96	10,14	10,14	10,14	2,19	2,24	2,30	2,31	2,20	0,6796	19,95	10,14	2,25	455	54,4		
P3P4 3	0,6944	0,6944	0,6945	19,96	19,96	10,19	10,19	10,19	2,27	2,35	2,35	2,27	2,26	0,6944	19,96	10,19	2,30	468	52,9		
P3P4 4	0,6902	0,6902	0,6903	20,00	20,01	10,19	10,17	10,17	2,25	2,31	2,34	2,33	2,25	0,6902	20,01	10,18	2,30	467	51,7		
P3P4 5	0,6700	0,6700	0,6701	20,03	19,99	10,12	10,17	10,18	2,14	2,25	2,23	2,10	2,30	0,6700	20,01	10,16	2,20	448	54,6		
P3P4 6	0,6675	0,6675	0,6675	20,01	20,04	10,01	10,06	10,03	2,23	2,27	2,26	2,18	2,20	0,6675	20,03	10,03	2,23	448	53,9		
P3P4 7	0,6545	0,6546	0,6546	19,97	19,93	9,99	9,99	10,00	2,27	2,34	2,32	2,19	2,33	0,6546	19,95	9,99	2,29	457	45,3		
P3P4 8	0,6526	0,6527	0,6526	20,02	20,03	9,87	9,93	9,94	2,27	2,31	2,36	2,26	2,22	0,6526	20,03	9,91	2,28	453	46,2		

