




**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

BACHELORARBEIT

Herr
Hiep David Nguyen

Untersuchungen von Klebungen bei 3D-gedruckten thermoplastischen Bauteilen

Mittweida, August 2024



Fakultät **Ingenieurwissenschaften**

BACHELORARBEIT

Untersuchungen von Klebungen bei 3D-gedruckten thermoplastischen Bauteilen

Autor:

Hiep David Nguyen

Studiengang:

Lasertechnik/Physikalische Technik

Seminargruppe:

LT21wD-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. Jörg Hübler

Zweitprüfer:

Dr. Hagen Bankwitz

Einreichung:

Mittweida, 31.08.2024

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2024

Faculty of **Engineering Sciences**

BACHELOR THESIS

Investigations of Adhesive Bonds in 3D-Printed Thermoplastic Components

Author:

Hiep David Nguyen

Course of Study:

Laser Technology/Physical Engineering

Seminar Group:

LT21wD-B

First Examiner:

Prof. Dr. Jörg Hübler

Second Examiner:

Dr. Hagen Bankwitz

Submission:

Mittweida, 31.08.2024

Defense/Evaluation:

Mittweida, 2024

Bibliografische Beschreibung

Nguyen, Hiep David:

Untersuchungen von Klebungen bei 3D-gedruckten thermoplastischen Bauteilen. – 2024. – 89 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2024.

Referat

Diese Bachelorarbeit untersucht die Klebeverbindungen bei 3D-gedruckten thermoplastischen Bauteilen und deren mechanische Eigenschaften. Untersucht wurden drei thermoplastische Materialien: Polyamid (PA), Polycarbonat (PC) und Greentec Pro. Drei verschiedene Klebstoffe (2K-PUR, 2K-Acrylat, 2K-Cyanacrylat-Acrylat-Basis) von unterschiedlichen Herstellern wurden verwendet, um die Festigkeit der Klebeverbindungen zu vergleichen.

Die Untersuchung konzentriert sich darauf, welche Kombination von Material und Klebstoff die höchste Festigkeit erreicht. Zugscherversuche nach der DIN EN 1465 Norm wurden durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der Klebeverbindungen zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des Klebstoffs signifikante Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindungen hat. Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Optimierung von Klebeverbindungen in der industriellen Anwendung und bieten wertvolle Hinweise für zukünftige Forschungen in diesem Bereich.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Problemstellung	8
1.2 Relevanz der Untersuchung	8
1.3 Zielsetzung	9
1.4 Aufbau der Arbeit	10
2 Grundlagen	11
2.1 Additive Fertigung und deren Materialien	11
2.1.1 Komponenten und Funktionsweise eines FDM-Druckers	12
2.1.2 Materialien im FDM-Verfahren	13
2.2 UD-Tape	15
2.2.1 Herstellung von UD-Tape	15
2.2.2 Eigenschaften von UD-Tape	16
2.3 Klebstoffe	17
2.3.1 Grundlagen der Adhäsion und Kohäsion	17
2.3.2 Adhäsionskraft	17
2.3.3 Kohäsionskraft	17
2.3.4 2K-Acrylatklebstoffen	18
2.3.5 Cyanacrylatklebstoffen	18
2.3.6 2K-PUR-Klebstoffen	19
2.3.7 Primer	19
2.4 Klebverfahren	20
2.5 Prüfung der Klebung nach DIN EN1465	21
2.6 Einflussfaktoren auf die Klebung	24
3 Experimentelle Methodik und Durchführung	27
3.1 Beschreibung der Materialien und Klebstoffe	28
3.1.1 Auswahlgrund der Materialien und Klebstoffe	33
3.2 Vorbereitung und Klebung der Proben	35
3.2.1 Bauteilgeometrie	37
3.2.2 Probenkombinationen	38
3.2.3 Vorbereitung	40
3.3 Vorbetrachtung der Proben	42
3.4 Durchführung des Zugscherversuchs	45
4 Ergebnisse und Diskussion	47
4.1 Analyse der Klebeverbindung	47

4.1.1	Ergebnisse: CFUD-Green	47
4.1.2	Ergebnisse: CFUD-PA	54
4.1.3	Ergebnisse: CFUD-PC	59
4.1.4	Ergebnisse: Green-Green	64
4.1.5	Ergebnisse: PA-PA	69
4.1.6	Ergebnisse: PC-PC	73
4.1.7	Ergebnisse: CFUD-CFUD	78
4.2	Diskussion der Kombinationen	83
4.2.1	CFUD-Green im Vergleich zu CFUD-CFUD und Green-Green	83
4.2.2	CFUD-PA im Vergleich zu CFUD-CFUD und PA-PA	84
4.2.3	CFUD-PC im Vergleich zu CFUD-CFUD und PC-PC	85
5	Fazit und Ausblick	86
5.1	Fazit	86
5.2	Limitationen der Versuche	88
5.3	Empfehlungen für zukünftige Forschungen	89
	Anhang	91
	A Messwerte der Probengeometrie nach dem Kleben	91
	B Probenbilder nach dem Kleben	94
B.1	Probenbilder nach dem Kleben: 3M-Klebstoff	94
B.2	Probenbilder nach dem Kleben: HL-Klebstoff	95
B.3	Probenbilder nach dem Kleben: TC-Klebstoff	96
	C Probenbilder nach der Zugscherprüfung	97
C.1	Probenbilder nach der Zugscherprüfung für CFUD-Green	97
C.2	Probenbilder nach der Zugscherprüfung für CFUD-PA	100
C.3	Probenbilder nach der Zugscherprüfung für CFUD-PC	103
C.4	Probenbilder nach der Zugscherprüfung für Green-Green	106
C.5	Probenbilder nach der Zugscherprüfung für PA-PA	109
C.6	Probenbilder nach der Zugscherprüfung für PC-PC	112
C.7	Probenbilder nach der Zugscherprüfung für CFUD-CFUD	115
	D Selbstständigkeitserklärung	118
	Literaturverzeichnis	119

Abbildungsverzeichnis

2.1.1	Geldbörse aus Nylon-Kunststoff Lockcard [Gmb24]	11
2.1.2	"Topologie-optimierter Spiegelhalter zur Ausrichtung der Intersatelliten- Laserkommunikation, gefertigt als monolithisches Festkörpergelenk"[Mit24b]	11
2.1.3	Übersicht 3D-Verfahren [igu19]	12
2.1.4	Komponenten eines FDM-Druckers[3D24]	13
2.2.1	Herstellung von UD-Tape[Hop+21, et al. S. 1302]	16
2.3.1	Übersicht Adhäsion- und Kohäsionskräfte beim Kleben [Hab17, S. 76]	18
2.5.1	Bruchbilder [Bod15, S. 305]	23
2.6.1	Spannungsverlauf bei Zugscherbelastung [Bod15, S. 292]	24
2.6.2	„Kraftübertragung als Funktion der Überlappungsfläche“ [Bod15, S. 292]	25
2.6.3	„Festigkeit als Funktion der Überlappungslänge“ [Bod15, S. 292]	25
2.6.4	Spannungsverlauf bei Zugscherbelastung [Bod15, S. 292]	25
2.6.5	„Einfluss der Substratdicke auf die Klebkraft“ [Bod15, S. 293]	25
2.6.6	„Einfluss des Substratmoduls auf die Klebkraft“ [Bod15, S. 293]	26
2.6.7	Einfluss der Klebschichtdicke auf Klebekraft [Bod15, S. 293]	26
3.2.1	Geometrieproben [DIN09, S. 8, geändert]	37
3.2.2	angeschliffene und gesäuberte Fügeteil aus Polycarbonat	40
3.2.3	Klebevorrichtung	40
3.2.4	Fixierung der Proben nach der Applikation	41
3.2.5	Applikation des 3M-Klebstoffs	41
3.4.1	Skizze der Einspannung [DIN09, S. 8, geändert]	45
3.4.2	Einspannung von 3M_Green-Green	45
4.1.1	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-Green mit 3M-Klebstoff	47
4.1.2	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-Green mit HL-Klebstoff	49
4.1.3	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-Green mit TC-Klebstoff	50
4.1.4	Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-Green aller Klebstoffe	52
4.1.5	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PA mit 3M-Klebstoff	54
4.1.6	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PA mit HL-Klebstoff	55
4.1.7	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PA mit TC-Klebstoff	56
4.1.8	Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-PA aller Klebstoffe	57
4.1.9	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PC mit 3M-Klebstoff	59
4.1.10	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PC mit HL-Klebstoff	60
4.1.11	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PC mit TC-Klebstoff	61
4.1.12	Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-PC aller Klebstoffe	62
4.1.13	Weg-Kraft-Diagramm Green-Green mit 3M-Klebstoff	64

4.1.14	Weg-Kraft-Diagramm Green-Green mit HL-Klebstoff	65
4.1.15	Weg-Kraft-Diagramm Green-Green mit TC-Klebstoff	66
4.1.16	Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination Green-Green aller Klebstoffe	67
4.1.17	Weg-Kraft-Diagramm PA-PA mit 3M-Klebstoff	69
4.1.18	Weg-Kraft-Diagramm PA-PA mit HL-Klebstoff	70
4.1.19	Weg-Kraft-Diagramm PA-PA mit TC-Klebstoff	71
4.1.20	Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination PA-PA aller Klebstoffe	72
4.1.21	Weg-Kraft-Diagramm PC-PC mit 3M-Klebstoff	73
4.1.22	Weg-Kraft-Diagramm PC-PC mit HL-Klebstoff	74
4.1.23	Weg-Kraft-Diagramm PC-PC mit TC-Klebstoff	75
4.1.24	Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination PC-PC aller Klebstoffe	76
4.1.25	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-CFUD mit 3M-Klebstoff	78
4.1.26	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-CFUD mit HL-Klebstoff	79
4.1.27	Weg-Kraft-Diagramm CFUD-CFUD mit TC-Klebstoff	80
4.1.28	Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-CFUD aller Klebstoffe	81
B.1.1	Proben nach dem Kleben für 3M-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit Bauteil	94
B.1.2	Proben nach dem Kleben für 3M-Klebstoff für Kombination Bauteil mit Bauteil	94
B.1.3	Proben nach dem Kleben für 3M-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit CFUD-Tape	94
B.2.1	Proben nach dem Kleben für HL-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit Bauteil	95
B.2.2	Proben nach dem Kleben für HL-Klebstoff für Kombination Bauteil mit Bauteil	95
B.2.3	Proben nach dem Kleben für HL-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit CFUD-Tape	95
B.3.1	Proben nach dem Kleben für TC-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit Bauteil	96
B.3.2	Proben nach dem Kleben für TC-Klebstoff für Kombination Bauteil mit Bauteil	96
B.3.3	Proben nach dem Kleben für TC-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit CFUD-Tape	96
C.1.1	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-Green mit 3M-Klebstoff	97
C.1.2	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-Green mit HL-	98
C.1.3	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-Green mit TC-Klebstoff	99
C.2.1	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PA mit 3M-Klebstoff	100
C.2.2	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PA mit HL-Klebstoff	101
C.2.3	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PA mit TC-Klebstoff	102
C.3.1	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PC mit 3M-Klebstoff	103
C.3.2	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PC mit HL-Klebstoff	104
C.3.3	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PC mit TC-Klebstoff	105
C.4.1	Proben nach der Zugscherprüfung: Green-Green mit 3M-Klebstoff	106
C.4.2	Proben nach der Zugscherprüfung: Green-Green mit HL-Klebstoff	107
C.4.3	Proben nach der Zugscherprüfung: Green-Green mit TC-Klebstoff	108
C.5.1	Proben nach der Zugscherprüfung: PA-PA mit 3M-Klebstoff	109

C.5.2	Proben nach der Zugscherprüfung: PA-PA mit HL-Klebstoff	110
C.5.3	Proben nach der Zugscherprüfung: PA-PA mit TC-Klebstoff	111
C.6.1	Proben nach der Zugscherprüfung: PC-PC mit 3M-Klebstoff	112
C.6.2	Proben nach der Zugscherprüfung: PC-PC mit HL-Klebstoff	113
C.6.3	Proben nach der Zugscherprüfung: PC-PC mit TC-Klebstoff	114
C.7.1	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-CFUD mit 3M-Klebstoff	115
C.7.2	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-CFUD mi HL-Klebstoff	116
C.7.3	Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-CFUD mi TC-Klebstoff	117

Tabellenverzeichnis

3.1.1	Technische Daten von GreenTec Pro von Extrudr [Ext24b]	28
3.1.2	Technische Daten von PolyLite PC von Polymaker [Pol20]	29
3.1.3	Technische Daten von Ultrafuse PA von BASF [BAS19]	29
3.1.4	Technische Daten von Kohlenfaser UD-Tape von BÜFA	30
3.1.5	Klebstoffeigenschaften von 3M DP8410NS [3M22]	30
3.1.6	Klebstoffeigenschaften von Henkel Loctite HY4070 [Hen17]	31
3.1.7	Klebstoffeigenschaften von Technicoll 9431 [Tec18]	32
3.1.8	Primereigenschaften von Technicoll 9603-1 [Tec19]	32
3.2.1	Druckparameter für GreenTec Pro mit dem Bambulab X1E	35
3.2.2	Druckparameter für PA mit dem Bambulab X1E	36
3.2.3	Druckparameter für PC mit dem Bambulab X1E	36
3.2.4	Bezeichnungen und Kombinationen für 3M-Klebstoff	38
3.2.5	Bezeichnungen und Kombinationen für Henkel-Klebstoff	39
3.2.6	Bezeichnungen und Kombinationen für Technicoll-Klebstoff	39
3.3.1	Mittelwerte für Klebschichtdicke \bar{s} , Klebbreite \bar{u} und Klebeüberlappungs- breite für den 3M-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta_s = 0,005$ mm, $\Delta_s = 0,025$ mm und $\Delta_{\bar{u}} = 0,025$ mm	42
3.3.2	Mittelwerte für Klebschichtdicke \bar{s} , Klebbreite \bar{b} und Klebeüberlappungs- breite für den HL-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta_s = 0,005$ mm, $\Delta_s = 0,025$ mm und $\Delta_{\bar{u}} = 0,025$ mm	42
3.3.3	Mittelwerte für Klebschichtdicke \bar{s} , Klebbreite \bar{b} und Klebeüberlappungs- breite \bar{u} für den TC-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta_s = 0,005$ mm, $\Delta_s = 0,025$ mm und $\Delta_{\bar{u}} = 0,025$ mm	43
3.4.1	Prüfparameter der servoelektrischen Spindel SPIAx 7,5 HD von DYNA-MESS	46
4.1.1	Bruchkräfte CFUD-Green mit 3M-Klebstoff	47
4.1.2	Bruchkräfte CFUD-Green mit HL-Klebstoff	49
4.1.3	Bruchkräfte CFUD-Green mit TC-Klebstoff	50
4.1.4	Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-Green	52
4.1.5	Bruchkräfte CFUD-PA mit 3M-Klebstoff	54
4.1.6	Bruchkräfte CFUD-PA mit HL-Klebstoff	55
4.1.7	Bruchkräfte CFUD-PA mit TC-Klebstoff	56
4.1.8	Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-PA	57
4.1.9	Bruchkräfte CFUD-PC mit 3M-Klebstoff	59
4.1.10	Bruchkräfte CFUD-PC mit HL-Klebstoff	60
4.1.11	Bruchkräfte CFUD-PC mit TC-Klebstoff	61
4.1.12	Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-PC	62
4.1.13	Bruchkräfte Green-Green mit 3M-Klebstoff	64
4.1.14	Bruchkräfte Green-Green mit HL-Klebstoff	65

4.1.15	Bruchkräfte Green-Green mit TC-Klebstoff	66
4.1.16	Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination Green-Green	67
4.1.17	Bruchkräfte PA-PA mit 3M-Klebstoff	69
4.1.18	Bruchkräfte PA-PA mit HL-Klebstoff	70
4.1.19	Bruchkräfte PA-PA mit TC-Klebstoff	71
4.1.20	Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination PA-PA	72
4.1.21	Bruchkräfte PC-PC mit 3M-Klebstoff	73
4.1.22	Bruchkräfte PC-PC mit HL-Klebstoff	74
4.1.23	Bruchkräfte PC-PC mit TC-Klebstoff	75
4.1.24	Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten $\bar{\sigma}$ für Kombination PC-PC	76
4.1.25	Bruchkräfte CFUD-CFUD mit 3M-Klebstoff	78
4.1.26	Bruchkräfte CFUD-CFUD mit HL-Klebstoff	79
4.1.27	Bruchkräfte CFUD-CFUD mit TC-Klebstoff	80
4.1.28	Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-CFUD	81
A.0.1	Messwerte: Schichtdicke s , Klebebreite b und Klebeüberlappungsbreite \ddot{u} für den 3M-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta s = 0,025$ mm und $\Delta \ddot{u} = 0,025$ mm	91
A.0.2	Messwerte Schichtdicke s , Klebebreite b und Klebeüberlappungsbreite \ddot{u} für den HL-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta s = 0,025$ mm und $\Delta \ddot{u} = 0,025$ mm	92
A.0.3	Messwerte Schichtdicke s , Klebebreite b und Klebeüberlappungsbreite \ddot{u} für den TC-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta s = 0,025$ mm und $\Delta \ddot{u} = 0,025$ mm	93

Abkürzungsverzeichnis

- 2K** Zweikomponenten
- 3D** Dreidimensional
- ABS** Acrylnitril-Butadien-Styrol
- BJ** Binder-Jet Modeling
- bzw.** beziehungsweise
- CF** Kohlefaser
- CFUD** Kohlefaser-UD-Tape
- DIN** Deutsches Institut für Normung
- EBM** Elektronenstrahlschmelzen
- EN** Europäische Norm
- FDM** Fused Deposition Modeling
- Green** GreenTec Pro
- HL** Henkel Loctite
- ISO** International Organization for Standardization
- LOM** Layer Object Modeling
- MJ** Multi-Jet Modeling
- PA** Polyamid
- PA6** Polyamid 6
- PA6/66** Polyamid 6/66
- PC** Polycarbonat
- PE** Polyethylen
- PEEK** Polyetheretherketon

PJ Poly-Jet Modeling

PLA Polylactic Acid

PUR Polyurethan

SLA Stereolithografie

SLM Selektives Laserschmelzen

SLS Selektives Lasersintern

TC Technicoll

UD Unidirektional

z.B. zum Beispiel

1 Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung in der additiven Fertigung hat in den letzten Jahren die Möglichkeit zur Herstellung komplexer Bauteile erheblich erweitert. Neben der Prototypenfertigung gewinnt der 3D-Druck zunehmend an Bedeutung in der Serienproduktion. Die Herausforderung liegt jedoch in der effizienten und stabilen Verbindung dieser Bauteile mit anderen Materialien, insbesondere im Leichtbau.

In diesem Kontext sind Klebeverbindungen eine bevorzugte Wahl, da sie unterschiedliche Materialien effizient verbinden können, ohne deren strukturelle Integrität zu beeinträchtigen. Die mechanische Leistungsfähigkeit solcher Verbindungen wird jedoch stark von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe und Fügebauteile beeinflusst. Für die optimale Klebeverbindung 3D-gedruckter Bauteile mit Verbundwerkstoffen ist die Auswahl des richtigen Klebstoffs von großer Bedeutung.

1.1 Problemstellung

Die Verbindung von UD-Tapes mit 3D-gedruckten Bauteilen stellt eine besondere Herausforderung dar. Die unidirektionalen Kohlefaser sind mit einer Kunststoffmatrix aus PA6 umhüllt, dadurch weist das UD-Tape eine hohe Steifigkeit, Festigkeit und erhöhte Oberflächenenergie auf. Währenddessen 3D-gedruckte thermoplastische Materialien wie GreenTec Pro, Polycarbonat oder andere Polyamide unterschiedliche Strukturen, Festigkeiten und Oberflächenenergien besitzen. Diese Unterschiede können die Haftung und Zuverlässigkeit der Klebeverbindung beeinflussen. Darüber hinaus spielen die spezifischen Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe eine wesentliche Rolle für die resultierende Zugscherfestigkeit der Verbindungen.

1.2 Relevanz der Untersuchung

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind von großer Bedeutung für die Industrie und Forschung. Eine zuverlässige Klebetechnik kann die Produktionseffizienz erheblich steigern und die Qualität der Endprodukte verbessern. Insbesondere in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, wo Leichtbau und Festigkeit entscheidende Faktoren sind, können die richtigen Klebetechniken die Entwicklung neuer, leistungsfähiger Komponenten fördern.

Zudem trägt die Untersuchung zur Erweiterung des Wissens über die Interaktionen zwischen verschiedenen Materialien und Klebstoffen bei. Dies kann zukünftige Forschungen und Entwicklungen in der Materialwissenschaft und Fertigungstechnik unterstützen.

1.3 Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Bachelorarbeit ist es, den am besten geeigneten Klebstoff für die Verbindung von Kohlefaser-UD-Tapes mit den 3D-gedruckten Materialien GreenTec Pro, PA6 und PC zu identifizieren. Außerdem benutzen die Klebstoffhersteller verschiedene Normen zu Prüfung der Zugschereigenschaften, deswegen ist es von Bedeutung diese mit einer Norm durchzuführen, um sie vergleichbar zu machen. Dies soll durch systematische Zugscherversuche gemäß DIN 1465 erreicht werden. Die spezifischen Fragestellungen lauten:

1. Welcher Klebstoff zeigt die höchste Zugscherfestigkeit bei der Verbindung von Kohlefaser-UD-Tapes mit Greentec, PA6 und PC?
2. Wie verhalten sich die Zugscherfestigkeiten bei der Verbindung gleichartiger Materialien (CFUD-CFUD, Greentec-Greentec, PA6-PA6, PC-PC)?

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in mehrere Kapitel gegliedert, die aufeinander aufbauen und das Thema der Untersuchung systematisch behandeln.

Das folgende Kapitel 2 befasst sich mit den theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis der experimentellen Arbeit und die darauf basierenden Ergebnisse wichtig sind. Es beginnt mit einer Einführung in die additiven Fertigungstechnologien, insbesondere in das FDM-Verfahren. Ein weiterer Schwerpunkt sind unidirektionale Kohlefaser-Tapes, deren Herstellung und Eigenschaften. Danach werden die grundlegenden Prinzipien der Klebstofftechnologie vorgestellt, einschließlich einiger Klebstofftypen. Des Weiteren werden kurz die Vorteile und die Durchführung des Klebens dargestellt und anschließend wird die Prüfnorm DIN EN 1465 detailliert mit ihren Anforderungen, der Durchführung und Auswertung behandelt. Zum Schluss werden wichtige Einflussfaktoren für eine Klebeverbindung genannt, die später für die Auswertung der Proben von großer Bedeutung sind.

Im dritten Kapitel werden die experimentelle Methodik und die praktische Durchführung der Untersuchungen beschrieben. Hier werden die verwendeten Materialien und Klebstoffe detailliert vorgestellt und deren Auswahlgrund erläutert. Danach werden die Vorbereitung, Beschreibung und Herstellung der Proben sowie deren Eigenschaften behandelt. Anschließend wird erläutert, wie die Proben geklebt, vor der Zugscherprüfung vermessen und der Versuch an der Prüfmaschine durchgeführt wurden. Dieses Kapitel legt den Fokus auf die praktische Umsetzung der theoretischen Grundlagen und beschreibt die Methodik zur präzisen Bestimmung der Zugscherfestigkeit. Dabei wird besonders darauf geachtet, dass die Versuchsbedingungen standardisiert und die Ergebnisse reproduzierbar sind.

Das vierte Kapitel präsentiert die Ergebnisse der durchgeführten Experimente und bietet eine umfassende Diskussion der erzielten Daten. Die Zugscherfestigkeiten der verschiedenen Material-Klebstoff-Kombinationen werden systematisch ausgewertet und im Kontext der theoretischen Grundlagen interpretiert. Hierbei wird untersucht, welcher Klebstoff die höchste Zugscherfestigkeit in Kombination mit den untersuchten Materialien aufweist und wie die Materialeigenschaften die Leistung der Klebeverbindungen beeinflussen.

Das abschließende Kapitel 5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammen und bietet einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungen. Zudem werden die Limitationen der durchgeführten Untersuchungen reflektiert und es werden Empfehlungen für weiterführende Studien gegeben, die auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauen können.

2 Grundlagen

2.1 Additive Fertigung und deren Materialien

Die additiven oder generativen Fertigungsverfahren, auch 3D-Druck genannt, haben im letzten Jahrzehnt eine schnelle und stetige Entwicklung durchlaufen. Vor den 2010er Jahren wurden sie hauptsächlich für Prototypen für Design und Funktion verwendet, und nur wenige Unternehmen konnten sich dieses teure und komplexe Verfahren leisten. In der heutigen Zeit gibt es eine große Bandbreite an Verwendungen, Materialien und 3D-Druckverfahren. Auch gibt es preiswerte Angebote und Anlagen, die sowohl private als auch kommerzielle Anwender nutzen können. Immer mehr Endprodukte kommen aus dem 3D-Drucker, wie zum Beispiel Geldbörsen (Abb. 2.1.1) [Gmb24] aus Nylon oder Spiegelhalter für Satelliten (Abb. 2.1.2) [Mit24b] aus Edelstahl.



Abbildung 2.1.1: Geldbörse aus Nylon-Kunststoff | Lockcard [Gmb24]



Abbildung 2.1.2: "Topologie-optimierter Spiegelhalter zur Ausrichtung der Intersatelliten-Laserkommunikation, gefertigt als monolithisches Festkörpergelenk"[Mit24b]

Die additive Fertigung gehört zur Fertigungsverfahrensguppe Urformen. Das Besondere an diesen Verfahren im Vergleich zu konventionellen Methoden ist, dass sie werkzeug- und formlos ablaufen, da sie auf dem Prinzip des schichtweisen Aufbaus von Bauteilen basieren. Im Gegensatz zu subtraktiven oder konventionellen Verfahren wie Drehen oder Fräsen, bei denen Material abgetragen wird. Die wichtigsten additiven Verfahren umfassen Stereolithografie (SLA), Lasersintern (SLS) oder -schmelzen (SLM), Fused Deposition Modeling (FDM), Multi-Jet Modeling (MJ). Weniger häufig vertretene Verfahren sind Elektronenstrahlschmelzen (EBM), Binder-Jet Modeling (BJ), Poly-Jet Modeling (PJ) und Layer Object Modeling (LOM). Je nach Verfahren gibt es unterschiedliche Einsatzgebiete und Materialien. Die folgende Übersicht stellt grob die Verfahren je nach Material und die Eigenschaften des Endprodukts vor.

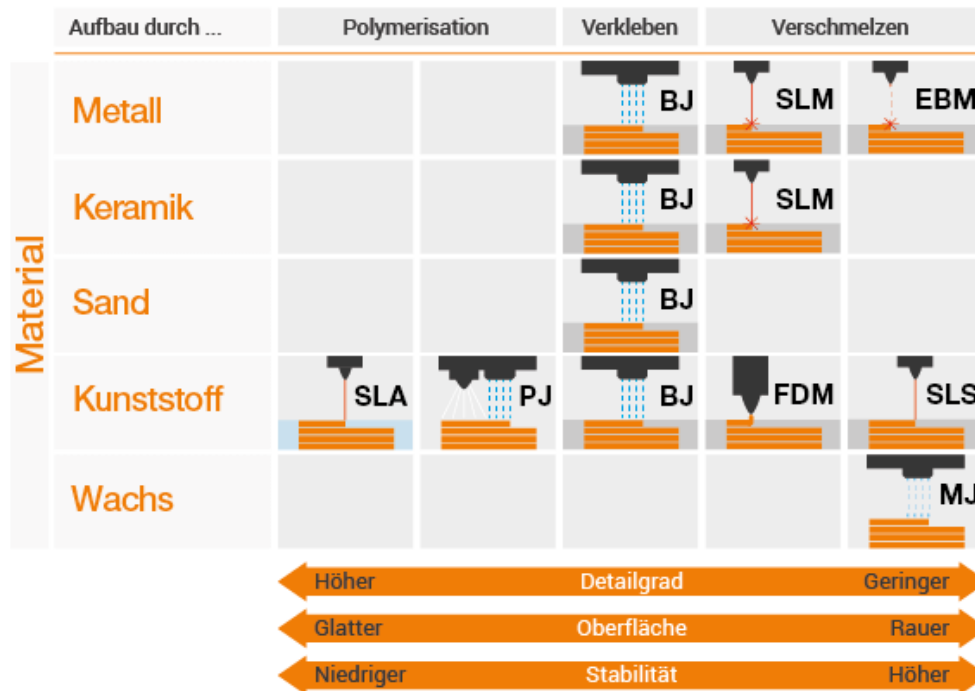


Abbildung 2.1.3: Übersicht 3D-Verfahren [igu19]

2.1.1 Komponenten und Funktionsweise eines FDM-Druckers

Ein FDM-Drucker besteht aus mehreren Hauptkomponenten wie sie in Abbildung 2.1.4 zu sehen sind. Der Extrusionskopf ist das Herzstück des FDM-Druckers. Er besteht aus einer beheizbaren Düse, die das Filament aufschmilzt und Schicht für Schicht aufträgt. Die Düse kann unterschiedliche Durchmesser haben, typischerweise zwischen 0,1 und 1 mm, was die Feinheit der gedruckten Schichten beeinflusst. Größere Düsendurchmesser können mehr Durchfluss erreichen, wodurch schneller gedruckt werden kann. Die Bauteillüfter, entweder am Extrusionskopf oder extern gelegen, stellen sicher, dass der verflüssigte Kunststoff wieder erstarrt. Somit können Überbrückungen ohne Stützen bis zu einer gewissen Länge erzeugt werden. Die Bauteilqualität hängt ebenfalls davon ab, da sie verhindert, dass die Schicht ineinander verläuft und die Schicht somit ungleichmäßig wird. Zu viel Kühlung kann die Heizdüse verstopfen, da sie zu schnell kalt wird und kein Material mehr extrudiert werden kann. Auch verringert sich die Schichthaftung auf der Bauplattform und innerhalb der Schichten. Das Bauteil erreicht nicht die benötigten mechanischen Eigenschaften. Zwei lagergeregelte Vorschubachsen bewegen den Extrusionskopf präzise in der x- und y-Achse. Diese Bewegungen ermöglichen das genaue Platzieren des aufgeschmolzenen Materials auf der Bauplattform. Die Bauplattform ist in der z-Achse höhenverstellbar und oft beheizbar, was das Warping (Verziehen) des Materials verhindert, indem sie die Abkühlrate des Kunststoffs kontrolliert. Es gibt verschiedene Bauarten von FDM-Druckern. Die bekanntesten Bauarten sind Bed-Slinger und XY-Core.

Die Maschinensteuerung und die zugehörige Software koordinieren die Bewegungen der Vorschubachsen und des Extrusionskopfes sowie die Zuführung des Filaments. Das Slicer-Programm erzeugt einen G-Code aus 3D-Modellen. Meistens sind die Modelle in STL- oder AMF-Dateien gespeichert.

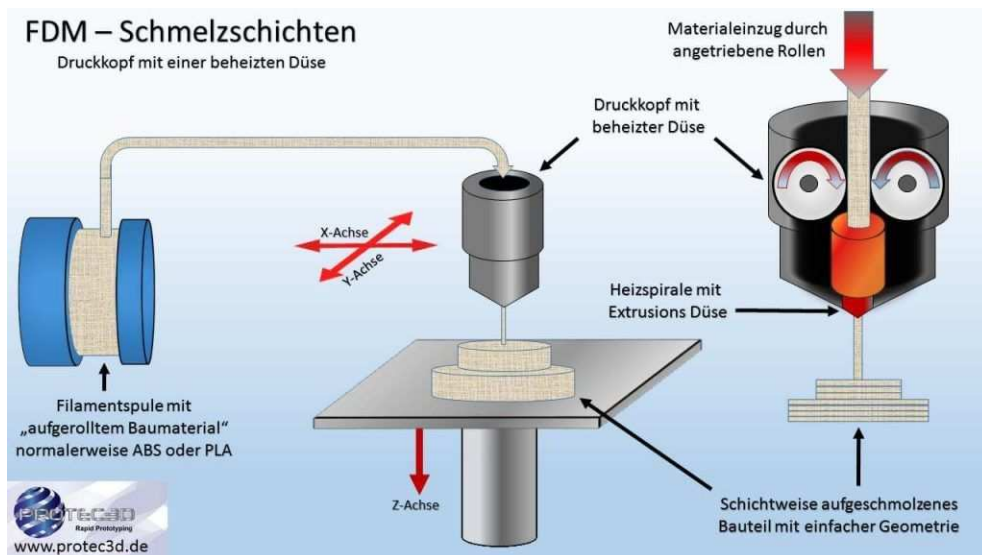


Abbildung 2.1.4: Komponenten eines FDM-Druckers[3D24]

2.1.2 Materialien im FDM-Verfahren

Das FDM-Verfahren kann heutzutage viele verschiedene Materialien verarbeiten, die je nach Anwendung unterschiedliche Eigenschaften bieten. Besonders geeignet sind amorphe Thermoplasten, da ihre Viskosität relativ linear verläuft, was einen regelbaren Prozess ermöglicht. Es gibt sehr viele Filamenthersteller, die zu unterschiedlichen Preisen und Qualitäten geläufige oder spezielle Kunststoffe auf den Markt bringen. Hier werden einige Kunststoffarten vorgestellt.

Polylactid (PLA) ist ein sehr beliebtes Material im FDM Druck. Es ist ein biologisch abbaubarer Kunststoff, der sich einfach verarbeiten lässt und eine geringe Verformung beim Abkühlen auszeichnet. Der später in der Arbeit verwendete Kunststoff GreenTec Pro stammt aus dieser Gruppe. Es ist aber ein weiter entwickeltes Produkt mit besseren Eigenschaften gegenüber dem normalen PLA. Zudem ist es ein kostengünstiges Material und daher besonders im Hobbybereich und in der Prototypenentwicklung beliebt. Jedoch besitzt es eine relativ niedrige Hitzebeständigkeit, was seine Anwendung auf Bereiche mit niedrigen Betriebstemperaturen beschränkt.

Polycarbonat (PC) ist ein technisches Material mit hoher Festigkeit und Hitzebeständigkeit, das oft in der Automobil- und Luftfahrtindustrie verwendet wird. Es bietet hervorragende mechanische und chemische Eigenschaften und ist zudem ein sehr guter Isolator, was es für elektrische und elektronische Anwendungen wie Abdeckungen geeignet macht. Allerdings erfordert das Drucken mit Polycarbonat sehr hohe Extrusionstemperaturen, was spezielle Drucker und Druckbettbedingungen notwendig macht. Deswegen ist Polycarbonat im privaten Bereich noch nicht so oft vertreten.

Polyamid (PA), auch als Nylon bekannt, ist ein weiteres häufig verwendetes Material im FDM-Verfahren. PA zeichnet sich durch hohe Festigkeit, Zähigkeit und Abriebfestigkeit aus. Es ist zudem chemisch beständig und weist gute Gleiteigenschaften auf. Es hat jedoch eine hohe Feuchtigkeitsaufnahme, was die mechanischen Eigenschaften beeinflussen kann und spezielle Lagerungsbedingungen erforderlich macht. Deswegen wird das Filament in Trockenbehälter gelagert und daraus gedruckt, um so wenig wie möglich mit der Umwelt in Kontakt zutreten. Im Allgemeinen ist der Druck für den Privatanwender schwierig, da zudem eine Behausung für den Drucker benötigt wird. Es ist in der Regel teurer als PLA und ABS, bietet jedoch hervorragende mechanische Eigenschaften, die es zu einer bevorzugten Wahl für funktionale Prototypen und Endanwendungen machen.

Da es noch sehr viele andere Materialien gibt wie wasserlösliches oder gummiartiges Filament, bieten diese im FDM-Verfahren eine breite Palette an mechanischen Eigenschaften, chemischer Beständigkeit und thermischen Eigenschaften an. Die Auswahl des richtigen Materials hängt von den spezifischen Anforderungen der Anwendung, den Umweltbedingungen und den mechanischen Belastungen ab, denen das fertige Bauteil ausgesetzt sein wird.

2.2 UD-Tape

2.2.1 Herstellung von UD-Tape

„Unidirektionale Tapes, auch UD-Tapes genannt, sind endlosfaserverstärkte Bänder unterschiedlicher Breite mit unidirektional ausgerichteten Verstärkungsfasern.“ [IMW24] Es ist ein bedeutender Werkstoff in der modernen Materialwissenschaft und Ingenieurtechnik, besonders im Bereich der Verbundwerkstoffe. Die Herstellung von UD-Tape erfolgt durch ein Schmelz-Imprägnierungsverfahren, bei dem Fasern in eine thermoplastische Matrix eingebettet werden. In diesem Prozess werden die Fasern durch ein Bad aus geschmolzenem Polymer gezogen, das die Fasern vollständig imprägniert.

Die UD-Tape-Linie kann in fünf Hauptkomponenten unterteilt werden:

- Spulengestell
- Spreizeinrichtung
- Schmelz-Imprägnierungseinheit mit Extruder und Imprägnierdüse
- Konsolidierungseinheit
- Abzugseinheit

Das Spulengestell erzeugt eine definierte Vorspannung während des Abwickelns der Rovings, was die Qualität des Spreizens beeinflusst und ein gleichmäßiges, verdrehungsfreies Abwickeln sicherstellt [Hop+21, et al. S. 1301 -1303]. Rovings sind Stränge oder Bündel von Endlosfasern oder Filamenten, die parallel zueinander angeordnet sind.

In der Spreizeinrichtung werden die ovalen Querschnittsformen der Rovings in eine homogen verteilte Form überführt. Dies geschieht durch acht verchromte Spreizstangen, die die Rovings zu einem breiten Faserbündel formen. Dieses Bündel wird dann in der Schmelz-Imprägnierungseinheit mit dem thermoplastischen Matrixmaterial imprägniert. Die verwendete Schmelz-Imprägnierungseinheit besteht aus einem Extruder und einer Imprägnierdüse, die das geschmolzene Matrixmaterial kontinuierlich zuführt und die Fasern imprägniert [Hop+21, et al. S. 1301 -1303].

Nach der Imprägnierung werden die Fasern durch eine Konsolidierungseinheit gezogen, die aus Rollensystemen und Kühlwalzen besteht. Im Rollensystem werden die finale Bandgeometrie und Oberflächenqualität unter definiertem Druck eingestellt. Schließlich wird das UD-Tape abgezogen und aufgewickelt [Hop+21, et al. S. 1301 -1303].

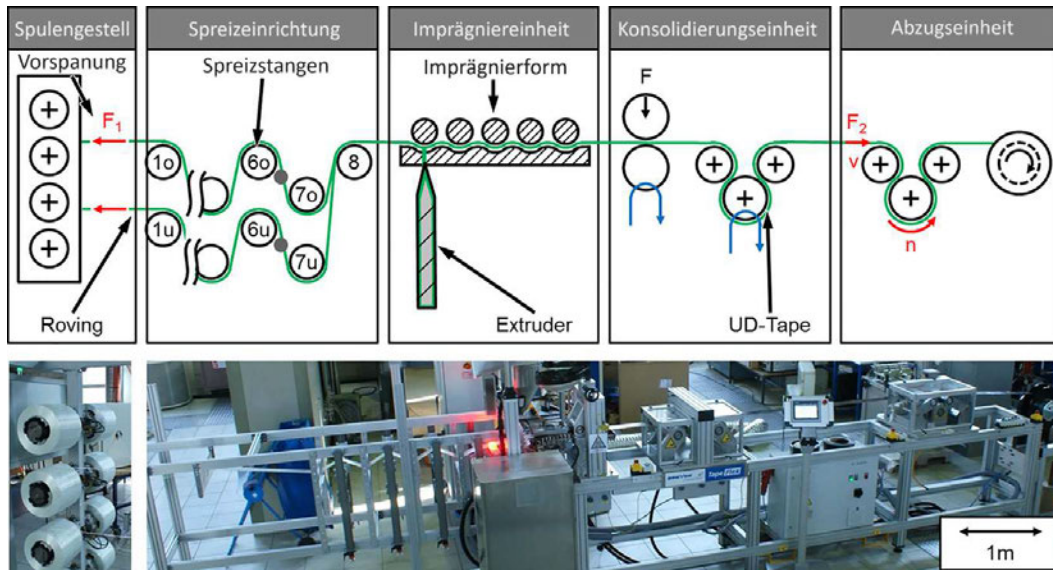


Abbildung 2.2.1: Herstellung von UD-Tape [Hop+21, et al. S. 1302]

2.2.2 Eigenschaften von UD-Tape

UD-Tapes zeichnen sich durch ihre mechanischen und physikalischen Eigenschaften aus, die sie attraktiv für technische Anwendungen machen. Eine der herausragenden Eigenschaften ist die hohe Zugfestigkeit bei geringem Gewicht. Durch die unidirektionale Ausrichtung der Fasern können UD-Tapes sehr hohe Lasten in Längsrichtung aufnehmen, was sie ideal für Anwendungen macht, bei denen hohe Festigkeit und Steifigkeit erforderlich sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass UD-Tapes aus recycelten Carbonfasern und Polyamid 6 eine hohe Zugfestigkeit von 1339 ± 28 MPa und ein E-Modul von 84.7 ± 2.3 GPa aufweisen, was sie zu einer leistungsfähigen und nachhaltigen Materialwahl macht [Khu+22, S. 133-138].

