

Interner Bericht

DLR-IB-SY-BS-2025-121

**Experimentelle
Untersuchungen zu TPU-
zähmodifizierten verklebten
Faserverbundwerkstoffen**

Bachelorarbeit

Richard Kunert

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Systemleichtbau



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Dokumenteigenschaften

Titel Experimentelle Untersuchungen zu TPU-zähmodifizierten verklebten Faserverbundwerkstoffen

Betreff Bachelorarbeit

Institut Systemleichtbau

Erstellt von Richard Kunert

Beteiligte Dr.-Ing. Martin Schollerer

Geprüft von Dr.-Ing. Martin Schollerer

Freigabe von Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Zugänglichkeit Stufe 1: Allgemein zugänglich (in elib ohne Zugangsbeschränkung)

Stufe 2: DLR intern zugänglich (in elib mit Beschränkung „nur DLR-intern zugänglich“)

Datum 07.07.2025

Version 1.0

Datei Info IB_2025_121_BA_Kunert.pdf

Hochschule Schmalkalden
Fakultät Maschinenbau

Bachelorarbeit

Experimentelle Untersuchungen zu TPU- zähmodifizierten verklebten Faserverbundwerkstoffen

eingereicht von

Richard Kunert

geb. am 19.03.1995 in Meiningen

Matrikelnummer: 312961

im

Studiengang Maschinenbau

zur

Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul

Korreferent: Dr.-Ing. Martin Schollerer

Braunschweig, den 07.07.2025

SPERRVERMERK

Die Abschlussarbeit wurde im Rahmen eines laufenden Projektes für das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt durchgeführt. Um eine Geheimhaltung zu gewährleisten, verpflichte ich mich – von Beginn bis mindestens fünf Jahre nach Abgabe der Abschlussarbeit – Veröffentlichungen jeglicher Art der Abschlussarbeit oder ihres wesentlichen Inhalts nicht vorzunehmen. Aus diesem Grund muss auch eine Aufnahme eines Exemplars der Abschlussarbeit zur Einsicht und Ausleihe in der Bibliothek der Hochschule Schmalkalden während des genannten Zeitraums unterbleiben.

Ich habe keine Einwände, dass das Thema meiner Abschlussarbeit mit meiner Namensnennung in einem Verzeichnis der Hochschule genannt wird.

Ort/Datum _____ Unterschrift _____

Von der Hochschule zu unterschreiben:

Aus den oben genannten Gründen verpflichtet sich der Lehrstuhl entsprechend, Veröffentlichungen der Abschlussarbeit oder ihres wesentlichen Inhalts nicht vorzunehmen und die Abschlussarbeit auch nicht zur Einsicht und Ausleihe in die Bibliothek aufzunehmen.

Ort/Datum _____ Unterschrift _____

Vom Betreuer des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt zu unterschreiben:

Oben genannter Sperrvermerk zur Kenntnis genommen.

Ort/Datum _____ Unterschrift _____

THEMENBESCHREIBUNG

Nach dem Drucken ist dieser Platzhalter durch die Kopie der Themenbeschreibung zu ersetzen.

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und die verwendeten Hilfsmittel angegeben habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften übernommen wurden, sind als Zitate kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keinem anderen Prüfungsamt vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

INHALT

SPERRVERMERK	I
THEMENBESCHREIBUNG	II
SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	III
ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES	VII
ZUSAMMENFASSUNG	VIII
ABSTRACT	IX
EINLEITUNG	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Aufgabenstellung	3
1.3 Ziel der Arbeit	3
2 STAND DER TECHNIK	6
2.1 Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe	6
2.1.1 Fasermaterial	8
2.1.2 Matrixwerkstoff (Prepreg).....	10
2.2 Thermoplastisches Polyurethan - TPU	13
2.3 Kleben	13
2.4 Gestaltungsmöglichkeiten von Überlappungsklebung	15
2.5 Oberflächenbehandlung von Klebeverbindungen	18
2.5.1 Einteilung	18
2.5.2 Chemische Reinigung und Aktivierung der Oberfläche (chemisch)	19
2.5.3 Atmosphärendruckplasma-Vorbehandlung (physikalisch)	19
2.5.4 Corona-Vorbehandlung (physikalisch)	21
2.5.5 Oberflächenspannung und Oberflächenenergie.....	22
2.5.6 Einfluss Oberflächenrauheit auf Klebeflächen (mechanisch)	24
2.6 Oberflächenzähmodifikation	25
2.7 Prüfverfahren von Klebeverbindungen	28
3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	31
3.1 Versuchsplanung	31
3.2 Vorversuche	32
3.2.1 Hypothese der Vorversuche	32
3.2.2 Lineartisch Corona-Vorbehandlung	33
3.2.3 Corona-Vorbehandlung TPU-Folie	35
3.2.4 Fertigung Prepreg im Autoklaven	36

3.2.5	Fertigung Kopfzugproben	39
3.2.6	Design und Fertigung Kopfzugvorrichtung.....	40
3.2.7	Kopfzugversuche.....	41
3.3	Zwischenauswertung.....	42
3.4	Hauptversuche.....	44
3.4.1	Fertigung SLS-Proben.....	44
3.4.2	Schliffbilder SLS-Proben	45
3.4.3	SLS Zugscherversuch.....	46
4	AUSWERTUNG	48
4.1	Ergebnisauswertung.....	48
5	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	52
5.1	Zusammenfassung.....	52
5.2	Schlussfolgerung.....	53
ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS		LV
Abbildungs- und Diagrammverzeichnis.....		lv
Tabellenverzeichnis		lvi
LITERATUR.....		LVII
6	ANHANG	LX

ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
Ar	Argon
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Co-cured	Ko-laminiert
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EASA	European Union Aviation Savety
FAA	Federal Aviation Administration
kHz	Kilohertz
kV	Kilovolt
KZP	Kopfzugproben
OH	Hydroxid
M5	Metrisches Gewinde; Durchmesser: 5mm
N ₂	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
PEEK	Polyetheretherketon
PETG	Polyethylenterephthalat
PES	Polyethersulfon
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SLS	Single-Lap-Shear
ST	Surface-Toughening
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
UV	Ultraviolett
3D	3-dimensional

Formelzeichen

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
A	[mm ²]	Querschnittsfläche
D	[N/m]	Federsteifigkeit
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
F	[N]	Kraft
F ₀	[N]	Startkraft
T _g	[°C]	Glasübergangstemperatur
T	[°C]	Temperatur
t	[mm]	Länge
x ₀	[mm]	Startlänge
α	[°]	Winkel
σ	[N/mm ²]	Spannung
σ _S	[mN/m]	Oberflächenenergie Festkörper
σ _L	[mN/m]	Oberflächenspannung Flüssigkeit
σ _{LS}	[mN/m]	Grenzflächenenergie

ZUSAMMENFASSUNG

Schlagworte: Oberflächenzähmodifikation, Corona-Vorbehandlung, TPU, CFK, Single-Lap-Shear, SLS

Ziel dieser Bachelorarbeit war die experimentelle Untersuchung der Wirksamkeit thermoplastischen Polyurethans (TPU) als Oberflächenzähmodifikation für strukturelle Klebverbindungen mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Nach einer umfassenden Literaturrecherche zu relevanten Fertigungsprozessen, Materialien und Vorbehandlungen erfolgten systematische Vor- und Hauptversuche.

Im Fokus der Vorversuche stand der Einfluss einer Corona-Vorbehandlung auf die Adhäsion von TPU-Folien auf CFK-Substraten. Die Ergebnisse zeigten, dass eine gesteigerte Oberflächenenergie zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit um bis zu 20 % führt. Die Hauptversuche mit Single-Lap-Shear-(SLS-)Proben analysierten die potentielle festigkeitssteigernde Wirkung der TPU-Oberflächenzähmodifikation im Vergleich zu etablierten Materialien wie Polyvinylidenfluorid (PVDF). TPU zeigte insbesondere bei -55 °C eine höhere Festigkeit als PVDF bei -55 °C, was auf eine verbesserte Performance bei niedrigen Temperaturen – etwa im Luftfahrtbereich – hinweist. Bei Raumtemperatur erreichte TPU allerdings eine geringere Festigkeit als PVDF.