2.3 Klebstoffe

2.3.1 Grundlagen der Adhäsion und Kohäsion

Das grundlegendste Konzept von Klebstoffen ist die Unterscheidung von Adhäsions- und Kohäsionskräften. Adhäsion bezieht sich auf die Anziehungskräfte zwischen unterschiedlichen Materialien, die an ihrer Grenzfläche wirksam werden. Diese Kräfte sind verantwortlich dafür, dass der Klebstoff an der Oberfläche des zu verbindenden Materials haftet [Bod15, S.26-34]. Kohäsion hingegen beschreibt die Anziehungskräfte innerhalb eines Materials, die für dessen innere Festigkeit verantwortlich sind. Diese Kräfte sind das Resultat von Haupt- und Nebervalenzbindungen zwischen den Molekülen des Materials [Bod15, S.35]. In der Abb. 2.3.1 sieht man die Kräfte in der Klebeschicht dargestellt.

2.3.2 Adhäsionskraft

- mechanische Verklammerung: Der Klebstoff dringt in die Poren oder Rauheiten der zu verbindenden Oberflächen ein und härtet dort aus und führen zu einer physikalischen Verzahnung, die die Oberflächen fest miteinander verbindet.
- physikalische Wechselwirkungen: Die Van-der-Waals-Kräfte und andere physikalische Wechselwirkungen entstehen durch Anziehungskräfte zwischen nahen Molekülen. Diese Kräfte sind schwächer als chemische Bindungen, können aber durch eine große Kontaktfläche eine starke Bindung erzeugen.
- chemische Bindungen: Die Wasserstoffbrücken und kovalente Bindungen zwischen dem Klebstoff und den zu verbindenden Materialien sorgen für eine besonders starke Haftung.

2.3.3 Kohäsionskraft

- Hauptvalenzbindungen: Das sind die stärksten Bindungen im Material, einschließlich kovalenter Bindungen, die eine hohe innere Festigkeit garantieren sollen. Diese Bindungsarten sind wichtig für die Torsionsfestigkeit und die mechanische Stabilität der Klebstoffe.
- Nebervalenzbindungen: Dazu gehören Wasserstoffbrücken und Van-der-Waals-Kräfte, die zusätzliche Stabilität verleihen. Diese schwächeren Bindungen tragen ebenfalls zur Gesamtfestigkeit des Klebstoffs bei und beeinflussen dessen Verhalten unter mechanischer Belastung.

Die Kombination aus Adhäsions- und Kohäsionskräften ist entscheidend. Idealerweise bietet der Klebstoff sowohl hohe Adhäsions- als auch Kohäsionskräfte. Starke Adhäsionskräfte stellen eine gute Haftung an den zu verbindenden Oberflächen her, während starke Kohäsionskräfte sicherstellen, dass der Klebstoff selbst nicht unter Belastung versagt ([Hab17, S. 69-76]).

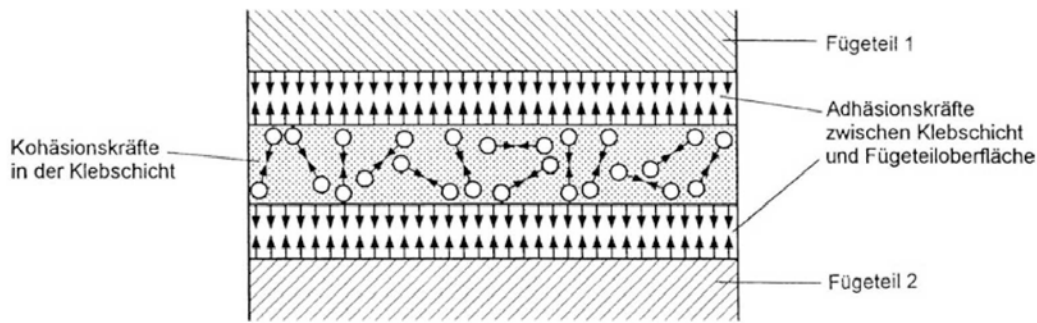


Abbildung 2.3.1: Übersicht Adhäsion- und Kohäsionskräfte beim Kleben [Hab17, S. 76]

2.3.4 2K-Acrylatklebstoffen

2K-Acrylatklebstoffe bestehen aus zwei Komponenten, die unmittelbar vor der Anwendung miteinander vermischt werden müssen. Diese Klebstoffe bieten eine schnelle Aushärtung und hohe Festigkeit, was sie ideal für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen macht. Die Polymerisation der Acrylate erfolgt durch radikalische Mechanismen, die durch die Zugabe von Peroxiden und Aminen als Beschleuniger ausgelöst werden [Hab17, S. 43].

Polymere Acrylate sind amorphe Substanzen, deren Glasübergangstemperatur über die Zusammensetzung der Monomere steuerbar ist. Das wichtigste Monomer für Klebstoffanwendungen ist Methylmethacrylat, dessen Polymer eine Glasübergangstemperatur von 105 °C aufweist. Durch kontrollierte Vernetzung mittels höher funktioneller Acrylate kann die chemische und thermische Beständigkeit weiter verbessert werden [Bod15, S. 175-176].

2.3.5 Cyanacrylatklebstoffen

Cyanacrylatklebstoffe, oft als Sekundenkleber bekannt, sind für ihre schnelle Aushärtung bei Raumtemperatur bekannt. Diese Klebstoffe basieren auf Ethyl- oder Methylcyanacrylat und polymerisieren durch eine anionische Reaktion, die durch die Anwesenheit von Feuchtigkeit oder alkalischen Substanzen initiiert wird. Die 2K-Systeme sind besonders für industrielle Anwendungen geeignet, bei denen eine kontrollierte Aushärtung und hohe Festigkeit erforderlich sind [Hab17, S. 192].

Polymere Cyanacrylate sind amorphe Materialien mit hoher Glasübergangstemperatur und ausgezeichneten Adhäsionseigenschaften auf einer Vielzahl von Substraten. Sie bieten eine sehr schnelle Aushärtung, hohe Endfestigkeit und Transparenz, was sie ideal für Anwendungen macht, bei denen optische Klarheit und schnelle Verarbeitung erforderlich sind [Hab17, S. 194].

2.3.6 2K-PUR-Klebstoffen

2K-PUR-Klebstoffe (Polyurethanklebstoffe) sind weit verbreitete Klebstoffsysteme, die aufgrund ihrer ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften und ihrer Vielseitigkeit in verschiedenen Industrien verwendet werden. Sie bestehen aus zwei Komponenten: einem Polyol (Harz) und einem Isocyanat (Härter), die unmittelbar vor der Anwendung vermischt werden müssen [Hab17, S. 38]. Polyurethanklebstoffe bieten eine hohe Flexibilität, gute Haftung auf verschiedenen Substraten und eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Feuchtigkeit und Chemikalien. Durch die Auswahl geeigneter Polyole und Isocyanate können die Eigenschaften des Klebstoffs an die spezifischen Anforderungen der Anwendung angepasst werden [Hab17, S. 38].

2.3.7 Primer

Primer sind spezielle Beschichtungen, die vor dem Auftragen von Klebstoffen auf Substrate aufgebracht werden, um die Adhäsion zu verbessern. Sie bilden eine haftvermittelnde Schicht, die die Oberflächenenergie des Substrats erhöht und chemische Bindungen zwischen dem Klebstoff und der Substratoberfläche ermöglicht [Hab17, S. 78]. Diese aktive Schicht kann chemische Bindungen mit dem Substrat eingehen und die Adhäsion des nachfolgenden Klebstoffs verbessern [Hab17, S. 113].

Funktion von Primern

Die Hauptfunktionen von Primern umfassen:

- Erhöhung der Oberflächenenergie des Substrats, was die Benetzung durch den Klebstoff verbessert [Hab17, S. 79]
- chemische Gruppen enthalten, die mit dem Klebstoff reagieren und somit eine feste chemische Bindung zwischen Substrat und Klebstoff herstellen [Hab17, S. 80]
- bieten oft zusätzlichen Schutz gegen Korrosion, insbesondere bei Metallsubstraten [Hab17, S. 81]
- Ausfüllen von Oberflächenunregelmäßigkeiten und Schaffen einer gleichmäßigen Haftfläche, verbessern die mechanische Verzahnung zwischen Klebstoff und Substrat [Hab17, S. 82]

2.4 Klebverfahren

Vorteile des Klebens im 3D-Druck

Das Kleben gehört zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren, bei denen zwei oder mehr Substrate durch einen Klebstoff verbunden werden. Im 3D-Druck bietet das Kleben zahlreiche Vorteile:

1. **Vielseitigkeit:** verschiedene Materialien können verbunden werden, was die Herstellung komplexer und multifunktionaler Bauteile ermöglicht [Doo17, S. 322].
2. **Gewichtsreduktion:** Verwendung leichter Materialien wie Kunststoffe führt zu leichteren und dennoch robusten Strukturen [Hab17, S. 3].
3. **Einfache Nachbearbeitung:** einfache Nachbearbeitungen und Anpassungen der gedruckten Teile und ist nützlich für Prototypen, da Änderungen und Anpassungen schnell und ohne großen Aufwand durchgeführt werden können [Hab17, S. 2].
4. **Kosteneffizienz:** oft günstiger als mechanische Verbindungen und erfordern weniger aufwendige Montageprozesse und führt zu Reduktion der Produktionskosten und Beschleunigung des Fertigungsprozesses [Hab17, S. 2].

Vorgehensweise beim Kleben

Die Herstellung einer Klebung umfasst mehrere wichtige Schritte:

1. **Oberflächenvorbereitung:**

Die Klebeflächen müssen sauber und frei von Verunreinigungen wie Schmutz, Öl oder Rost sein. Dies erfolgt oft durch Schleifen, Bürsten oder chemische Reinigung. Eine gründliche Entfettung mit geeigneten Lösungsmitteln wie Isopropanol oder Aceton ist erforderlich, um die Adhäsionskräfte zu gewährleisten [Hab17, S. 81].

Mechanische Verfahren wie Schleifen oder Strahlen sorgen für eine aufgeraute Oberfläche, die die Adhäsion verbessert. Durch das Aufrauen wird die Oberfläche vergrößert und die mechanische Verklammerung des Klebstoffs erleichtert [Hab17, S. 81].

2. **Klebstoffauftrag:**

Der Klebstoff wird gleichmäßig auf die vorbereiteten Oberflächen aufgetragen, um eine vollständige Benetzung sicherzustellen. Der Auftrag kann durch Sprühen, Streichen oder andere Methoden erfolgen, je nach Viskosität des Klebstoffs und den Anforderungen der Anwendung [Hab17, S. 85].

Beim Auftrag ist darauf zu achten, dass keine Luftblasen eingeschlossen werden, da diese die Festigkeit der Verbindung beeinträchtigen können. Techniken wie das Vakuumentgasen des Klebstoffs vor dem Auftrag oder die Anwendung unter leichtem Druck können dazu beitragen, Luftblasen zu vermeiden [Hab17, S. 95].

3. **Fügeteile verbinden:**

Die Fügeteile werden unter Druck zusammengeführt und fixiert, um eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs zu gewährleisten und die Adhäsionskräfte zu maximieren. Hierbei können spezielle Fixierhilfen oder Vorrichtungen verwendet werden, um den erforderlichen Druck sicherzustellen [Hab17, S. 95].

Der Klebstoff muss unter kontrollierten Bedingungen (Zeit, Temperatur, Druck) aushärten. Die Aushärtungszeit und -bedingungen variieren je nach Klebstofftyp und Anwendung. Beispielsweise erfordert ein Epoxidklebstoff oft eine thermische Aushärtung bei erhöhten Temperaturen, während Cyanacrylatklebstoffe bei Raumtemperatur aushärten [Hab17, S. 95].

2.5 Prüfung der Klebung nach DIN EN1465

Der Zugscherversuch nach DIN EN 1465 ist ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappklebungen. Diese Methode ermöglicht die Bewertung der Festigkeit und Zuverlässigkeit von Klebeverbindungen unter definierten Bedingungen. Die Zugscherfestigkeit wird durch eine Scherbelastung einer einschnittigen Überlappverbindung bestimmt. Die Zugkraft wirkt parallel zur Klebfläche und zur Hauptachse der Probe. Die Bruchkraft oder Bruchspannung wird als Ergebnis festgehalten. Das Verfahren gilt für Überlappklebungen, die einer Zugscherbelastung ausgesetzt sind. Es dient nicht der Berechnung von Konstruktionsklebeverbindungen, sondern primär der Bewertung der Klebefestigkeit unter standardisierten Bedingungen [DIN09].

Verweisungen auf Normen

- **EN 13887**: Leitlinien für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben
- **EN ISO 291**: Kunststoffe – Normalklimate für Konditionierung und Prüfung
- **EN ISO 527-1**: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Allgemeine Grundsätze
- **EN ISO 10365**: Klebstoffe – Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder

Prüfeinrichtungen

Die Prüfmaschine muss den Anforderungen der Klasse 1 entsprechen und eine konstante Zunahme der Belastung ermöglichen. Geeignete, sich selbst ausrichtende Einspannklemmen sind erforderlich, um unerwünschte Spannungsspitzen zu vermeiden. Die Prüfmaschine muss kalibriert sein, sodass die aufgezeichnete Kraft nicht mehr als 1% von der tatsächlich aufgetragenen Kraft abweicht. Die Einspannklemmen und das Zubehör müssen so gestaltet sein, dass sie mit der Probe ausgerichtet sind, sobald die Kraft aufgebracht wird. Dies verhindert Biegemomente und stellt sicher, dass die Längsachse der Probe mit der Zugrichtung der aufgetragenen Kraft durch die Mittelachse der Klemmanordnung übereinstimmt. Eine konstante Zunahme der Belastung oder eine entsprechende Prüfgeschwindigkeit muss gewährleistet sein [DIN09].

Probenherstellung und Vorbereitung

Proben müssen bestimmte Maße erfüllen, wie z. B. eine Überlappungslänge von 12,5 mm. Die Fügeiloberfläche muss sachgemäß behandelt werden, um eine optimale Klebung zu erzielen. Oberflächenbehandlungen können gemäß Herstellervorgaben oder EN 13887 erfolgen. Der Klebstoff ist gemäß Herstellerangaben aufzutragen und auszuhärten. Zur Kontrolle der Schichtdicke können kalibrierte Abstandhalter verwendet werden. Es sollten mindestens fünf Proben vorbereitet werden [DIN09]. Eine Klebevorrichtung ist erforderlich, um eine exakte Ausrichtung und Überlappung der Fügeile sicherzustellen und eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs zu gewährleisten.

Konditionierungs- und Prüfklimate

Die Proben müssen in einem Normalklima gemäß EN ISO 291 konditioniert und geprüft werden. Diese standardisierten Klimabedingungen sind wichtig für konsistente und reproduzierbare Ergebnisse, da Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Eigenschaften der Klebstoffe beeinflussen können [DIN09].

Durchführung des Tests

Die Proben werden symmetrisch in den Einspannklemmen angeordnet, sodass die Kraft parallel zur Klebungsebene wirkt. Die Prüfgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass die Verbindung innerhalb von 65 ± 20 Sekunden zerstört wird. Die größte Kraft während der Zerstörung wird als Bruchkraft festgehalten. Fehler können durch ungenaue Ausrichtung der Proben oder ungleichmäßige Klebschichtdicke auftreten [DIN09].

Angabe der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden als arithmetischer Mittelwert und Variationskoeffizient für Bruchkraft oder Bruchspannung angegeben. Die Zugscherfestigkeit wird durch Division der Bruchkraft durch die Klebefläche berechnet. Diese Werte sind wichtig für die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Klebverbindung. Für die Ergebnisdarstellungen wird der arithmetische Mittelwert und Variationskoeffizient verlangt [DIN09]. Der Variationskoeffizient zeigt an, wie groß die Streuung im Verhältnis zum Mittelwert ist, und ermöglicht den Vergleich der Streuung zwischen unterschiedlichen Messreihen.

Die Zugscherfestigkeit σ wird in den Einheiten MPa oder N/mm^2 angegeben und mit folgender Formel ermittelt:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{b \cdot \ddot{u}}$$

wobei:

- F_{\max} ... Bruchkraft
- A ... Klebefläche
- b ... Klebebreite
- \ddot{u} ... Klebeüberlapplänge

Der Mittelwert der Messreihen wird wie folgt berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Die Standardabweichung der Stichprobe wird wie folgt berechnet:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Der Variationskoeffizient in Prozent wird wie folgt berechnet:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100$$

wobei:

- \bar{x} ... Mittelwert der Stichprobe
- S ... Standardabweichung
- V ... Variationskoeffizient in Prozent
- n ... Anzahl der Stichproben
- x_i ... Messwert der i-ten Beobachtung

Ein wichtiger Bestandteil zur Beurteilung einer erfolgreichen Klebeverbindung ist die Analyse des Bruchbildes. Man unterscheidet zwischen Adhäsionsbruch (A), Kohäsionsbruch (K), Materialbruch (M), Grenzflächenbruch (G) und gemischtem Bruch [Bod15, S. 305].

Der Adhäsionsbruch tritt an der Grenzschicht zwischen Füge teil und Klebstoff auf. Er ist leicht zu erkennen, da auf einem Füge teil kein Klebstoff mehr verbleibt. Wenn ein Adhäsionsbruch auftritt, scheint es für den Anwender, als wäre der Klebstoff für die Anwendung nicht geeignet. Es kann darauf hindeuten, dass die Kohäsion stärker ist als die Adhäsion, bei gleichbleibender Festigkeit unter Belastung. Deswegen kann man nicht zwangsläufig beurteilen, dass der Klebstoff für die Anwendung ungeeignet ist. Damit der Eindruck eines Klebstoffversagens nicht entsteht, könnte man die Kohäsion durch Füllstoffe senken und so einen Kohäsionsbruch bei gleichbleibender Festigkeit erzwingen [Bod15, S. 305].

Der Kohäsionsbruch tritt innerhalb der Klebeverbindung gleichmäßig auf. Man erkennt ihn daran, dass an beiden Füge teilen noch gleich viele Klebstoffüberreste verbleiben. Beim Materialbruch versagt das Füge teil und wird dabei zerstört, nicht jedoch die Klebeverbindung. Der Grenzflächenbruch ähnelt dem Kohäsionsbruch, jedoch bricht die Verbindung nicht mittig. Er tritt sehr nahe an der Phasengrenze zu einem Füge teil auf und ist schwer mit bloßem Auge zu erkennen, da die Klebstoffrückstände sehr dünn sein können [Bod15, S. 305]. Beim gemischten Bruch kommt es sowohl zu Adhäsions- als auch Kohäsionsbruch [Bod15, S. 305]. Das Bruchbild ist ungleichmäßig verteilt. In Abbildung 2.5.1 sind die Unterschiede der Brüche zu sehen.

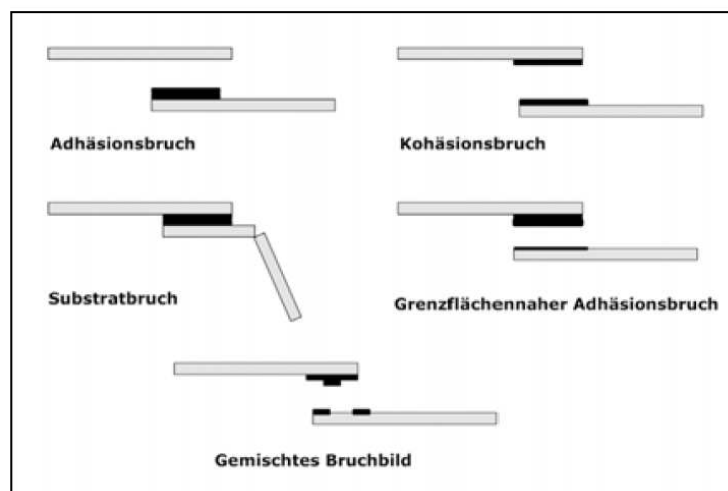


Abbildung 2.5.1: Bruchbilder [Bod15, S. 305]

Prüfbericht

Eine detaillierte Dokumentation ermöglicht die Bewertung der Klebequalität und Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Der Prüfbericht muss mindestens enthalten:

- Bezugnahme auf DIN EN 1465
- Identifikation des Klebstoffs und der Fügeteile
- Beschreibung des Klebeverfahrens und der Oberflächenvorbehandlung
- Einzelprüfergebnisse und statistische Auswertung
- Art des Bruchs gemäß EN ISO 10365
- Abweichungen oder Vorkommnisse während der Prüfung [DIN09].

2.6 Einflussfaktoren auf die Klebung

Die Zugscherbelastung ist von zentraler Bedeutung für die mechanische Festigkeit und Haltbarkeit von Klebeverbindungen, insbesondere wenn Kräfte parallel zur Klebefläche wirken. Diese Art der Belastung führt zu komplexen Spannungsverteilungen innerhalb der Klebeschicht.

Die Kraftübertragung erfolgt nicht gleichmäßig über die gesamte Klebefläche. Es entstehen an den Rändern der Klebung Spannungsspitzen, während in der Mitte der Fuge geringe Spannungen herrschen, wie in Abbildung 2.6.1 dargestellt. Das liegt daran, dass die Klebefuge durch die äußeren Kräfte ungleichmäßig gedehnt wird, was zur Konzentration der Spannung an den Rändern führt. Ein Versagen tritt idealerweise an den Stellen der höchsten Spannungsspitzen auf, sofern keine anderen Fehlerstellen in der Klebeschicht vorhanden sind, die den Bruch vorzeitig einleiten.

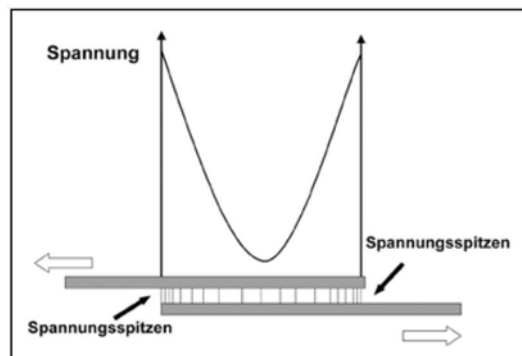


Abbildung 2.6.1: Spannungsverlauf bei Zugscherbelastung [Bod15, S. 292]

Die Größe der Überlappungsfläche spielt eine wesentliche Rolle für die Festigkeit einer Klebeverbindung. Grundsätzlich gilt, dass eine größere Klebefläche eine größere Kraft übertragen kann. Allerdings zeigt die Praxis, dass die übertragbare Kraft nicht linear steigt. Bei zunehmender Überlapplänge nimmt der Anteil der wirksamen Kraftübertragung ab, da die Spannungsspitzen an den Enden der Klebefuge dominieren. Somit verbessert sich die maximale Kraft ab einer bestimmten Klebefläche kaum. Die Abbildungen 2.6.2 und 2.6.3 verdeutlichen diese Zusammenhänge.

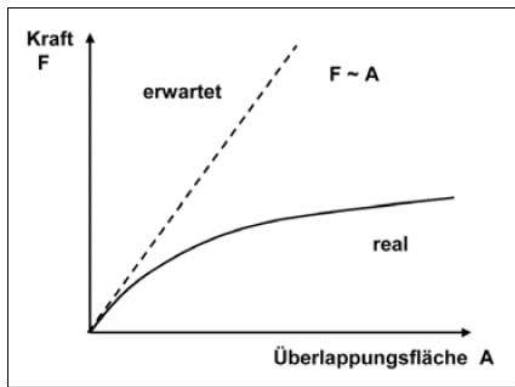


Abbildung 2.6.2: „Kraftübertragung als Funktion der Überlappungsfläche“ [Bod15, S. 292]

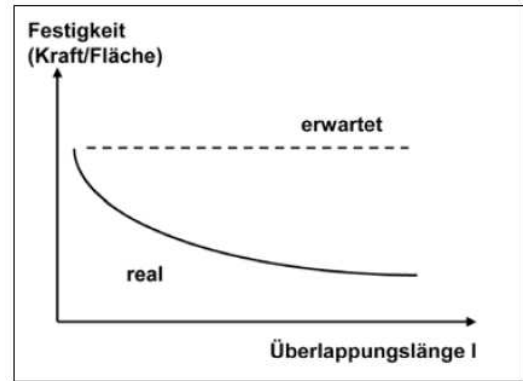


Abbildung 2.6.3: „Festigkeit als Funktion der Überlappungslänge“ [Bod15, S. 292]

Das Verhalten der Klebeverbindung unter Scherbelastung wird maßgeblich durch die Eigenschaften des Substrats beeinflusst. Dickere Substrate zeigen in der Regel höhere Festigkeiten, da sie sich unter Last weniger verwinden, wie in den Abbildungen 2.6.4 und 2.6.5 dargestellt. Durch die Verwindung treten Schälkomponenten auf, wodurch die Klebung einer Schäl- statt einer Zugscherbelastung ausgesetzt wird.

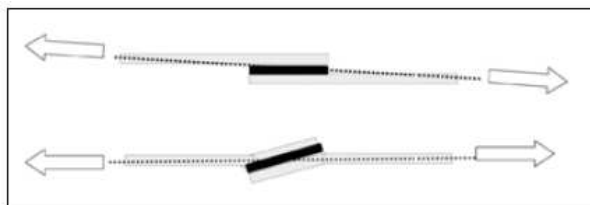


Abbildung 2.6.4: Spannungsverlauf bei Zugscherbelastung [Bod15, S. 292]

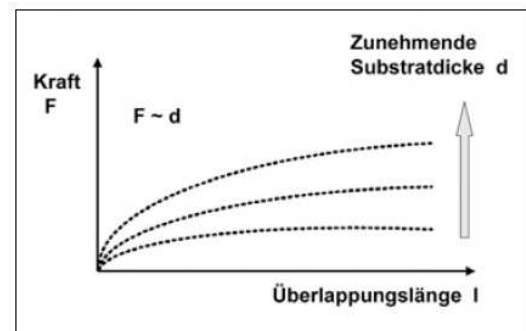


Abbildung 2.6.5: „Einfluss der Substratdicke auf die Klebkraft“ [Bod15, S. 293]

Zudem spielen der Elastizitätsmodul des Substrats und des Klebstoffs eine wichtige Rolle. Hochmodulige Substrate verteilen die Kräfte gleichmäßiger über die gesamte Klebefläche, was die Spannungsspitzen an den Enden der Klebefuge reduziert [Bod15, S. 293]. Dies führt zu einer insgesamt höheren Festigkeit der Verbindung, wie in Abbildung 2.6.6 schematisch dargestellt wird. Ebenfalls zu beachten ist die Klebeschichtdicke, da sie ein kritischer Faktor für die Zugscherfestigkeit der Klebeverbindung ist. Klebefugen im Bereich von 0,05 mm bis 0,20 mm liefern in der Regel die höchsten Festigkeiten, da sie flexibel genug sind, um Biegebeanspruchungen standzuhalten und gleichzeitig weniger Spannungsspitzen entwickeln. Die Abbildung 2.6.7 zeigt den Einfluss der Klebschichtdicke auf die übertragbare Kraft. Während sehr dünne Klebefugen unterhalb von 0,05 mm aufgrund von Substratberührungen, inhomogenen Klebschichtdicken und Benetzungsfehlern zu Einbußen führen können, neigen dickere Klebschichten dazu, höhere Eigenspannungen zu entwickeln und innerhalb der Klebschicht zu schrumpfen, was die Zugscherfestigkeit ebenfalls reduzieren kann [Bod15, S. 293-294].

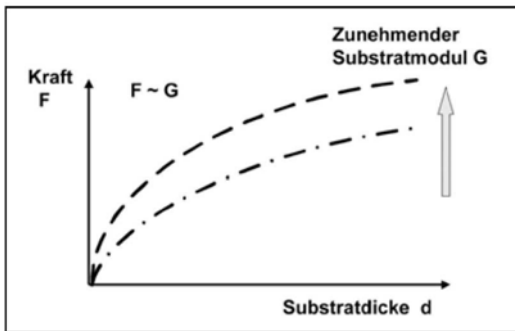


Abbildung 2.6.6: „Einfluss des Substratmoduls auf die Klebkraft“ [Bod15, S. 293]

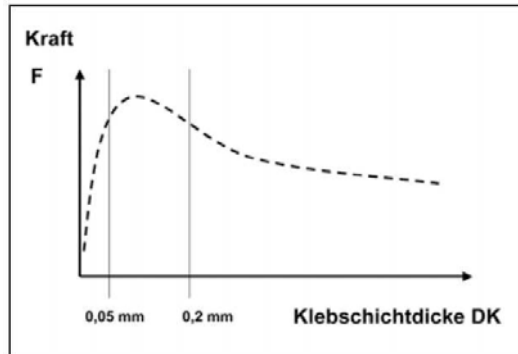


Abbildung 2.6.7: Einfluss der Klebschichtdicke auf Klebkraft [Bod15, S. 293]

Ein weiteres Problem bei der Klebung von Polymeren ist das Eindringen von Wasser in die Klebefuge. Der Grenzbereich zwischen Fügeteil und Klebstoff ist oft anfällig für eindringendes Wasser, das die Adhäsion dauerhaft beeinträchtigen kann. Die Diffusionsprozesse laufen langsam ab. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, können Behandlungsmaßnahmen ergriffen werden, wie beispielsweise das Überlackieren der Klebung zum Schutz vor Wasser [Bod15, S. 299].

Ein weiterer möglicher Einflussfaktor ist die Quellung. Polymere neigen häufig zur Quellung, wenn sie mit Flüssigkeiten in Kontakt kommen. Sie wirken wie Weichmacher, und dieser Vorgang ist in der Regel reversibel, führt aber zu einer Verringerung der mechanischen Festigkeit und zu Veränderungen der Bauteilgeometrie. Hochvernetzte Polymere wie Duroplasten sind gegenüber Thermoplasten und Elastomeren vorteilhafter, da sie tendenziell weniger zu Quellungen neigen [Bod15, S. 298].

3 Experimentelle Methodik und Durchführung

Für die Untersuchungen der Klebeverbindungen ging ich quantitativ und qualitativ vor. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet und entsprechend interpretiert. Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurden Proben angefertigt und daran ein Zugscherversuch nach EN DIN 1465 durchgeführt. Da es verschiedene Methoden zum Fügen wie Schmelzen, Nieten und Kleben gab, wurde entschieden, die Bauteile mit Klebungen zu verbinden, da dies den wirtschaftlichsten und einfachsten Weg in einer Produktion darstellt.

Es sollen UD-Tapes aus Kohlefaser mit PA6-Matrix mit drei verschiedenen 3D-Druck-Materialien verklebt werden. Die dabei verwendeten Klebstoffe waren jeweils unterschiedliche Arten. Es wurden ein 2K-PUR-Klebstoff von Technicoll, ein 2K-Hybridklebstoff auf Acrylat- und Cyanacrylat-Basis von Henkel Loctite sowie ein 2K-Acrylat-Klebstoff von 3M verwendet. Dabei soll herausgefunden werden, welcher Klebstoff die höchste Zugscherfestigkeit aufweist. Die variable Klebschichtdicke wurde durch das Einbringen von Abstandsdrähten mit einer Dicke von 0,2 mm, wie in der DIN 1465 vorgeschlagen, kontrolliert. Eine Messreihe umfasste 5 Proben, und insgesamt wurden 105 Einzelversuche durchgeführt.

3.1 Beschreibung der Materialien und Klebstoffe

Es wurden drei verschiedene Kunststoffe von drei Herstellern begutachtet. Es werden Dichte, mechanische Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Zugdehnung sowie spezifische Temperaturen in den Tabellen angegeben.

Das Kunststoff-Filament Greentec Pro natural von Extrudr ist eine PLA-Alternative. Es handelt sich um einen nachhaltigen und ölfreien Kunststoff, der sich durch seine hohe Wärmebeständigkeit und gute mechanische Eigenschaften auszeichnet. Der VICAT-Erweichungspunkt zeigt, dass das Material auch unter Belastung und bei höheren Temperaturen formstabil bleibt [Ext24b]. In der folgenden Tabelle 3.1.1 sind die Eigenschaften des Materials aufgeführt. Leider geht aus dem Datenblatt nicht hervor, wie die Proben angefertigt wurden.

Tabelle 3.1.1: Technische Daten von GreenTec Pro von Extrudr [Ext24b]

Eigenschaft	Methode	Werte
Name		Greentec Pro
Hersteller		Extrudr
Farbe		natural
Filamentdurchmesser		1,75 mm
Dichte	ISO 1183	1,35 g/cm ³
Zugmodul	ISO 527	4300 MPa
Zugfestigkeit	ISO 527	58 MPa
Zugdehnung	ISO 527	2,8 %
Kerbschlagzähigkeit	ISO 179	4 kJ/m ²
VICAT-Erweichungspunkt	ISO 306	160 °C
Düsentemperatur		210-230 °C
Betttemperatur		20-90 °C

PolyLite PC von Polymaker ist ein Polycarbonat-Kunststoff mit einer hohen Steifigkeit und guten Wärmebeständigkeit, was ihn ideal für technische Anwendungen macht [Pol20]. PC ist in seiner natürlichen Form vollständig transparent und farblos. In der folgenden Tabelle 3.1.2 sind die Eigenschaften des Materials aufgelistet.

Tabelle 3.1.2: Technische Daten von PolyLite PC von Polymaker [Pol20]

Eigenschaft	Methode	Werte
Name		PolyLite PC
Hersteller		Polymaker
Farbe		transparent, farblos
Filamentdurchmesser		1,75 mm
Dichte	ISO 1183	1,19 g/cm ³
Zugmodul (XY)	ISO 527	2497 MPa
Zugfestigkeit (XY)	ISO 527	69,1 MPa
Zugdehnung (XY)	ISO 527	4,8 %
Kerbschlagzähigkeit (XY)	ISO 179	4,1 kJ/m ²
VICAT-Erweichungspunkt	ISO 306	119,5 °C
Düsentemperatur		250-270 °C
Betttemperatur		90-105 °C

Das Material Ultrafuse PA von BASF ist eine Polymermischung aus PA6 und PA66, die für den 3D-Druck optimiert ist. Dieses Filament bietet eine hohe Flexibilität und Zugfestigkeit und ist ideal für Anwendungen mit hohen Anforderungen an Festigkeit und Dehnung geeignet. In der Tabelle 3.1.4 sind die Materialeigenschaften beschrieben.

Tabelle 3.1.3: Technische Daten von Ultrafuse PA von BASF [BAS19]

Eigenschaft	Methode	Werte
Name		Ultrafuse PA
Hersteller		BASF
Farbe		natural
Filamentdurchmesser		1,75 mm
Dichte (konditioniert)	ISO 1183-1	1,05 g/cm ³
Zugmodul (XY)	ISO 527	2419 MPa
Zugfestigkeit (XY)	ISO 527	61,4 MPa
Zugdehnung (XY)	ISO 527	9,6 %
Kerbschlagzähigkeit (XY)	ISO 179-2	5,6 kJ/m ²
VICAT-Erweichungspunkt	ISO 306	172 °C
Düsentemperatur		220 bis 250 °C
Betttemperatur		90 bis 120 °C

Die Rolle Kohlefaser-UD-Tape mit PA6-Matrix wurde von der Firma BÜFA Thermoplastic Composites GmbH & Co. KG bereitgestellt. Leider konnten zum jetzigen Zeitpunkt keine Datenblätter gefunden werden. Es scheint, dass die Firma nicht mehr tätig ist und daher die Website nicht mehr zugänglich ist. Dennoch konnten einige Informationen vom Beschriftungslabel gesammelt werden. 3M DP8410NS ist ein hochleistungsfähiger, zweikomponentiger Acrylat-

Tabelle 3.1.4: Technische Daten von Kohlenfaser UD-Tape von BÜFA

Eigenschaft	Methode	Werte
Name		UD-Tape CF-PA6 170
Hersteller		BÜFA
Farbe		schwarz
Matrix		PA6
Faserart		Kohlenfaser
Dicke		170 µm
Breite		12,7 mm
Dichte		/
Zugmodul		/
Zugfestigkeit		/
Zugdehnung		/
Chargennummer		14212222AAA2_2016-2-2

kleber. Er besitzt eine hohe Zugfestigkeit und Beständigkeit gegenüber hohen Temperaturen. Er bietet eine hervorragende Haftung auf verschiedenen Metallen und Kunststoffen, auch bei leicht öligen Oberflächen [3M22]. In der folgenden Tabelle 3.1.5 sind die spezifischen Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 3.1.5: Klebstoffeigenschaften von 3M DP8410NS [3M22]

Eigenschaft	Werte
Name	DP8410NS
Hersteller	3M
Chemische Basis	Acrylat
Farbe	Grün
Dichte	1,03 g/cm ³
Viskosität	60000 mPas
Mischungsverhältnis (Volumen)	10:1
Topfzeit	10-12 Minuten
Handfestigkeit	N/A
Aushärtezeit	24 Stunden
Zugfestigkeit	15,3 MPa
Zugdehnung	6 %
Zugscherfestigkeit (PC)	9,2 MPa (Materialversagen)
Verarbeitungstemperatur	16 °C oder höher
Temperatureinsatzbereich	-40 bis +150 °C
Chargennummer	3101W3111T

Der Klebstoff HY4070 von Henkel Loctite ist ein Cyanacrylat/Acrylat-Hybridklebstoff, der schnelle Aushärtung und hohe Festigkeit kombiniert. Er eignet sich ideal für Einsatzgebiete mit hohen Temperaturen, nassen Umgebungen und mäßiger mechanischer Belastung. Dank des mitgelieferten Applikators lässt sich der Klebstoff schnell und mühelos einsetzen [Hen17]. In der folgenden Tabelle 3.1.6 sind die spezifischen Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 3.1.6: Klebstoffeigenschaften von Henkel Loctite HY4070 [Hen17]

Eigenschaft	Werte
Name	HY4070
Hersteller	Henkel Loctite
Chemische Basis	Cyanacrylat/Acrylat
Farbe	Transparent/Klar
Dichte	1,05-1,1 g/cm ³
Viskosität	A: 200-1300 mPas
Mischungsverhältnis (Volumen)	10:1
Topfzeit	4-5 Minuten
Handfestigkeit	<60 Sekunden (0,05 mm Spalt)
Aushärtezeit	24 Stunden
Zugfestigkeit	14,6 MPa
Zugdehnung	4.9 %
Zugscherfestigkeit (PC)	12 MPa (Materialversagen)
Verarbeitungstemperatur	Raumtemperatur
Temperatureinsatzbereich	-40 bis +120 °C
Chargennummer	33504020

Für den Technicoll 9431 gibt es zusätzlich einen Primer für Polyamide. Er wird nach dem Aufschütteln mit einem Tuch oder Pinsel dünn und gleichmäßig aufgetragen. Die Anhaftung der Technicoll-Klebstoffe auf PA soll nach einer Wartezeit von 50 Minuten deutlich verbessert werden. In der folgenden Tabelle 3.1.8 sind die wichtigsten Produktdaten aufgelistet.

Tabelle 3.1.7: Klebstoffeigenschaften von Technicoll 9431 [Tec18]

Eigenschaft	Werte
Name	9431
Hersteller	Technicoll
Chemische Basis	Polyurethan
Farbe	Schwarz/Beige
Dichte	1,3 g/cm ³
Viskosität	600000 mPas
Mischungsverhältnis (Volumen)	100:130
Topfzeit	12 Minuten
Handfestigkeit	90 Minuten
Aushärtezeit	48 Stunden
Zugfestigkeit	8 MPa
Zugdehnung	95 %
Zugscherfestigkeit (PC)	~9 MPa (Materialversagen)
Verarbeitungstemperatur	15-30 °C
Temperatureinsatzbereich	-40 bis +100 °C
Chargennummer	24030601

Für den Technicoll 9431 gibt es zusätzlich einen Primer für Polyamide. Es wird nach dem Aufschütteln mit einem Tuch oder Pinsel dünn und gleichmäßig aufgetragen. Die Anhaftung der Technicoll-Klebstoffe auf PA sollen nach einer Wartezeit von 50 Minuten deutlich verbessert werden. In der folgenden Tabelle (Tab.3.1.8) sind die wichtigsten Produktdaten aufgelistet.

Tabelle 3.1.8: Primereigenschaften von Technicoll 9603-1 [Tec19]

Eigenschaft	Werte
Name	9603-1
Hersteller	Technicoll
Chemische Basis	Harze gelöst in organischen Lösungsmitteln
Farbe	farblos
Dichte	0,8 g/cm ³
Viskosität	100 mPas
Ablüftzeit (+20 °C)	min. 50 Minuten bis max. 2 Stunden
Verarbeitungstemperatur	15 bis 25 °C
Chargennummer	23120501

3.1.1 Auswahlgrund der Materialien und Klebstoffe

„Um eine gute Klebverbindung herzustellen, muss der Anwender viele Faktoren berücksichtigen. Der Klebstoff selbst hat natürlich einen signifikanten Einfluss auf die Qualität bzw. Festigkeit einer Klebung. Deshalb müssen zunächst die optimale Klebstoffart und der ideale Klebstofftyp für eine Klebaufgabe ausgewählt werden – was allein aufgrund der etwa 30.000 am Markt erhältlichen Klebstoffe eine Herausforderung darstellt. Im Hinblick auf die Füge-
teilwerkstoffe hat auch die Qualität der Klebflächen für die Klebung eine große Bedeutung.“
[JJ20]

Die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe waren ein besonders wichtiger Faktor. Polycarbonat wurde aufgrund seiner hohen Schlagzähigkeit und Zugfestigkeit ausgewählt, was es zu einem interessanten Material für Branchen wie die Automobil-, Luftfahrt- oder Elektronikindustrie macht. Polyamid weist ebenfalls hervorragende mechanische Eigenschaften und eine besonders hohe chemische Beständigkeit auf. Es besitzt eine hohe Zug- und Biegefestigkeit und eignet sich für Anwendungen, bei denen hohe Festigkeit und Biegebelastung erforderlich sind. Kohlefaser-UD-Tape wurde aufgrund seiner hohen Zugfestigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht ausgewählt. Zudem besteht die Matrix aus PA6, was im Gegensatz zu Kunststoffen wie Polyethylen eine relativ einfache Klebeverbindung ermöglicht. Dadurch ist es auch möglich, handelsübliche Klebstoffe zu verwenden, die es ermöglichen, Polyamide ohne Primer oder chemische Vorbehandlung zu kleben.

Die Datenblätter und die Beratung durch die Klebstoffhersteller erleichterten die Auswahl erheblich. Der 2K-PUR-Klebstoff 9431 von Technicoll wurde aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften und seiner Eignung für die vorgesehenen Anwendungen ausgewählt. Er besitzt laut Datenblatt eine gute Anfangshaftung und eine gute Zugscherfestigkeit bei Polycarbonat und Polyamid, wobei bei Polyamid ein Primer verwendet werden sollte. Der 2K-Hybridklebstoff HY4070 von Henkel versprach eine hohe Zugfestigkeit für Polycarbonat und eine einfache Anwendung, da er, im Gegensatz zu den anderen beiden Klebstoffen, kein Spezialwerkzeug erforderte. Der 2K-Acrylat-Klebstoff DP8410NS Green von 3M erfüllte laut Datenblatt die Anforderungen. Eine hohe Zugscherfestigkeit und Flexibilität ist angegeben. Zudem wurde dieser Klebstoff als Strukturklebstoff in der Industrie erfolgreich angewendet. Dank des Applikators sollte das Mischen und Auftragen optimal erfolgen.

Ein weiteres Auswahlkriterium waren die Verfügbarkeit und die damit verbundenen Kosten. Greentec Pro, PC und PA sind in hoher Verfügbarkeit erhältlich und zählen als technische Kunststoffe zu den relativ preiswerten Materialien. Da PC und PA schon lange auf dem Markt sind und es viele Hersteller gibt, sind sie pro Kilogramm für ungefähr 30 € erhältlich. Zudem sind diese Filamente in unterschiedlichen Qualitäten, Farben und als kohle- oder glasfaserverstärkt erhältlich, wobei die Eigenschaften nochmals verbessert werden sollen. Bei Greentec Pro beträgt der Preis für ein Kilogramm ungefähr 55 €, da es neu ist und nur von einem Hersteller angeboten wird. Auch hier gibt es verschiedene Qualitäten und Farben. Für diese Arbeit wurden die Kunststoffe in ihrer natürlichen Form ohne Zusatz- und Farbstoffe verwendet. Bei den Klebstoffen gab es viele Spezialklebstoffe, und einige kosteten bis zu 300 € pro Dosis. Ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis wurde bei ungefähr 30 € pro Dosis gefunden. Somit rückt die Wirtschaftlichkeit in den Vordergrund.

Die Umweltfreundlichkeit und Nachhaltigkeit ist in der modernen Zeit zunehmend wichtiger. Neben den klassischen technischen Kunststoffen wie Polycarbonat oder Polyamid wurde auch ein relativ neues Kunststoff-Filament namens Greentec Pro von Extrudr verwendet. Laut Hersteller stammt es aus der BIO Performance Reihe und ist speziell entwickelt für Ultra High Performance-Anwendungen [Ext24a] und soll eine PLA-Alternative sein. Derzeit ist dieser Hersteller der einzige, der dieses Filament für FDM anbietet. Es soll dem häufig im FDM-Druck angewandten PLA-Filament in den Materialeigenschaften überlegen und zudem biologisch abbaubar sein. Das führt dazu, dass dieses Material eine gute Alternative für nachhaltigen 3D-Druck sein kann.

3.2 Vorbereitung und Klebung der Proben

Die Proben wurden mit dem FDM-Verfahren auf einem Bambu Lab X1E von Bambu Lab angefertigt und das Slicer-Programm heißt Bambu Studio in der Version 1.9.1.67. Jedes Material hat spezifische Einstellungen, und die Maschinenparameter sind allgemeine Grundeinstellungen für das jeweilige Material. Es wurden nur Anpassungen in den Bereichen Wandung, Infill, Geschwindigkeit, Temperatur und Kühlung vorgenommen. Die Filamentrollen wurden neu aus der Verpackung entnommen und nicht nochmal vorher getrocknet. Eine Trocknung hätte wahrscheinlich zu höheren Festigkeiten geführt, das wurde nicht durchgeführt, da es realistischer ist, dass neue Filamentrollen direkt verwendet werden. Es empfiehlt sich trotzdem die Filamente vorher zu trocknen.

Für GreenTec Pro wurde folgendes Profil ausgewählt und Anpassungen vorgenommen. Hier konnte die ganze Bauplatte benutzt werden. Die Bauplatte ist texturiert und bietet dadurch eine bessere Haftung als eine glatte Bauplatte. Es konnten in zwei Drucken 45 Proben gedruckt werden. Auch musste zuerst ein Filamentprofil eingerichtet werden. Die Einstellungen dafür hat der Hersteller zur Verfügung gestellt. In der folgenden Tabelle 3.2.1 sind die Parameter aufgelistet.

Tabelle 3.2.1: Druckparameter für GreenTec Pro mit dem Bambulab X1E

Parameter	Einstellungen
Düsendurchmesser	0,4 mm
Druckplatte	Texture
Maschinenprofil	Bambu Lab X1E 0.4 nozzle
Druckprofil	0.20 Standard @BBL X1E
Filamentprofil	Extrdr Greentec pro @Bambu Lab X1E 0.4 nozzle
Wände	2
Infill	100 %
Infillwinkel	45°
Düsentemperatur	220 bis 226 °C
Betttemperatur	65 °C
Kammertemperatur	0 °C (Aus)
Flussverhältnis	0,98
Lüftergeschwindigkeit	50 bis 90 %
Hilfslüfter	80 %
Druckgeschwindigkeiten	Standard
Haftungskleber	Keine

Für das Ultrafuse PA-Filament von BASF waren viele Anpassungen nötig. Aufgrund des starken Verzugs musste zusätzlich ein 5 mm Rand (Brim) hinzugefügt und der PA-Haftverstärker von Magicgoo für die Bauplatte verwendet werden. Hier konnte nur in kleineren Chargen gearbeitet werden, da die Gefahr zu groß war, dass, falls eine Probe fehlschlägt, alle fehlschlagen. Jeweils 10 Proben wurden pro Druckjob gedruckt. Als Grundprofil für das Filament wurde das allgemeine PA-Profil von Bambu Lab genutzt und angepasst, wie in Tabelle 3.2.3 zu sehen ist. Das Grundprofil für Polylite PC von Polymaker wurde ebenfalls dem Datenblatt des Herstellers entnommen und angepasst. Die Bauplatte wurde mit einem PC-Haftverstärker von Magicgoo benetzt, um den Verzug zu vermindern. Im Gegensatz zu PA konnte hier der

Tabelle 3.2.2: Druckparameter für PA mit dem Bambulab X1E

Parameter	Einstellungen
Düsendurchmesser	0,4 mm
Druckplatte	Engineering
Maschinenprofil	Bambu Lab X1E 0.4 nozzle
Druckprofil	0.20 Standard @BBL X1E
Filamentprofil	Generic PA
Wände	2
Infill	100 %
Infillwinkel	45°
Düsentemperatur	250 °C
Betttemperatur	110 °C
Kammertemperatur	60 °C
Flussverhältnis	1,00
Lüftergeschwindigkeit	0 %
Hilfslüfter	0 %
Druckgeschwindigkeiten	50 mm/s
Haftungskleber	Magicgoo PA

Bauteillüfter mit 50 % laufen, wodurch bessere Schichtqualitäten erzielt, da Wärmestaus im Bauteil verhindert wurden. Dank der guten Haftung an der Bauplatte konnten in 2 Drucken 45 Proben erstellt werden. Die vollständigen Parameter sind in Tabelle 3.2.3 zu sehen.

Tabelle 3.2.3: Druckparameter für PC mit dem Bambulab X1E

Parameter	Einstellungen
Düsendurchmesser	0,4 mm
Druckplatte	Engineering
Maschinenprofil	Bambu Lab X1E 0.4 nozzle
Druckprofil	0.20 Standard @BBL X1E
Filamentprofil	Polylite PC @BBL X1E
Wände	2
Infill	100 %
Infillwinkel	45°
Düsentemperatur	255 °C
Betttemperatur	110 °C
Kammertemperatur	60 °C
Flussverhältnis	1,00
Lüftergeschwindigkeit	50 %
Hilfslüfter	0 %
Druckgeschwindigkeiten	50 mm/s
Haftungskleber	Magicgoo PC

3.2.1 Bauteilgeometrie

Die Geometrie der Proben orientiert sich an den Vorgaben der DIN EN 1465. Sie ähnelt einer halben Zugprobe, da diese Proben noch eine Übergangsschulter besitzen. Dies soll verhindern, dass der Bruch innerhalb der Einspannung stattfindet. Die UD-Tapes wurden mit einer Länge von $100 \pm 0,25$ mm zugeschnitten und sie besitzen eine Breite von $12,7 \pm 0,25$ mm. Im Gegensatz zur Norm beträgt die Probenbreite 12,7 mm statt der beschriebenen 25 mm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass UD-Tapes mit einer Breite von 12,7 mm ausgewählt wurden. In Abschnitt 5 der Norm wird die Möglichkeit zur Abweichung der Maße, wie in Abb. 3.2.1 dargestellt, beschrieben. Dabei wird darauf hingewiesen, dass es zu Schwierigkeiten bei der Interpretation führen kann [DIN09, S. 4]. In Abb. 3.2.1 ist die vereinfachte Geometrie ohne Übergangsschulter dargestellt.

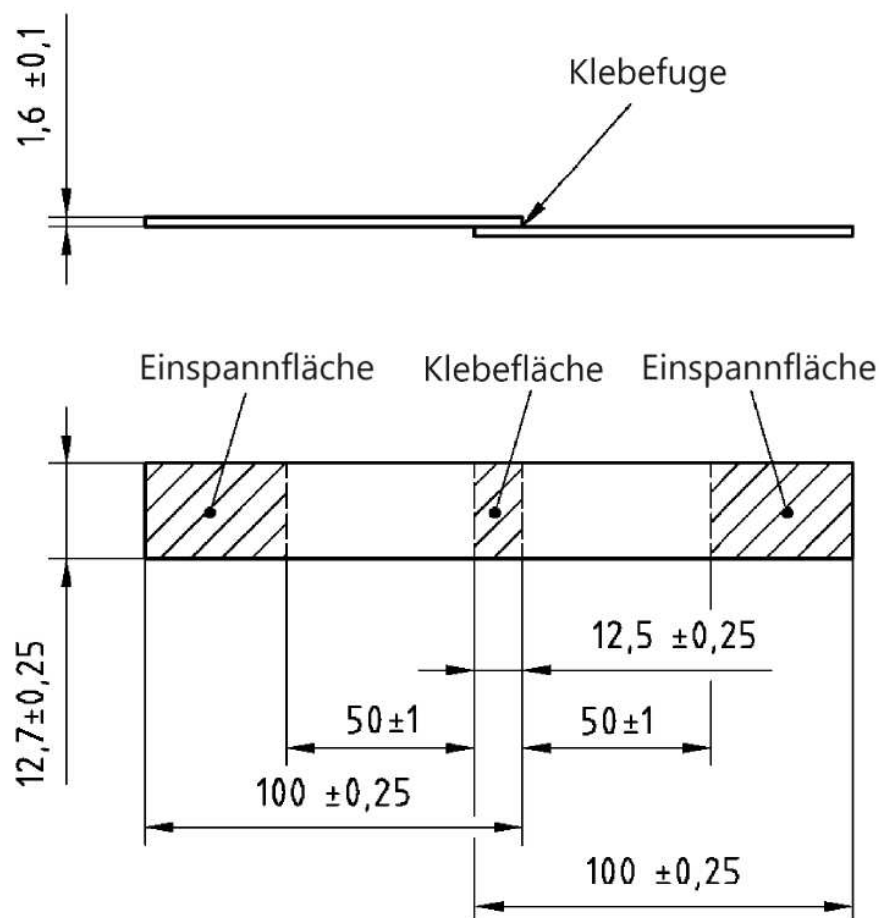


Abbildung 3.2.1: Geometrieproben [DIN09, S. 8, geändert]

3.2.2 Probenkombinationen

Wie bereits erwähnt, ist geplant, jede 3D-gedruckte Probe mit UD-Tape zu verkleben, wobei die 3 Klebstoffe eingesetzt werden. Die Materialien werden zusätzlich untereinander verklebt und auch mit den 3 Klebstoffen verbunden.

Für die Probenbenennung wird zuerst die Probennummer, dann der Klebstoff und zuletzt die Kombination angegeben. In den Tabellen 3.2.4, 3.2.5 und 3.2.6 sind die Benennungen und Kombinationen zu sehen. Außerdem werden die Klebstoffe nach ihren Herstellern benannt. Die Klebstoffe 3M DP8410NS, Loctite HY 4070 und Technicoll 9431 werden jeweils mit den Herstellerkürzeln 3M, HL und TC abgekürzt.

Dies wird anhand des Beispiels 2_3M_CFUD-PA erläutert.

2 \cong zweite Probe der Messreihe

3M \cong Klebstoff/Hersteller

CFUD-PA \cong Kombination: Kohlefaser-UD-Tape mit PA

Tabelle 3.2.4: Bezeichnungen und Kombinationen für 3M-Klebstoff

	GreenTec Pro	PA	PC
(CF)UD-Tape	1_3M_CFUD-Green 2_3M_CFUD-Green 3_3M_CFUD-Green 4_3M_CFUD-Green 5_3M_CFUD-Green	1_3M_CFUD-PA 2_3M_CFUD-PA 3_3M_CFUD-PA 4_3M_CFUD-PA 5_3M_CFUD-PA	1_3M_CFUD-PC 2_3M_CFUD-PC 3_3M_CFUD-PC 4_3M_CFUD-PC 5_3M_CFUD-PC
GreenTec Pro	1_3M_Green-Green 2_3M_Green-Green 3_3M_Green-Green 4_3M_Green-Green 5_3M_Green-Green		
PA		1_3M_PA-PA 2_3M_PA-PA 3_3M_PA-PA 4_3M_PA-PA 5_3M_PA-PA	
PC			1_3M_PC-PC 2_3M_PC-PC 3_3M_PC-PC 4_3M_PC-PC 5_3M_PC-PC

Tabelle 3.2.5: Bezeichnungen und Kombinationen für Henkel-Klebstoff

	GreenTec Pro	PA	PC
(CF)UD-Tape	1_HL_CFUD-Green 2_HL_CFUD-Green 3_HL_CFUD-Green 4_HL_CFUD-Green 5_HL_CFUD-Green	1_HL_CFUD-PA 2_HL_CFUD-PA 3_HL_CFUD-PA 4_HL_CFUD-PA 5_HL_CFUD-PA	1_HL_CFUD-PC 2_HL_CFUD-PC 3_HL_CFUD-PC 4_HL_CFUD-PC 5_HL_CFUD-PC
GreenTec Pro	1_HL_Green-Green 2_HL_Green-Green 3_HL_Green-Green 4_HL_Green-Green 5_HL_Green-Green		
PA		1_HL_PA-PA 2_HL_PA-PA 3_HL_PA-PA 4_HL_PA-PA 5_HL_PA-PA	
PC			1_HL_PC-PC 2_HL_PC-PC 3_HL_PC-PC 4_HL_PC-PC 5_HL_PC-PC

Tabelle 3.2.6: Bezeichnungen und Kombinationen für Technicoll-Klebstoff

	GreenTec Pro	PA	PC
(CF)UD-Tape	1_TC_CFUD-Green 2_TC_CFUD-Green 3_TC_CFUD-Green 4_TC_CFUD-Green 5_TC_CFUD-Green	1_TC_CFUD-PA 2_TC_CFUD-PA 3_TC_CFUD-PA 4_TC_CFUD-PA 5_TC_CFUD-PA	1_TC_CFUD-PC 2_TC_CFUD-PC 3_TC_CFUD-PC 4_TC_CFUD-PC 5_TC_CFUD-PC
GreenTec Pro	1_TC_Green-Green 2_TC_Green-Green 3_TC_Green-Green 4_TC_Green-Green 5_TC_Green-Green		
PA		1_TC_PA-PA 2_TC_PA-PA 3_TC_PA-PA 4_TC_PA-PA 5_TC_PA-PA	
PC			1_TC_PC-PC 2_TC_PC-PC 3_TC_PC-PC 4_TC_PC-PC 5_TC_PC-PC

3.2.3 Vorbereitung

Nach dem Druck wurden die Proben mit Isopropanol gesäubert. Die Hersteller gaben Anweisungen zur Vorbehandlung der Oberflächen. Im Grunde lautete die Empfehlung bei jedem Hersteller: Zuerst die Oberfläche mit 99,9 % Isopropanol säubern, dann anschleifen oder anrauen und schließlich die Oberfläche erneut mit 99,9 % Isopropanol reinigen. Das Schleifpapier hatte eine Körnung von 150. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die gesamte Probenbreite von $12,5 \pm 0,25$ mm behandelt wurde. In Abbildung 3.2.2 ist die vorbereitete Klebefläche für das Füge­teil aus Polycarbonat zu sehen. Nur beim 2K-PUR-Kleber von Technicoll ist noch ein PA-Primer zu verwenden. Nach dem Aufschütteln wurden alle Füge­teile und UD-Tapes, die aus PA bestehen, nach dem Schleifen und der erneuten Reinigung mit Primer dünn und flächig benetzt. Anschließend wurde gemäß der Anleitung mindestens 50 Minuten gewartet; danach musste das Bauteil innerhalb von 70 Minuten geklebt werden. Die Proben und Klebstoffe wurden sonnengeschützt gelagert, da sonst durch die UV-Strahlung die Materialeigenschaften geändert werden könnten.

Für die Klebung wurde eine Klebevorrichtung konstruiert, wie in Abb.3.2.3 zu sehen. Das 3D-gedruckte Bauteil wurde auf einer Werkbank fixiert. Die Aussparungen auf der Oberseite der Vorrichtung markieren die Klebefläche der Probe, damit es beim Auftrag einfacher ist, die gesamte Klebefläche zu benetzen. Die Vorrichtung wurde aus dem Material PE gedruckt, da dieses schlecht mit den Klebstoffen haftet. Somit können die Proben leicht aus der Vorrichtung entfernt werden. Um die optimale Klebschichtdicke von 0,2 mm zu erreichen, wurde ein Abstandshalter aus Draht in die Klebung eingebracht. Der Edelstahldraht wurde zugeschnitten und mit Klebeband außerhalb der Klebefläche fixiert. Es war wichtig, dass der Draht parallel zur Belastungsrichtung eingebracht wird, damit die Wirkung auf die Verbindung minimal ist [DIN09, S. 6]. Auch konnte man in der Konstruktion der Vorrichtung die Klebschichtdicke durch die Schichten im FDM-Druck beeinflussen und bestimmte Abstände einhalten. Für den 3M-Klebstoff musste kein Draht eingebracht werden, da bereits 0,25 mm Glaskugeln im Kleber enthalten sind, um die optimale Klebschichtdicke zu gewährleisten. Zusätzlich wurden die nicht zu klebenden Flächen mit Maler­klebeband abgeklebt, damit kein Klebstoff diese kontaminieren.



Abbildung 3.2.2: angeschliffene und gesäuberte Füge­teil aus Polycarbonat



Abbildung 3.2.3: Klebevorrichtung

Der Klebstoff wurde nach Herstellerangaben vorbereitet und angewendet. Wichtig ist es, vorher die persönliche Schutzausrüstung wie Masken, Brillen und Handschuhe anzuziehen, da die Klebstoffe in ihrer flüssigen Form gesundheitsschädlich sind. Dabei ist zu beachten, das Mischungsverhältnis der Klebstoffe einzuhalten; dafür gab es am Applikator zwei verschiedene Schubstangen. Für den Technicoll-Kleber braucht man eine 1:1/1:2 und für den 3M-Kleber eine 1:10 Stange. Diese wurden nach Anleitung montiert und der Kleber in den Applikator eingesetzt. Für den Henkel-Kleber wurde ein Handapplikator als Zubehör mitgeschickt. Nachdem alle Luftblasen und Vormischungen aus der Mischdüse ausgetreten waren, konnte der Klebstoff aufgetragen werden. Es wurde jeweils pro Probe eine angemessene Menge aufgebracht und mit einem Edelstahl-Spachtel verteilt. Es musste alle 10-12 min die Mischdüse getauscht werden, da diese die Topfzeit überschritten hatte und allmählich eine feste Konsistenz entwickelte, die sich nicht gut verteilen ließ. Besonders beim 2K-Hybridkleber von Henkel musste zügig gearbeitet werden, da die Topfzeit nur 5 min betrug.

Danach wurde das Gegenstück, entweder die 3D-Druck-Probe oder das UD-Tape, nach dem Aufbringen des Klebers auf die Klebefläche gelegt. Ein passgenauer Deckel übte Druck auf das obere Bauteil aus, und die Vorrichtung wurde zusätzlich mit Schraubzwingen fixiert (Abb. 3.2.4). Je nach Hersteller gab es unterschiedliche Trocknungszeiten von 24 bis 48 Stunden bei Raumtemperatur; bei höheren Umgebungstemperaturen soll die Trocknung schneller ablaufen.

Der 3M-Kleber war geleeartig und ließ sich nicht so gut mit dem Spachtel verteilen, da er wie zähflüssiger Schleim war wie in Abbildung 3.2.5 dargestellt. Der Technicoll-Kleber hatte eine Konsistenz wie Zahnpasta und konnte sich somit gut verteilen. Nach dem Auftragen mit dem Applikator entstanden Klebstofffäden, die ungewollt auf nicht zu klebende Flächen fielen. Diese mussten mit Papier und Klebeband vorher abgedeckt werden. Der Henkel-Kleber war am einfachsten zu verarbeiten, wegen des mitgelieferten Applikators, da dieser schnell montiert und einsatzbereit war. Die Konsistenz war von den drei Klebstoffen am flüssigsten; dadurch war die Klebstoffverteilung gezielter und sauberer als bei den anderen.

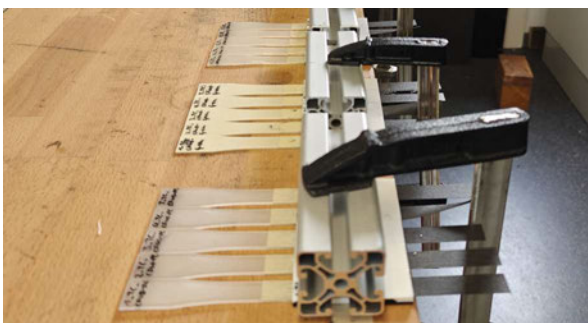


Abbildung 3.2.4: Fixierung der Proben nach der Applikation

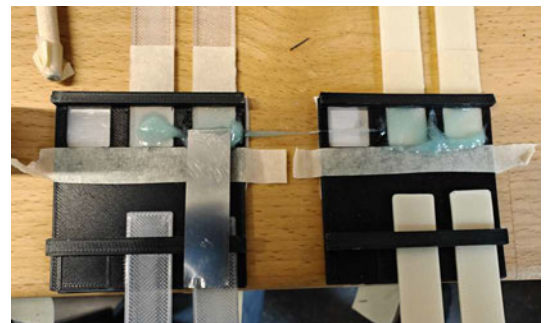


Abbildung 3.2.5: Applikation des 3M-Klebstoffs

3.3 Vorbetrachtung der Proben

Vor der Zugscherprüfung an der Prüfmaschine wurden die Maße nach dem Kleben aufgenommen, um standardisierte und vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten. Es wurden die Klebebreite und die Überlapplänge mit einem Messschieber gemessen. Die Klebschichtdicke ist wichtig für die finale Festigkeit; sie wurde daher mit einer Bügelmessschraube ermittelt. Beim Ermitteln der Klebschichtdicke wurde Folgendes Vorgehen angewendet: Zuerst wurden an drei Stellen die Dicken der einzelnen Proben kurz nach der Klebung gemessen. Anschließend wurden 3x3 Messungen an der Klebefläche durchgeführt. Dann wurde jeweils der arithmetische Mittelwert gebildet, und anschließend wurde von der Klebflächen-Dicke jeweils die zwei Dicken der Proben subtrahiert, um die Klebschichtdicke zu ermitteln.

In den Tabellen 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3 sind die Mittelwerte der drei verschiedenen Klebstoffe mit den Materialkombinationen zu sehen.

Tabelle 3.3.1: Mittelwerte für Klebschichtdicke \bar{s} , Klebebreite \bar{b} und Klebeüberlappungsbreite für den 3M-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta b = 0,025$ mm und $\Delta \bar{u} = 0,025$ mm

Messreihe	\bar{s} [mm]	\bar{b} [mm]	\bar{u} [mm]
3M_CFUD-CFUD	0,20	12,79	12,62
3M_CFUD-Green	0,21	12,83	12,49
3M_CFUD-PA	0,16	12,75	12,54
3M_CFUD-PC	0,25	12,76	12,43
3M_Green-Green	0,22	12,88	12,44
3M_PA-PA	0,23	12,87	12,64
3M_PC-PC	0,16	12,83	12,57

Tabelle 3.3.2: Mittelwerte für Klebschichtdicke \bar{s} , Klebebreite \bar{b} und Klebeüberlappungsbreite für den HL-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta b = 0,025$ mm und $\Delta \bar{u} = 0,025$ mm

Messreihe	\bar{s} [mm]	\bar{b} [mm]	\bar{u} [mm]
HL_CFUD-CFUD	0,21	11,33	12,94
HL_CFUD-Green	0,19	12,86	12,72
HL_CFUD-PA	0,17	12,83	12,44
HL_CFUD-PC	0,15	12,71	12,67
HL_Green-Green	0,20	12,99	12,40
HL_PA-PA	0,22	13,04	12,60
HL_PC-PC	0,20	12,86	12,54

Tabelle 3.3.3: Mittelwerte für Klebschichtdicke \bar{s} , Klebbreite \bar{b} und Klebeüberlappungsbreite \bar{u} für den TC-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta b = 0,025$ mm und $\Delta u = 0,025$ mm

Messreihe	\bar{s} [mm]	\bar{b} [mm]	\bar{u} [mm]
TC_CFUD-CFUD	0,23	12,72	12,85
TC_CFUD-Green	0,24	12,76	12,69
TC_CFUD-PA	0,27	12,75	12,65
TC_CFUD-PC	0,13	12,75	12,55
TC_Green-Green	0,15	12,77	11,59
TC_PA-PA	0,19	12,73	12,46
TC_PC-PC	0,12	12,87	12,71

Zwischen den einzelnen Proben schwankte die Klebschichtdicke zwischen 0,06 mm und 0,32 mm. Auch waren die Schichtdicken in Belastungsrichtung nicht immer gleichmäßig verteilt. Dies kann auf die Vorrichtung zurückzuführen sein, da möglicherweise bei der Fixierung nicht gleichmäßig Kraft auf die Klebefläche ausgeübt wurde. Die Einzelwerte der Klebschichtdicke sind im Anhang A zu sehen. Innerhalb aller drei Klebstoffe schwankt der Mittelwert der Klebschichtdicke zwischen 0,12 mm und 0,27 mm. Die Toleranzen für die Schichtdicke von 0,20 mm werden in der DIN 1465 nicht explizit angegeben. Ein Schichtdickenoptimum liegt zwischen 0,05 mm und 0,20 mm [Bod15, S. 293]. Diese Schichten verhalten sich bei Biegung flexibel, während dickere Schichten geringere Festigkeiten aufweisen, da sie aufgrund höherer Eigenspannungen durch Schrumpfung und Querkontraktionsbehinderung weniger flexibel sind [Bod15, S. 293]. Wie in der Abbildung zur Klebschichtdicke in den Grundlagen dargestellt, beträgt die übertragbare Kraft bei Schichtdicken über 0,20 mm noch bis zu 50 % der maximalen Kraft. Bei Schichtdicken kleiner als 0,05 mm kommt es hingegen zu einem steileren Verlust der maximalen übertragbaren Kraft aufgrund mangelnder Benetzung und der direkten Berührung der Fügeteile. Demnach ist eine zu dünne Klebschichtdicke schwerwiegender als eine etwas zu dicke. Somit kann zunächst mit den größeren Klebeschichten weiter geprüft werden. Die Schichtdicke des 3M-Klebstoffs sollte aufgrund der integrierten Glasperlen bei 0,25 mm liegen. Es ist jedoch möglich, dass bei der Anfertigung der Proben zu viel Druck auf die Fügeteile ausgeübt wurde und somit die Glasperlen zwischen die Fasern des UD-Tapes gedrückt wurden.

Anschließend wurde eine optische Kontrolle durchgeführt. Bei jeder Probe waren moderate Klebstoffrückstände entweder auf dem UD-Tape oder auf den Fügeteilen vorhanden. Zuerst wurden die Proben des 3M-Klebstoffs untersucht. Es gab einige Mängel in der Benetzung bzw. mögliche Luftblasen in der Klebeschicht (Anhang A.0.1). Die Proben 5_3M_CFUD-PC, 2_3M_PC-PC und 4_3M_PC-PC zeigten einige Luftblasen. Dennoch wurden sie für die Zug-scherprüfung ebenfalls benutzt und ausgewertet. Die restlichen Proben waren bis auf einige Klebstoffreste auf den Fügeteilen oder UD-Tapes in Ordnung. Der Klebstoff wies nach der Trocknung eine türkise Färbung auf und war hart. Bei einigen Proben wies der Rand der Klebefuge jedoch teilweise eine orange Färbung auf. Dies könnte auf mögliche Mischungsfehler, das Alter des Klebers oder die Umgebungsbedingungen bei der Verarbeitung und Trocknung zurückzuführen sein.

Der Henkel-Klebstoff zeigte bei der Mehrheit der Proben eine ordnungsgemäße Klebung (Anhang A.0.2). Bei den Proben 4_HL_CFUD-PC, 1_HL_Green-Green und 3_HL_PC-PC war zu erkennen, dass die Fügeflächen nicht vollständig überlappten. Wahrscheinlich sind diese beim Fixieren verrutscht, was zu einer leichten Verschiebung in der Klebung führte. Nach dem Trocknen zeigte der Klebstoff eine trübe bis transparente Erscheinung und die Klebungen waren steinhart und spröde.

Der letzte Klebstoff von Technicoll hatte ebenfalls Benetzungs- oder Luftblasenprobleme, ähnlich wie der 3M-Klebstoff (Anhang A.0.3). Bei PC oder PA konnte man erkennen, ob die Klebung optimal verlaufen war. Die Proben 1_TC_PA-PA, 2_TC_PA-PA, 1_TC_PC-PC, 2_TC_PC-PC und 3_TC_PC-PC wichen optisch von den anderen ab und es war nicht ersichtlich, ob sie ordnungsgemäß geklebt wurden. Auf dem UD-Tape waren einige Kleberückstände zu erkennen. Dies könnte daran liegen, dass der Deckel der Klebevorrichtung während der Montage mit dem Klebstoff in Berührung kam und sich dieser dadurch auf der Rückseite des UD-Tapes verteilt hat. Der Klebstoff war nach der Trocknung schwarz und zähelastisch.

3.4 Durchführung des Zugscherversuchs

Die Prüfmaschine besitzt eine servoelektrische Prüfspindel SPIAx 7,5 HD von der Firma DYNAMESS und verfügt über eine maximale Prüfkraft von bis zu 7,5 kN. Dank des modularen Prüfrahmens kann die Prüfvorrichtung für den Zugscherversuch nach DIN EN 1465 eingerichtet werden. Der Zylinderweg beträgt 300 mm bei einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von 250 mm/s und einer maximalen Prüffrequenz von 5 Hz [Mit24a]. Für den Zugscherversuch mussten Spannbacken eingebaut werden. Dazu besitzt sie eine Aufspannplatte aus Aluminium mit T-Nuten, und die Maschine wurde entsprechend der Anleitung umgebaut. Nach dem Aufbau müssen die Spannflächen kollinear zueinander ausgerichtet werden. Dafür wurde eine parallele Aluminiumplatte in die Spannvorrichtung fest eingespannt, und anschließend wurden die Spannbacken mit dem entsprechenden Drehmoment festgezogen. Nach dem Entfernen der Aluminiumplatte muss der Versatz der Spannflächen für die jeweilige Kombination eingestellt werden. Je nachdem, ob die Kombination als Material-Material, CFUD-Material oder CFUD-CFUD durchgeführt wurde, musste ein anderer Versatz eingestellt werden. Die Einspannung muss dann wie in Abb. 3.4.1 gezeigt aussehen. Dies wurde sichergestellt, indem die Abstände der verstellbaren Spannflächen mit dem Messschieber gemessen wurden.

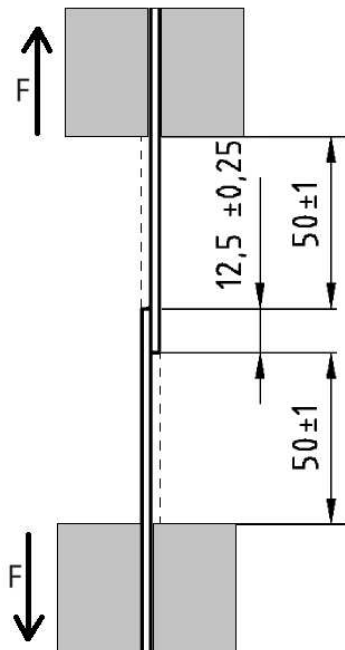


Abbildung 3.4.1: Skizze der Einspannung [DIN09, S. 8, geändert]

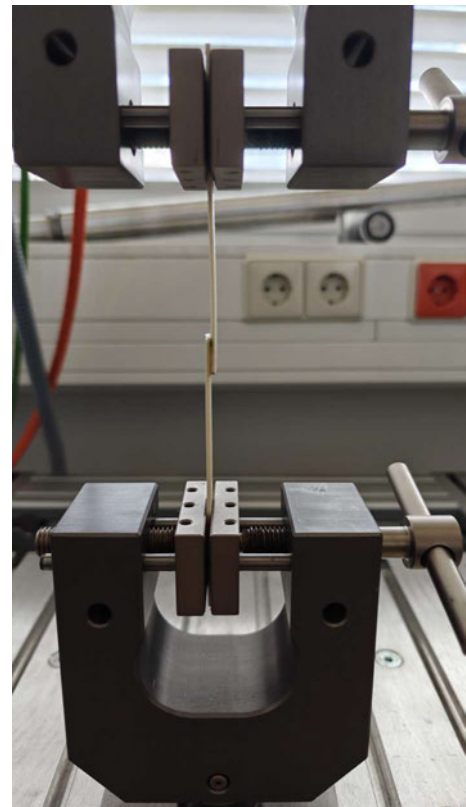


Abbildung 3.4.2: Einspannung von 3M_Green-Green

Beim Einspannen der Proben muss die Einspannlänge von 50 ± 1 mm von der nächsten Klebung eingehalten werden, dies wurde mit einem Messschieber überprüft. Um Fehlerquellen zu reduzieren, wurde eine 50 mm breite Metallplatte verwendet, um diese Abstände zu prüfen.

Das Programm von DYNA-MESS wurde verwendet. Die Parameter des Tests sind in der Tabelle 3.4.1 dargestellt.

Tabelle 3.4.1: Prüfparameter der servoelektrischen Spindel SPIAx 7,5 HD von DYNA-MESS

Parameter	Werte
Bezeichnung	SPIAx 7,5 HD
Achse	Servoelektrotische Spindel
Zuggeschwindigkeit	10 mm/s
Zielwert des Zylinders	140 mm
Zylinderstartposition	$-20,5 \pm 0,1$ mm
Einspannweite	$112,5 \pm 0,1$ mm
Diagramm	Kraft-Weg
Maximale Kraft	4 kN
Abtastrate	10 Hz

Vor der eigentlichen Prüfung wurden einige Testversuche durchgeführt, um zu ermitteln, ob der Aufbau korrekt ist. Es wurde die absolute Startposition von $-20,5 \pm 0,1$ mm auf der Prüfmaschine ermittelt und eingestellt. Die gesamte Einspannweite betrug $112,5 \pm 0,1$ mm.

Als Nächstes wurde die Probe grob ausgerichtet und dann zuerst oben in die Haltevorrichtung eingespannt. Danach wurde die Kraft in der Software genullt. Dies ist notwendig, da schon vor der Prüfung Kräfte auf die Probe ausgeübt werden, die in der Aufzeichnung berücksichtigt werden sollen. Nach dem Einspannen wird der Dateiname vergeben und der Versuch gestartet.

Laut DIN-Norm muss die Probe innerhalb von (65 ± 20) s zerstört werden [DIN09, S. 6]. Die Prüfkraft und der Maschinenweg wurden während der Prüfung aufgezeichnet. Laut DIN-Norm soll die größte Kraft während der Zerstörung als Bruchkraft ermittelt und ausgewiesen werden. Proben, bei denen das Füge teil oder Substrat bricht, sollen außerdem verworfen werden [DIN09, S. 7]. Für diese Arbeit werden diese ebenfalls ausgewertet, da es Messreihen gibt, bei denen die Klebeverbindung in allen fünf Versuchen nicht zerstört wurde. Die Prüfungsgeschwindigkeit wird auf 10 mm/s eingestellt. Bei zu hoher Geschwindigkeit kann es zu großen Spannungen in der Klebeverbindung kommen.

Nach dem Bruch wird der Versuch unterbrochen und der interne Prüfbericht von DYNA-MESS wird gespeichert. Für den nächsten Versuch muss die Startposition wieder angefahren werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Nach der Durchführung wurden die Daten gesammelt und ausgewertet. Es wurden die Bruchkräfte der jeweiligen Proben ermittelt und in Diagrammen dargestellt. Zudem wurden Mittelwerte, Standardabweichung und Variationskoeffizienten berechnet. Die Zugscherfestigkeiten wurden für jede Probe ermittelt und als Diagramm mit Mittelwert, Standardabweichung sowie Minimum und Maximum dargestellt.