Die überwiegend kohäsiven Versagensbilder sowie die temperaturabhängigen Veränderungen des Steifigkeitsverhältnisses zwischen TPU und Klebstoff belegen die Komplexität des mechanischen Wirkprinzips. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Effektivität von zähmodifizierenden Materialien von der Duktilität derer und der Klebstoffe abhängig ist.

ABSTRACT

Keywords: surface-toughening, corona-treatment, TPU, CFRP, single-lap-shear, SLS

The aim of this bachelor's thesis was the experimental investigation of the effectiveness of thermoplastic polyurethane (TPU) as a surface toughening for structural adhesive bonding with carbon fiber reinforced polymers (CFRP). Following extensive literature research on manufacturing processes, materials and surface treatments, a series of preliminary and main experiments were performed.

The preliminary tests were focused on the influence of corona treatment on the adhesion of TPU films to CFRP substrates. The results demonstrated that increased surface energy achieved from corona treatment led to an increase in tensile strength of up to 20 %. Main tests using single-lap-shear (SLS) specimens analyzed the potential strength-enhancing effect of TPU surface-toughening in comparison to established materials such as polyvinylidene fluoride (PVDF). TPU showed an improved performance at -55 °C when, in comparison, PVDF reached a much lower performance. Though at room temperature it could not surpass the PVDF surface-toughening material.

Predominantly cohesive failure patterns and the temperature-dependent change in stiffness ratio between TPU and the bonding adhesive highlighted the complexity of the surface-toughening mechanisms. The results suggest that the effectiveness of surface toughening materials is dependent on the ductility of the material and adhesive.

EINLEITUNG

Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt kommt im Flugzeugbau überwiegend Aluminium als Werkstoff zum Einsatz. Die Forschung und Entwicklung ist stets bemüht bessere Werkstoffe zu finden um Flugzeuge leichter zu bauen. Verbundwerkstoffe erfreuen sich aufgrund ihres geringen Gewichts immer größerer Beliebtheit.

Eine zentrale Rolle spielen dabei kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK), welche Aluminium zunehmend ersetzen sollen. Durch die Gewichtoptimierung kann der Kraftstoffverbrauch eines Flugzeugs deutlich gesenkt werden. Dies sollte sich allerdings nicht negativ auf die Festigkeit der Bauteile auswirken. Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, bedeutet nicht nur geringere Kosten für den Flugbetrieb, sondern auch eine geringere Belastung der Umwelt. Des Weiteren ist der Abbau von Bauxit, der für die Herstellung von Aluminium notwendig ist, mit weiteren Umweltbelastungen verknüpft. Dazu zählen Regenwaldrodungen, Kontaminierung von Gewässern mit Schwermetallen beim Abbau und ein hoher Energieverbrauch. (vgl. [URL01])

Im Vergleich dazu kann die Herstellung von Kohlefasern mit erneuerbaren Energien, klimaneutral gestaltet werden. Die Verwendung von Verbundmaterialien wie CFK bringen aber auch technische Herausforderungen mit sich. Anders als metallische Komponenten lassen sich diese Werkstoffe nur aufwendig Instandsetzen. Die Forschung ist daher immer bemüht neue Technologien zu finden, um bestehende Nachteile zu minimieren oder gänzlich zu beseitigen.

Die Verwendung von Verbundmaterialien ist kein neuartiges Konzept. Bereits in den 20er-Jahren wurden Materialien und Fertigungsverfahren für den Leichtbau gesucht.

Im Jahre 1927 wurden Leitwerke schon so leicht konstruiert, dass ein Kind eines dieser Segmente tragen konnte. Anfangs wurde Glasfaser als Verstärkung von Aluminium eingesetzt, durch dieses Prinzip konnte die Festigkeit gesteigert werden. In den 50er-Jahren kam es zur Entwicklung von CFK, welches sich durch ein geringes Gewicht mit einer hohen Belastbarkeit auszeichnete. Das Zusammenspiel von Leichtbaukonstruktion und die Wahl eines Widerstandsfähigem Materials mit geringem Gewicht, ist im heutigen Flugzeugbau ein sehr wichtiges Konzept mit dem die Flugzeuge von morgen gebaut werden. (vgl. [URL02])

1.1 Problemstellung

Die strukturellen Komponenten von Flugzeugen unterliegen hohen sicherheitstechnischen Anforderungen und müssen diese auch unbedingt erfüllen. Daher fokussiert sich die Forschung mit der Konzipierung und Erprobung neuer Fertigungsvarianten, Materialien und Technologien.

Fertigungsverfahren und Materialien müssen im Flugzeugbau, Anforderungen von Behörden wie der European Union Aviation Savety (EASA) oder der Federal Aviation Administration (FAA) erfüllen um eine Zulassung zu erlangen. Deshalb liegt die Priorität nicht nur darin neue Verfahren zur Herstellung von Bauteilen zu entwickeln, sondern auch deren Belastbarkeit nachzuweisen. In der Forschung ist es daher notwendig die Ergebnisse quantitativ und qualitativ zu analysieren. Veröffentlichungen der Behörden beinhalten sehr detaillierte Informationen über die Flugtauglichkeit neuer Konzepte. (vgl. [EAS24, 43])

Aufgrund der komplexen Geometrien von Flugzeugstrukturen entstehen zwangsläufig Fügestellen, an denen geeignete Verbindungstechniken zum Einsatz kommen müssen.

Grundsätzlich wird zwischen lösbaren und unlösbaren Verbindungen unterschieden. Im strukturellen Bereich werden bei Flügelstrukturen unlösbare Verbindungen bevorzugt, da diese über die gesamte Lebensdauer des Flugzeugs hinweg bestehen bleiben müssen. Beliebte Verbindungselemente sind Nieten, jedoch bringen diese zusätzliches Gewicht mit sich. Die Herstellung eines Airbus A320 benötigt im Schnitt 3,5 Millionen Nieten, bei einem Gewicht von circa 3g pro Niet, soll hier das Gewicht einmal berechnet werden. (vgl. [Dil10, 384])

$$m_{ges} = M * m_N = 3.500.00 \text{ Stk} * 0,003\text{kg} = 10.500\text{kg} \quad \text{Gl. 1}$$

m_{ges}	Gesamtmasse	[kg]
M	Menge Nieten	[Stk]
m_N	Masse Niet	[kg]

Das Gesamtgewicht aller Nieten beläuft sich auf 10,5 Tonnen. Bei einem maximalen Startgewicht von 73,5 Tonnen, entspricht das einem Gewichtseinsparungspotential von 14,3 %. (vgl. [URL17])

Des Weiteren entsteht beim Bohren der Nietlöcher, Staub und Späne, die besonders bei Kohlefaserverstärkten Kunststoffen ein Gesundheitsrisiko darstellen und somit vermieden werden sollten.

Eine Lösung stellt hier das Kleben mit Oberflächenzähmodifikation dar, bei dem durch das Einfügen elastischer Zwischenschichten eine Verbindung mit unterschiedlichen Elastizitätsmodulen entsteht. Das resultierende Verbundsystem lässt sich prinzipiell mit einem Federmodell vergleichen, bei dem die Bauteile und die Klebschicht eine unterschiedliche Steifigkeit besitzen. (vgl. [Sch24, 47])

1.2 Aufgabenstellung

Die Oberflächenzähmodifikation ermöglicht es, spannungskonzentrationsbedingte Versagensursachen signifikant zu reduzieren. In bisherigen Untersuchungen konnte dies erfolgreich mit dem Werkstoff Polyvinylidenfluorid (PVDF) erfolgreich umgesetzt werden. (vgl. [Sch24, 91]) Allerdings zeigte sich unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g des Materials eine Aufhebung des positiven Effekts. Da PVDF nur bis -35 °C einsetzbar ist und Flugzeugstrukturen bei Reise Flughöhen typischerweise -55 °C ausgesetzt sind, wird ein alternativer Werkstoff benötigt.