4.1 Analyse der Klebeverbindung

4.1.1 Ergebnisse: CFUD-Green

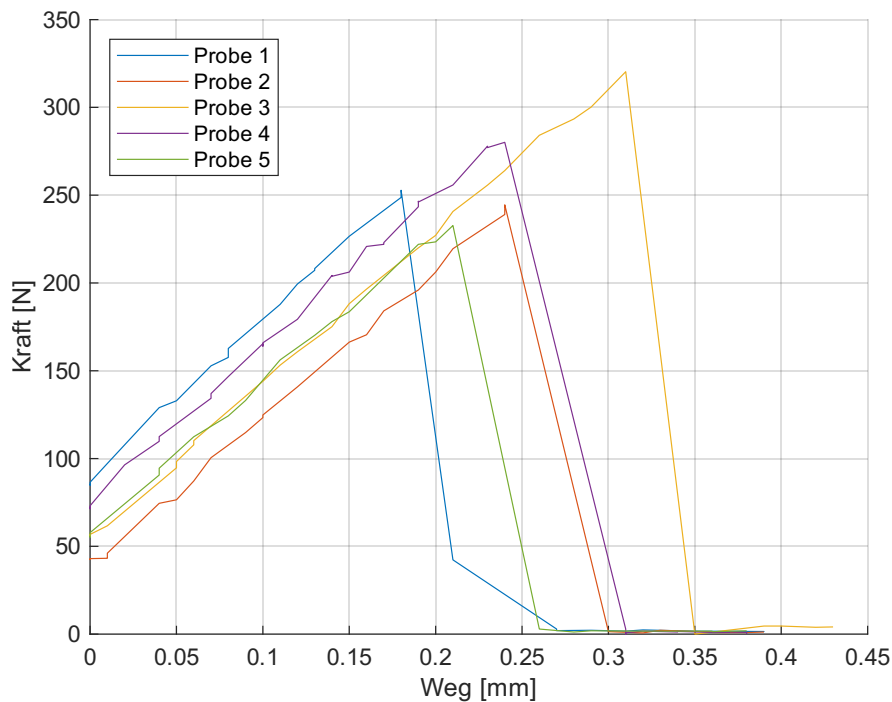


Tabelle 4.1.1: Bruchkräfte CFUD-Green mit 3M-Klebstoff

Probe	F_{max} [N]
1	252,3
2	243,8
3	316,2
4	279,1
5	231,5

Abbildung 4.1.1: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-Green mit 3M-Klebstoff

Die Abbildung 4.1.1 zeigt den Kraftverlauf für die CFUD-PA-Proben mit dem 3M-Klebstoff. Die Bruchkräfte variieren zwischen 231,5 N und 316,2 N (Tab. 4.1.1). Der Mittelwert der Bruchkraft beträgt 264,6 N mit einer Standardabweichung von 33,7 N und einem Variationskoeffizienten von 12,8%. Die Bruchkräfte für die Kombination CFUD-PA mit dem 3M-Klebstoff weisen eine relativ hohe Streuung auf, die anhand der Standardabweichung zu erkennen ist. Die Probenverläufe sehen identisch aus, wobei dieser zu Beginn relativ linear steigt und nach dem Bruch steil, aber nicht abrupt abfällt. Die Probe 3 war mit Abstand die stärkste, wenn man in Abb.C.7.1 die Klebefläche ansieht. Erkennt man, dass sich bei den restlichen Proben kleine Luftblasen, besonders in Probe 1 und 2, in der Klebeschicht befanden.

Das Bruchbild der Proben zeigt einen Adhäsionsbruch. Der Kleber haftete an GreenTec Pro stärker als an Kohlefaser-UD-Tape. Die gemessene mittlere Klebschichtdicke für Probe drei liegt bei 0,22 mm. Wobei bei Probe 2 eine mittlere Klebschichtdicke von 0,17 mm und in Probe 5 eine Dicke von 0,23 mm gemessen wurde, war die zweite stärker als die fünfte. Eigentlich sollten die Glasperlen von 0,25 mm die Schichtdicke einstellen. Wie aber bereits erwähnt, wurde diese Dicke wahrscheinlich durch das zu feste Fixieren der Proben verringert. Es kann dennoch auch daran liegen, dass beim Messen der Schichtdicke oder bei der Einspannung Fehler aufgetreten sind. Aber wie in Abb. 2.6.7 dargestellt, ist eine Klebschichtdicke zwischen 0,05 mm und 0,2 mm im optimalen Bereich. So ist eine größere Klebschichtdicke von 0,2 mm nachteilig. Dennoch hat wahrscheinlich die 3. Probe eine gute Oberflächenbehandlung und eine gleichmäßigere Verteilung ohne Luftblasen erhalten.

Der Grund, dass der Verlauf nach dem Bruch nicht sofort auf null geht, kann an den elastischen Eigenschaften der Prüfmaschine und Klemmvorrichtungen, im Material oder in der Software liegen. Auch können die Materialien eine gewisse elastische Nachgiebigkeit haben, die sich nach dem Bruch noch entlädt. Ebenso kann es sein, dass die Klebeverbindung nicht vollständig zerbricht, sondern in einzelnen Abschnitten und sich durch das weitere Ziehen lösen.

Die kleinen Einkerbungen im Anstieg können daran liegen, dass kleine mikroskopische Risse oder Faserbrüche im Material oder in den Klebeschichten auftreten. Auch Inhomogenitäten in der Klebstoffschicht, wie ungleichmäßige Verteilung oder Variationen in der Klebeschichtdicke, können diese Schwankungen auslösen. Zudem können kleine lokale Adhäsions- und innere Kohäsionsbrüche für dieses Phänomen verantwortlich sein. Diese Brüche entstehen möglicherweise aufgrund von internen Spannungen oder unvollständiger Benetzung der Oberfläche. Darüber hinaus könnte die Prüfmaschine minimal mechanisch nachgeben, etwa durch Spiel in den Spannvorrichtungen.

Auch sieht man, dass nach dem Nullen und Einspannen der Probe, die Startkraft bei ungefähr 40 N bis 80 N anfängt. Das kann daran liegen, dass mechanische und geometrische Effekte aufgetreten sind. Ein wesentlicher Faktor, der beobachtbar war, ist die mögliche Verdrehung der Probe beim Einspannen. Wenn die Spannvorrichtungen angezogen werden, kann es zu minimalen Verformungen und Verschiebungen der Probenenden kommen, wodurch eine Zugkraft entsteht. Das tritt nach Beobachtung häufig an den Proben mit Kohlefaser-UD-Tape auf. Ebenfalls können geometrische Ungenauigkeiten, wie leichte Abweichungen in der Ausrichtung oder Parallelität der Einspannvorrichtungen, die Ursache dafür sein. Falsch eingespannte Proben können ungleichmäßige Spannungen in der Probe erzeugen.

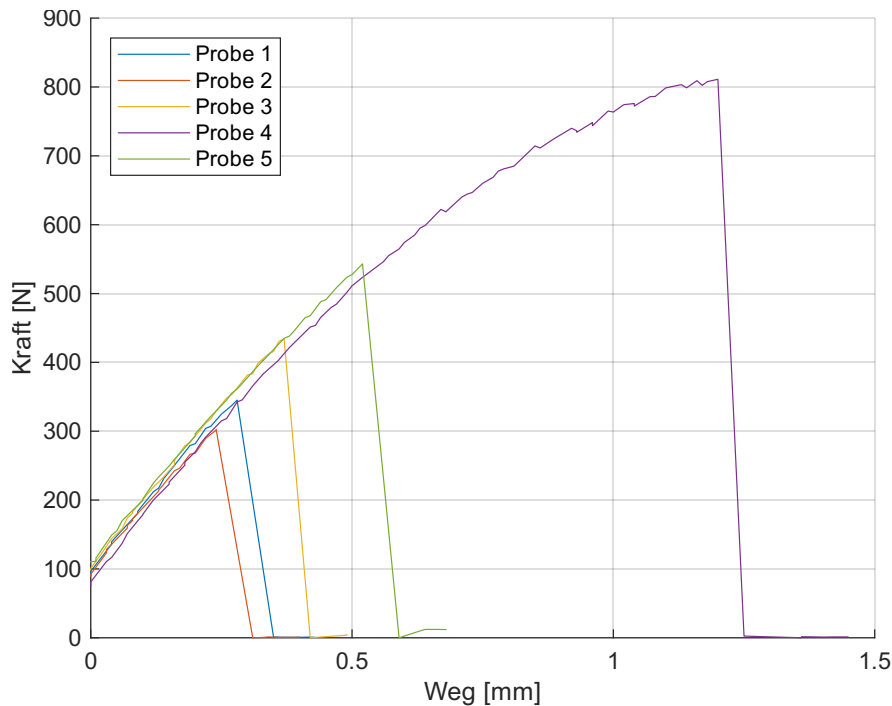


Tabelle 4.1.2: Bruchkräfte
CFUD-Green
mit
HL-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	343,7
2	301,6
3	429,4
4	814,6
5	530,9

Abbildung 4.1.2: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-Green mit HL-Klebstoff

Der Kraftverlauf von Abbildung 4.1.2 für die CFUD-PA-Proben mit dem HL-Klebstoff besitzt eine sehr große Variabilität mit dem kleinsten Wert von 301,6 N und dem größten von 814,6 N. Die mittlere Bruchkraft beträgt 484,0 N mit einer Standardabweichung von 204,6 N und einem Variationskoeffizienten von 42,3 %. Dieser Wert zeigt, dass die Streuung sehr hoch ist und eine inkonsistente Messung stattfand. Die ersten zwei Proben liegen relativ nah beieinander, ab der 3. Probe wird die Kraft immer höher. Bei allen Proben ist es zum Adhäsionsbruch aufseiten des Kohlefaser-UD-Tapes gekommen. In Probe 4 und 5 werden Anzeichen von einem gemischten Bruchbild an GreenTec Pro im unteren Bereich (siehe Abb. C.1.2) beobachtet.

Bei Probe 1, 2 und 3 sind nach dem Bruch, ähnlich wie beim 3M-Klebstoff, Luftblasen in der Klebeschicht zu erkennen. Dies weist darauf hin, dass die tatsächliche Klebefläche viel kleiner ist als angenommen. Die mittlere Klebschichtdicke der einzelnen Proben schwankte zwischen 0,18 mm und 0,21 mm, was nah an die geforderten 0,20 mm herankommt. Der Verlauf der ersten vier Proben sieht ähnlich aus. Man erkennt, dass der Klebstoff plötzlich bricht, ohne die Fügeiteile stark zu belasten. Die Kraft nimmt bei Probe 1 und 2 schnell ab.

Im Verlauf der Probe 4 ist ersichtlich, dass diese Probe eine besonders starke Adhäsion und möglicherweise eine optimale Reaktion zwischen dem HL-Klebstoff und dem CFUD-Green-Substrat zeigt. Da die ersten 4 Proben schon bei 301,6 N gebrochen sind, weist der Klebstoff auf eine schwache Klebeverbindung hin. Es kann viele Ursachen für den vorzeitigen Bruch geben. Es wäre wahrscheinlich, dass die Oberflächenbehandlung nicht ordnungsgemäß durchgeführt wurde, entweder beim Anschleifen oder beim Säubern der Fläche mit Isopropanol. Im Vergleich zum 3M-Kleber hat dieser dennoch eine viel höhere Kraft ausgehalten. Diese Messreihe zeigt, wie sich die einzelnen Schritte auf das Klebeergebnis auswirken.

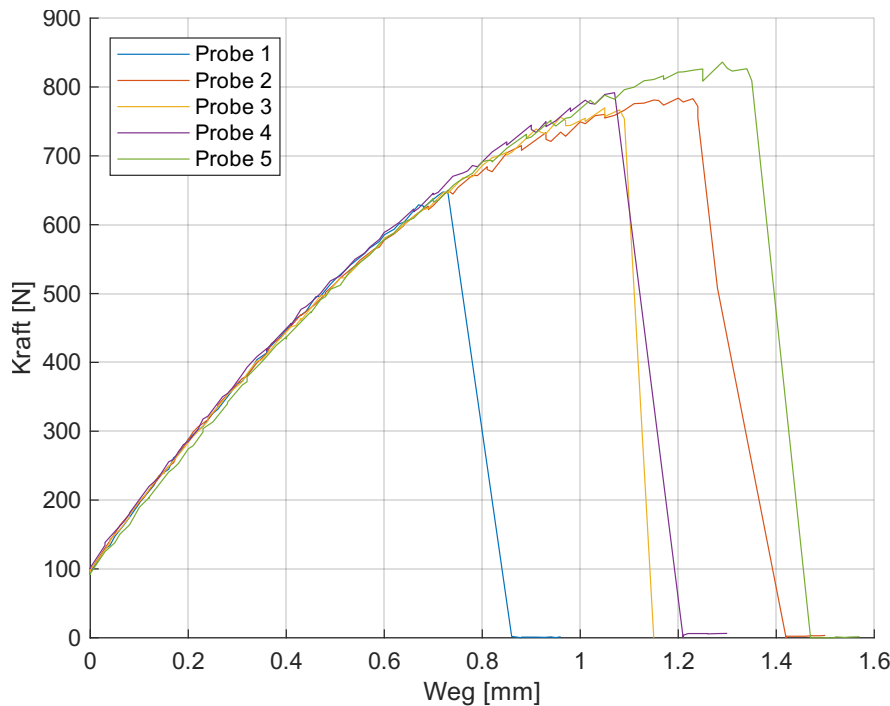


Tabelle 4.1.3: Bruchkräfte
CFUD-Green
mit
TC-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	646,8
2	786,2
3	751,8
4	788,8
5	840,1

Abbildung 4.1.3: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-Green mit TC-Klebstoff

Der Kraftverlauf der CFUD-Green-Proben mit dem TC-Klebstoff in Abbildung 4.1.3 zeigt insgesamt eine deutlich kleinere Streuung als beim HL-Klebstoff. Die Bruchkräfte liegen relativ nah beieinander, mit den Messwerten zwischen 646,8 N und 840,1 N (Abb. 4.1.4). Der Mittelwert beträgt 743,5 N mit einer Standardabweichung von 72,1 N und einem Variationskoeffizienten von 9,4%. Dies deutet auf eine konsistente und robuste Klebeverbindung hin, die durch den TC-Klebstoff erzielt wurde. Bis rund 650 N ist der Verlauf sehr ähnlich.

Alle Kurven außer der von Probe 1 steigen kontinuierlich an und erreichen hohe Bruchkräfte. Die Proben 1, 3 und 4 weisen einen adhäsiven Bruch auf, während bei den Proben 2 und 5 das Füge teil GreenTec Pro zerbrochen ist, wie in Abbildung C.1.3 zu sehen. Das zeigt, dass der Klebstoff noch mehr Kraft aushalten würde, wenn die Klebung optimal hergestellt worden wäre. Auch zeigt es sich, dass die Oberflächenbehandlung bei den Proben 1, 3 und 4 nicht ausreichend war. Besonders bei Probe 1 ist damit ein vorzeitiges Versagen in dieser Messreihe von bis zu 100 N möglich. Obwohl die Proben 3 und 4 ebenfalls das gleiche Bruchbild wie Probe 1 hatten, ist die Kraft identisch mit der von Probe 2 und 5. Das Bruchbild ist auch auffällig im Vergleich zu den anderen oben genannten Proben. Dank des Primers für PA war die Adhäsion auf dem Kohlefaser-UD-Tape mit PA6-Matrix viel stärker als bei den anderen Klebstoffen. Dort war der Adhäsionsbruch am UD-Tape.

Auch erkennt man, dass diese Proben bei annähernd gleichem Zugweg zerbrochen sind. Was darauf hindeutet, dass diese beiden Proben gleich hergestellt wurden. Man könnte daraus herleiten, dass der TC-Klebstoff in der Verarbeitung weniger empfindlich auf Schwankungen und Verarbeitungsparameter reagiert.

Besonders hervorstechend ist die Bruchkraft von Probe 5 mit 850,1 N. Diese Probe zeigt, dass der TC-Klebstoff in der Lage ist, sehr hohe mechanische Belastungen auszuhalten, was auf eine äußerst gute Adhäsions- und Kohäsionskraft hinweist. Die verlängerten Zugwege können darauf zurückzuführen sein, dass sich die Fügeiteile angefangen haben, sich plastisch zu verformen. Dies ist ebenfalls im Verlauf erkenntlich, da dieser Verlauf typisch für einen Zugversuch ist, da man den Beginn der Einschnürung am Maximum erkennen kann. Wobei bei diesem Versuch die Zugfestigkeit des Materials getestet wurde und nicht die Zugscherfestigkeit des Klebstoffs.

Der Kraftverlauf der CFUD-Green-Proben mit dem TC-Klebstoff zeigt insgesamt eine hohe Konsistenz und Kraft. Die gleichmäßigen Kraftverläufe und die geringe Streuung der Bruchkräfte bestätigen die Leistungsfähigkeit des TC-Klebstoffs mit dieser Materialkombination.

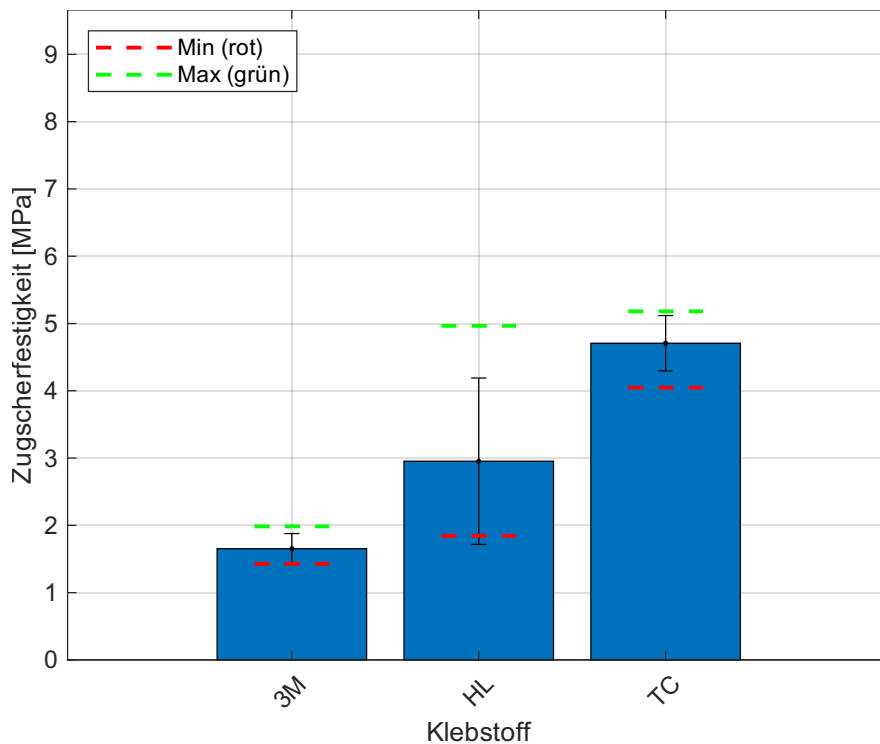


Tabelle 4.1.4: Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-Green

Hersteller	$\bar{\sigma}$ [MPa]
3M	1,7
HL	3,0
TC	4,7

Abbildung 4.1.4: Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-Green aller Klebstoffe

Die Ergebnisse wurden in Abbildung 4.1.4 dargestellt, wo die Zugscherfestigkeiten für die verschiedenen Klebstoffe gegenübergestellt werden. Neben der Standardabweichung sind noch die minimalen und maximalen Zugscherfestigkeiten aufgeführt. Der TC-Klebstoff erzielt die höchste Zugscherfestigkeit mit einem Mittelwert von 4,7 MPa mit einem Minimum und Maximum bei 4,0 MPa und 5,2 MPa.

Da beim TC-Kleber die Füge-teile bei den Proben 2 und 5 zerbrochen sind, kann man die Zugfestigkeit des Materials ermitteln. Mit der folgenden Formel kann die Zugfestigkeit der Materialien errechnet werden.

$$R_m = \frac{F_{\max}}{d \cdot b}$$

wobei:

- R_m ... Zugfestigkeit
- F_{\max} ... Bruchkraft
- d ... Dicke des Füge-teils
- b ... Breite des Füge-teils

Wenn man die Zugfestigkeit der zerbrochenen Füge-teile von Probe 2 und 5 ansieht, ergibt sich daraus ein Wert von 38 bis 42 MPa. Im Datenblatt ist ein Wert von 58 MPa angegeben und leider ist nicht ersichtlich, ob die Probe aus Vollmaterial oder gedruckt wurde. Die Werte können durchaus korrekt sein, da beim Zugscherversuch die Kraft an den Klebekanten am höchsten ist. Im Zugversuch nach ISO 527 ist die Kraft über die gesamte Probenlänge verteilt und nicht unsymmetrisch belastet, wie in diesem Versuch. Aber für die Forschungsfrage ist dieser Wert nicht relevant und wird hier nur kurz erwähnt.

Laut TC-Klebstoff-Datenblatt hat PA6.6 einen Wert von ungefähr 4,5 MPa ohne Primer und 7 MPa mit Primer. Für PA12 werden Werte von ungefähr 5 MPa ohne Primer und 6 MPa mit Primer angegeben. Im besten Fall erreicht die Zugscherfestigkeit etwas mehr als 5 MPa und im schlimmsten Fall einen Wert von rund 4 MPa. Damit liegen die Werte für den TC-Klebstoff im mittleren Bereich der im Datenblatt angegebenen Werte.

Für den HL- und den 3M-Klebstoff sind keine spezifischen Zugscherfestigkeiten für PA angegeben. Dennoch kann man die Werte mit anderen Kunststoffarten, die im Datenblatt angegeben sind, vergleichen. Es konnte eine durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 3,0 MPa mit einer Schwankung zwischen 1,8 MPa und 4,9 MPa für den HL-Klebstoff ermittelt werden. Hier sieht man die Schwankung deutlich bei einem Minimum von unter 2 MPa bis zu einem Maximum von 5 MPa. Im Vergleich zu dem Datenblatt mit den Kunststoffen PVC mit 7 MPa und ABS mit 8 MPa ist dieser Wert mindestens halb so groß. Hier trat der Adhäsionsbruch aufseiten des Kohlefaser-UD-Tapes mit PA6-Matrix auf.

Der 3M-Klebstoff ist bei der Kombination CFUD-Green auf 1,7 MPa im Durchschnitt gekommen. Die Werte schwanken zwischen 1,4 MPa und 2,0 MPa. Damit ist diese Materialkombination die schwächste von den drei Klebstoffen. Laut Datenblatt war mehr zu erwarten, obwohl die Materialien PA6 und GreenTec Pro nicht spezifisch aufgelistet sind. Es ist möglich, dass dieser Klebstoff nicht für diese Materialien optimiert wurde, besonders auf PA6.

Insgesamt sind weitere Optimierungen bei der Auswahl des Klebstoffs und den Verarbeitungsparametern nötig, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Obwohl die Luftblasen theoretisch von der Klebefläche abgezogen werden müssten, wurden sie in der Analyse als ideal geklebt angenommen. In der Praxis würde ein solcher Defekt nicht ohne Weiteres erkannt werden. Daher wurde vorsichtshalber die niedrige Zugscherfestigkeit mit oder ohne Luftblasen berücksichtigt, da sie in dieser Arbeit den Worst Case darstellt.

4.1.2 Ergebnisse: CFUD-PA

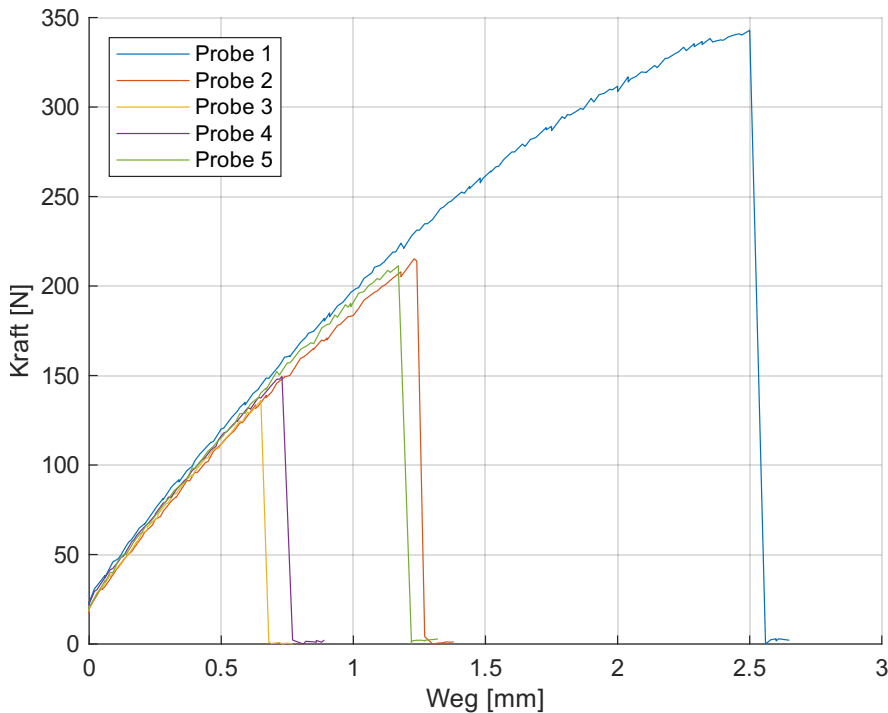


Tabelle 4.1.5: Bruchkräfte CFUD-PA mit 3M-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	342,7
2	218,6
3	135,0
4	148,9
5	211,1

Abbildung 4.1.5: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PA mit 3M-Klebstoff

In Abbildung 4.1.5 ist der Kraftverlauf für CFUD-PA mit dem 3M-Klebstoff und die Bruchkraft (Tab.4.1.5) dargestellt. Die höchste Kraft beträgt 342,7 N und die kleinste 135,0 N. Die Messreihe besitzt einen Mittelwert von 211,3 N mit einer Standardabweichung von 82,2 N und einem Variationskoeffizienten von 38,9%. Im Diagramm sind grob drei Bruchkraftbereiche zu erkennen: einmal um die 100 N, das nächste bei 200 N und der letzte bei 350 N. Es kam bei allen Proben zum Adhäsionsbruch, wobei sich der Kleber vom UD-Tape löste und Rückstände am PA-Fügeteil verblieben. Die Klebschichtdicke lag im Durchschnitt bei 0,16 mm. Die erste Probe erreichte die größte Kraft mit einem Abstand von rund 150 N zur nächsten Probe. In den anderen Proben erkennt man deutlich einen Adhäsionsbruch. In Probe 1 konnte man eine allmähliche Einschnürung erkennen, die für Polyamide typisch ist.

Aufgrund schlechter Oberflächenbehandlung oder Durchführung kann es im Bruchbild auf Abbildung C.2.1 kaum Unterschiede in der Klebeschicht geben. Nur bei Probe 1 und 2 sind raue Oberflächen nach dem Bruch in der Klebeschicht zu erkennen. Dort könnte es besonders in Probe 1 zu einem Grenzflächenbruch gekommen sein. Es ist deutlich erkennbar, dass unterschiedliche Probenvorbereitungen die Klebung stark beeinflussen können. Bei optimaler Durchführung könnte man kontinuierlich den Maximalwert dieses Diagramms erreichen.

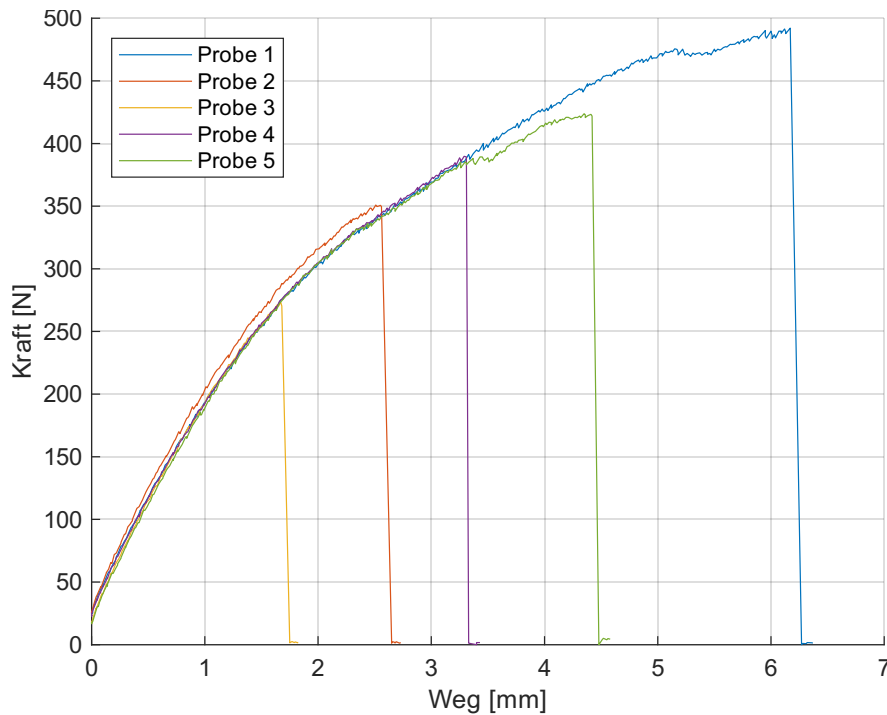


Tabelle 4.1.6: Bruchkräfte
CFUD-PA mit
HL-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	494,0
2	351,4
3	279,1
4	388,1
5	426,7

Abbildung 4.1.6: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PA mit HL-Klebstoff

Der Kraftverlauf für CFUD-PA mit dem HL-Kleber wird in Abbildung 4.1.26 dargestellt. Die Messwerte schwanken zwischen 279,1 N und 494,0 N mit einem Mittelwert von 387,9 N, einer Standardabweichung von 80,5 N und einem Variationskoeffizienten von 20,8 %. Im Vergleich zum 3M-Kleber ist diese Probe etwas konsistenter ausgeführt. Die Kurven verlaufen relativ gleichmäßig, was darauf hinweist, dass eine Bindung mit dem PC-Substrat eingegangen wurde. Markant ist, dass die Bruchkräfte in Intervallen brechen und keine Anhäufung von Messwerten erkennbar ist. Das Bruchbild ist gemischt und es kommt sowohl zum Adhäsions- als auch zum Kohäsionsbruch. Besonders bei den Proben 1 und 5, die die höchsten Bruchkräfte erreicht haben, erkennt man Klebstoff sowohl auf dem Füge teil als auch auf dem UD-Tape. Mit einer optimalen Oberflächenbehandlung und Klebedurchführung kann eine erfolgreiche Klebung zum UD-Tape mit PA-Matrix hergestellt werden. Die Abweichungen bei den anderen Proben sind wahrscheinlich auf Ausführungsfehler zurückzuführen. Dieser Kleber erreichte im Durchschnitt höhere Bruchkräfte als der 3M-Klebstoff.

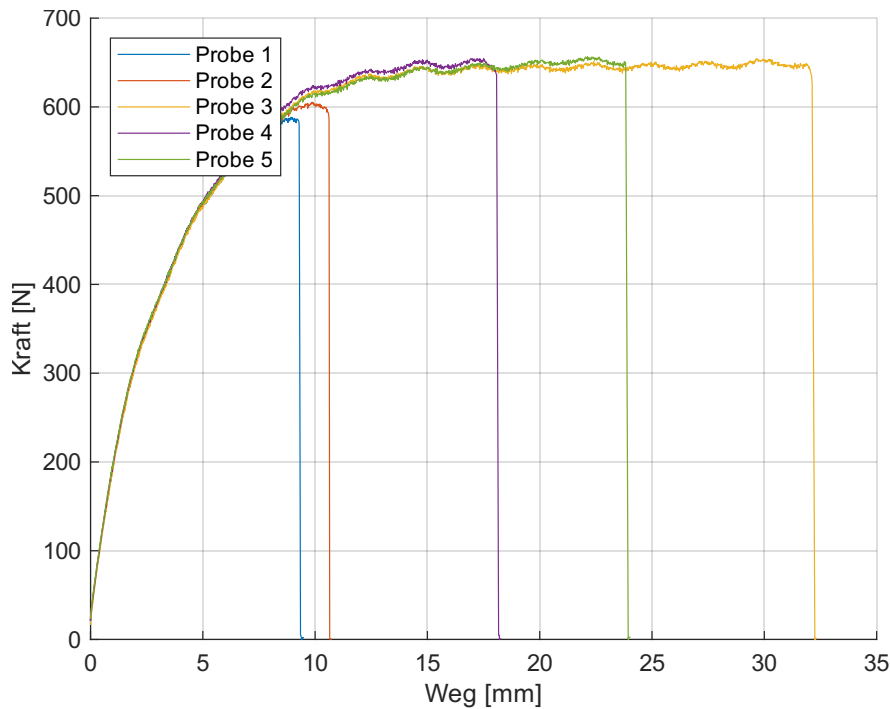


Tabelle 4.1.7: Bruchkräfte
CFUD-PA mit
TC-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	592,4
2	604,7
3	661,6
4	654,8
5	657,7

Abbildung 4.1.7: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PA mit TC-Klebstoff

Der Kraftverlauf in Abbildung 4.1.7 weicht deutlich von den bisherigen Diagrammen ab. Die höchste Bruchkraft wird bei Probe 3 mit 661,6 N erreicht, und die kleinste Kraft beträgt 592,4 N, die bei Probe 1 gemessen wurde. Der Mittelwert liegt bei 634,2 N mit einer Standardabweichung von 33,0 N und einem Variationskoeffizienten von 5,2 %. Von den drei Messreihen ist dies die am konsistentesten durchgeführte. Die Kurven verlaufen anfangs parallel zueinander und zeigen in der Bruchkraft eine geringe Streuung. Dies weist darauf hin, dass die Proben gut vorbereitet und die Versuche sorgfältig durchgeführt wurden. Es kommt zum Kohäsionsbruch in den Proben, teilweise tritt in den Proben 3 und 5 ein gemischtes Bruchbild auf (Abb. C.2.3).

Die Proben brechen bei verschiedenen Zugwegen bei annähernd gleichen Bruchkräften. Auch ist zu erkennen, dass nach ungefähr 10 mm Zugweg das Polyamid-Fügeteil in die Einschnürung übergeht, die dann dauerhaft bestehen bleibt. Die unterschiedlichen Zugwege könnten daher aufgetreten sein, weil die Einschnürung an verschiedenen Stellen begonnen hat. Sobald die Einschnürung die Klebefläche erreicht, wird die Klebe

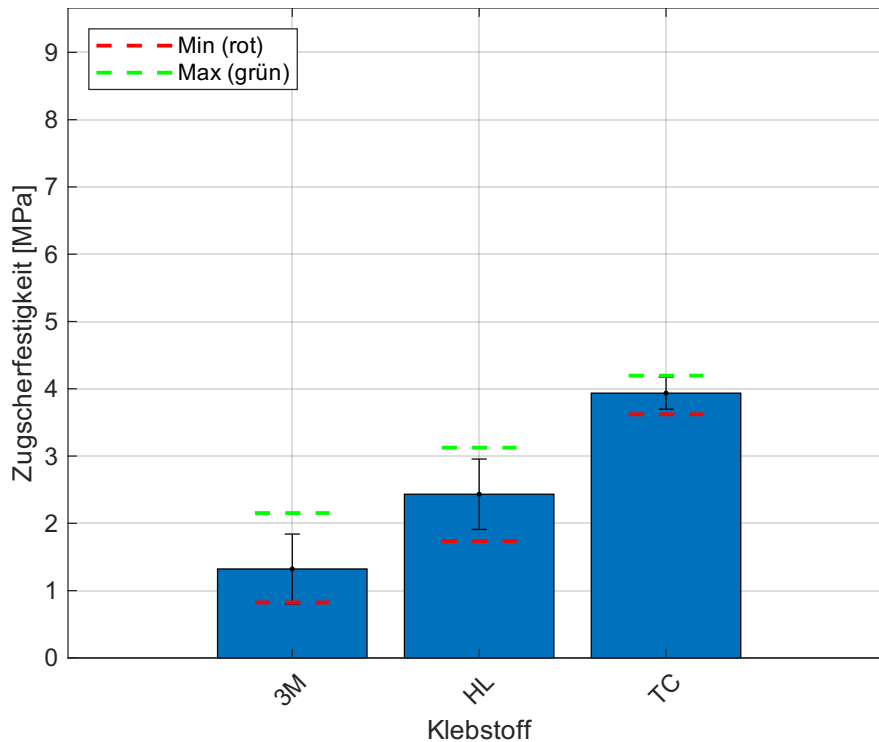


Tabelle 4.1.8: Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-PA

Hersteller	$\bar{\sigma}$ [MPa]
3M	1,3
HL	2,4
TC	3,9

Abbildung 4.1.8: Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-PA aller Klebstoffe

In dem Balkendiagramm in Abbildung 4.1.8 sind die Zugscherfestigkeiten dargestellt. Der 3M-Klebstoff erreichte im Durchschnitt eine Zugscherfestigkeit von 1,3 MPa mit einem Minimum von ungefähr 0,8 MPa und einem Maximum von 2,1 MPa. Die hohe Standardabweichung weist auf eine inkonsistente Klebung hin, dennoch sieht man, dass dieser Klebstoff für diese Kombination eher ungeeignet ist, auch wenn die Klebung im Allgemeinen verbessert wird. Da im Datenblatt keine Polyamide aufgeführt sind, kann kein genauer Vergleich dazu durchgeführt werden. Im Vergleich zu den anderen Kunststoffarten schnitt diese Kombination dennoch unterdurchschnittlich ab.

Die mittlere Zugscherfestigkeit von 2,5 MPa mit einem Minimum von 1,7 MPa und einem Maximum von 3,1 MPa erreichte der HL-Klebstoff und schnitt damit besser ab als der 3M-Klebstoff. Es liegt dennoch innerhalb der Erwartungen. Im Vergleich zu dem Datenblatt mit den anderen Kunststoffen ist dieser nur stärker als Nitrilgummi mit 1 MPa und ist den anderen Kunststoffen deutlich unterlegen. Es scheint, dass es Probleme gab, eine stabile Verbindung zu dem Füge teil aus PA6/66 herzustellen. Dies zeigt auch, dass die spezifischen Wechselwirkungen zwischen dem HL-Klebstoff und der Kombination möglicherweise nicht optimal sind, was die erzielbare Festigkeit begrenzt.

Die höchste Zugscherfestigkeit erreichte der TC-Klebstoff mit durchschnittlich 3,0 MPa, einem Minimum von ungefähr 3,6 MPa und einem Maximum von 4,2 MPa. Im Vergleich zum Datenblatt des TC-Klebstoffs liegt dieser Wert im unteren Bereich für PA6.6 und PA12. Dank des Primers konnte eine relativ gute chemische Bindung aufgebaut werden, dennoch war die Adhäsionskraft nicht ausreichend. Da das Füge teil in die Einschnürung überging, kann nicht sicher gesagt werden, ob diese Werte das Optimum dieser Kombination darstellen. Die geringe Streuung der Ergebnisse im Balkendiagramm unterstreicht die Konsistenz und mögliche Effektivität dieses Klebstoffs.

Insgesamt haben alle Verbindungen eine niedrigere Zugscherfestigkeit als die vorherige Kombination CFUD-Green. Hier bestand das Füge teil aus PA6/66, was wiederum eine größere Herausforderung für die Klebstoffe darstellte und somit die gesamte Leistungsfähigkeit beeinträchtigte. Auch hier sind weitere Optimierungen bei der Vorbereitung und den Verarbeitungsparametern nötig, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern.

4.1.3 Ergebnisse: CFUD-PC

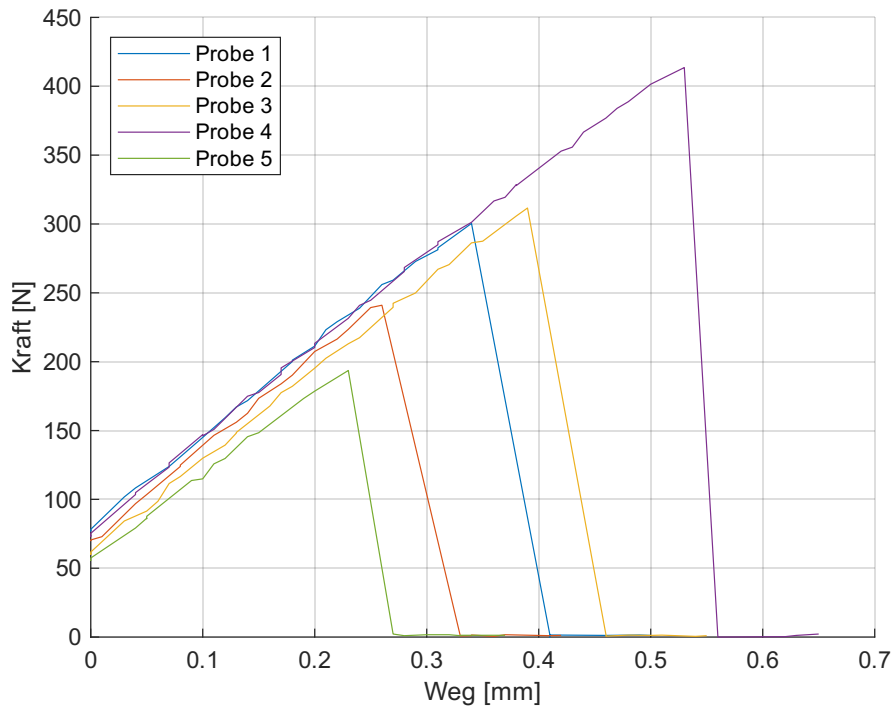


Tabelle 4.1.9: Bruchkräfte CFUD-PC mit 3M-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	299,9
2	240,0
3	308,7
4	411,4
5	192,1

Abbildung 4.1.9: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PC mit 3M-Klebstoff

Die Abbildung 4.1.9 zeigt den Kraftverlauf für die Kombination CFUD-PC mit dem 3M-Klebstoff. Die niedrigste Bruchkraft wurde von Probe 5 mit 192,1 N und die höchste von Probe 4 mit 411,4 N erreicht. Der Mittelwert der Bruchkraft beträgt 290,4 N mit einer Standardabweichung von 82,6 N und einem Variationskoeffizienten von 28,4 %. Der Kraftverlauf dieser Proben zeigt stark schwankende Bruchkräfte. Die Kurven verlaufen unregelmäßig und die Werte streuen erheblich, was auf eine inkonsistente Klebeverbindung hindeutet. Auffällig ist die niedrige Bruchkraft bei einigen Proben, was auf eine schwache Adhäsion oder unzureichende Aushärtung hindeutet.

Laut der Klebschichtdicke in Tabelle A.0.1 ist zu erkennen, dass die Klebschichtdicke ausreichend war. Nur bei Probe 4 betrug die Dicke 0,19 mm, und trotzdem war diese Probe am stärksten.

Der Adhäsionsbruch am UD-Tape ist gut im Diagramm und im Bruchbild in Abbildung C.3.1 zu erkennen. Auch sind Luftblasen in der Klebeschicht zu erkennen; besonders in Probe 5 sind viele vorhanden. Dies könnte die niedrige Bruchkraft erklären, da die Klebefläche real viel kleiner war. Dies gilt auch für die anderen Proben mit Lufteinschlüssen. Um dies zu vermeiden, sollte das Auftragen des Klebstoffs vorsichtig und ohne Rühren durchgeführt werden.

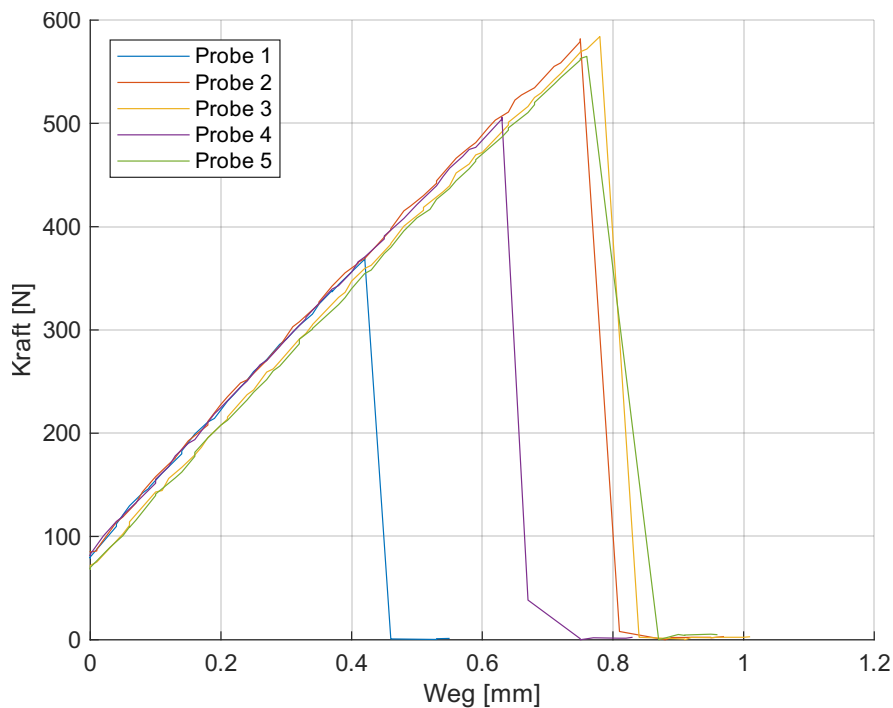


Tabelle 4.1.10: Bruchkräfte
CFUD-PC
mit HL-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	368,7
2	579,0
3	581,9
4	504,4
5	560,5

Abbildung 4.1.10: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PC mit HL-Klebstoff

Der Kraftverlauf in Abbildung 4.1.6 zeigt eine konsistentere Versuchsdurchführung. Das Minimum liegt bei 368,7 N und das Maximum der Messreihe liegt bei 581,9 N. Der Mittelwert beträgt 518,9 N mit einer Standardabweichung von 89,6 N und einem Variationskoeffizienten von 17,3 %. Die Proben 1 und 4 zeigen ein Adhäsionsbruchbild, und bei den restlichen Proben ist das Füge teil aus PC zerbrochen. Im Bruchbild erkennt man bei Probe 1 und 4 ebenfalls Brüche im Füge teil, die wahrscheinlich auf das ruckartige Versagen der Klebung zurückzuführen sind. Es ist wahrscheinlich, dass eine starke Verbindung zwischen den Füge teilen aufgebaut werden kann, wenn die Vorbereitung und Durchführung korrekt ausgeführt werden.

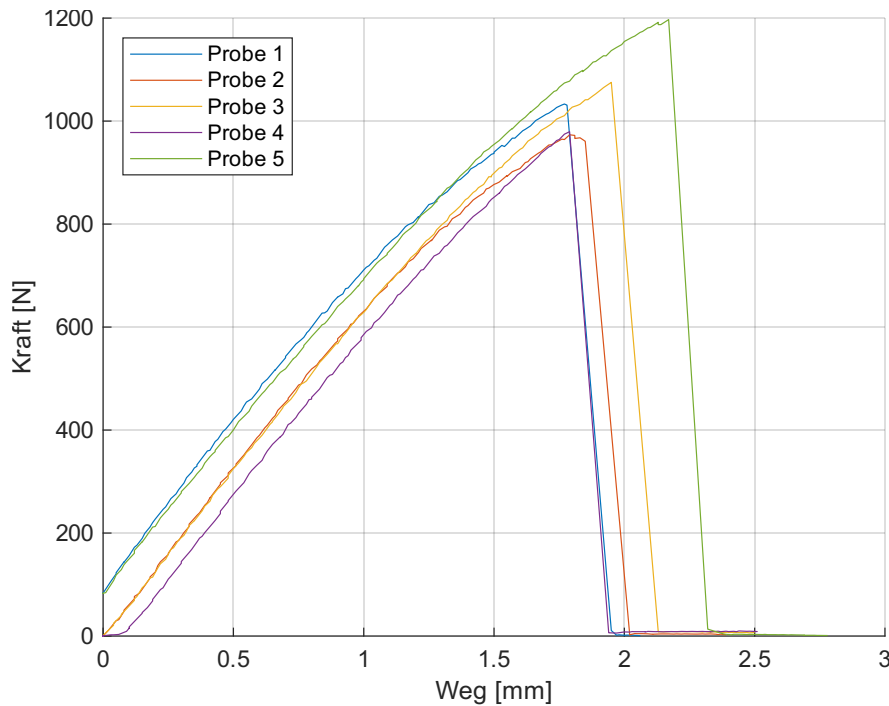


Tabelle 4.1.11: Bruchkräfte CFUD-PC mit TC-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	1036,6
2	973,2
3	1071,1
4	975,4
5	1196,1

Abbildung 4.1.11: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-PC mit TC-Klebstoff

Die Abbildung 4.1.11 zeigt den Kraftverlauf für die CFUD-PC-Proben, die mit dem TC-Klebstoff verklebt wurden. Die minimale Bruchkraft liegt bei 975,4 N und die maximale beträgt 1196,1 N. Der Mittelwert beträgt 1050,5 N mit einer Standardabweichung von 91,4 N und einem Variationskoeffizienten von 8,7 %. Die Verläufe sind in dieser Messreihe sehr konsistent und steigen identisch zueinander an. Die Bruchkräfte liegen ebenfalls in einem engen Bereich, was auf eine starke und gleichmäßige Klebeverbindung hinweist. Alle Proben sind im Substrat gebrochen, und besonders in Probe 4 und 5 sind die Kohlefaser-UD-Tapes an der Kante der Einspannbacken gerissen, wie in Abbildung C.3.3 zu sehen ist. Das kann daran liegen, dass beim Einspannen hohe mechanische Spannungen an den Kanten auftreten. Wenn die Proben fixiert werden, konzentrieren sich die Kräfte an diesen Kanten, was zu einer lokalen Überbeanspruchung des Materials führen kann. Zwar ist das UD-Tape in Zugrichtung sehr stark, kann jedoch an den Einspannbacken durch Scherkräfte und lokale Druckspannungen geschwächt werden.

Es scheint, dass der TC-Klebstoff sich gut mit dem PC-Substrat verbindet und dank des Primers auf dem UD-Tape auch eine starke Adhäsion entwickelt. Die Zerstörung der UD-Tapes zeigt, dass die Klebeverbindung so stark ist, dass das Versagen nicht im Klebstoff auftritt, sondern eher in den Substraten. Das unterstreicht die hohe Leistungsfähigkeit des TC-Klebstoffs im Vergleich zu den anderen.

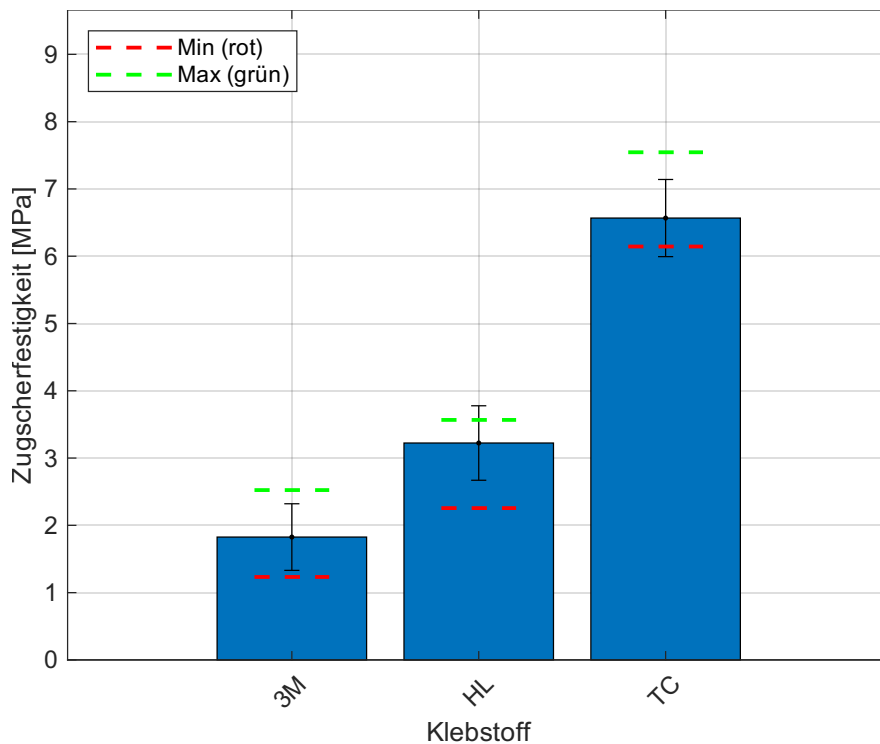


Tabelle 4.1.12: Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-PC

Hersteller	$\bar{\sigma}$ [MPa]
3M	1,8
HL	3,2
TC	6,6

Abbildung 4.1.12: Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-PC aller Klebstoffe

Die Zugscherfestigkeiten der CFUD-PC-Proben zeigen deutliche Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Klebstoffe. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen in Abbildung 4.1.12 dargestellt.

Die Proben mit dem 3M-Klebstoff erreichen eine durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 1,8 MPa mit einer Schwankung zwischen 1,2 MPa und 2,5 MPa. Dieser Wert ist relativ niedrig und weist auf eine weniger effektive Klebung hin. Verschiedene Faktoren könnten zu dieser unzureichenden Adhäsion beigetragen haben, darunter möglicherweise eine schlechte Oberflächenvorbereitung des UD-Tapes, eine ungleichmäßige Verteilung des Klebstoffs oder Auswertungsbedingungen, die nicht ideal waren. Laut Datenblatt sollte die Verbindung auf Polycarbonat eine Zugscherfestigkeit von 9,2 MPa erreichen. Doch der experimentell gemessene Wert liegt weit darunter, somit scheint die Leistungsfähigkeit des Klebstoffs für diese Kombination nicht ausreichend zu sein.

Der HL-Klebstoff wies eine mittlere Zugscherfestigkeit von 3,2 MPa auf, mit einem Minimum bei etwa 2,2 MPa und einem Maximum bei etwa 3,6 MPa. Die Zugscherfestigkeit ist somit nur halb so groß wie die des TC-Klebstoffs. Da die Fügebauteile zu Bruch gingen, kann man davon ausgehen, dass die Verbindung sehr stark ist. Laut Datenblatt des Materials hat dieses Polycarbonat eine Zugfestigkeit von 62,7 MPa, und wenn man die Formel von oben anwendet, erreicht diese Messreihe für Polycarbonat eine Zugfestigkeit von 18,4 bis 29,1 MPa. Dieser Wert ist niedriger als der im Datenblatt angegebene. Das kann, wie schon bei CFUD-Green beschrieben, an den Prozessen in der Durchführung oder an der Herstellung liegen.

In den Datenblättern für diesen Klebstoff wird für Polycarbonat eine Zugscherfestigkeit von 12 MPa angegeben. Auch hier bleibt der experimentelle Wert deutlich unter den theoretischen Erwartungen, was auf mögliche Schwächen in der Verarbeitung oder eine unzureichende chemische Interaktion zwischen Klebstoff und Substrat hinweist. Trotz des moderaten Werts zeigt der HL-Klebstoff, dass er eine zuverlässigere Verbindung bieten kann, wenn das volle Potenzial des Materials ausgeschöpft werden kann.

Der TC-Klebstoff hat mit Abstand den größten Wert mit einem Mittelwert von 6,6 MPa, einem Minimum von rund 6,1 MPa und einem Maximum von bis zu 7,5 MPa. Die Ergebnisse zeigen eine konsistente Klebung, wie in den Kraftverlaufskurven zu sehen ist, wo die Kurven nahezu parallel verlaufen. Im Vergleich zum Datenblatt sollte PC mindestens etwa 8 MPa aushalten, wobei es auch zu einem Substratbruch gekommen ist. Der höchste gemessene Wert liegt somit sehr nah an den Herstellerdaten, obwohl der Fügepartner aus Kohlefaser-UD-Tape mit PA6-Matrix bestand.

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass der TC-Klebstoff die robustesten und konsistentesten Verbindungen mit CFUD-PC erzielt, während der HL-Klebstoff tendenziell ebenfalls gute Festigkeiten erreichen würde, wenn die Klebparameter optimaler wären. Der 3M-Klebstoff hingegen erfordert eine sorgfältige Überprüfung der Verarbeitungsparameter, um sein volles Potenzial ausschöpfen zu können.

4.1.4 Ergebnisse: Green-Green

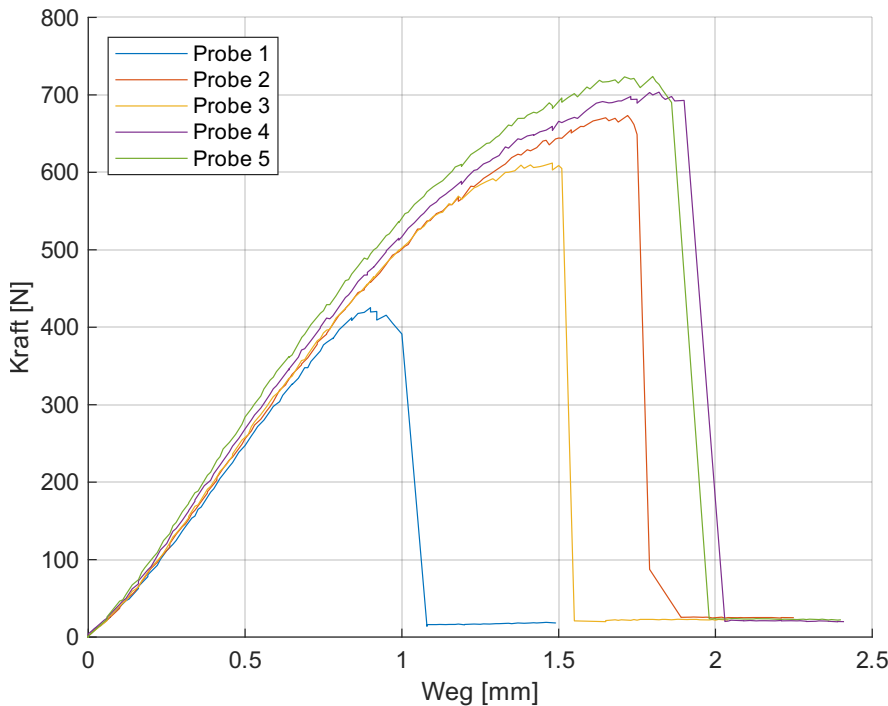


Tabelle 4.1.13: Bruchkräfte
Green-
Green mit
3M-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	409,0
2	651,1
3	594,3
4	685,4
5	703,4

Abbildung 4.1.13: Weg-Kraft-Diagramm Green-Green mit 3M-Klebstoff

Die Abbildung 4.1.13 zeigt den Kraftverlauf für die Green-Green-Proben, die mit dem 3M-Klebstoff verklebt wurden. Die Bruchkräfte variieren zwischen 409,0 N und 703,4 N. Die Probe 5 erreichte die größte Bruchkraft, während die Probe 1 die kleinste Bruchkraft aufwies. Der Mittelwert beträgt 608,6 N mit einer Standardabweichung von 119,1 N und einem Variationskoeffizienten von 19,6 %. Diese Streuung deutet darauf hin, dass die Klebeverbindungen mit dem 3M-Klebstoff nicht konsistent waren. In den Bruchbildern in Abbildung C.4.1 ist das deutlich zu sehen. Während die Proben 1, 2 und 3 Adhäsionsbrüche aufzeigten, waren bei den Proben 4 und 5 die Fügeiteile an der Klebekante gebrochen. Das spiegelt sich auch in den Kraftverläufen wider. Die Probe 1 wurde wahrscheinlich schlecht vorbereitet, während die Proben 4 und 5 optimal waren. Die Proben 3 und 4 waren besser als Probe 1 vorbereitet, dennoch war die Adhäsionskraft zu schwach, und im oberen Teil des Bruchbildes ist eine kleine Einschnürung oder ein Ansatz eines Bruchs an der Klebekante zu erkennen. Erwähnenswert ist, dass die Klebschichtdicke der ersten drei Proben zwischen 0,21 mm und 0,28 mm lag und damit im Bereich der empfohlenen 0,25 mm des Herstellers war. Die Proben 4 und 5 hatten eine Klebschichtdicke von 0,17 mm und 0,16 mm. Es wäre auch möglich gewesen, dass die Einspannung in die Prüfmaschine fehlerhaft war und unsymmetrische Kräfte aufgetreten sind, die zu einer Schälbelastung geführt haben. Trotz dieser Variabilität verlaufen die meisten Kurven relativ gleichmäßig, was darauf hindeutet, dass der 3M-Klebstoff unter bestimmten Bedingungen eine starke Klebung ermöglichen kann, jedoch hochsensibel gegenüber Verarbeitungsfehlern ist.

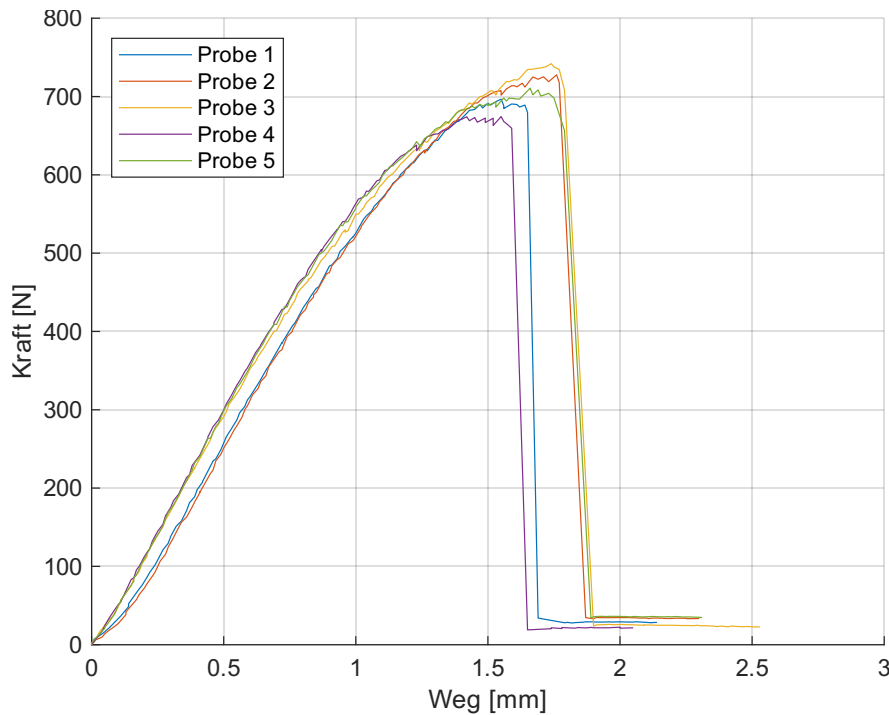


Tabelle 4.1.14: Bruchkräfte Green-Green mit HL-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	671,3
2	696,6
3	721,1
4	657,4
5	678,6

Abbildung 4.1.14: Weg-Kraft-Diagramm Green-Green mit HL-Klebstoff

Die Abbildung 4.1.14 stellt den Kraftverlauf der Green-Green-Proben mit dem HL-Klebstoff dar. Die Bruchkräfte dieser Proben liegen zwischen 657,4 N und 721,1 N. Die mittlere Bruchkraft beträgt 685,0 N mit einer Standardabweichung von 24,6 N und einem Variationskoeffizienten von 3,6 %. Die Verläufe zeigen eine bemerkenswerte Konsistenz. Die hohen Bruchkräfte weisen auf eine stabile und zuverlässige Klebverbindung hin. Die geringe Streuung der Ergebnisse deutet auf eine gute Klebedurchführung und eine starke chemische Bindung hin. Alle Proben sind im Substrat an der Klebekante gebrochen, wie in Abbildung C.4.2 zu sehen ist. Die Kurven verlaufen gleichmäßig und zeigen, dass der HL-Klebstoff in der Lage ist, eine starke und beständige Adhäsion zu erreichen.

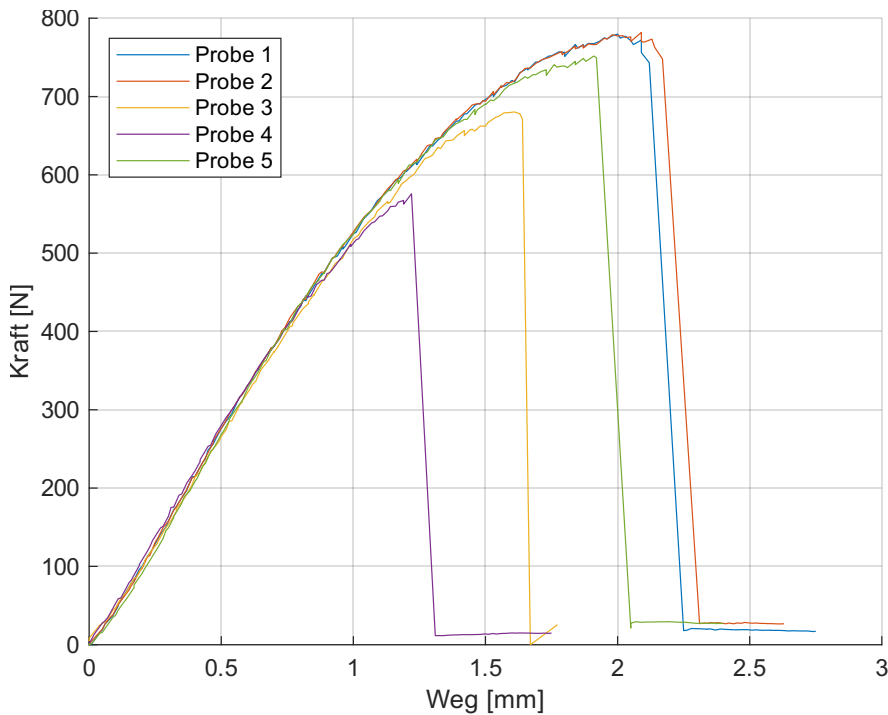


Tabelle 4.1.15: Bruchkräfte
Green-
Green mit
TC-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	762,9
2	756,8
3	658,2
4	564,9
5	728,1

Abbildung 4.1.15: Weg-Kraft-Diagramm Green-Green mit TC-Klebstoff

Der Kraftverlauf der Green-Green-Proben mit dem TC-Klebstoff wird in Abbildung 4.1.15 dargestellt. Die Bruchkräfte dieser Proben liegen zwischen 564,9 N und 762,9 N, und die durchschnittliche Bruchkraft beträgt 694,2 N, mit einer Standardabweichung von 83,4 N und einem Variationskoeffizienten von 12,0%. Obwohl Probe 4 vorzeitig versagt, verlaufen die Kurven bis etwa 500 N gleichmäßig und nahe beieinander. Die Proben 1 und 2 weisen einen Substratbruch auf, während die restlichen einen Adhäsionsbruch zeigen. Das spiegelt sich ebenfalls im Kraftverlauf wider. Die mögliche Ursache für die Adhäsionsbrüche kann wieder in der Oberflächenbehandlung, dem Klebevorgang oder der Trocknung liegen. Dennoch zeigt der Klebstoff, dass er eine gute Verbindung erreichen kann, wie man an den ersten beiden Proben sehen kann.

Eine weitere Ursache für die gute Adhäsion könnte die niedrige Klebeschicht sein, die zu einer erhöhten Adhäsion beiträgt, da diese bei den ersten zwei Proben 0,09 mm und 0,11 mm betrug. Die Streuung ist etwas größer als beim HL-Klebstoff, was darauf hinweist, dass der TC-Klebstoff möglicherweise etwas empfindlicher auf die Verarbeitungsbedingungen reagiert, jedoch insgesamt eine hohe Festigkeit bietet.

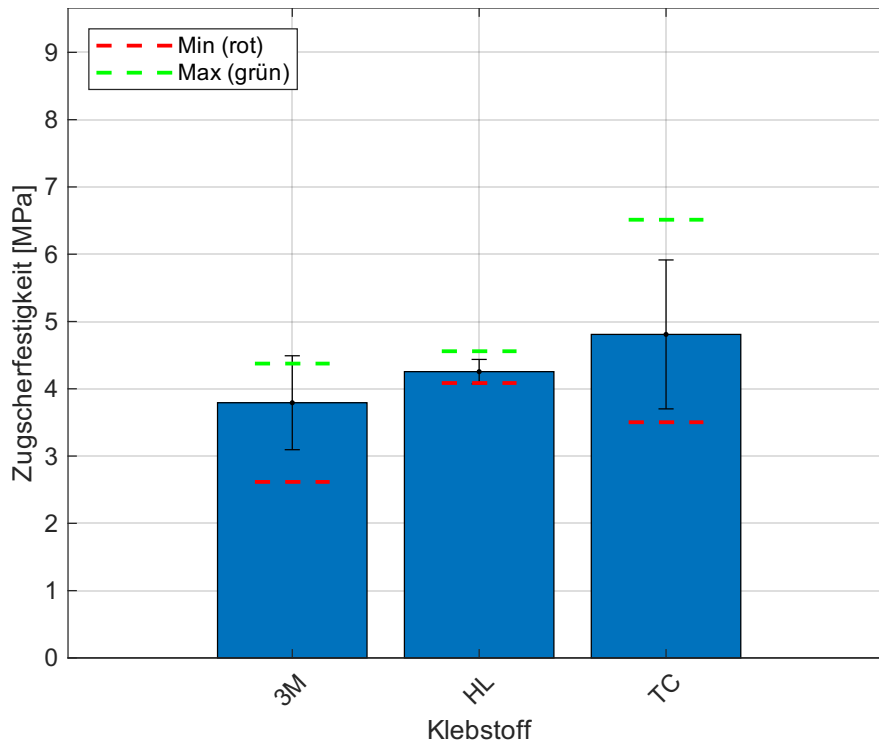


Tabelle 4.1.16: Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination Green-Green

Hersteller	$\bar{\sigma}$ [MPa]
3M	3,8
HL	4,3
TC	4,8

Abbildung 4.1.16: Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination Green-Green aller Klebstoffe

Die Zugscherfestigkeiten sind in der Abbildung 4.1.16 als Balkendiagramm abgebildet. Der 3M-Klebstoff hat eine durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 3,8 MPa und schwankt zwischen etwa 2,6 MPa und 4,4 MPa. Der Wert zeigt eine moderate Festigkeit der Klebung, die allerdings schwankt. Diese Schwankung deutet darauf hin, dass die Klebung nicht durchgehend gleichmäßig stark ist, was möglicherweise auf die Vorbereitung und Ausführung beim Kleben zurückzuführen ist. Laut Datenblatt erreicht dieser Klebstoff die Zugscherfestigkeit von Polystyrol und faserverstärktem Epoxidharz. Jedoch konnte der Wert für ABS von 7,6 MPa nicht erreicht werden. Da zwei Proben im Füge teil gebrochen sind, konnte die endgültige Zugscherfestigkeit nicht ermittelt werden. Nach jetzigem Stand kann dieser Klebstoff die Proben aus GreenTec Pro bei optimaler Klebung verbinden.

Der HL-Klebstoff erzielt eine durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 4,5 MPa mit einer Schwankung von etwa 4,1 bis 4,6 MPa. Die geringe Streuung der Ergebnisse verdeutlicht eine gleichmäßig starke Klebeverbindung. Im Vergleich zu den Datenblättern des Klebstoffs erreichen die gemessenen Zugscherfestigkeiten nicht die Werte von ABS mit 8,0 MPa oder Polycarbonat mit 12,0 MPa. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Füge teile zerbrochen sind und die wahre Zugscherfestigkeit des Klebstoffs nicht ermittelt werden konnte. Dennoch kann der Klebstoff eine sehr starke Verbindung zu den Füge teilen erbringen. Somit ist dieser Klebstoff sehr gut für die Fügung von GreenTec Pro Substraten geeignet.

Die höchste mittlere Zugscherfestigkeit von 4,8 MPa erreicht der TC-Klebstoff mit einer großen Schwankung von 3,5 MPa im Minimum bis 6,5 MPa im Maximum. Die großen Schwankungen resultieren ebenfalls aus mangelhafter Vorbereitung und Ausführung beim Kleben. Dennoch zeigt das Diagramm das Potenzial des Klebstoffs, wenn die Klebung optimal verläuft. Da einige Proben im Substrat gebrochen sind, kann wie bei den anderen Klebstoffen die maximale Zugscherfestigkeit des Klebstoffs nicht ermittelt werden.

Insgesamt ist jeder Klebstoff für die Klebung dieser Proben geeignet. Während der TC-Klebstoff die besten Ergebnisse zeigt, bleibt auch er unter den theoretisch möglichen Werten, was auf Potenzial für weitere Optimierungen in der Oberflächenvorbereitung und Klebstoffapplikation hinweist. Der HL-Klebstoff zeigt eine solide Leistung, während der 3M-Klebstoff die schwächste, aber dennoch brauchbare Klebung liefert.

4.1.5 Ergebnisse: PA-PA

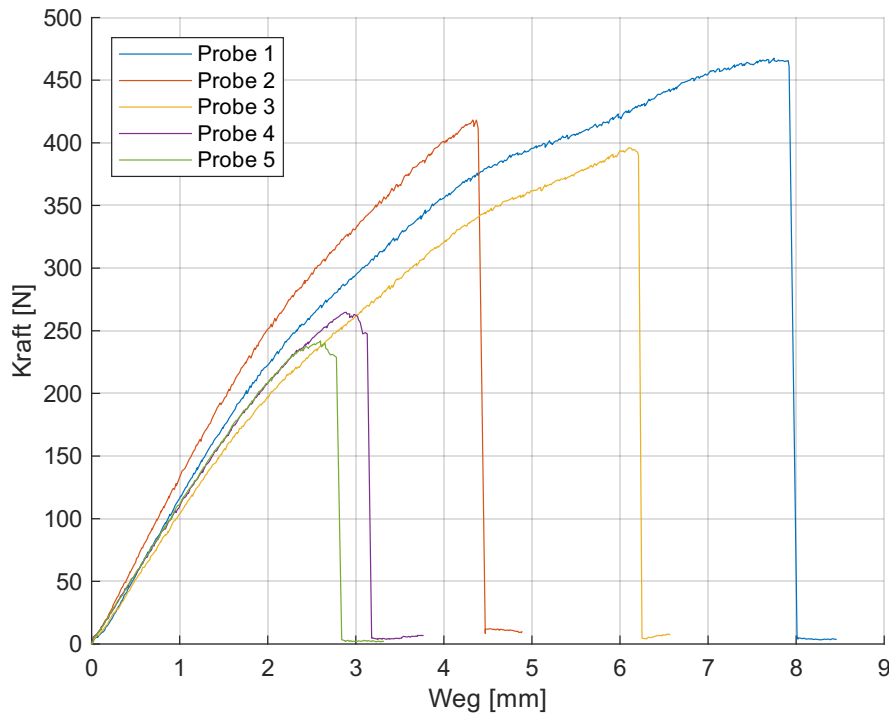


Tabelle 4.1.17: Bruchkräfte PA-PA mit 3M-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	462,7
2	413,1
3	392,2
4	260,4
5	238,7

Abbildung 4.1.17: Weg-Kraft-Diagramm PA-PA mit 3M-Klebstoff

In der Abbildung 4.1.17 sind die Kraftverläufe der PA-PA-Proben für den 3M-Klebstoff dargestellt. Die minimalen und maximalen Bruchkräfte liegen zwischen 238,7 N und 462,7 N, und die durchschnittliche Bruchkraft beträgt 353,4 N mit einer Standardabweichung von 98,5 N und einem Variationskoeffizienten von 27,9%. Die Verläufe zeigen eine signifikante Streuung der Bruchkräfte. Die Proben 4 und 5 liegen dabei weit unter den Kräften der anderen; die Klebeschicht betrug durchschnittlich 0,23 mm und wäre somit innerhalb der vom Hersteller angegebenen Toleranz.

Die Proben 1, 2, 4 und 5 weisen laut Abbildung C.5.1 einen gemischten Bruch auf, und teilweise sind bei den ersten beiden Proben beschädigte Druckschichten zu erkennen, die während des Versuchs delaminiert sind. Das weist auf eine sehr hohe Klebekraft hin. Probe 3 ähnelt einem Adhäsionsbruch; trotzdem ist die Bruchkraft relativ hoch. Laut Kurvenverlauf ist es möglich, dass der Klebstoff nachgegeben hat. Bei Proben 1 und 2 kann man eine kleine Einschnürung erkennen, was den längeren Zugweg erklärt. Das vorzeitige Versagen der letzten beiden Proben ist auf unzureichende Vorbereitung und Ausführung zurückzuführen.

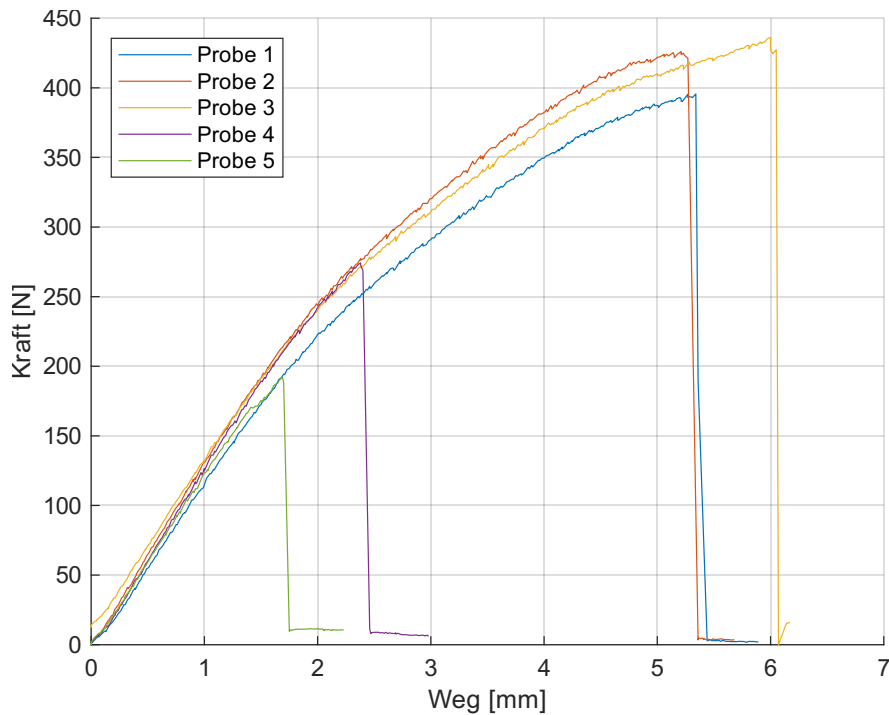


Tabelle 4.1.18: Bruchkräfte
PA-PA mit
HL-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	391,7
2	421,1
3	419,0
4	267,2
5	185,8

Abbildung 4.1.18: Weg-Kraft-Diagramm PA-PA mit HL-Klebstoff

Die Abbildung 4.1.18 zeigt den Kraftverlauf für die PA-PA-Proben, die mit dem HL-Klebstoff verklebt wurden. Die Bruchkräfte variieren zwischen 185,8 N und 421,1 N. Der Mittelwert der Bruchkraft liegt bei 337,0 N mit einer Standardabweichung von 105,5 N und einem Variationskoeffizienten von 31,3 %. Die Schwankungen sind in dieser Messreihe höher ausgeprägt als bei dem 3M-Klebstoff. Hier sind die Proben 4 und 5 die schwächsten, und wie man aus dem Bruchbild in Abbildung C.5.2 erkennt, sind diese Proben an der Kleboberfläche nicht so stark beschädigt wie die Proben 1, 2 und 3. Die ersten drei Proben weisen auf ein gemischtes Bruchbild hin. Wie beim 3M-Klebstoff sind teilweise Druckschichten delaminiert. Das zeugt von einer sehr starken Bindung und deutet auf ein mögliches Problem beim 3D-Druckprozess von PA6/66 hin. Die Klebeschicht betrug dabei durchschnittlich 0,22 mm. Es ist wieder möglich, dass bei der Anfertigung der Proben 4 und 5 typische Fehlerquellen aufgetreten sind. Dennoch zeigt dieser Klebstoff ein großes Potenzial zur Klebung von PA6/66, wenn das Füge teil optimal gefertigt wird.

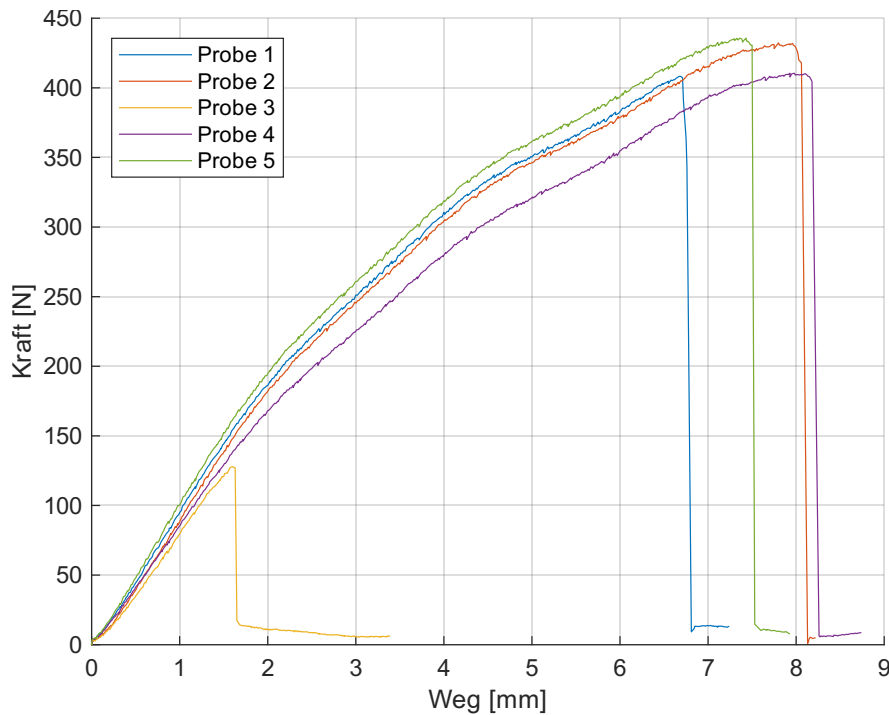


Tabelle 4.1.19: Bruchkräfte
PA-PA mit
TC-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	402,9
2	426,2
3	120,9
4	403,7
5	428,4

Abbildung 4.1.19: Weg-Kraft-Diagramm PA-PA mit TC-Klebstoff

Der Kraftverlauf für die PA-PA-Proben mit dem TC-Klebstoff ist in Abbildung 4.1.19 zu sehen. Die minimale und maximale Bruchkraft beträgt 120,9 N und 428,4 N. Der Mittelwert beträgt 356,4 N mit einer Standardabweichung von 132,2 N und einem Variationskoeffizienten von 37,1 %. Das ist eine noch größere Schwankung im Vergleich zu den ersten beiden Klebstoffen. Die geringe Bruchkraft von Probe 3 könnte durch eine unzureichende Oberflächenbehandlung oder Kontamination vor der Klebstoffapplikation verursacht worden sein, was die Adhäsion erheblich beeinträchtigt hat. Die Klebschichtdicke hat anscheinend keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit, da sie im Bereich der anderen Proben lag. Mithilfe des Bruchbildes in Abbildung C.5.3 erkennt man, dass anscheinend Probe 3 nicht ausreichend mit Klebstoff benetzt wurde und es daher zu einem vorzeitigen Bruch kam. Die restlichen Proben wiederum erreichten relativ hohe Bruchkräfte, und auch hier gibt es verschiedene Zugwege aufgrund der duktilen Eigenschaften der Substrate aus Polyamiden oder des Klebstoffs. Bei diesen Proben kam es zum gemischten Bruch, wobei an jedem Fügeteil noch die Hälfte der Klebung verblieb. Der Primer half, die Oberfläche für die Klebung vorzubereiten und somit eine erhöhte Adhäsionskraft zu erreichen.