Literaturrecherchen identifizierten thermoplastisches Polyurethan (TPU) mit einer T_g von -70 °C als geeignetes Material zur Anwendung in diesem Temperaturbereich. Ziel ist es daher, TPU in zukünftige Klebprozesse zu integrieren und dessen Potenzial für den Einsatz in Luftfahrtstrukturen zu evaluieren. Der Einfluss der Oberflächenzähmodifikation mit TPU, soll daher bei Raumtemperatur und bei einer Temperatur von -55 °C getestet werden. [The25, 1]

1.3 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wurde das Ziel gesetzt die Eigenschaften von Thermoplastischem Polyurethan (TPU) als Oberflächenzähmodifikation von Überlappungsklebungen mit Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) zu untersuchen.

Neben der experimentellen Vorbehandlung und Applikation von TPU auf das CFK-Substrat, soll auch die Spannungsreduktion durch die Oberflächenzähmodifikation der Klebverbindung untersucht werden. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei in der Erstellung von Probestücken, der Durchführung von Versuchen und der Auswertung dieser. Die Arbeit umfasst folgende Tätigkeiten.

Zu Beginn erfolgt eine Einarbeitung in die Grundlagen der Spannungsanalytik von Überlappungsklebungen. Des Weiteren ist die Einarbeitung in die Labor- und Fertigungstechniken des DLR notwendig, um die fachgerechte Fertigung von Faserverbunden und Couponproben, zu gewährleisten. Dazu gehört auch das strukturelle Kleben der Proben.

Das gesamte Probenprogramm wird anschließend experimentell getestet. Diese Messergebnisse sollen weiter ausgewertet und interpretiert werden. Diese Proben sollen den Einfluss einer Vorbehandlung vom TPU quantifizieren. Auf dieser Grundlage sollen Überlappungsklebungen mit Oberflächenzähmodifikation hergestellt und getestet werden.

Es wird angenommen, dass durch die Verwendung von TPU, die Verbindungsstellen zähmodifiziert werden. Insbesondere in kälteren Temperaturbereichen verhält sich das TPU zäher. In der Vergangenheit hat die Oberflächenzähmodifikation mit PVDF bei niedrigen Temperaturen nicht gewünschte Wirkung erzielt. Daher wird vorerst untersucht, ob die TPU Oberflächenzähmodifikation bei Normaltemperaturen, eine ausreichende Adhäsion der Fügepartner aufweist. Sind die Anforderungen zufriedenstellend, sollen gleiche Proben bei -55°C ebenfalls im Zugversuch auf ihre Festigkeit untersucht werden.

Die Auswertung erfolgt unter dem Vergleich der Proben mit PVDF Oberflächenzähmodifikation. Abschließend kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die TPU Oberflächenzähmodifikation einen ausreichenden Effekt zum Einsatz als potentielle Spannungsreduzierende Technologie für zukünftige Luft- und Raumfahrttechnische Anwendungen hat oder nicht. [The25, 1]

Die Strukturierung der Arbeit soll hier einmal graphisch kurz dargestellt werden.



Abbildung 1: Strukturierung der Arbeit

2 STAND DER TECHNIK

Zur Schaffung eines fundierten Verständnisses für die Technologien und Fertigungsverfahren, die zur Bearbeitung der Problemstellung dieser Arbeit herangezogen werden, dient dieser Abschnitt zur theoretischen Wissensgewinnung. Das hier zusammengetragene Wissen, bildet die Grundlage zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen.

Die thematische Einordnung dieser Arbeit liegt primär im Bereich der Materialwissenschaften. Entsprechend ist es notwendig, sich mit der chemischen Zusammensetzung, den physikalischen Eigenschaften sowie werkstofftechnischen Aspekten der verwendeten Materialien auseinanderzusetzen. Im Zuge dessen lassen sich Werkstoffe auf vielfältige Weise analysieren und gezielt modifizieren um gewünschte Eigenschaften zu realisieren. In Summe ergibt sich aus einer Vielzahl einzelner Einflüsse die finale Materialperformance. (vgl. [URL03])

2.1 Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe

Ein zentraler Werkstoff dieser Arbeit stellt Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) dar. In der Luftfahrtindustrie spielt CFK eine zentrale Rolle. Aufgrund seiner hohen spezifischen Festigkeit und der hohen spezifischen Steifigkeit kann eine deutliche Gewichtersparnis gegenüber metallischen Werkstoffen erzielt werden. (vgl. [Wie22, 5])

Diagramm 1 zeigt die herausragenden Eigenschaften von CFK im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen. Trotz geringerer Dichte weist es ein höheres spezifisches E-Modul auf.

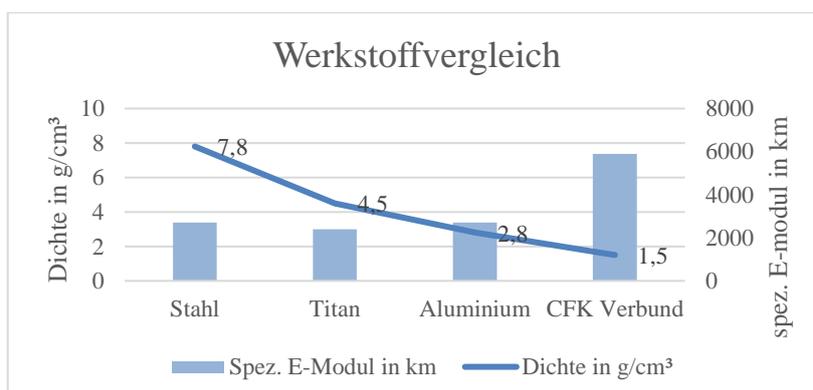


Diagramm 1: Werkstoffvergleich mit Dichte und E-Modul [URL04]

„Bei gleichem Gewicht hat CFK die fünffache Zugfestigkeit und Steifigkeit von Stahl. 1kg CFK kann 5kg Stahl ersetzen.“ [URL04]

Weitere Vorteile entstehen durch eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit sowie eine hohe Ermüdungsfestigkeit, die besonders in Bezug auf Nachhaltigkeit und Langlebigkeit attraktiv sind.

CFK-Bauteile werden nicht als Massivbauteile gefertigt, sondern in einer schichtweisen Laminier- bzw. Legetechnik aufgebaut. Diese Fertigungsmethode ermöglicht einen kontinuierlichen Faserverlauf, wodurch sich auftretende Lasten optimal im Bauteil verteilen. Durch die sogenannte Integralbauweise kann eine nahezu stufen- und spaltfreie Geometrie erzeugt werden, was insbesondere für die aerodynamische Effizienz an Flugzeugflügeln von Bedeutung ist. (vgl. [Wie22, 5])

Trotz zahlreicher Vorteile sind auch materialbedingte Nachteile von CFK zu berücksichtigen. Aufgrund des fehlenden plastischen Verformungsverhaltens neigt CFK bei lokalen Beschädigungen zu Delaminationen innerhalb der Harzmatrix. Eine Detektion dieser Schäden ist nur mit erhöhtem Aufwand und teuren Gerätschaften möglich. Außerdem ist die Bearbeitung von CFK mit hohem Aufwand und Kontamination der Umgebung verbunden, da Kohlenstofffaserpartikel die Atemwege reizen können. Da Flugzeuge in der Regel nicht für den Einsatz von CFK konzipiert wurden, erschwert eine nicht faserverbundgerechte Bauweise den Fertigungsaufwand. (vgl. [Wie22, 6])

Derzeit werden CFK-Werkstoffe vorrangig zum Bau von Flügelstrukturen angewandt. Für den Einsatz in Rumpfstrukturen fehlte bislang allerdings ein lukratives Verhältnis zwischen Kosten und Gewichtseinsparungen. (vgl. [Wie22, 6])

Zur Verbesserung der Verfahren forscht das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) an einer automatisierten Fertigung von Rumpfstrukturen zur Reduzierung von Produktionskosten und zur Realisierung einer wirtschaftlichen Serienfertigung. Unter Verwendung eines Industrieroboterarms wird das Fasermaterial schichtweise aufgetragen und gleichzeitig mit einem thermoplastischen Matrixmaterial verschweißt. Auf diese Weise kann ein vollständiges Rumpfsegment ohne Fügstellen gefertigt werden. (vgl. [URL06])



Abbildung 2: CFK Rumpfteil [URL06]

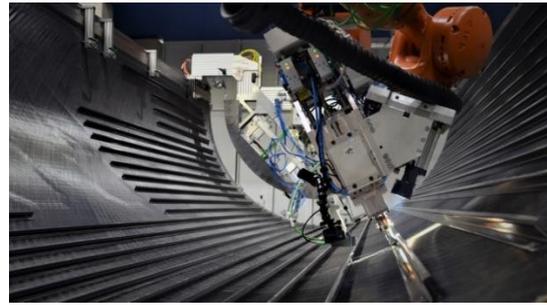


Abbildung 3: Roboterarm Fertigung [URL06]

Da geschlossene Geometrien zu diesem Zeitpunkt nur eingeschränkt realisierbar sind, entstehen zwangsläufig Fügstellen, deren Verbindung eine besondere Herausforderung darstellt. Wie bereits erwähnt bietet strukturelles Kleben von CFK eine Lösung die nicht nur Bestandteil der Forschung, sondern auch ein Teil dieser Arbeit ist.