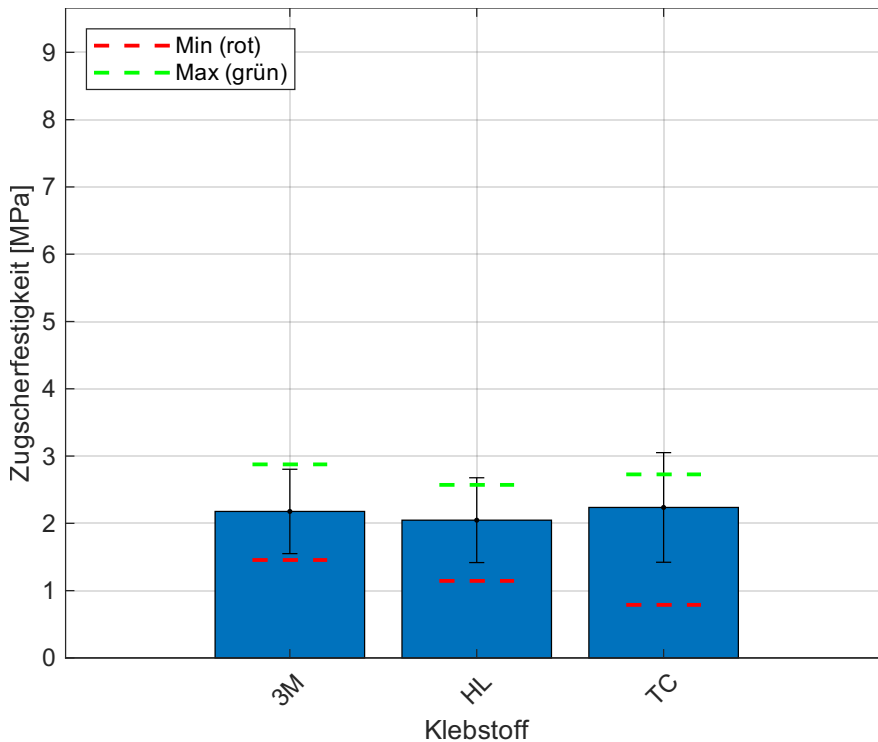


Tabelle 4.1.20: Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination PA-PA

Hersteller	$\bar{\sigma}$ [MPa]
3M	2,2
HL	2,1
TC	2,2

Abbildung 4.1.20: Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination PA-PA aller Klebstoffe

Die Zugscherfestigkeit der PA-PA-Proben wurde für die Klebstoffe ermittelt und wird in Abbildung 4.1.20 dargestellt. Alle drei Klebstoffe erreichen annähernd gleiche Zugfestigkeiten. Der 3M-Klebstoff und der TC-Klebstoff erreichen durchschnittlich eine Zugfestigkeit von 2,2 MPa, während der HL-Klebstoff einen Wert von 2,1 MPa erreicht. Das Minimum und Maximum des TC-Klebstoffs schwankt zwischen 0,8 MPa und 2,7 MPa, und beim 3M-Klebstoff beträgt es zwischen 1,4 MPa und 2,9 MPa. Polyamide neigen dazu, aufgrund ihrer chemischen Struktur eine geringere Adhäsion zu Klebstoffen aufzuweisen, was durch Oberflächenrauigkeit, Feuchtigkeitsaufnahme oder ungleichmäßige Primeranwendung verstärkt werden kann. Für den 3M- und HL-Klebstoff gibt es keine genauen Zugscherfestigkeitswerte für Polyamide.

Für den TC-Klebstoff wurde der Mittelwert der Zugscherfestigkeit ohne den eindeutigen extremen Ausreißer der Probe 3 ermittelt. Es wurde eine Zugscherfestigkeit von 2,7 MPa festgestellt, was gegenüber der ursprünglichen Betrachtungsweise eine erhebliche Verbesserung von bis zu 0,5 MPa darstellt. Dennoch muss beachtet werden, dass bei einer Klebung nicht jede Verbindung ideal verlaufen kann und es bei schlechter Vorbereitung und Ausführung zu Defekten kommen kann. Dies sollte in der Betrachtung und Auswahl des Klebstoffs oder des Klebeprozesses genauer analysiert und abgewägt werden. Diese Produktionsfehler sollten durch geeignete Vorkehrungen verhindert oder erkannt werden. Im Vergleich zum Datenblatt schnitt die Messreihe unterdurchschnittlich ab. Für PA6.6 sollte eine Zugscherfestigkeit von mindestens 5 MPa erreicht werden. Die Gründe wurden bereits weiter oben beschrieben. Insgesamt haben alle drei Klebstoffe eine ähnliche Leistungsfähigkeit für die Kombination PA-PA gezeigt. Dennoch könnte man bei den Klebstoffen 3M und HL potenziell bessere Werte erreichen, wenn die 3D-Druckparameter verbessert würden.

4.1.6 Ergebnisse: PC-PC

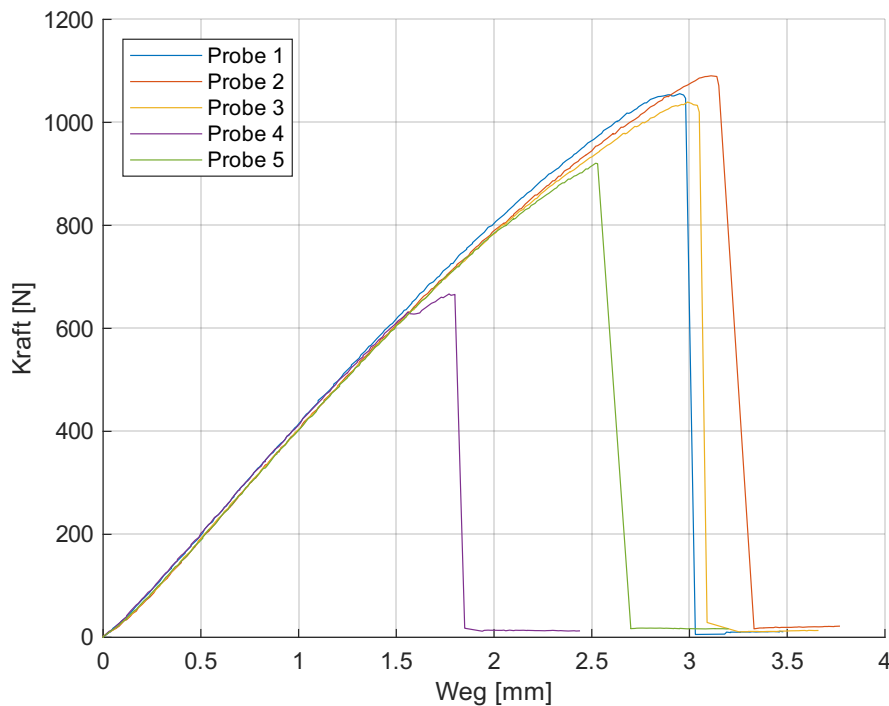


Tabelle 4.1.21: Bruchkräfte
PC-PC mit
3M-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	1043,9
2	1071,1
3	1026,1
4	656,5
5	902,7

Abbildung 4.1.21: Weg-Kraft-Diagramm PC-PC mit 3M-Klebstoff

In der Abbildung 4.1.21 sind die Kraftverläufe der PC-PC-Proben für den 3M-Klebstoff dargestellt. Die minimalen und maximalen Bruchkräfte liegen zwischen 656,5 N und 1071,1 N, und die durchschnittliche Bruchkraft beträgt 940,1 N mit einer Standardabweichung von 171,1 N und einem Variationskoeffizienten von 18,2 %. Die Kurven zeigen weitgehend den gleichen Verlauf. Probe 4 ist ein Ausreißer mit 656,5 N, weit unter dem Durchschnitt. Im Bruchbild in Abbildung C.6.1 erkennt man, dass Brüche bei der Hälfte der Klebefläche versagt haben; dadurch war die Spannung so hoch, dass das Füge teil aus PC an dieser Stelle zerbrach. Ebenso sieht man, dass Probe 4 nicht in einzelne Teile zerbrochen ist, wie die anderen. Der Grund ist wahrscheinlich, wie bei den anderen Messreihen, eine hohe Sensibilität gegenüber den Verarbeitungsbedingungen. Die Klebschichtdicke hatte in dieser Messreihe wahrscheinlich keinen Einfluss, da die Probe mit 0,14 mm im Mittelfeld lag. Der Bruch der Füge teile verdeutlicht die hohe Adhäsion des Klebstoffs gegenüber Polycarbonat.

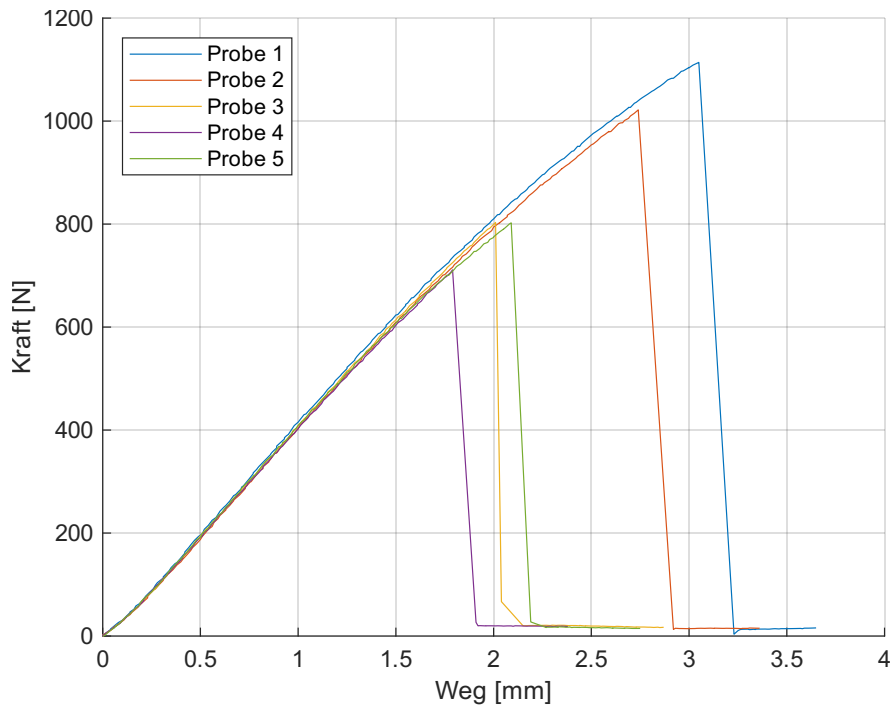


Tabelle 4.1.22: Bruchkräfte
PC-PC mit
HL-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	1098,7
2	1005,0
3	785,0
4	695,3
5	787,6

Abbildung 4.1.22: Weg-Kraft-Diagramm PC-PC mit HL-Klebstoff

Der Kraftverlauf der PC-PC-Proben mit dem HL-Klebstoff wird in Abbildung 4.1.22 dargestellt. Die Bruchkräfte dieser Proben liegen zwischen 695,3 N und 1098,7 N, und die durchschnittliche Bruchkraft beträgt 874,3 N mit einer Standardabweichung von 169,5 N und einem Variationskoeffizienten von 19,4 %. Es ist eine höhere Schwankung erkennbar, wobei die Mehrheit der Proben beim 3M-Klebstoff über 1000 N zerbrochen ist. In dieser Messreihe sind alle Proben im Substrat gebrochen und in viele Einzelteile zerbrochen, wie in Abbildung C.6.2 zu sehen ist. Mit einer durchschnittlichen Klebschichtdicke von 0,20 mm sind die Proben in Bezug auf die Applikation konsistent angefertigt worden. Die Verläufe zeigen, dass dieser Klebstoff ein höheres Potenzial weit über 1000 N aufweist. Dies könnte durch Anpassung des Versuchsaufbaus, wie durch dickere Proben und kontrollierte Fertigung, verbessert werden.

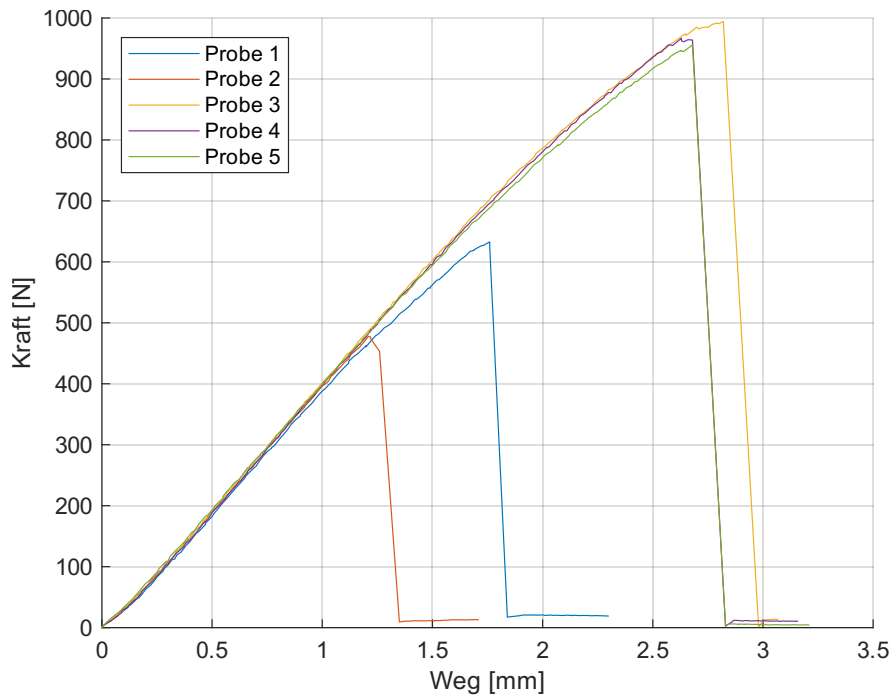


Abbildung 4.1.23: Weg-Kraft-Diagramm PC-PC mit TC-Klebstoff

Tabelle 4.1.23: Bruchkräfte
PC-PC mit
TC-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	617,4
2	469,5
3	980,0
4	954,7
5	950,6

Die Abbildung 4.1.23 zeigt den Kraftverlauf der PC-PC-Proben mit dem TC-Klebstoff. Die Bruchkräfte dieser Proben liegen zwischen 469,5 N und 980,0 N. Die mittlere Bruchkraft beträgt 794,4 N mit einer Standardabweichung von 235,3 N und einem Variationskoeffizienten von 29,6 %. Diese Messreihe weist von den drei Klebstoffen die höchste Varianz auf. Die ersten beiden Proben versagten frühzeitig bei 469,5 N und 617,4 N, weit unter dem Durchschnitt. Im Bruchbild in Abbildung C.6.3 sieht man, dass die ersten beiden Proben Adhäsionsbrüche erfuhren, wobei bei Probe 2 der Bruch nur in einer kleinen Klebefläche auftrat. Es scheint, dass durch dieses Versagen die Kraft ruckartig lokal auf dieses Fügeglied einwirkte und damit zum Bruch führte. Die restlichen Proben zerbrachen in viele kleine Bruchstücke. Dies spiegelt sich auch im Diagramm wider, wo alle Kräfte nahe beieinander versagten.

Die Klebschichtdicke bei diesen Proben lag weit unter den geforderten 0,20 mm; sie betrug bei den Proben 1, 2 und 3 nur 0,07 mm. Neben Fehlerquellen, die schon in den anderen Messreihen beschrieben wurden, sind im Bruchbild bei diesen Proben transparente Stellen erkennbar. Das deutet darauf hin, dass der Klebstoff dort kaum vorhanden ist. Dennoch ist bemerkenswert, dass Probe 3 trotz fehlenden Klebstoffs einen höheren Wert liefert als die gut geklebten Proben 4 und 5.

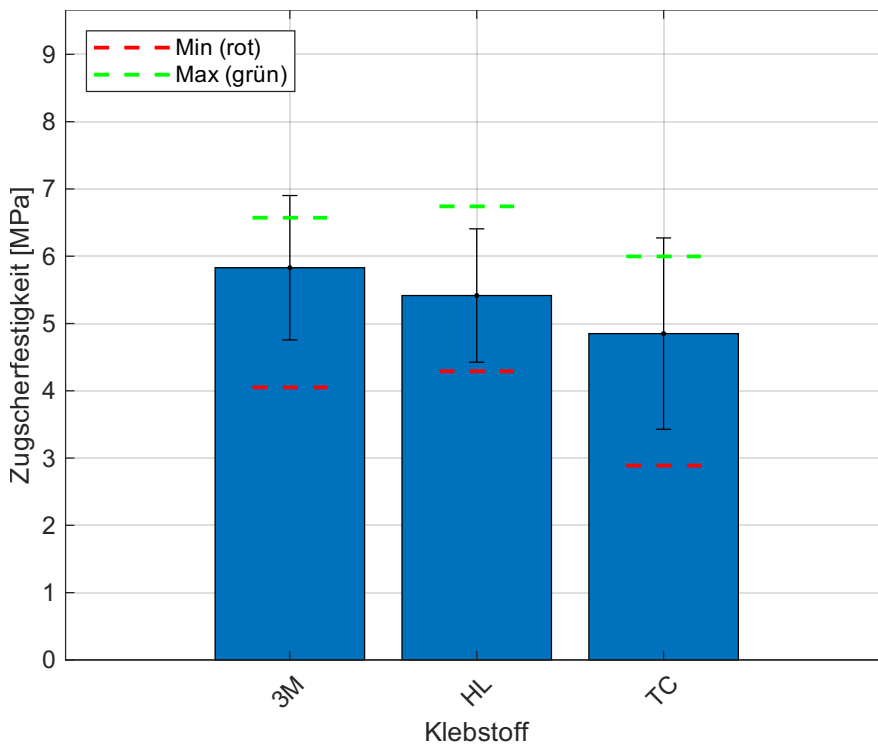


Tabelle 4.1.24: Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten $\bar{\sigma}$ für Kombination PC-PC

Hersteller	$\bar{\sigma}$ [MPa]
3M	5,8
HL	5,4
TC	4,9

Abbildung 4.1.24: Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination PC-PC aller Klebstoffe

Die Zugscherfestigkeit der PC-PC-Proben wurde für drei verschiedene Klebstoffe getestet, und die Ergebnisse in Abbildung 4.1.24 zeigen Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Klebstoffe. Die PC-PC-Proben mit dem 3M-Klebstoff erzielen eine durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 5,8 MPa, wobei das Minimum bei etwa 4 MPa und das Maximum bei 6,6 MPa liegt. Es ist eine moderate Schwankung zu beobachten, die mit einer besseren Vorbereitung und Durchführung verringert werden kann. Für Polycarbonat gibt das Datenblatt eine Zugscherfestigkeit von 9,2 MPa an, damit liegt der gemessene Wert weit unter dem Möglichen. Im Datenblatt werden wahrscheinlich nicht gedruckte Vollproben verwendet, und außerdem ist im Vermerk angegeben, dass die Proben 3,2 mm dick sind, eine größere Klebefläche besitzen und nach der Norm ASTM D1002 geprüft wurden. In der ASTM D1002 sind die Überlappflächen anders definiert. Das verändert nachhaltig das Verhalten der Proben im Zugscherversuch.

Der HL-Klebstoff besitzt eine mittlere Zugscherfestigkeit von 5,4 MPa und ein Minimum und Maximum von etwa 4,3 MPa und 6,7 MPa. Potenziell ist dieser Klebstoff stärker als der 3M-Klebstoff, dennoch ist er im Durchschnitt geringer. Diese Messreihe zeigt die geringste Streuung der drei Messreihen. Im Datenblatt wird eine Zugfestigkeit von 12 MPa angegeben, und damit liegt auch dieser gemessene Wert weit unter dem theoretisch Möglichen. Die Zugscherfestigkeit wurde laut Datenblatt nach der Norm ISO 4587 durchgeführt. Die Hauptunterschiede zwischen der ISO 4587 und DIN EN 1465 liegen in den Anwendungsbereichen, Probengeometrien und Prüfgeschwindigkeiten.

Für die Proben mit dem TC-Klebstoff ist eine mittlere Zugscherfestigkeit von 4,9 MPa ermittelt worden. Die Werte schwanken zwischen etwa 2,9 MPa und 6,0 MPa. In den bisherigen Versuchen war dieser Klebstoff derjenige mit den höchsten Zugscherfestigkeiten. Im Vergleich zum Datenblatt sollte dieser Klebstoff einen Wert von ungefähr 8,5 MPa erreichen. Die Unterschiede im Ergebnis können verschiedene Gründe haben, z.B. die kleinere Klebefläche, die den Kraftverlauf der Proben beeinflussen kann, oder die fehlerhafte Herstellung der Proben.

Insgesamt liegen die Werte für die drei Kleber auf einem ähnlichen Niveau, und mit optimierten Verfahren können alle eine gleich gute Leistung bei dieser Kombination erzielen.

4.1.7 Ergebnisse: CFUD-CFUD

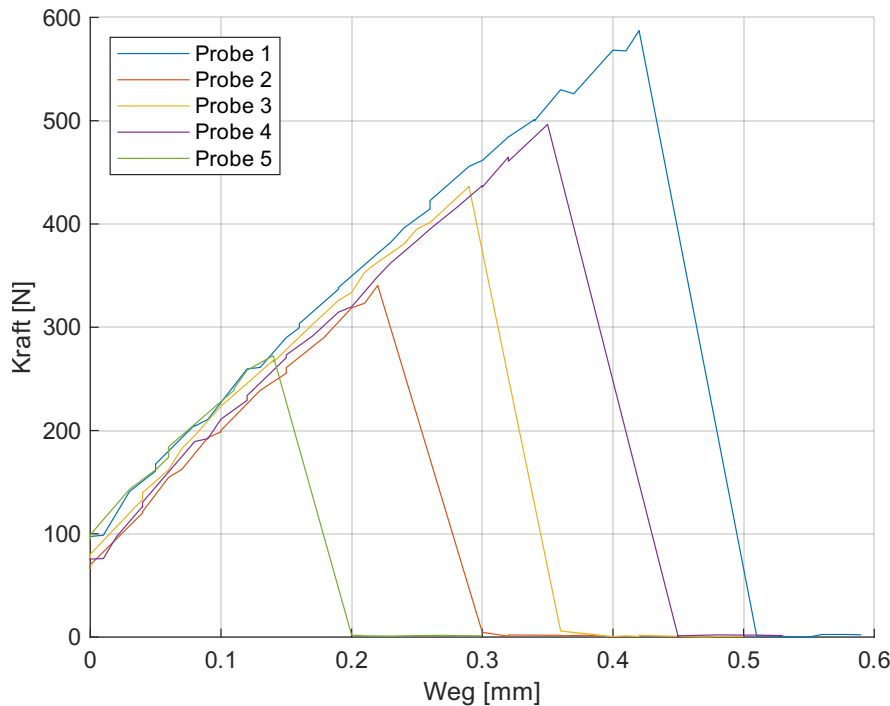


Tabelle 4.1.25: Bruchkräfte
CFUD-CFUD
mit 3M-
Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	584,6
2	339,5
3	435,7
4	494,5
5	271,8

Abbildung 4.1.25: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-CFUD mit 3M-Klebstoff

Die Abbildung 4.1.25 zeigt den Kraftverlauf für die CFUD-CFUD-Proben, die mit dem 3M-Klebstoff verklebt wurden. Die Bruchkräfte variieren erheblich zwischen 271,8 N und 584,6 N. Der Mittelwert beträgt 425,2 N bei einer Standardabweichung von 123,7 N und einem Variationskoeffizienten von 29,1 %. Die Verläufe zeigen eine große Streuung, was auf eine inkonsistente Klebung hinweist. Während Probe 1 eine relativ hohe Bruchkraft aufweist, bricht jede Probe bei unterschiedlichen Kräften. Die Bruchbilder in Abbildung C.7.1 weisen auf einen Adhäsionsbruch hin. Diese Variabilität deutet auf Unterschiede in der Oberflächenvorbereitung, der Klebstoffapplikation oder den Aushärtungsbedingungen hin, die zu einer uneinheitlichen Qualität der Klebverbindungen führen können.

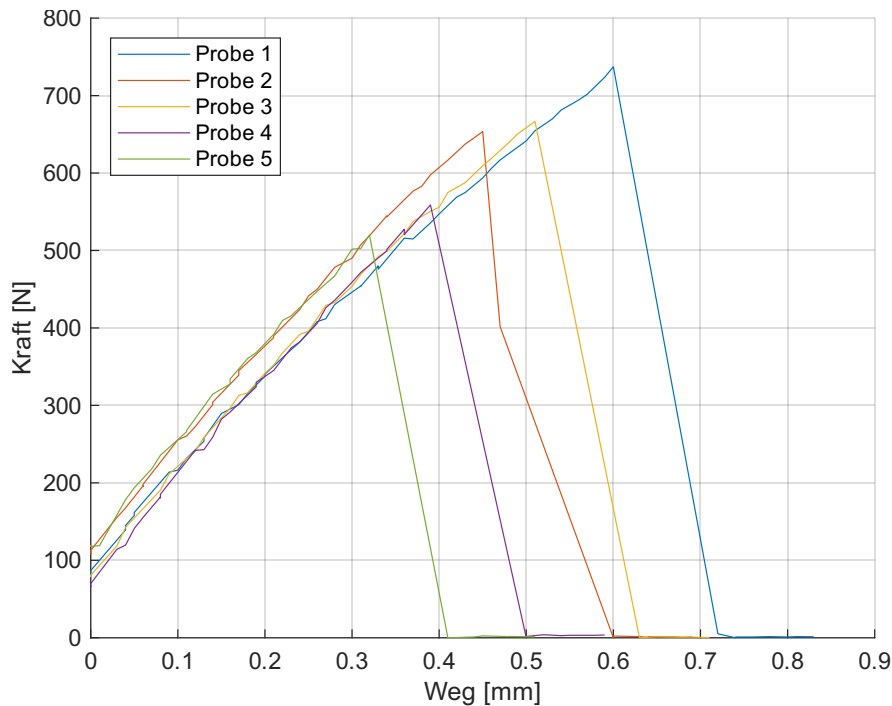


Tabelle 4.1.26: Bruchkräfte CFUD-CFUD mit HL-Klebstoff

Probe	F_{max} [N]
1	735,7
2	651,9
3	666
4	555,4
5	518,3

Abbildung 4.1.26: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-CFUD mit HL-Klebstoff

Die Abbildung 4.1.26 zeigt den Kraftverlauf der CFUD-CFUD-Proben mit dem HL-Klebstoff. Die Bruchkräfte schwanken zwischen 518,3 N und 735,7 N. Der Mittelwert beträgt 625,5 N bei einer Standardabweichung von 87,9 N und einem Variationskoeffizienten von 14,0 %. Die Verläufe zeigen eine geringere Streuung, was auf eine konsistentere und stabilere Klebung hinweist.

Auch hier hat Probe 1 die höchste Bruchkraft erreicht, und die restlichen Proben beginnen ab etwa 500 N zu versagen. In den Bruchbildern in Abbildung C.7.2 sind in allen Proben eindeutig Luftblasen zu erkennen, und zudem weisen alle einen Adhäsionsbruch auf. Bei der Applikation ist es schwierig zu erkennen, ob der Kleber richtig aufgetragen wurde, aufgrund der intransparenten Eigenschaft des Kohlefaser-UD-Tapes. Es ist möglich, dass beim Auftragen mit dem Spachtel Luftblasen eingemischt wurden. Eine mögliche Variante wäre, einen Klebetropfen in die Mitte aufzutragen und diesen mit dem Gegenstück unter Anpressdruck zu verteilen. Dies birgt jedoch die Gefahr, dass die Ecken nicht richtig benetzt werden; dennoch könnte das Innere frei von Luftblasen bleiben. Insgesamt ist dieser Klebstoff im Vergleich zum 3M-Klebstoff deutlich leistungsfähiger.

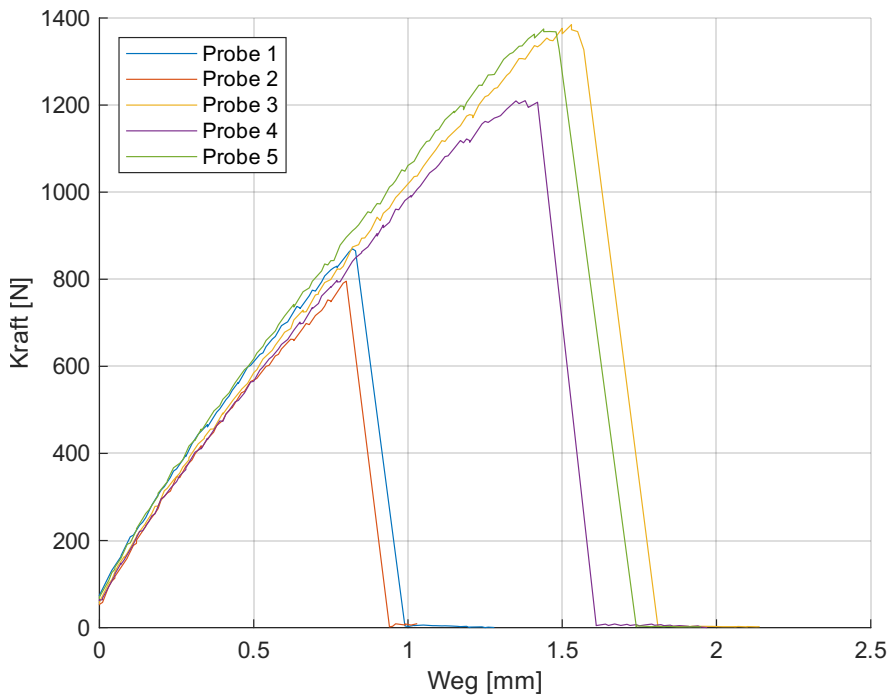


Tabelle 4.1.27: Bruchkräfte CFUD-CFUD mit TC-Klebstoff

Probe	F_{\max} [N]
1	878,9
2	811,9
3	1388
4	1244,2
5	1380,5

Abbildung 4.1.27: Weg-Kraft-Diagramm CFUD-CFUD mit TC-Klebstoff

Der Kraftverlauf für die CFUD-CFUD-Proben mit dem TC-Klebstoff wird in Abbildung 4.1.27 gezeigt. Die minimale und maximale Bruchkraft betragen 811,9 N und 1380,5 N, mit einem Mittelwert von 1140,7 N, einer Standardabweichung von 276,6 N und einem Variationskoeffizienten von 24,2 %. Die Verläufe der Proben zeigen die höchste Bruchkraft unter den getesteten Kombinationen und Klebstoffen. Die meisten Werte liegen nah beieinander. Dennoch weichen die Proben 1 und 2 stark vom Durchschnitt ab, und das spiegelt sich in den Bruchbildern in Abbildung C.7.3 wider. Diese Proben sind entlang der Kante der Einspannvorrichtung gerissen, und der Grund ist wahrscheinlich zu festes und schiefes Einspannen gewesen. Man erkennt, dass sich die Abdrücke der Vorrichtung in das Material eingedrückt haben; dadurch wurde das UD-Tape lokal an den Kanten stark geschwächt. Auch schiefes Einspannen kann dafür verantwortlich sein, da der Bruch wie ein Stück gerissenes Papier aussieht. Die Probe 4 ähnelt dem Versagen von Probe 1 und 2, dennoch konnte sie eine höhere Bruchkraft erreichen. Man sieht, dass noch zwei Stränge das Material zusammenhielten, was die Zugfestigkeit des UD-Tapes unterstreicht. Die Proben 3 und 5 haben die größten Bruchkräfte erreicht, und im Bruchbild ist ein Kohäsionsbruch erkennbar. Der Grund für dieses Fehlerbild ist wahrscheinlich eine schiefe oder unvollständige Einspannung der gesamten Fläche des UD-Tapes. Es sind einzelne Faserabschnitte zu erkennen, und es scheint, dass nur ein Teil des UD-Tapes der Zugkraft ausgesetzt war. Unter bestimmten Bedingungen, wie oben beschrieben, kann auch UD-Tape atypisch versagen. Dennoch zeigt dieser Klebstoff dank des Primers eine außergewöhnliche Leistung für diese Kombination.

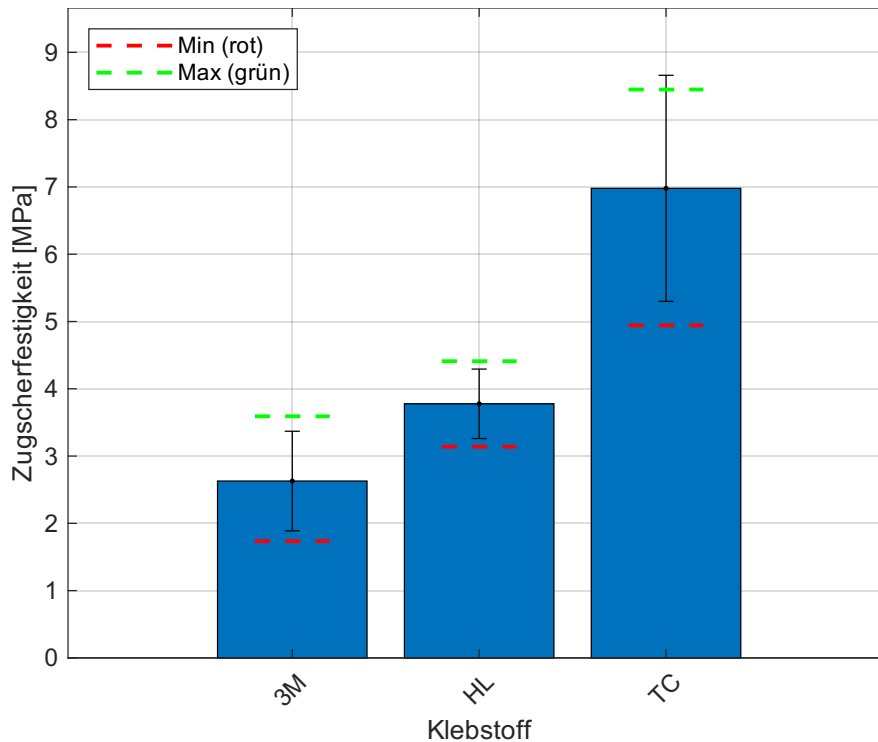


Tabelle 4.1.28: Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-CFUD

Hersteller	$\bar{\sigma}$ [MPa]
3M	2,6
HL	3,8
TC	7,0

Abbildung 4.1.28: Mittelwerte, Standardabweichungen und Min-Max-Werte der Zugscherfestigkeiten für Kombination CFUD-CFUD aller Klebstoffe

Die durchschnittlichen Zugscherfestigkeiten sind in Abbildung 4.1.28 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen signifikante Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Klebstoffe.

Die Proben mit dem 3M-Klebstoff erzielten durchschnittlich eine Zugscherfestigkeit von 2,6 MPa, was der niedrigste Wert aller drei Klebstoffe ist. Das zeigt, dass der 3M-Klebstoff auf CFUD-Substraten eine weniger effektive Bindung ermöglicht. Die Werte schwanken ungefähr zwischen 1,7 MPa und 3,6 MPa. Da die Kohlefaser von PA6 umhüllt ist, findet die Klebereaktion hauptsächlich mit dem Kunststoff statt. Im Vergleich zu den Datenblattwerten wie Polystyrol mit 3,8 MPa bleibt der gemessene Wert deutlich zurück.

Der HL-Klebstoff erzielt eine durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 3,8 MPa mit einem Minimum und Maximum von etwa 3,1 MPa und 4,4 MPa. Die geringere Streuung der Ergebnisse weist auf eine stabilere und ordnungsgemäße Klebung hin. Im Vergleich zu den anderen Kunststoffen im Klebstoff-Datenblatt war die gemessene Zugscherfestigkeit unterdurchschnittlich.

Die mit Abstand höchste Zugscherfestigkeit wurde mit dem TC-Klebstoff erreicht. Er besitzt einen Durchschnitt von 7,0 MPa, allerdings mit einer großen Schwankung von etwa 5,0 MPa bis 8,5 MPa. Wie schon angesprochen, ist dieser Klebstoff dank Primer sehr gut für UD-Tape mit PA6-Matrix geeignet. Im Datenblatt sind PA6.6 mit etwa 7,5 MPa und PA12 mit etwa 6 MPa angegeben, und somit entspricht der gemessene Wert den Angaben im Datenblatt. Es ist auch ein Wert für PA6 GF15 mit etwa 10,5 MPa angegeben. Dieser Wert wurde nicht gemessen, dennoch könnte er mit einigen Verbesserungen in der Einspannung und Versuchsdurchführung durchaus erreicht werden.

Insgesamt überzeugt der TC-Klebstoff mit seiner hohen Zugscherfestigkeit, während der HL- und 3M-Klebstoff nur etwa die Hälfte davon erreichen.

4.2 Diskussion der Kombinationen

4.2.1 CFUD-Green im Vergleich zu CFUD-CFUD und Green-Green

Bei der Untersuchung der CFUD-Green-Proben zeigte sich, dass der TC-Klebstoff die höchste durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 4,7 MPa erreichte. Der HL-Klebstoff folgte mit 3,0 MPa, während der 3M-Klebstoff den niedrigsten Wert von 1,7 MPa erzielte. Im obigen Diagramm 4.1.4 erkennt man bei dem HL-Klebstoff eine hohe Schwankung. Es zeigt, dass durchaus eine gleich gute Zugscherfestigkeit wie beim TC-Klebstoff erreicht werden kann. Dennoch liegen die Werte unter denen der CFUD-CFUD-Proben, die 7,0 MPa mit dem TC-Klebstoff, 4,6 MPa mit dem HL-Klebstoff und 2,6 MPa mit dem 3M-Klebstoff erreichten. Die höheren Werte der CFUD-CFUD-Proben sind vermutlich auf die Steifigkeit des Materials zurückzuführen. Da das GreenTec Pro im Gegensatz zum UD-Tape nicht steif ist, wie schon in den Grundlagen beschrieben, kann es zu unterschiedlichen Verformungen führen. Diese Verformungsunterschiede können Spannungsspitzen in der Klebschicht, hauptsächlich an den Enden der Klebefugen, erzeugen, die die Adhäsion schwächen und die Festigkeit der Verbindung reduzieren. Beim Ziehen der Proben war es zudem so, dass die dünnen GreenTec Pro Füge­teile sich stärker verwunden haben als das flexiblere UD-Tape, wodurch Schälbelastungen zum vorzeitigen Versagen der Klebung führen. Es ist zu erkennen, dass verformbare Klebstoffe wie der TC-Klebstoff diese Belastung über die Klebschicht verteilen kann und somit höhere Festigkeiten erreicht werden als spröde wie der HL-Klebstoff. Auch ist die Klebschichtdicke von großer Bedeutung. Bei einer dickeren Schicht können innere und äußere Spannungen in der Klebschicht bei einer Biegebelastung entstehen, die bei der Verwindung auftreten. Da der HL-Klebstoff zudem im Endzustand sehr hart und spröde ist, kann es bei einer solchen Belastung leicht zu Defekten kommen. Die 3M- und TC-Klebstoffe sind hingegen im Endzustand zähelastisch und können Biegebelastungen bis zu einer gewissen Klebschichtdicke gut vertragen. Ebenfalls könnten unzureichende Oberflächenbehandlungen oder Lufteinschlüsse während des Klebeprozesses zu den geringeren Zugscherfestigkeiten beigetragen haben. Eine bessere Vorbereitung der Oberflächen und ein sorgfältigerer Klebstoffauftrag könnten die Adhäsion verbessern und somit die Festigkeit der Verbindung erhöhen.

Die Green-Green-Proben erzielten mit dem TC-Klebstoff 4,8 MPa, mit dem HL-Klebstoff 4,3 MPa und mit dem 3M-Klebstoff 3,8 MPa gleiche bzw. bessere Zugscherfestigkeiten als die Kombination CFUD-Green. Wegen der gleichen Füge­teilgeometrie konnten die Spannungsspitzen in der Klebschicht gleichmäßiger verteilt werden. Ebenso war die Verwindung der Füge­teile nicht so extrem, da sie gleichmäßiger ablief. Des Weiteren ist die Adhäsion bei diesen Proben gleichmäßiger, was wiederum zu einer gleichmäßigeren Belastung der Klebschicht führt. Im Gegensatz zu CFUD-Green hat das UD-Tape eine Matrix aus PA6, das als Polyamid bekanntlich schwieriger zu kleben ist, aufgrund der höheren Oberflächenenergie.

Die Kombination Kohlefaser-UD-Tape mit GreenTec Pro liefert mit dem TC-Klebstoff und potenziell auch mit dem HL-Klebstoff gleich gute Ergebnisse im Vergleich zur Kombination GreenTec Pro mit GreenTec Pro. Der 3M-Klebstoff schnitt besser ab, wenn die Füge­teile aus GreenTec Pro bestehen. Dennoch liefert die Kombination CFUD-CFUD die besten Ergebnisse.

4.2.2 CFUD-PA im Vergleich zu CFUD-CFUD und PA-PA

Bei der Analyse der CFUD-PA-Proben zeigt sich, dass der TC-Klebstoff die höchste durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 3,9 MPa erreicht. Der HL-Klebstoff folgte mit 2,4 MPa, während der 3M-Klebstoff den niedrigsten Wert von 1,3 MPa erreichte. Im Vergleich zu den CFUD-CFUD-Proben erreichen sie knapp die Hälfte der erreichten Werte. Die niedrigen Zugscherfestigkeiten sind wahrscheinlich auf die unterschiedlichen mechanischen und chemischen Eigenschaften der beiden Materialien zurückzuführen. PA6/66, ein weniger steifes Material im Vergleich zum UD-Tape, hat die Neigung, sich unter Belastung stärker zu verformen, was zu Spannungsspitzen an den Enden der Klebefuge führen kann. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Bindung. Polyamide besitzen eine höhere Oberflächenenergie, was die Benetzung durch den Klebstoff erschwert. Deswegen wurde für den TC-Klebstoff der empfohlene Primer verwendet, um eine bessere Adhäsion zu erreichen. Das konnte anscheinend erreicht werden, da die Zugscherfestigkeit viel höher ist als bei denen ohne Primer. Für die Versuche mit PA-PA sind alle Zugscherfestigkeiten unter denen der CFUD-PA-Proben. Der TC- und 3M-Klebstoff erreichten eine Zugscherfestigkeit von 2,2 MPa, während der HL-Klebstoff einen Wert von 2,1 MPa erreichte. Auch wenn hier die gleichen Materialien verwendet werden, ist die Verbindung aufgrund der allgemeinen schlechten Adhäsion schwach. Außerdem ist PA6/66 ein sehr flexibles Material. Wie schon oben in den Ergebnissen beschrieben, schnürt sich das Material ein und es kommt zu einer ungleichmäßigen Belastung der Klebeschicht. Auch ist die Steifigkeit sehr gering, was die Zugscherfestigkeit niedrig hält. Trotz Primer für den TC-Klebstoff war dieser den anderen Klebstoffen nicht überlegen.

Abgesehen vom 3M-Klebstoff sieht man, dass eine Verbindung mit einem steifen Material wie UD-Tape die Zugscherfestigkeit verbessert. Bei einer Kombination von PA6/66 mit PA6/66 ist die Zugscherfestigkeit für den 3M-Klebstoff verbessert worden, während die anderen an Leistungsfähigkeit einbüßen mussten.

4.2.3 CFUD-PC im Vergleich zu CFUD-CFUD und PC-PC

Bei den CFUD-PC-Proben erzielte der TC-Klebstoffe im Durchschnitt 6,6 MPa die höchste Zugscherfestigkeit, gefolgt von 3,2 MPa beim HL-Klebstoff und 1,8 MPa beim 3M-Klebstoff. Diese Ergebnisse zeigen insgesamt bessere Ergebnisse als beim CFUD-PA-Versuch, wobei die Werte dennoch hinter denen der CFUD-CFUD-Proben zurückbleiben, die aber potenziell diese Zugscherfestigkeiten bei besseren Klebparametern erreichen könnten.

Der Kunststoff Polycarbonat ist steifer als PA6/66, weist aber im Vergleich zum UD-Tape eine niedrigere Steifigkeit auf. Bei einer Zugscherbelastung kommt es zu einer Verwindung im Füge teil aus Polycarbonat, die durch die lokalen Spannungsspitzen in der Klebeschicht zu einem Festigkeitsverlust führt. Auf chemischer Ebene könnte die geringere Zugscherfestigkeit auch auf eine schwächere Interaktion zwischen Polycarbonat und dem Klebstoff zurückzuführen sein. Während das UD-Tape mit seiner PA6-Matrix eine chemische Bindung mit dem TC-Klebstoff dank des Primers eingeht, ist die Benetzung und Bindung an Polycarbonat weniger effektiv. Dies könnte erklären, warum der TC-Klebstoff trotz seiner guten Zugscherfestigkeit in den CFUD-PC-Proben hinter den CFUD-CFUD-Werten bleibt.

Interessanterweise zeigten die PC-PC-Proben, die mit dem 3M- und HL-Klebstoff verklebt wurden, mit einer durchschnittlichen Zugscherfestigkeit von 5,8 MPa und 5,4 MPa höhere Werte im Vergleich zu den CFUD-PC-Proben. Der TC-Klebstoff wiederum erreichte einen Wert von 4,9 MPa. Dies deutet darauf hin, dass Polycarbonat bei den 3M- und HL-Klebstoffen eine bessere Adhäsion zu sich selbst entwickelt als in der Kombination mit Kohlefaser-UD-Tapes. Der TC-Klebstoff wies einige Fehler in der Klebeschicht auf, wie z.B. Luftblasen, was wahrscheinlich die endgültige Zugscherfestigkeit verringerte. Das Maximum der Messreihe beweist, dass der Kleber das Potenzial hat, ähnlich wie die anderen abzuschneiden. Der 3M-Klebstoff schnitt am besten ab. Dennoch zeigt ein Blick auf die Maxima der drei Messreihen, dass sie relativ nah beieinander liegen.

5 Fazit und Ausblick

5.1 Fazit

Die vorliegende Arbeit untersuchte die Zugscherfestigkeiten von Klebeverbindungen zwischen 3D-gedruckten thermoplastischen Bauteilen und Kohlefaser-UD-Tapes (CFUD) und identifizierte den am besten geeigneten Klebstoff für verschiedene Materialkombinationen. Die Ergebnisse bieten klare Antworten auf die gestellten Forschungsfragen.

1. Welcher Klebstoff zeigt die höchste Zugscherfestigkeit bei der Verbindung von Kohlefaser-UD-Tapes mit GreenTec Pro, PA6/66 und Polycarbonat (PC)?

Die Ergebnisse zeigen, dass der TC-Klebstoff (Technicoll 9431) in allen getesteten Materialkombinationen im Durchschnitt die höchsten Zugscherfestigkeiten erzielte.

- CFUD-Green: 4,7 MPa
- CFUD-PA: 3,9 MPa
- CFUD-PC: 6,6 MPa

Diese Leistung des TC-Klebstoffs lässt sich auf seine chemische Zusammensetzung und Flexibilität im ausgehärteten Zustand zurückführen. Der Erfolg des TC-Klebstoffs kann durch die in Kapitel 2 beschriebenen Adhäsionsmechanismen erklärt werden. Der TC-Klebstoff weist eine gute Benetzungsfähigkeit auf, die es ihm ermöglicht, eng an den Substratoberflächen zu haften und starke intermolekulare Kräfte zu entwickeln. Diese Eigenschaften tragen wesentlich zur höheren Zugscherfestigkeit bei.

Im Vergleich dazu schnitten die anderen getesteten Klebstoffe HL (Henkel Loctite HY4070) und 3M (3M DP8410NS) insgesamt schlechter ab. Der HL-Klebstoff erreichte moderate Zugscherfestigkeiten, wobei seine besten Werte bei CFUD-PC mit 3,2 MPa und CFUD-Green mit 3,0 MPa erzielt wurden. Der 3M-Klebstoff zeigte im Vergleich die niedrigsten Zugscherfestigkeiten, besonders bei CFUD-PA mit 1,3 MPa und CFUD-PC mit 1,8 MPa, was darauf hinweist, dass dieser Klebstoff weniger gut für die untersuchten Kombinationen geeignet ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der TC-Klebstoff bei Kohlefaser-UD-Tapes mit GreenTec Pro, PA6/66 und Polycarbonat die besten Ergebnisse liefert und daher als der am besten geeignete Klebstoff für diese Anwendung betrachtet werden kann.

2. Wie verhalten sich die Zugscherfestigkeiten bei der Verbindung gleichartiger Materialien (CFUD-CFUD, GreenTec Pro-GreenTec Pro, PA6/66-PA6/66, PC-PC)?

Die Untersuchung hat deutlich gemacht, dass Verbindungen aus gleichartigen Materialien meist höhere Zugscherfestigkeiten aufweisen. Besonders die Kombination CFUD-CFUD erzielte mit dem TC-Klebstoff eine durchschnittliche Zugscherfestigkeit von 7,0 MPa, wobei die höchste gemessene Zugscherfestigkeit 8,5 MPa betrug. Wenn die Einspannungsfehler nicht gewesen wären, hätte diese Messreihe durchaus weit höhere Werte erzielen können. Dennoch zeigt es, dass gleiche Materialien tendenziell besser kompatibel sind, da sie gleiche Eigenschaften haben und somit die Spannungen gleichmäßiger auf die Klebefläche verteilen können.

Im Gegensatz dazu zeigen unterschiedliche Materialkombinationen, wie CFUD-Green oder CFUD-PA, aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften, wie unterschiedliche Elastizitätsmodule oder Oberflächenenergie, eine ungleichmäßige Verteilung der Spannungen in der Klebschicht.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Materialhomogenität einen entscheidenden Vorteil für die Zugscherfestigkeit bietet. Gleiche Materialien reagieren unter Belastung gleichmäßig, was zu stabilen und belastbaren Klebeverbindungen führt. Damit wird klar, dass bei der Auswahl von Materialien für strukturelle Klebungen die Homogenität der Substrate eine entscheidende Rolle spielt, um die bestmögliche Zugscherfestigkeit und Zuverlässigkeit der Verbindung zu gewährleisten.

5.2 Limitationen der Versuche

Diese Arbeit hat Erkenntnisse über die Zugscherfestigkeiten von Klebeverbindungen zwischen Kohlefaser-UD-Tapes und verschiedenen thermoplastischen Kunststoffen geliefert, doch es gibt mehrere Einschränkungen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

In dieser Untersuchung wurden nur drei spezielle Klebstoffe getestet: Technicoll 9431, Henkel Loctite HY4070 und 3M DP8419NS. Diese Klebstoffe wurden aufgrund ihrer breiten industriellen Anwendung und ihrer bekannten Eigenschaften für die Verklebung von Kunststoffen und Verbundwerkstoffen ausgewählt. Jedoch gibt es viele andere Klebstofftypen und Hersteller, die potenziell besser für diese Anwendungen geeignet sein könnten. Ebenfalls gibt es weitaus mehr Hersteller als die drei getesteten, wie DELO oder WEICON.

Die Untersuchung beschränkte sich auf vier Materialien: Kohlefaser-UD-Tape von BÜFA, GreenTec Pro von Extrudr, PA6/66 von BASF und Polycarbonat von Polymaker, die mit dem FDM-Drucker Bambulab X1E mit angepassten Profilen gedruckt wurden. Je nach Drucker und Profil können die Festigkeiten der Proben variieren. Zudem gibt es noch viele andere Filamenthersteller, die je nach Mischung andere Eigenschaften besitzen. Ebenfalls wurden nur die Filamente in ihrer natürlichen Form ohne zusätzliche Farbstoffe untersucht. Die Kombination fand nur unter gleichen Materialien und mit Verbindung zum UD-Tape statt und nicht zwischen den 3D-gedruckten Fügeteilen untereinander wie PC mit PA.

Ein weiterer Punkt betrifft die Probengeometrie und -vorbereitung. In dieser Arbeit wurden die Fügeteile nicht exakt nach DIN EN1465 angefertigt. Statt der geforderten 25 mm Breite wurden 12,7 mm verwendet. Es lag daran, dass zum jetzigen Zeitpunkt die 3D-gedruckten Bauteile auf das UD-Tape angepasst werden mussten, da breitere UD-Tapes nicht zur Verfügung standen. Ebenfalls waren die 3D-gedruckten Fügeteile mit einer Dicke von 1,6 mm zwar normgerecht, dennoch versagten die Bauteile vorzeitig, bevor die Klebeverbindung nachgab. Die UD-Tapes waren 0,17 mm dick und sind deswegen nicht exakt normgerecht ausgeführt. Es konnte somit nicht die wahre Zugscherfestigkeit der Klebeverbindung ermittelt werden.

Die Zugscherfestigkeit wurde nach DIN EN 1465 bestimmt, einer anerkannten Norm für Überlappklebungen, aufgrund der relativ einfachen und schnellen Durchführung. Dennoch wird in dieser Norm die Klebeschichtdicke nicht berücksichtigt. Dünne Klebungen unterhalb von 0,20 mm sind in der Praxis schwer zu erreichen, da viele Faktoren wie Schwankungen in der Applikation, Einflüsse der Substratoberflächen, Verdrängung beim Fügen, Herstellungstoleranzen und Schrumpfung des Klebstoffs existieren.

Es gibt jedoch zahlreiche andere Normen und Prüfmethode, die unterschiedliche Aspekte der Klebfestigkeit bewerten. Der Zugscherversuch nach DIN EN 1465 gibt keine umfassende Aussage über das Verhalten der Klebeverbindung unter Dauerlast, periodischer Last oder den Alterungseigenschaften.

5.3 Empfehlungen für zukünftige Forschungen

Aufbauend auf den Limitationen dieser Arbeit ergeben sich mehrere Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen, die dazu beitragen könnten, das Verständnis der Klebefestigkeit von Verbundwerkstoffen weiter zu vertiefen und Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern. Eine Erweiterung wäre die Einbeziehung einer größeren Auswahl an Klebstoffen. Die Untersuchung weiterer Klebstoffarten wie Epoxidharze, die für ihre hohe Festigkeit und Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen bekannt sind, oder anderer Fügmethoden wie Schmelzen, könnten wertvolle Einblicke in alternative Klebelösungen bieten.

Es wäre zudem sinnvoll, die Materialvielfalt zu erhöhen. Das Einbeziehen üblicher Filamente wie ASA, ABS, PETG, PLA oder TPU könnte Ergebnisse weiter generalisieren und für eine breitere Palette industrieller Anwendungen relevant machen. Ebenso könnten verschiedene Farben für ein Material untersucht werden, da die verschiedenen Farbpigmente die mechanischen und chemischen Eigenschaften verändern.

Da es in der Industrie nicht nur FDM-Drucker gibt, wäre es interessant, andere Verfahren wie SLA, SLS und SLM auf deren Klebeeigenschaften zu prüfen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Variation der Probengeometrie und -kombination. Zukünftige Studien sollten dickere und breitere Proben einbeziehen, um die Auswirkungen der Geometrie auf die Zugscherfestigkeit zu untersuchen. Diese Untersuchungen könnten helfen, die Anwendbarkeit der Ergebnisse auf reale Anwendungen besser einzuschätzen, insbesondere in Bereichen, wo große und dicke Strukturen verklebt werden. Ebenfalls könnten die 3D-gedruckten Bauteile untereinander kombiniert werden, um deren Verhalten zu untersuchen.

Zusätzlich zur Untersuchung der Zugscherfestigkeit nach DIN EN 1465 wäre es empfehlenswert, weitere Prüfmethoden anzuwenden, um ein umfassenderes Bild der Klebefestigkeit zu erhalten. Der Dauerschwingversuch könnte Aufschluss über die Ermüdungsfestigkeit der Klebeverbindung geben. Alterungstests bewerten die langfristige Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse und Chemikalien.

Abschließend könnten Experimente zwischen Klebstoffen und Oberflächenvorbehandlungen wie Primern oder Plasmaaktivierung weitere Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen. Diese könnten besonders wichtig sein für schwer zu klebende Kunststoffe wie Polyethylen oder Polyamide, bei denen eine verbesserte Adhäsion durch spezielle Oberflächenbehandlungen erreicht werden kann.

Anhang A: Messwerte der Probengeometrie nach dem Kleben

Tabelle A.0.1: Messwerte: Schichtdicke s , Klebebreite b und Klebeüberlappungsbreite \ddot{u} für den 3M-Klebstoff mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta b = 0,025$ mm und $\Delta \ddot{u} = 0,025$ mm

Probe	s [mm]	b [mm]	\ddot{u} [mm]
1_3M_CFUD-Green	0,20	12,77	12,33
2_3M_CFUD-Green	0,17	12,90	12,70
3_3M_CFUD-Green	0,22	12,73	12,52
4_3M_CFUD-Green	0,22	12,83	12,33
5_3M_CFUD-Green	0,23	12,90	12,57
1_3M_CFUD-PA	0,17	12,70	12,53
2_3M_CFUD-PA	0,17	12,77	12,67
3_3M_CFUD-PA	0,15	12,83	12,77
4_3M_CFUD-PA	0,17	12,73	12,27
5_3M_CFUD-PA	0,15	12,73	12,48
1_3M_CFUD-PC	0,27	12,62	12,27
2_3M_CFUD-PC	0,24	12,83	12,57
3_3M_CFUD-PC	0,27	12,93	12,27
4_3M_CFUD-PC	0,19	12,83	12,70
5_3M_CFUD-PC	0,26	12,60	12,37
1_3M_Green-Green	0,26	12,73	12,30
2_3M_Green-Green	0,21	12,90	12,73
3_3M_Green-Green	0,28	12,87	12,25
4_3M_Green-Green	0,17	12,93	12,48
5_3M_Green-Green	0,16	12,97	12,43
1_3M_PA-PA	0,29	12,63	12,73
2_3M_PA-PA	0,15	12,90	12,73
3_3M_PA-PA	0,32	13,00	12,23
4_3M_PA-PA	0,16	12,90	12,83
5_3M_PA-PA	0,22	12,93	12,68
1_3M_PC-PC	0,09	12,90	12,63
2_3M_PC-PC	0,16	12,83	12,70
3_3M_PC-PC	0,21	12,77	12,30
4_3M_PC-PC	0,14	12,97	12,50
5_3M_PC-PC	0,18	12,70	12,73
1_3M_CFUD-CFUD	0,20	12,77	12,75
2_3M_CFUD-CFUD	0,20	12,80	12,77
3_3M_CFUD-CFUD	0,20	12,77	12,58
4_3M_CFUD-CFUD	0,20	12,80	12,77
5_3M_CFUD-CFUD	0,21	12,80	12,23

Tabelle A.0.2: Messwerte Schichtdicke s , Klebebreite b und Klebeüberlappungsbreite \ddot{u} für den HL-Klebstoff
mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta b = 0,025$ mm und $\Delta \ddot{u} = 0,025$ mm

Probe	s [mm]	b [mm]	\ddot{u} [mm]
1_HL_CFUD-Green	0,18	12,78	12,55
2_HL_CFUD-Green	0,18	12,83	12,73
3_HL_CFUD-Green	0,21	12,87	12,78
4_HL_CFUD-Green	0,20	12,88	12,73
5_HL_CFUD-Green	0,19	12,95	12,80
1_HL_CFUD-PA	0,18	12,78	12,37
2_HL_CFUD-PA	0,18	12,83	12,60
3_HL_CFUD-PA	0,17	12,83	12,52
4_HL_CFUD-PA	0,17	12,83	12,40
5_HL_CFUD-PA	0,17	12,87	12,33
1_HL_CFUD-PC	0,13	12,80	12,77
2_HL_CFUD-PC	0,14	12,90	12,58
3_HL_CFUD-PC	0,15	12,87	12,72
4_HL_CFUD-PC	0,19	12,23	12,60
5_HL_CFUD-PC	0,15	12,77	12,67
1_HL_Green-Green	0,18	12,53	12,55
2_HL_Green-Green	0,27	13,25	12,53
3_HL_Green-Green	0,24	12,95	12,22
4_HL_Green-Green	0,18	13,10	12,28
5_HL_Green-Green	0,14	13,12	12,42
1_HL_PA-PA	0,23	13,00	12,80
2_HL_PA-PA	0,23	13,10	12,70
3_HL_PA-PA	0,15	13,03	12,50
4_HL_PA-PA	0,20	13,10	12,48
5_HL_PA-PA	0,28	12,97	12,52
1_HL_PC-PC	0,16	12,83	12,70
2_HL_PC-PC	0,23	12,93	12,70
3_HL_PC-PC	0,21	12,77	12,28
4_HL_PC-PC	0,20	13,00	12,47
5_HL_PC-PC	0,20	12,77	12,53
1_HL_CFUD-CFUD	0,19	12,83	13,00
2_HL_CFUD-CFUD	0,22	12,80	13,03
3_HL_CFUD-CFUD	0,22	12,73	12,90
4_HL_CFUD-CFUD	0,23	12,80	12,87
5_HL_CFUD-CFUD	0,20	5,47	12,90

Tabelle A.0.3: Messwerte Schichtdicke s , Klebbreite b und Klebeüberlappungsbreite \ddot{u} für den TC-Klebstoff
mit den Fehlern $\Delta s = 0,005$ mm, $\Delta b = 0,025$ mm und $\Delta \ddot{u} = 0,025$ mm

Probe	s [mm]	b [mm]	\ddot{u} [mm]
1_TC_CFUD-Green	0,19	12,60	12,68
2_TC_CFUD-Green	0,25	12,93	12,73
3_TC_CFUD-Green	0,27	12,73	12,52
4_TC_CFUD-Green	0,22	12,77	12,83
5_TC_CFUD-Green	0,26	12,77	12,70
1_TC_CFUD-PA	0,24	12,87	12,72
2_TC_CFUD-PA	0,32	12,80	12,58
3_TC_CFUD-PA	0,27	12,63	12,48
4_TC_CFUD-PA	0,25	12,73	12,70
5_TC_CFUD-PA	0,28	12,70	12,77
1_TC_CFUD-PC	0,07	12,80	12,73
2_TC_CFUD-PC	0,13	12,77	12,30
3_TC_CFUD-PC	0,17	12,73	12,77
4_TC_CFUD-PC	0,14	12,70	12,50
5_TC_CFUD-PC	0,15	12,73	12,45
1_TC_Green-Green	0,09	12,67	12,23
2_TC_Green-Green	0,11	12,83	12,27
3_TC_Green-Green	0,22	12,60	12,20
4_TC_Green-Green	0,13	12,83	12,57
5_TC_Green-Green	0,18	12,90	8,67
1_TC_PA-PA	0,16	12,73	12,32
2_TC_PA-PA	0,17	12,53	12,47
3_TC_PA-PA	0,17	12,50	12,27
4_TC_PA-PA	0,21	12,90	12,67
5_TC_PA-PA	0,23	12,97	12,58
1_TC_PC-PC	0,07	12,77	12,80
2_TC_PC-PC	0,07	12,93	12,57
3_TC_PC-PC	0,06	12,83	12,73
4_TC_PC-PC	0,16	12,90	12,70
5_TC_PC-PC	0,22	12,93	12,77
1_TC_CFUD-CFUD	0,22	12,73	12,77
2_TC_CFUD-CFUD	0,24	12,73	12,90
3_TC_CFUD-CFUD	0,23	12,80	12,93
4_TC_CFUD-CFUD	0,23	12,60	12,80
5_TC_CFUD-CFUD	0,23	12,73	12,83

Anhang B: Probenbilder nach dem Kleben

B.1 Probenbilder nach dem Kleben: 3M-Klebstoff

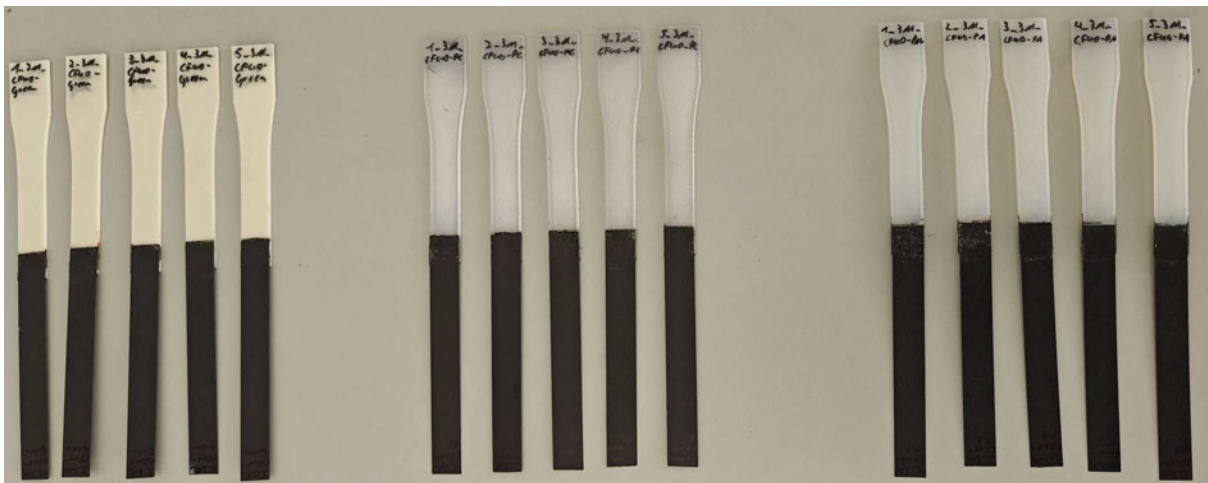


Abbildung B.1.1: Proben nach dem Kleben für 3M-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit Bauteil

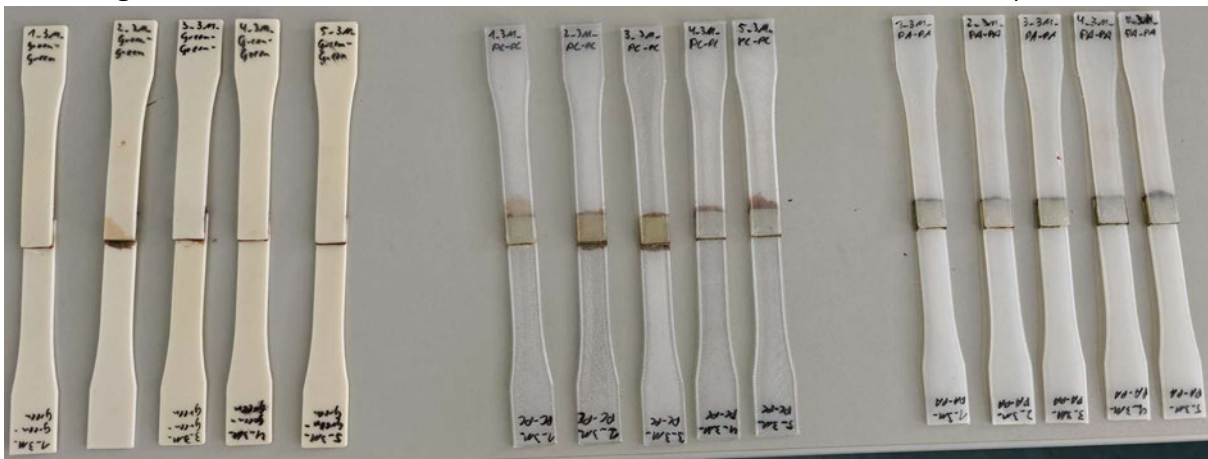


Abbildung B.1.2: Proben nach dem Kleben für 3M-Klebstoff für Kombination Bauteil mit Bauteil

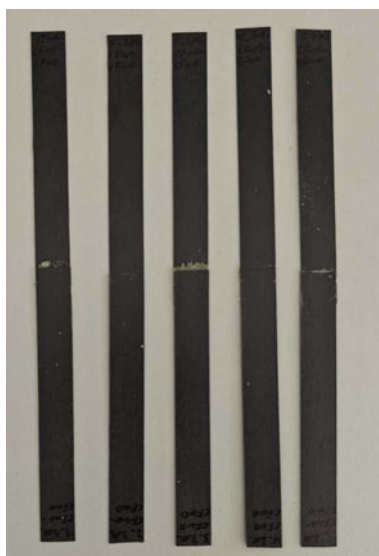


Abbildung B.1.3: Proben nach dem Kleben für 3M-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit CFUD-Tape

B.2 Probenbilder nach dem Kleben: HL-Klebstoff



Abbildung B.2.1: Proben nach dem Kleben für HL-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit Bauteil



Abbildung B.2.2: Proben nach dem Kleben für HL-Klebstoff für Kombination Bauteil mit Bauteil

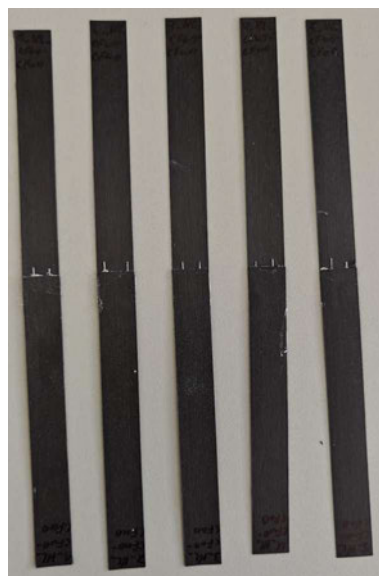


Abbildung B.2.3: Proben nach dem Kleben für HL-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit CFUD-Tape

B.3 Probenbilder nach dem Kleben: TC-Klebstoff



Abbildung B.3.1: Proben nach dem Kleben für TC-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit Bauteil



Abbildung B.3.2: Proben nach dem Kleben für TC-Klebstoff für Kombination Bauteil mit Bauteil

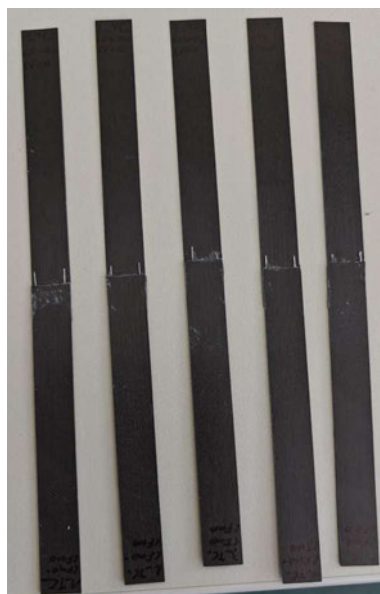


Abbildung B.3.3: Proben nach dem Kleben für TC-Klebstoff für Kombination CFUD-Tape mit CFUD-Tape

Anhang C: Probenbilder nach der Zugscherprüfung

C.1 Probenbilder nach der Zugscherprüfung für CFUD-Green



Abbildung C.1.1: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-Green mit 3M-Klebstoff



Abbildung C.1.2: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-Green mit HL-



Abbildung C.1.3: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-Green mit TC-Klebstoff

C.2 Probenbilder nach der Zugscherprüfung für CFUD-PA

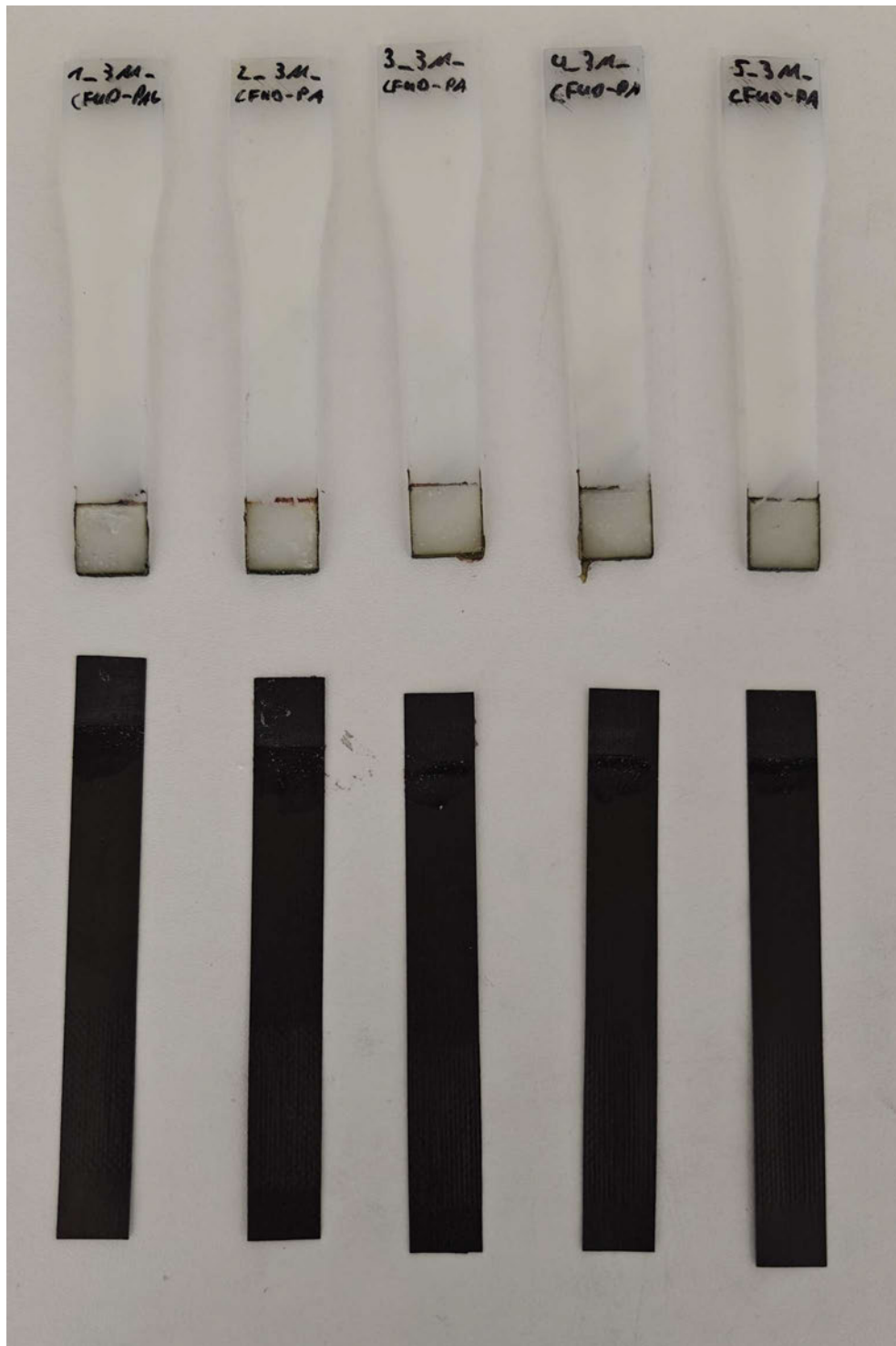


Abbildung C.2.1: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PA mit 3M-Klebstoff



Abbildung C.2.2: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PA mit HL-Klebstoff

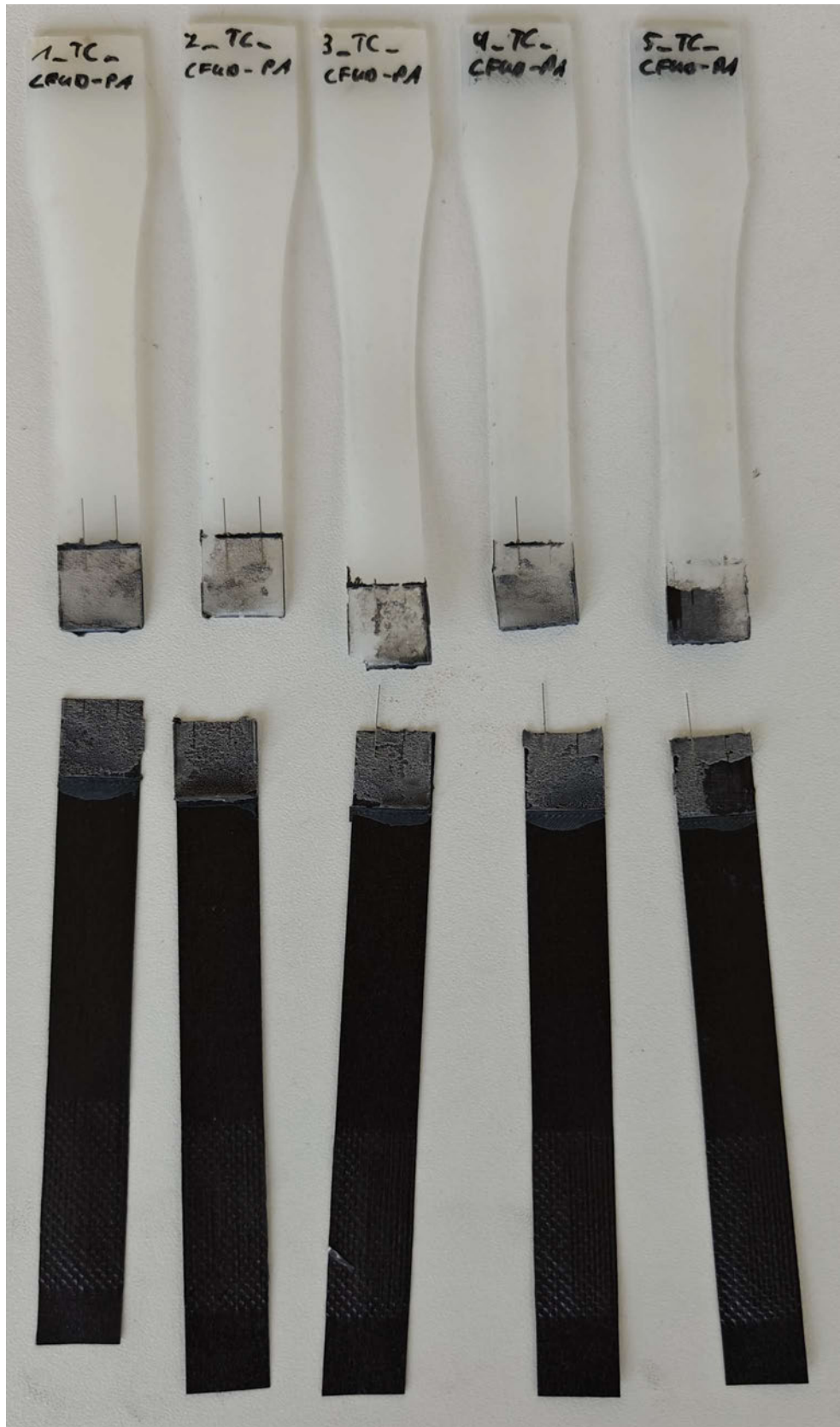


Abbildung C.2.3: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PA mit TC-Klebstoff

C.3 Probenbilder nach der Zugscherprüfung für CFUD-PC



Abbildung C.3.1: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PC mit 3M-Klebstoff



Abbildung C.3.2: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PC mit HL-Klebstoff



Abbildung C.3.3: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-PC mit TC-Klebstoff