2.1.1 Fasermaterial

Ein wesentlicher Bestandteil von CFK ist das Fasermaterial, das aus langen, dünnen Kohlenstofffasern besteht. Diese Fasern werden aus organischen Polymeren gewonnen. Dabei werden den Polymer-Molekülsträngen verschiedene Gase, Flüssigkeiten und andere Zusatzstoffe beigemischt, um die gewünschten Kohlenstofffasern zu erhalten. (vgl. [URL07])

Kohlenstofffasern werden als endlos bezeichnet, wenn ihre Länge mehr als 50mm beträgt. Im Bereich von 50mm bis 10mm gelten sie als Langfasern, während kürzere Fasern als Kurzfasern klassifiziert werden. Ihre Hauptfunktion besteht in der Lastaufnahme und Lastübertragung. Der Faserdurchmesser beträgt in der Regel 5-8 μm – Ein menschliches Haar hat zum Vergleich einen Durchmesser von ca. 60 μm . Durch das Kombinieren mehrerer tausend Einzelfilamente entstehen Faserbündel (engl. *rovings*), die typischerweise zu 12.000 (12k) oder 24.000 (24k) Filamenten¹ verarbeitet werden. Aus den Filamentsträngen werden Faserhalbzeuge in unterschiedlichen Ausführungen hergestellt. (vgl. [Len20, 5, 17, 43]) Gängige Faserhalbzeuge sind Gelege, Gewebe und unidirektional² (UD) ausgerichtete Prepregs. Prepreglagen sind mit einer Harzmatrix vorimprägnierte Rovings, die unidirektional angeordnet sind. Durch ein schichtweises Aufbringen der Lagen unter Variation der Lageorientierung (z. B. 0°, ± 45°, 90°) können mechanische Eigenschaften beeinflusst und an die jeweiligen Lastfälle angepasst werden. (vgl. [Len20, 73-74])

¹ Filament – fadenförmiges Gebilde

² unidirektional – nur in eine Richtung orientiert

Da die Fasern wie bereits erwähnt zur Kraftübertragung dienen, ist ein hoher Faseranteil erwünscht. Allerdings ist der maximale Faseranteil durch gewisse Obergrenzen beschränkt. Der typische Faseranteil in einem Faserverbundwerkstoff liegt typischerweise bei etwa 60 %. Die geometrische Obergrenze ergibt sich aus der theoretischen Packungsdichte, die sich entweder nach dem quadratischen oder dem hexagonalen Packmodell orientiert. Hierbei soll der 2500-fach vergrößerte Querschnitt einer Prepreglage zur Veranschaulichung dienen. (vgl. [URL08])

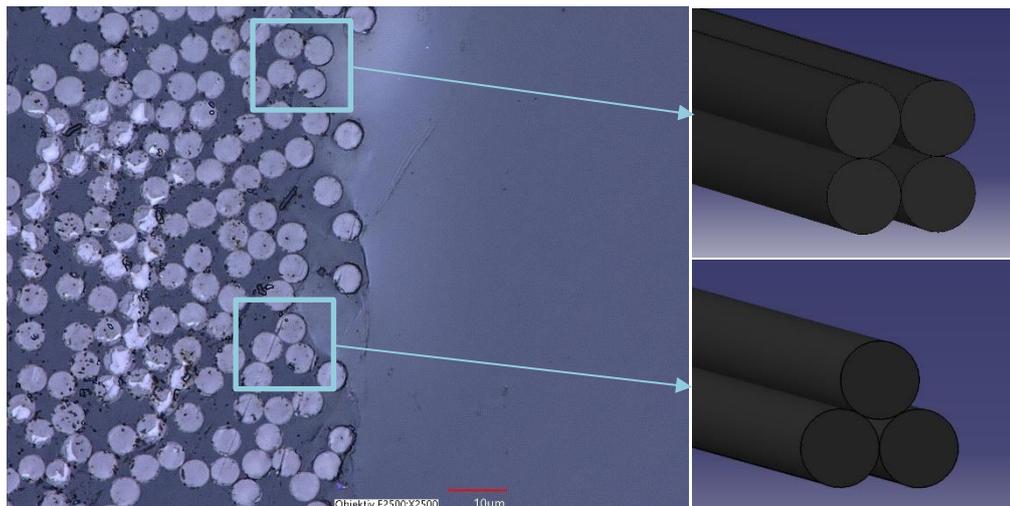


Abbildung 4: Faseranteil Schliﬀprobe [DLR]

$$\text{quadratische Packung} - \varphi_{max} = \frac{\pi}{4} \approx 0,79 = 79\% \quad \text{Gl.2}$$

$$\text{hexagonale Packung} - \varphi_{max} = \frac{\pi}{\sqrt{12}} \approx 0,91 = 91\% \quad \text{Gl.3}$$

φ_{max}

Maximaler Faseranteil

[%]

In der Realität treten jedoch Zwischenräume auf (siehe Abbildung 4), weshalb der eigentliche Faseranteil geringer ausfällt. Da bei der industriellen Fertigung der Prepreglagen das Verhältnis zwischen Faser- und Harzanteil definiert ist, lassen sich so reproduzierbare Proben mit gleichbleibender Qualität erzeugen. (vgl. [Len20, 5])

Die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Probekörper ([Kapitel 3.2.4](#) und [Kapitel 3.4.1](#)) wurden aus Prepregmaterial von Hexcel gefertigt und erzielen rund 58% Faservolumenanteil (siehe Anhang: Datenblatt HexPly IM7 8552)

Die Lasteinwirkungsrichtung und die Orientierung der Fasern sind bei Prepreg essenziell. Wird eine Prepreglage entlang der Faserrichtung belastet (siehe Abbildung 6), lassen sich die Fasern leicht separieren. Belastungen, die quer zur Faserrichtung wirken, führen hingegen zu einer signifikant höheren Reißfestigkeit (siehe Abbildung 5).

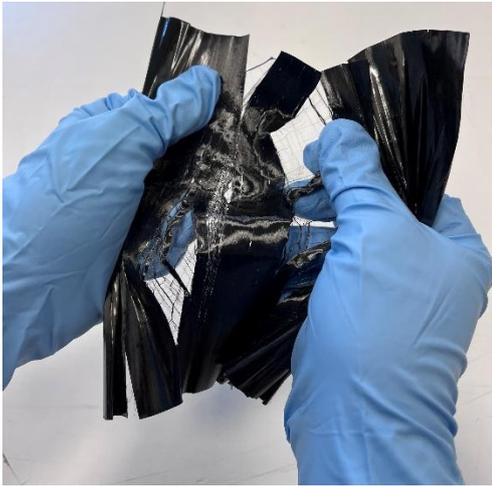


Abbildung 5: Last in Faserrichtung

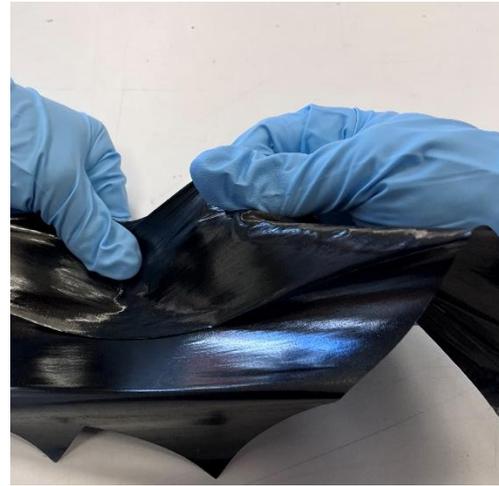


Abbildung 6: Last entgegen Faserrichtung

Um überwiegend isotrope³ Eigenschaften zu erzielen, erfolgt die Orientierung der Fasern typischerweise in definierten Winkelabfolgen (z. B. 0° , $\pm 45^\circ$, 90°). Der Fertigungsprozess wird in einem sogenannten Live-Data-Sheet dokumentiert, in dem Legefolgen, Geometrie, Materialdaten und Prozessparameter festgehalten sind.