C.4 Probenbilder nach der Zugscherprüfung für Green-Green

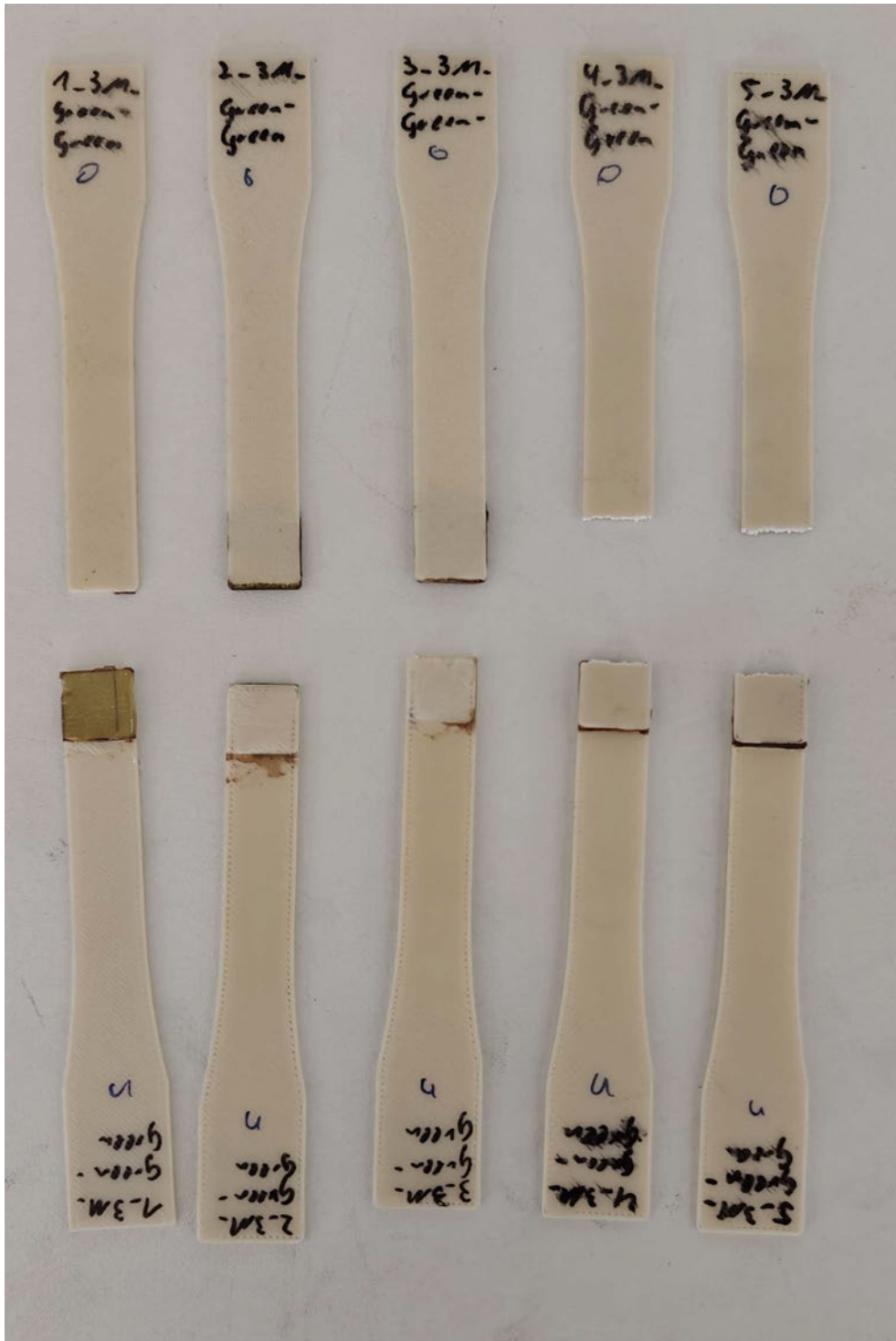


Abbildung C.4.1: Proben nach der Zugscherprüfung: Green-Green mit 3M-Klebstoff

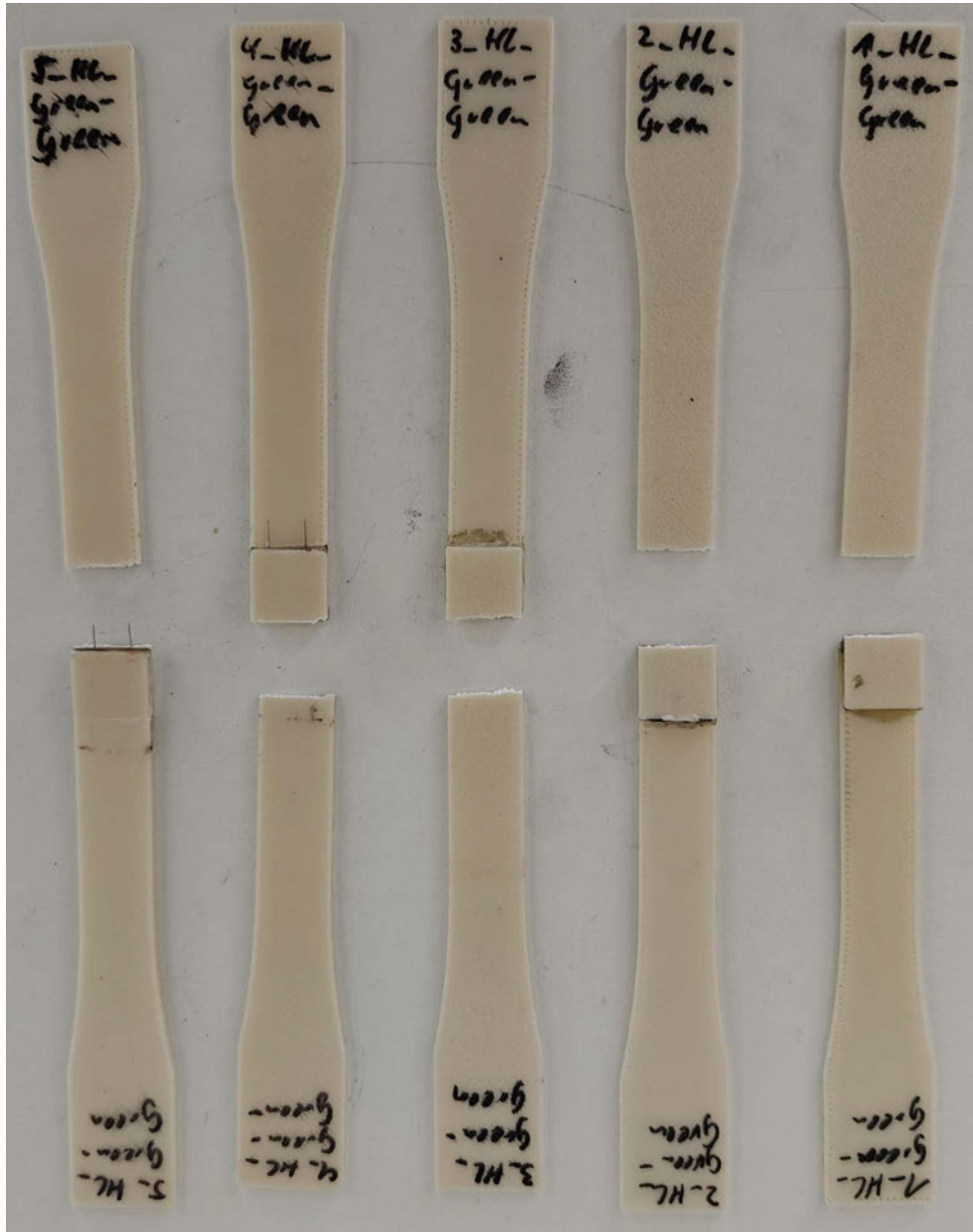


Abbildung C.4.2: Proben nach der Zugscherprüfung: Green-Green mit HL-Klebstoff



Abbildung C.4.3: Proben nach der Zugscherprüfung: Green-Green mit TC-Klebstoff

C.5 Probenbilder nach der Zugscherprüfung für PA-PA

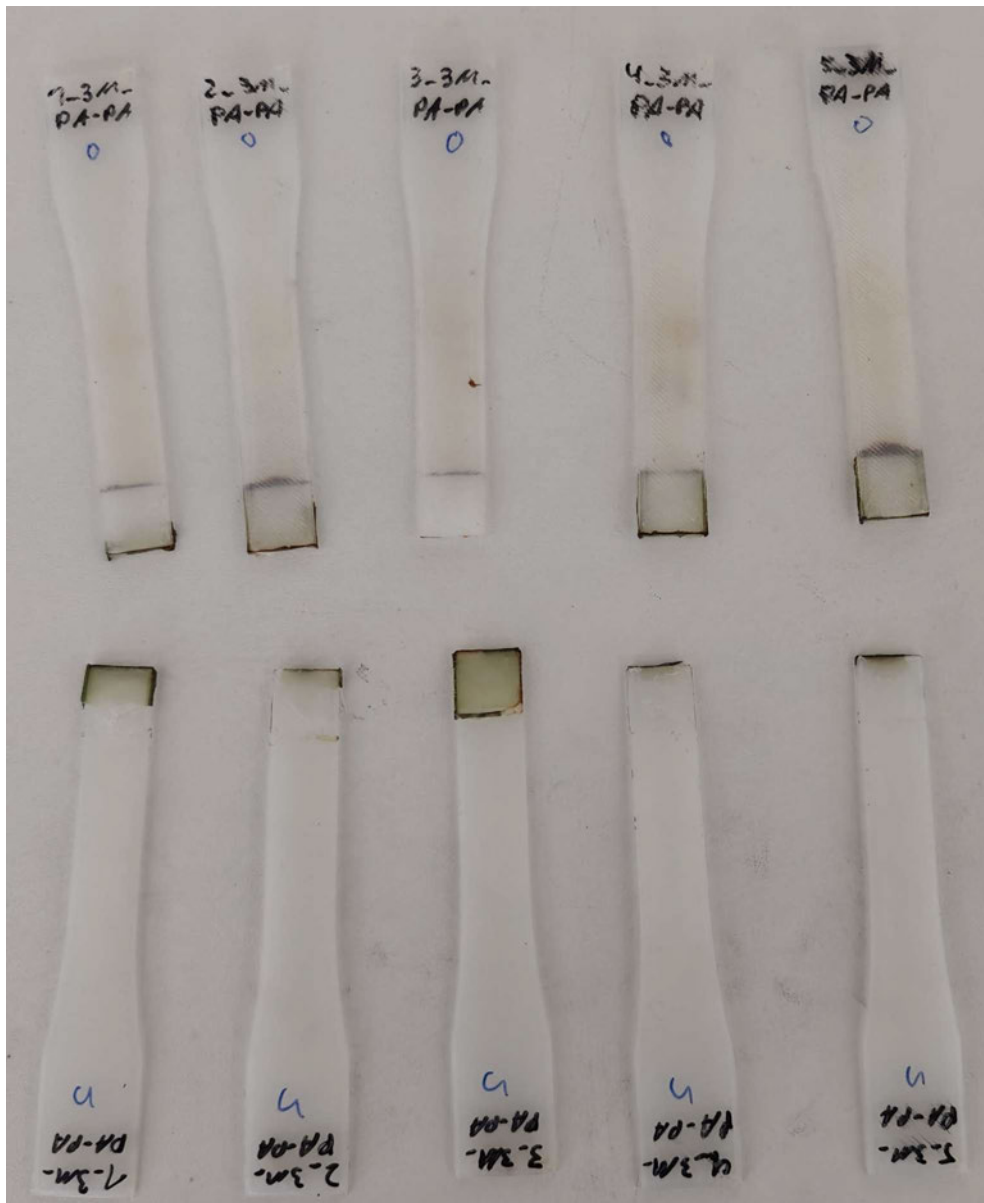


Abbildung C.5.1: Proben nach der Zugscherprüfung: PA-PA mit 3M-Klebstoff

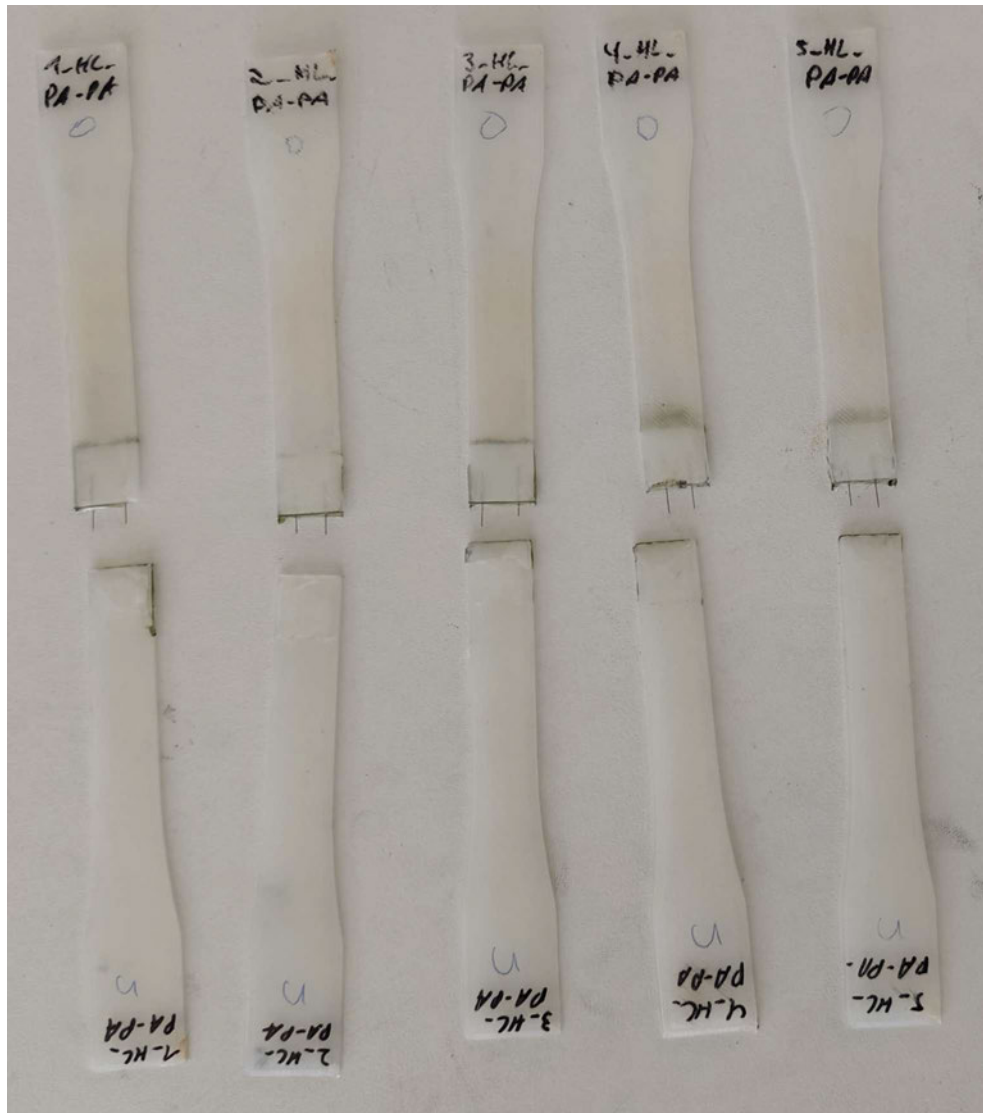


Abbildung C.5.2: Proben nach der Zugscherprüfung: PA-PA mit HL-Klebstoff

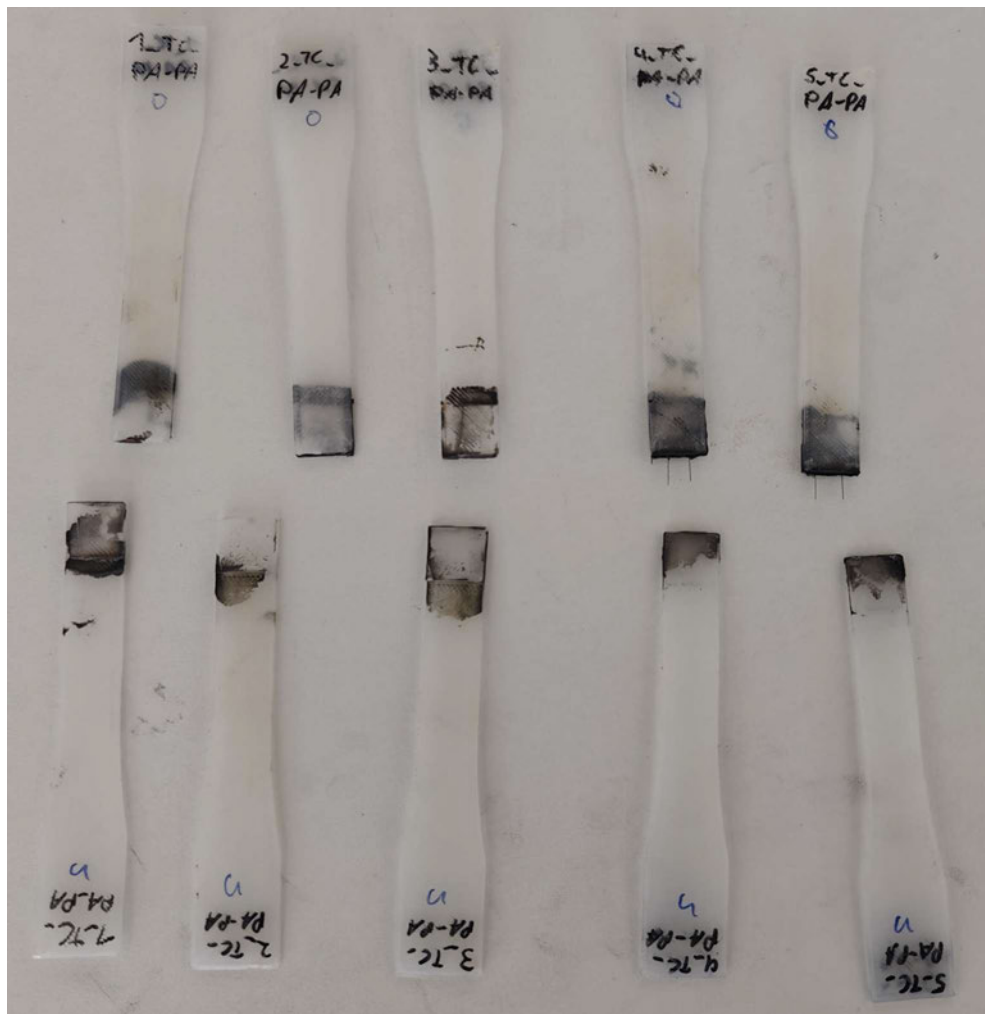


Abbildung C.5.3: Proben nach der Zugscherprüfung: PA-PA mit TC-Klebstoff

C.6 Probenbilder nach der Zugscherprüfung für PC-PC



Abbildung C.6.1: Proben nach der Zugscherprüfung: PC-PC mit 3M-Klebstoff

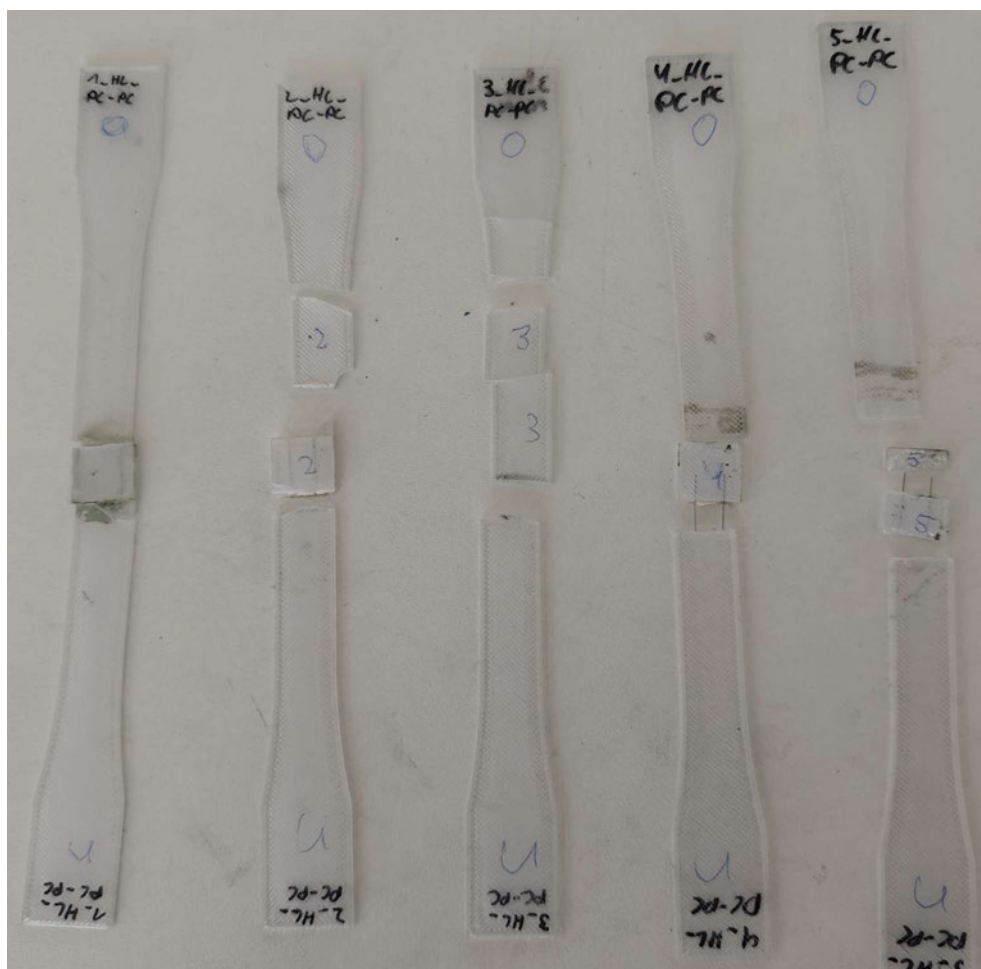


Abbildung C.6.2: Proben nach der Zugscherprüfung: PC-PC mit HL-Klebstoff

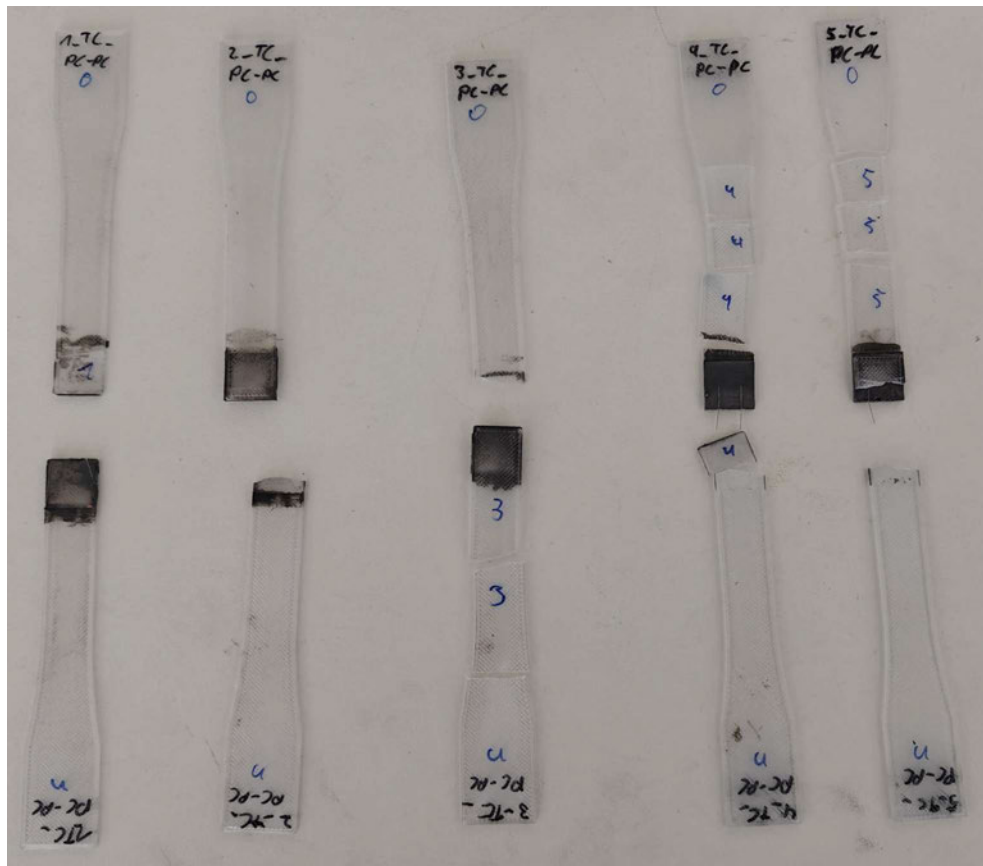


Abbildung C.6.3: Proben nach der Zugscherprüfung: PC-PC mit TC-Klebstoff

C.7 Probenbilder nach der Zugscherprüfung für CFUD-CFUD

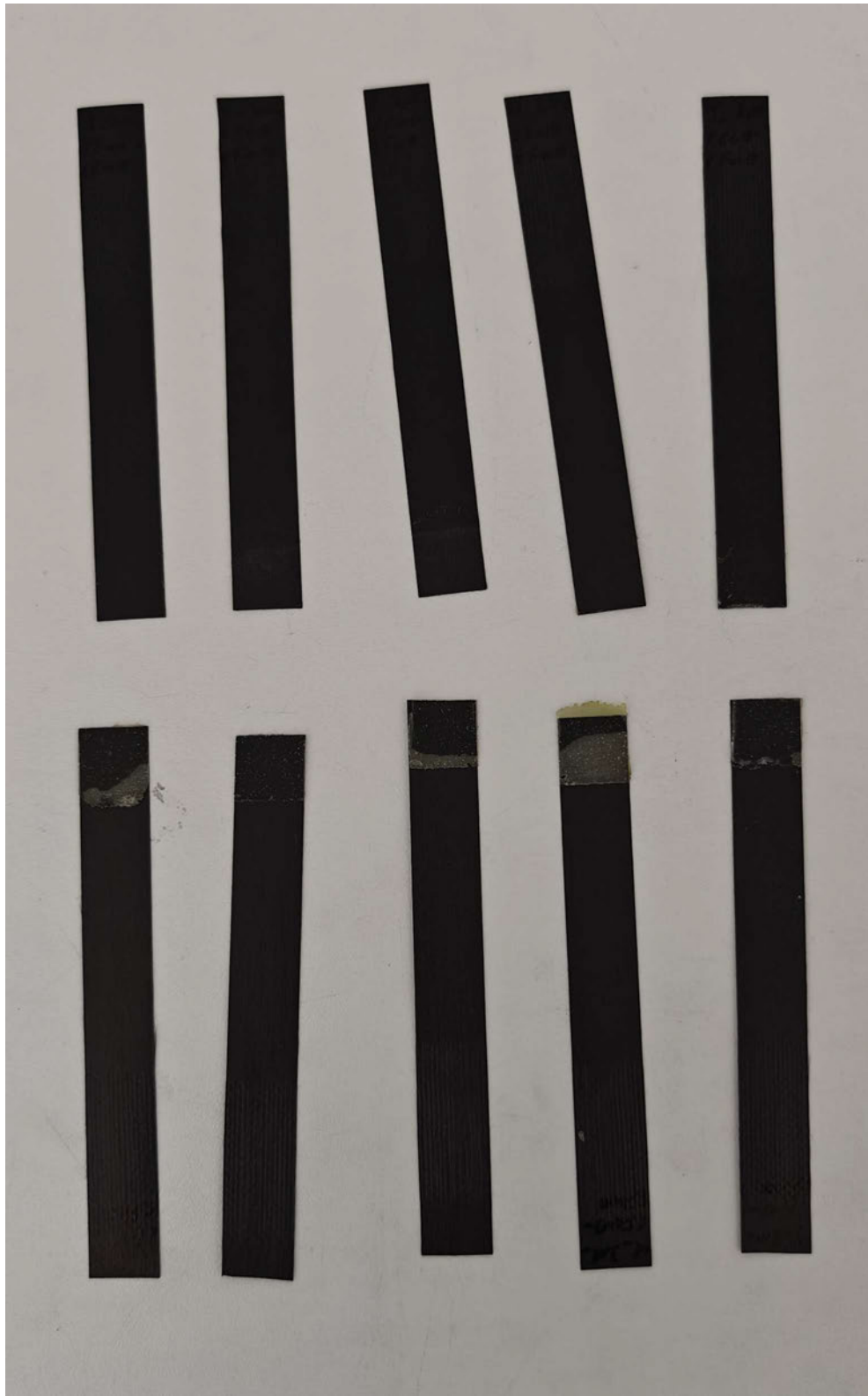


Abbildung C.7.1: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-CFUD mit 3M-Klebstoff

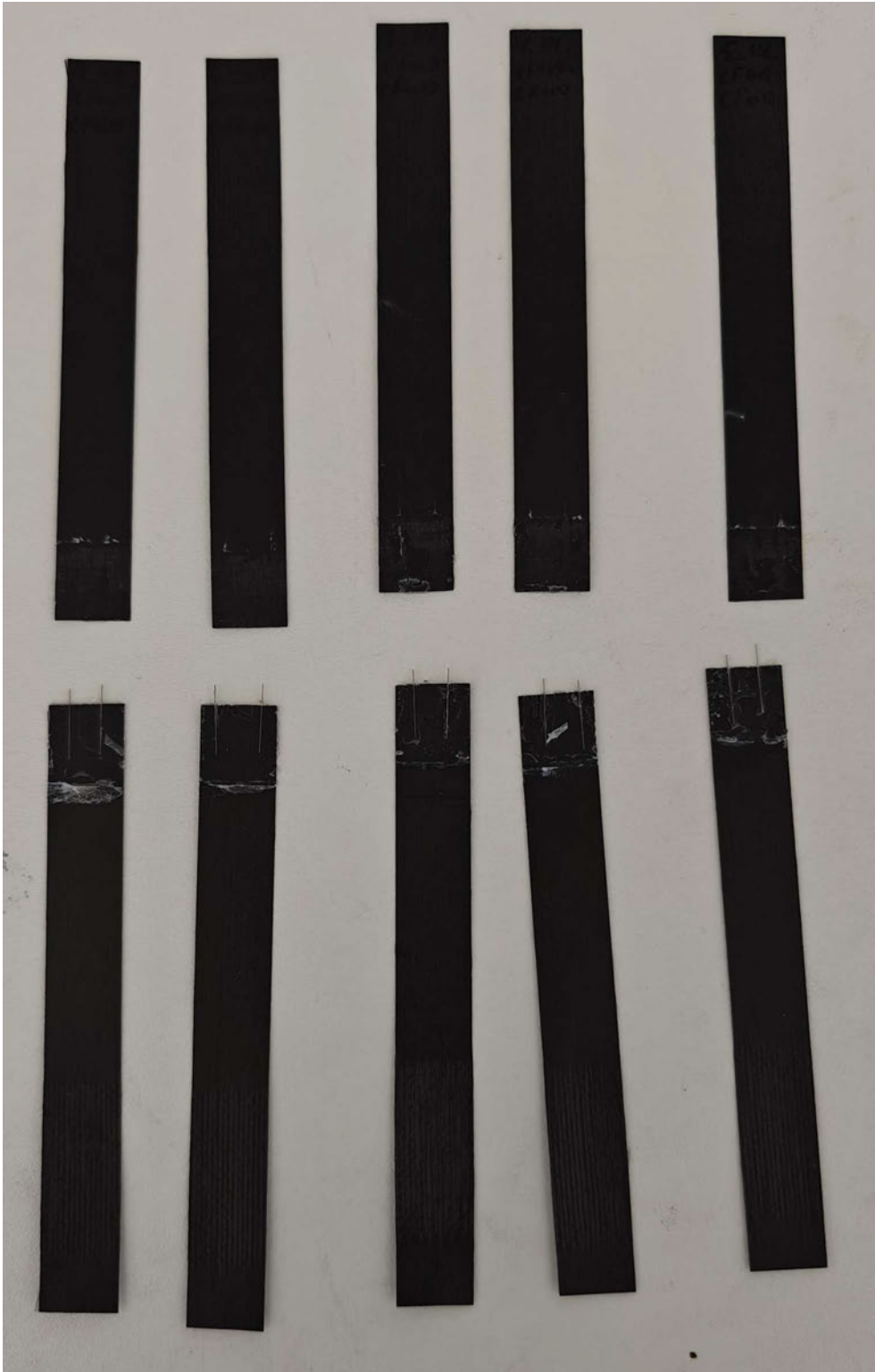


Abbildung C.7.2: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-CFUD mi HL-Klebstoff

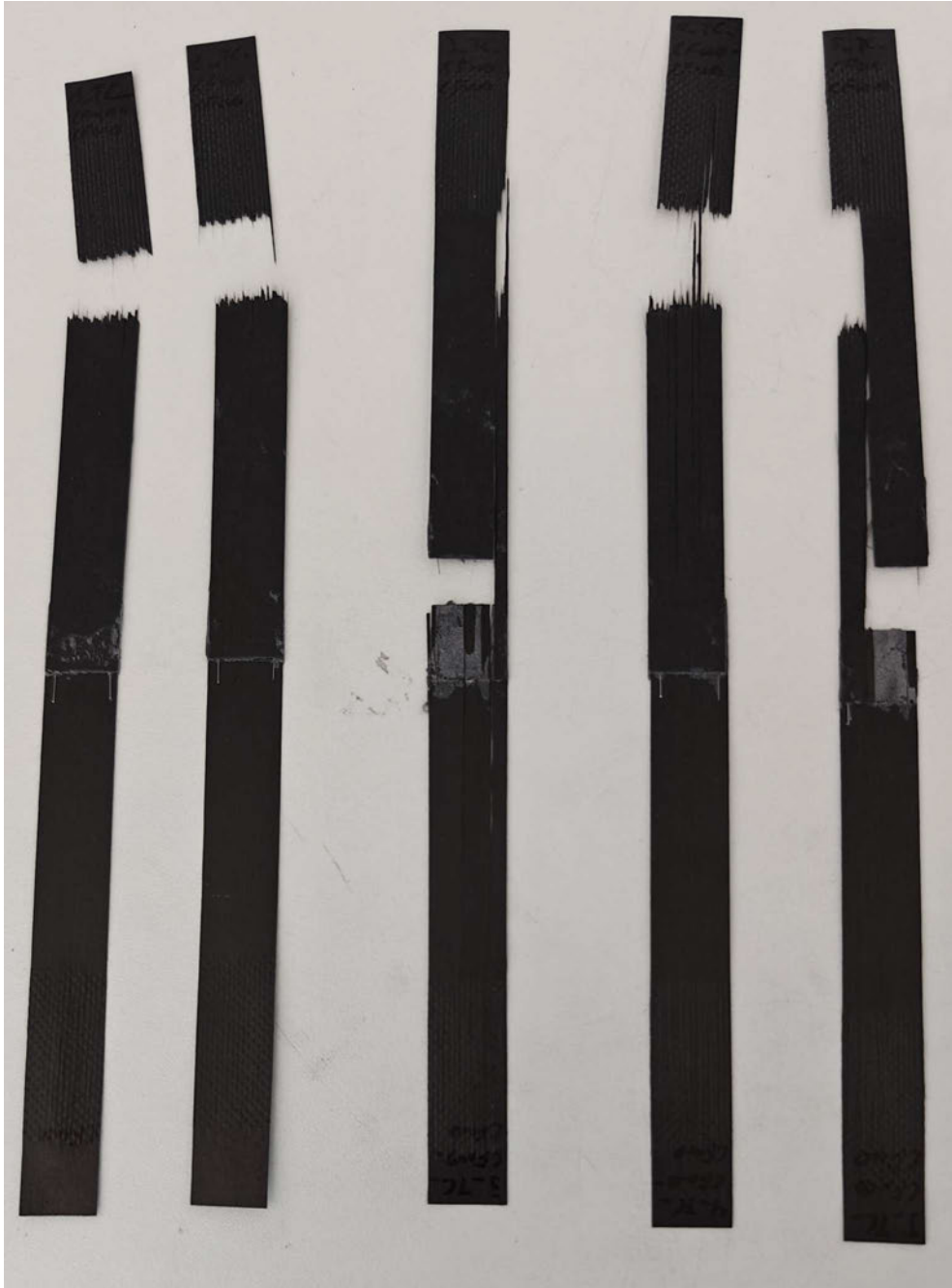


Abbildung C.7.3: Proben nach der Zugscherprüfung: CFUD-CFUD mi TC-Klebstoff


Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 31.08.2024


Hiep David Nguyen

Literaturverzeichnis

- [3D24] Protec 3D. *Vor- und Nachteile von 3D-Druck*. [Online]. 2024. URL: <https://protec3d.de/vor-und-nachteile-von-3d-druck/>. [verfügbar am 31.07.2024 15:00].
- [3M22] 3M. *Scotch-Weld™ Acrylic Adhesive DP8410NS Green*. [Online]. 2022. URL: https://multimedia.3m.com/mws/media/14174840/scotch-weld-acrylic-adhesive-dp8410ns-green.pdf?&fn=3M-Product-Data-Sheet-Scotch-Weld-Acrylic-Adhesive-DP8410NS-Green_R2.pdf. [verfügbar am 01.08.2024 13:00].
- [BAS19] BASF. *Technisches Datenblatt Ultrafuse PA*. [Online]. 2019. URL: https://move-forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Engineering%20Filaments/PA/TDS/Ultrafuse_PA_TDS_DE_v2.2.pdf. [verfügbar am 01.08.2024 12:00].
- [Bod15] Müller Bodo. *Formulierung von Kleb- und Dichtstoffen das kompetente Lehrbuch für Studium und Praxis*. 3., vollständig überarbeitete Auflage. Farbe und Lack Bibliothek. Hannover, Vincentz Network, Juni 2015, S. 328.
- [DIN09] Materials Testing Standards Committee DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP). *DIN EN 1465 Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen; Deutsche Fassung EN 1465:2009*. Berlin, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN German Institute for Standardization, Juli 2009, S. 11.
- [Doo17] Marlene Doobe. *Kunststoffe erfolgreich kleben*. Wiesbaden, Springer Vieweg, Nov. 2017, S. 430.
- [Ext24a] Extrudr. *GreenTEC Pro*. [Online]. 2024. URL: <https://www.extrudr.com/de/shop-eu/products/greentec-pro/>. [verfügbar am 31.07.2024 15:00].
- [Ext24b] Extrudr. *TECHNISCHE DATENBLATT GREENTEC PRO*. [Online]. 2024. URL: <https://s3-extrudr.mgh3.mynet.at/extrudr-media/datasheets/tds/tds-de/greentec-pro-TDS-de.pdf?response-content-disposition=attachment%3B+filename%3D%22greentec-pro-TDS-de.pdf%22>. [verfügbar am 01.08.2024 12:00].
- [Gmb24] Lockcard GmbH. *Classic Set - Kunststoff*. [Online]. 2024. URL: <https://lockcard.com/products/lockcard-wallet>. [verfügbar am 29.07.2024 15:00].
- [Hab17] Gerd Habenicht. *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei*. Wiesbaden, Springer Vieweg, Jan. 2017, S. 273.
- [Hen17] Henkel. *Technisches Datenblatt LOCTITE® HY 4070™*. [Online]. 2017. URL: https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-HY-4070-de_DE.pdf. [verfügbar am 01.08.2024 13:00].
- [Hop+21] Christian Hopmann u. a. *Investigation of the influence of melt-impregnation parameters on the morphology of thermoplastic UD-tapes and a method for quantifying the same*. Bd. 34. 9. 2021, S. 1299–1312. eprint: <https://doi.org/10.1177/0892705719864624>. URL: <https://doi.org/10.1177/0892705719864624>.
- [igu19] igu-blog-adm. *3D-Druck Verfahren im Überblick*. [Online]. 2019. URL: <https://blog.igus.de/3d-druck-verfahren-im-ueberblick/>. [verfügbar am 29.07.2024 15:00].

- [IMW24] Fraunhofer IMWS. *Leichte und Hochfeste Halbzeuge für die Erschließung maximaler Leichtbaupotenziale*. [Online]. 2024. URL: <https://www.imws.fraunhofer.de/de/specials/ud-tapes.html>. geändert,[verfügbar am 29.07.2024 17:00].
- [JJ20] Prof. Dr.-Ing. Tim Jüntgen und Katharina Juschkat. *Grundlagen des Klebens erklärt: Voraussetzung, Adhäsion, Kohäsion*. [Online]. 2020. URL: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/grundlagen-des-klebens-erklart-voraussetzung-adhaesion-kohaesion-a-794496/>. [verfügbar am 31.07.2024 15:00].
- [Khu+22] Muhammad Furqan Khurshid u. a. *Uni-Directional Tape Structures Consisting of Recycled Carbon Fibres and Polyamide 6 Fibers for High-Performance Thermoplastic Composites*. Bd. 1063. Juli 2022, S. 133–138.
- [Mit24a] IMS Hochschule Mittweida. *Technische Ausstattung*. [Online]. 2024. URL: <https://www.inw.hs-mittweida.de/webs/ims/technische-ausstattung/>. [verfügbar am 08.08.2024 12:00].
- [Mit24b] Laserinstitut Mittweida. *Laserbasierte Additive Fertigung*. [Online]. 2024. URL: <https://www.laser.hs-mittweida.de/lasertechnologien/laserbasierte-additive-fertigung/>. [verfügbar am 29.07.2024 15:00].
- [Pol20] Polymaker. *Technical Data Sheet - PolyLite™ PC*. [Online]. 2020. URL: https://polymaker.com/wp-content/uploads/lana-downloads/PolyLite_PC_TDS_V5.3.pdf. [verfügbar am 01.08.2024 12:00].
- [Tec18] Technicoll. *Produktinformation/Technisches Merkblatt technicoll® 9431 2-K Polyurethan Klebstoff, pastös*. [Online]. 2018. URL: https://www.technicoll.de/fileadmin/media/Documents/Produktinformationen_deutsch/technicoll_9431_2_Komponenten_Reaktionskleber_Produktinformation.pdf. [verfügbar am 01.08.2024 12:00].
- [Tec19] Technicoll. *Produktinformation/Technisches Merkblatt technicoll® 9603-1 Primer für Polyamid (PA)*. [Online]. 2019. URL: https://www.technicoll.de/fileadmin/media/Documents/Produktinformationen_deutsch/technicoll_9603_1_Primer_Produktinformation.pdf. [verfügbar am 01.08.2024 12:00].