2.1.2 Matrixwerkstoff (Prepreg)

Die Fasern werden durch das Matrixharz gebunden und in Position gehalten. Das Harz benetzt die Zwischenräume zwischen den Fasern.

Für Prepregs werden thermoplastische als auch duromere Matrices verwendet. Die Anforderung an die Temperaturbeständigkeit kann zum Teil über 180°C liegen, weshalb Hochleistungsthermoplaste wie Polyethersulfon (PES) oder Polyetheretherketon (PEEK) in diesen Bereichen eingesetzt werden.

Da die Matrix der thermoplastischen Halbzeuge bereits vollständig polymerisiert vorliegt, ist keine weitere chemische Reaktion zur Aushärtung erforderlich. Dies erhöht sowohl die Lagerstabilität als auch die Effizienz der Bauteilherstellung. Die hohe Schlagzähigkeit stellt

³ isotrop – nach allen Richtungen hin gleiche physikalische und chemische Eigenschaften aufweisend

ein weiteres Argument für deren Einsatz dar. Üblicherweise erfolgt die Verarbeitung mittels Heißpressverfahren, das insbesondere bei geringer Bauteilkomplexität und hohen Stückzahlen zu geringeren Produktionskosten führt. (vgl. [Len20, 18–19, 183])

Für kleinere Bauteilserien oder Probekörper – wie sie in dieser Arbeit untersucht werden – eignet sich eine duromere Prepregmatrix. Im Vakuumsackverfahren lassen sich diese unter mäßigem Aufwand verarbeiten und erlauben eine isotrope Aushärtung der Bauteile.

Charakteristisch für duromere Matrices ist die Ausbildung ihrer finalen molekularen Struktur während des Aushärteprozesses. Durch Wärmezufuhr erlaubt eine chemische Reaktion die Vernetzung der Polymerketten. Bei Variation der Reaktionsparameter – vor allem Temperatur und Zeit – können die Materialeigenschaften maßgeblich beeinflusst werden. Der Vernetzungsprozess bewirkt eine Zunahme der Molmasse⁴ und der Viskosität durch exothermische⁵ Reaktionen (siehe Diagramm 2). (vgl. [Len20, 19])

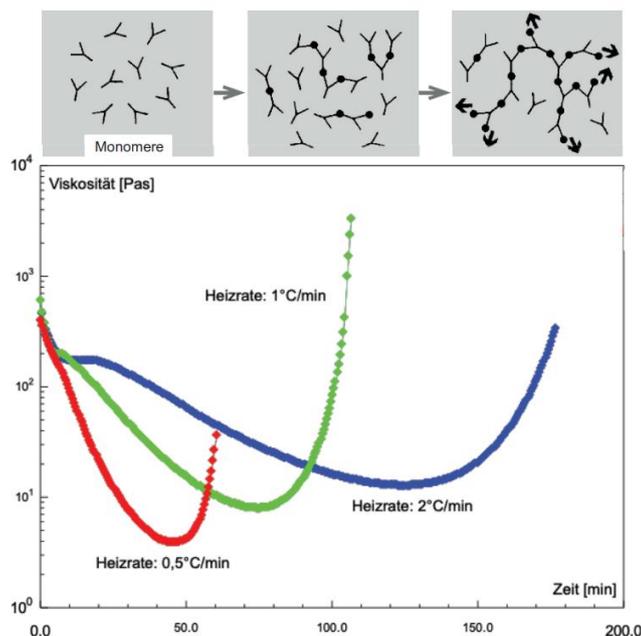


Diagramm 2: Härungsverlauf eines Duromers [Len20, 20]

„Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Der Kehrwert der Viskosität ist die Fluidität, ein Maß für die Fließfähigkeit eines Fluids. Je größer die Viskosität, desto dickflüssiger (weniger fließfähig) ist das Fluid; je niedriger die Viskosität, desto dünnflüssiger (fließfähiger) ist es.“ [URL09]

⁴ Molmasse – Masse einer bestimmten Anzahl an Teilchen

⁵ exotherm – Reaktion mit Wärmeabgabe

In der frühen Reaktionsphase wird das Harz niedrigviskos (vergleichbar mit Milch oder Saft) und kann sich in den Faserzwischenräumen gleichmäßig verteilen. Im Verlauf der Härtung steigt die Viskosität und wird innerhalb kurzer Zeit zähflüssig wie Honig. Nach Abkühlen und vollständiger Vernetzung der Polymerketten erreicht das Bauteil seine Endfestigkeit. Der Temperaturverlauf des Aushärtungsprozesses wird exemplarisch in [Kapitel 3.2.4](#) anhand einer konkreten Bauteilfertigung dargestellt. (vgl. [Len20, 18-19])

Das in dieser Arbeit verwendete Prepregmaterial von der Firma Hexcel trägt die Bezeichnung HexPly IM7 8552. (vgl. (Hex25))

Durch das Einbringen von thermischer Energie wird die chemische Reaktion initialisiert. Die Vernetzungsreaktion erfolgt durch eine sogenannte Aminhärtung. Das Grundprinzip beruht auf der Polyaddition von Aminen mit Epoxidharzen. Nach Zufuhr der Aktivierungsenergie in Form von Wärme greifen die primären Amine die Epoxidgruppen an. Dabei entstehen β -Hydroxyamin-Strukturen, die durch weitere Reaktionen (z. B. OH-Gruppen-Reaktionen) ein dreidimensional vernetztes Polymer ausbilden. Der Vernetzungsgrad und die damit einhergehenden Endfestigkeiten können durch unterschiedliche Amintypen beeinflusst werden. (vgl. [Bar87, 1965])

Schema A zeigt die schrittweise Ausbildung der β -Hydroxyamin-Struktur und anschließende Vernetzung, wobei Schema B eine katalytisch beschleunigte Reaktion durch bereits hinzugefügte OH-Gruppen zeigt. (vgl. [Bas23, 2])

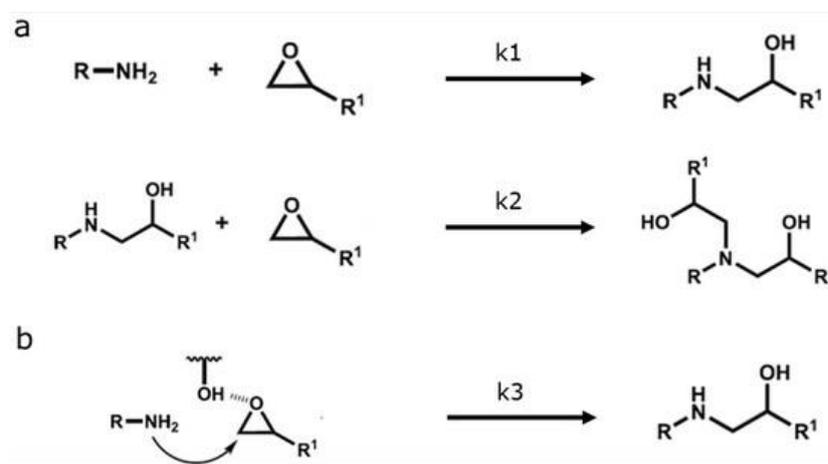


Abbildung 7: Aminhärtung mit und ohne Katalysator [Bas23]

In aktuellen Forschungsarbeiten wurde beobachtet, dass die Zugabe von Wasser als vermeintliche Verunreinigung in Epoxidharzen mit Aminhärtung nicht zwangsläufig eine Verschlechterung der Materialeigenschaften bewirkt. Im Gegenteil konnten in einigen Fällen sogar Verbesserungen physikalischer Eigenschaften festgestellt werden. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass es sich hier um eine sehr geringe Menge handelt. (vgl. [Xi24])

2.2 Thermoplastisches Polyurethan - TPU

Die Entwicklung thermoplastischer Polyurethane (TPU) begann bereits im Jahr 1950 in den Laboren des Unternehmens BF Goodrich, das heute als renommierter Reifenhersteller bekannt ist.

Im Wesentlichen besteht TPU aus linearen Hauptpolymerketten, die aus überwiegend langen, flexiblen Kettensegmenten zusammengesetzt sind. Der Zusammenhalt findet durch kovalente Bindung statt. Die Flexibilität der Polymerstruktur entsteht durch diisocyanatgekoppelte Polyester- oder Polyethersegmente mit niedrigem Schmelzpunkt. Durch deren Reaktion, entstehen Urethan-Kettensegmente, die maßgeblich zur Temperaturbeständigkeit beitragen. Die wiederholte Anordnung der Urethan-Kettensegmente führt zur Ausbildung kristalliner und parakristalliner Bereiche in der mobilen Polymermatrix. Die Beweglichkeit der Urethan-Kettensegmente wird durch intermolekulare Wasserstoffbrückenbindung eingeschränkt. Dadurch wird die Ausbildung von kristallinen Gitterstrukturen begünstigt, die positive Einflüsse auf die mechanische und thermische Stabilität haben. (vgl. [Hep92, 244-245])

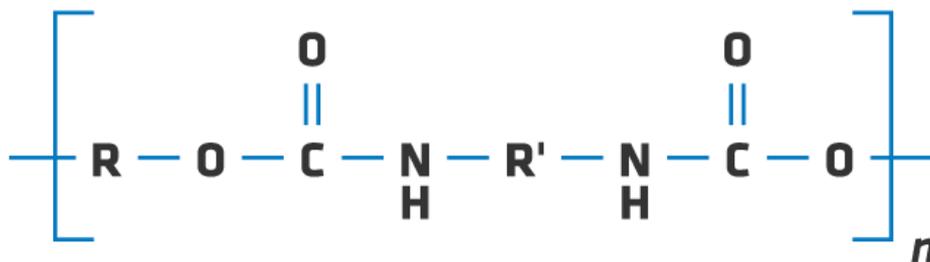


Abbildung 8: TPU-Kettensegment [URL10]

Aufgrund partieller Vernetzung der Urethansegmente weist TPU typische Eigenschaften eines stark gummiartigen Vulkanisats auf. Diese Eigenschaften bleiben bei niedrigen wie auch bei hohen Temperaturen stabil. (vgl. [Hep92, 245])

2.3 Kleben

Das Kleben stellt eine vielseitige Fügetechnologie dar, die nicht nur das Verbinden identischer Kunststoffe ermöglicht, sondern auch unterschiedliche Werkstoffe wie Kunststoffe, Metalle oder Glas. Der Vorteil gegenüber gängigen Schweißverfahren ist der deutlich

geringere Wärmeeintrag, was insbesondere das Fügen von dünnwandigen Materialien erheblich erleichtert. (vgl. [Seu20, 131])

Ein weiterer Vorzug besteht in der breiten Anwendbarkeit sowohl in manuellen Fertigungsprozessen als auch in hochautomatisierten Produktionslinien. Durch diese Flexibilität erfreut sich Klebtechnik in zahlreichen Industriefeldern – darunter Medizintechnik, Fahrzeugbau sowie Luft- und Raumfahrt – zunehmender Popularität. Der Einsatz chemisch beständiger Klebstoffe erlaubt es, selbst bei anspruchsvollen Umweltbedingungen eine zuverlässige Verbindung zu gewährleisten. In technischen Anwendungen sind Klebstoffe häufig aggressiven Medien wie Säuren, Ölen oder Treibstoffen (z. B. Benzin oder Kerosin) ausgesetzt. Daher ist die chemische Beständigkeit eine Mindestanforderung, um ein Versagen zu vermeiden. (vgl. [URL11])

Die Verbindung der Fügepartner erfolgt durch einen Hilfsstoff – den Klebstoff. Die Festigkeit der Klebverbindung entsteht durch das Zusammenspiel von Adhäsions- und Kohäsionskräften. Adhäsion ist die Haftungskraft zwischen Klebstoff und Oberfläche des Fügeteils. Dabei spielt die Qualität der Benetzung eine entscheidende Rolle. Oberflächenverunreinigungen, insbesondere durch Fette oder Staub, reduzieren die Benetzung drastisch und sollten unmittelbar vor dem Klebprozess entfernt werden. (vgl. [Seu20, 132])

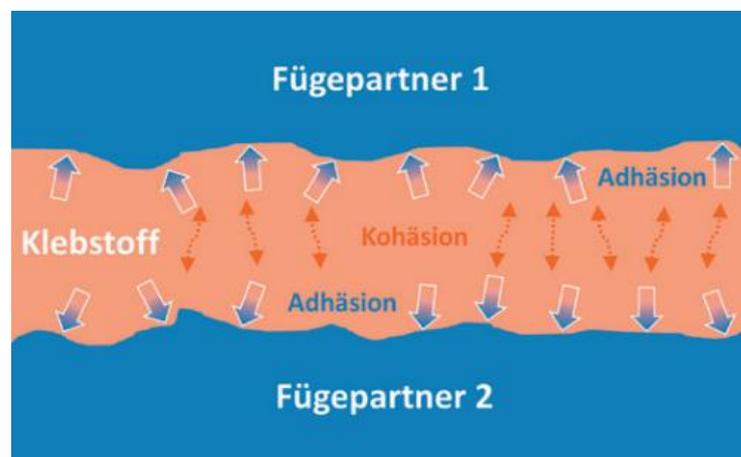


Abbildung 9: Mechanismen der Klebverbindung – Adhäsion und Kohäsion [Seu20]

Weitere Methoden zur gezielten Erhöhung der Adhäsionskräfte werden in [Kapitel 2.5](#) näher erläutert.

Im Inneren des Klebstoffs entstehen Kohäsionskräfte, die aus molekularen Wechselwirkungen wie kovalenten Bindungen, Ionenbindungen oder koordinativen Komplexbindungen resultieren. Die Entstehung dieser Kräfte findet bei der Aushärtung des Klebstoffs statt, wobei

zwischen chemischen und physikalischen Abbindesystemen unterschieden wird. (vgl. [Seu20, 132])

Chemisch abbindende Klebstoffe bestehen aus reaktiven Monomeren, die im Verlauf des Fügevorgangs polymerisieren. Die Initiierung dieser Reaktion kann durch das Mischen mehrerer Komponenten, das Einbringen von Feuchtigkeit oder durch Energiezufuhr (z. B. Wärme, UV-Licht) erfolgen. (vgl. [Seu20, 132])

Physikalisch abbindende Klebstoffe hingegen sind bereits polymer und benötigen keine chemische Reaktion. Hierbei sorgen physikalische Prozesse wie das Abkühlen nach einer Erwärmung oder das Verdampfen eines Lösemittels für die Verfestigung des Klebstoffs.

Tabelle 1 stellt eine systematische Einteilung dieser Abbindemechanismen mit konkreten Beispielen dar. (vgl. [Seu20, 133])

 <p>chemisch reagierend</p> <ul style="list-style-type: none">• Epoxide• Polyurethane• Silikone• Acrylate	 <p>physikalisch reagierend</p> <ul style="list-style-type: none">• Schmelzklebstoffe• Lösemittelklebstoffe• Dispersionsklebstoffe• Plastisole
--	---

Tabelle 1: Abbindemechanismen [Seu20]

Ein gesondertes Verfahren stellt das Diffusionskleben dar. Das Verbinden der Fügepartner findet unter Anpressdruck durch ein Auflösen der Materialoberfläche statt, bei dem die Molekülgruppen der Fügepartner ineinander diffundieren können. Nach Verdampfen des Lösemittels sind die Fügepartner durch den Diffusionsvorgang fixiert. (vgl. [Seu20, 133])

2.4 Gestaltungsmöglichkeiten von Überlappungsklebungen

Da Klebverbindungen in der Regel Schubbelastungen besser aufnehmen können als Zugbelastungen, sind überlappende Klebverbindungen widerstandsfähiger als auf Stoß geklebte Klebeflächen. Grund dafür sind bei Zugbelastung auftretende Spannungsspitzen, die zu einem schnellen Versagen führen können. Bei Schubbelastungen wird die Kraft gleichmäßiger über die gesamte Klebefläche verteilt.

Ein maßgeblicher Faktor für die Leistungsfähigkeit einer Klebverbindung ist die Größe der wirksamen Klebfläche. Mit zunehmender Klebfläche vergrößert sich der Bereich, über den mechanische Spannungen verteilt werden können, was zu einer Reduktion lokaler Spannungsspitzen führt und die Tragfähigkeit der Verbindung erhöht.

Eine der simpelsten Geometrien stellt die einschnittige Überlappungsklebung dar, die schon mit geringem Fertigungsaufwand realisiert werden kann. Unter Zugbelastung tritt jedoch eine unerwünschte Sekundärabiegung auf, da die angreifende Kraft exzentrisch zur Klebfläche eingeleitet wird. Diese Verformung ist bereits bei kleinen Probekörpern – die Single-Lap-Shear-Proben (kurz SLS) genannt werden – ersichtlich (siehe [Kapitel 3.4.3](#)).

Um die Beanspruchungen und daraus resultierenden Biegungen gleichmäßiger zu verteilen, werden zweischnittige Überlappungsklebungen eingesetzt. Durch eine symmetrische Kraftführung reduzieren sich die ungewollten Sekundärabiegungen. Allerdings ist ihr Herstellungsaufwand höher und bringt zusätzliches Strukturgewicht mit sich, welches für den Leichtbau kontraproduktiv ist. (vgl. [Sch24, 17])

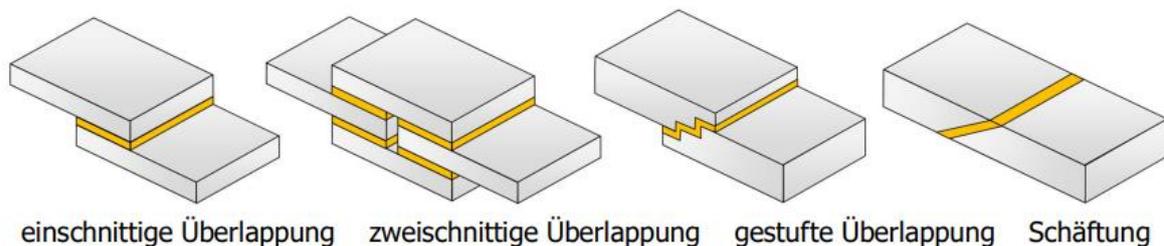


Abbildung 10: Gestaltungsmöglichkeiten Überlappungsklebungen [Sch24]

Um den Kraftfluss weiter in Richtung Mittelebene zu versetzen, können gestufte Klebverbindungen hergestellt werden. Der Fertigungsaufwand steigt dabei noch weiter an. Das Ziel ist, die Stufen immer weiter zu verringern, um den Kraftfluss weiter in Richtung Mitte zu versetzen. Werden die Stufen zu einer kontinuierlichen Schräge, spricht man von einer Schäftung. Fertigungstechnisch ist diese Klebverbindung mit dem höchsten Aufwand verbunden, bietet jedoch erhebliche Vorteile hinsichtlich der Lastübertragung und der aerodynamischen Qualität – die insbesondere im Flugzeugbau eine wichtige Rolle spielt. Abrupte Geometrieänderungen führen zu turbulenten Strömungen, die es zu vermeiden gilt. Die Schäftung erlaubt eine stufenlose, glatte Oberfläche und begünstigt laminare Strömungen. Eine zusätzliche Masse entsteht lediglich durch den eingesetzten Klebstoff, die im Vergleich der anderen Geometrien die geringste Masse darstellt. (vgl. [Sch24, 17])

Die Verformung der Klebgeometrien wurde mithilfe einer Finite-Elemente-Analyse simuliert. Die rot eingefärbten Bereiche besitzen eine hohe Spannungskonzentration, während blaue Zonen geringe Spannungen aufweisen. Die Spannungsspitzen treten unmittelbar vor der Überlappungsklebefläche auf.

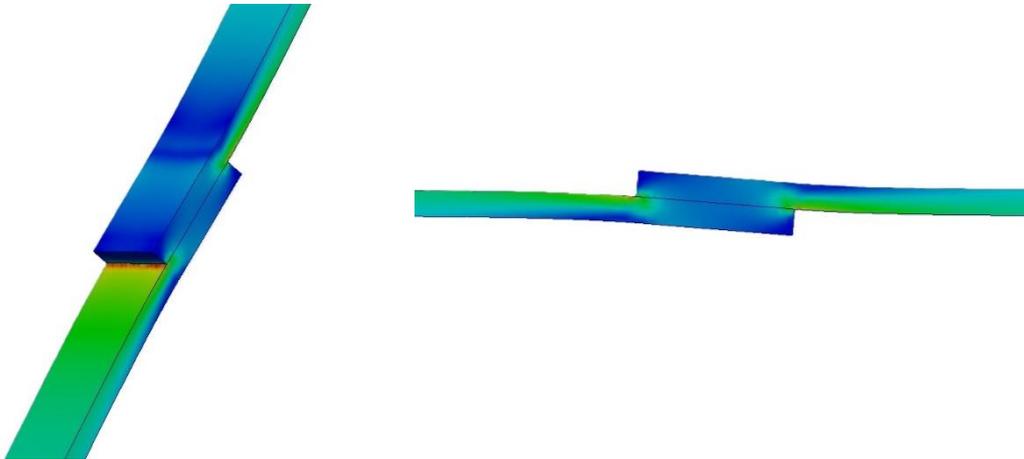


Abbildung 11: Finite-Elemente-Analyse SLS

Die folgende Tabelle soll die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Überlappungsgeometrien noch einmal zusammenfassen:

Art der Klebverbindung	Vorteil	Nachteil
Einschnittige Klebverbindung	Fertigungsaufwand –	Sekundärbiegung +++
Zweischchnittige Klebverbindung	Fertigungsaufwand + Gewicht +	Sekundärbiegung –
Gestufte Klebverbindung	Fertigungsaufwand ++	Sekundärbiegung ++
Schäftung	Fertigungsaufwand +++	Sekundärbiegung +

Tabelle 2: Vor- und Nachteile Klebverbindungsgeometrien

2.5 Oberflächenbehandlung von Klebeverbindungen

Die Oberflächenbehandlung von Klebeflächen dient in erster Linie der Optimierung der Haftungskräfte an den Verbindungsstellen. In diesen Bereichen treten physikalische, elektrische und chemische Vorgänge auf, die maßgeblich für die Ausbildung der Adhäsionskräfte sind. Um eine dauerhafte und belastbare Klebverbindung sicherzustellen, müssen energetisch bevorzugte Oberflächenzustände erzeugt werden. Die Oberflächenbehandlung stellt somit eine gezielte Modifikation der Oberfläche dar, um die Adhäsionskräfte zu steigern. (vgl. [Hab08, 542])

Darüber hinaus können durch die Oberflächenbehandlung auch Anforderungen hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit und Alterungsstabilität erfüllt werden. Aufgrund einer gleichmäßigen Benetzung des Klebstoffs wird ein Eindringen korrosiver Medien verhindert, wodurch die Integrität der Verbindung gewährleistet wird. Kann der Klebstoff keine ausreichende Benetzung aufgrund ungeeigneter Oberflächenzustände erreichen, kann dies zum frühzeitigen Versagen der Klebverbindung führen. Gleichzeitig darf die gewählte Behandlungsmethode den Werkstoff nicht negativ beeinflussen, da eine Schädigung der Oberfläche auch zu einer Reduktion der Adhäsionseigenschaften führen kann. (vgl. [Hab08, 543])

2.5.1 Einteilung

Tabelle 3 zeigt eine Einteilung der Behandlungsverfahren mit zugehörigen Beispielen.

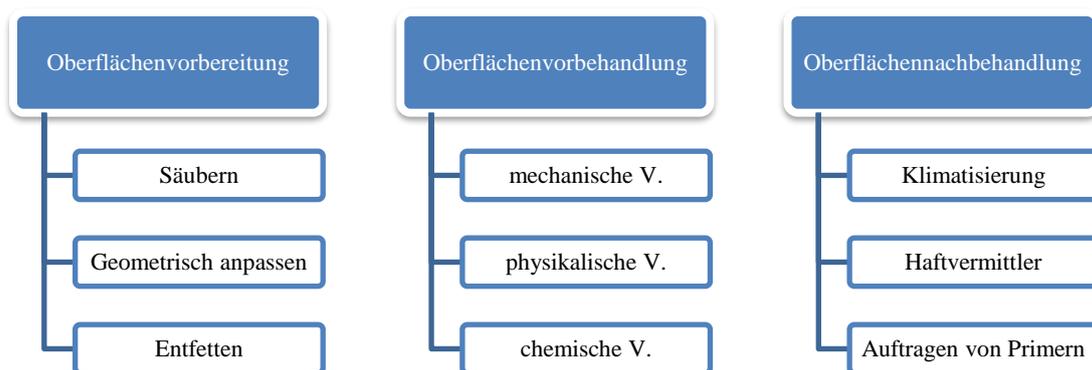


Tabelle 3: Einteilung Oberflächenbehandlung [Hab08]

Da eine vollständige Darstellung aller existierenden Verfahren den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde, wird im Folgenden lediglich auf die konkret eingesetzten Methoden eingegangen.

2.5.2 Chemische Reinigung und Aktivierung der Oberfläche (chemisch)

Die chemische Reinigung stellt eine der einfachsten Möglichkeiten zur Vorbereitung einer von Klebeflächen dar. Insbesondere im nicht-industriellen Bereich wird dieser Schritt häufig vernachlässigt, was oft zum Versagen der Verbindung führt. Zur Durchführung reichen ein geeignetes Lösungsmittel sowie ein sauberes Tuch aus, um die Verunreinigungen zu beseitigen.

Verunreinigungen können durch Umwelteinflüsse oder Fertigungsprozesse entstehen. Staub, Gleit- und Trennmittel, sowie Fett- und Wasserschichten lassen sich durch organische Lösungsmittel oder alkalische Reinigungsmittel entfernen. Die richtige Wahl des Reinigungsmittels ist entscheidend für die Oberfläche des Kunststoffes. Chemische Reaktionen können die Oberfläche durch Wechselwirkungen schädigen. Dabei verhalten sich wässrige alkalische Reinigungsmittel neutral gegenüber Kunststoffen. Unpolare Lösungsmittel wie z.B. niedrig siedende Benzine und Petroläther wirken geringfügig aggressiv auf Kunststoffe. Polare Lösungsmittel wie z.B. Methylenchlorid, Alkohole, Ester und Ketone haben ein starkes Lösungspotential und können zu Oberflächenschäden führen. Informationen über die chemische Beständigkeit eines jeweiligen Kunststoffes sind einschlägiger Fachliteratur oder Werkstoffdatenbanken zu entnehmen. (vgl. [Hab08, 654])

Das gezielte Aufbrechen chemischer Bindungen kann auch positiv eingesetzt werden. Hierbei können polare Gruppen an der Oberfläche erzeugt werden, die zwischenmolekulare Wechselwirkungen wie Dipol-Dipol-Interaktionen ermöglichen. Elektronegative Elemente an den Enden der Molekülketten fördern dabei die Ausbildung von Nebenvalenzbindungen, die Adhäsionskräfte erheblich steigern können. (vgl. [Hab08, 654])

2.5.3 Atmosphärendruckplasma-Vorbehandlung (physikalisch)

Oberflächeneigenschaften lassen sich auch ohne direkten Kontakt verändern. Ein Beispiel hierfür ist das Atmosphärendruckplasma-Verfahren. Im Gegensatz zu Niederdruckplasma-Verfahren ist keine Vakuumkammer notwendig, wodurch die Anlagen einfacher aufgebaut und kostengünstiger sind.

Das Verfahren basiert auf der Ionisation eines Prozessgases durch einen Lichtbogen, worauf ein potentialfreier Plasmastrahl aus dem Düsenkopf austritt. Die Strahllänge ist abhängig vom verwendeten Düsentyp und kann bis zu 50mm betragen, was die Bearbeitung komplexer Geometrien ermöglicht. (vgl. [Hab08, 664])

Das Atmosphärenplasma-Verfahren wird in drei Funktionsweisen unterteilt: (vgl. [URL12])

1. Oberflächenreinigung:

Entfernung organischer Verunreinigungen und Glättung der Oberfläche zur Vorbereitung einer Klebefläche oder Applikation von Beschichtungen.

2. Plasmaaktivierung:

Modifikation der chemischen Zusammensetzung der Polymeroberfläche zur Verbesserung der Haftungseigenschaften. Das dabei eingesetzte Prozessgas (z.B. Luft, N₂, Ar, NH₃) beeinflusst die resultierenden Oberflächeneigenschaften.

3. Plasmapolymerisation:

Erzeugung nanoskaliger Funktionsschichten durch die Zugabe eines Precursor-gases. Dabei finden Redoxreaktionen, Ionisations- und Radikalbildungsprozesse innerhalb der Plasmazone statt. Die resultierenden Beschichtungen können je nach Zusammensetzung z. B. mikrobenehmende oder permeationshemmende Eigenschaften erzeugen.

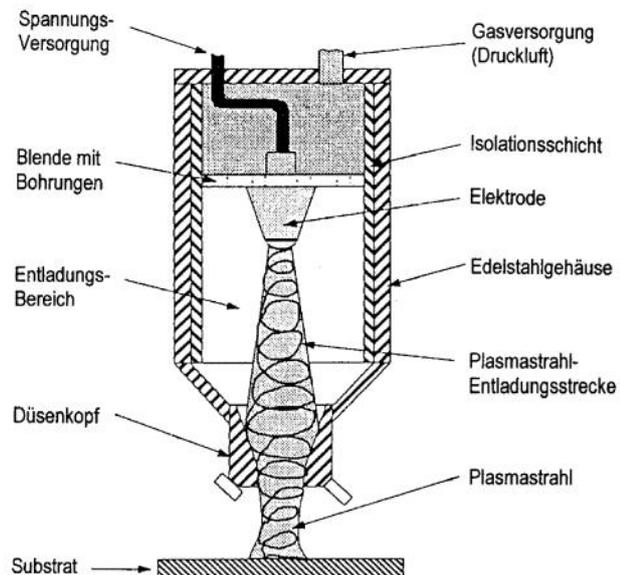
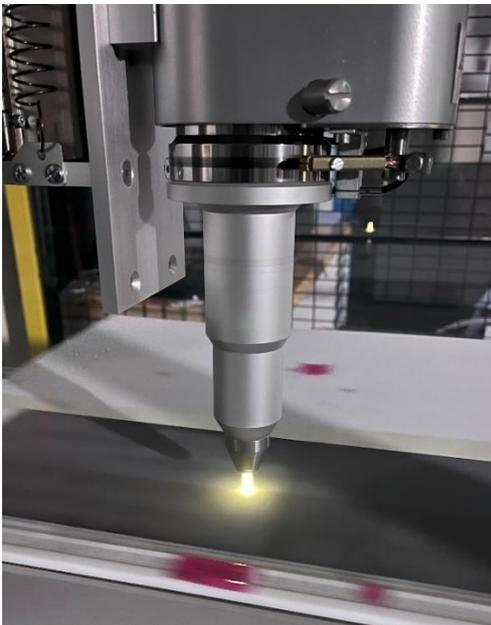


Abbildung 12: Anlage im Einsatz [DLR] Abbildung 13: Funktionsweise Anlage [Hab08]

In *Abbildung 12* ist die Atmosphärendruckplasmaanlage im Kleblabor des DLRs dargestellt. Das austretende Plasmabündel ist dabei deutlich sichtbar.

2.5.4 Corona-Vorbehandlung (physikalisch)

Da bei der Atmosphärendruckplasma-Vorbehandlung erhebliche Energiemengen in das Material eingebracht werden, haben frühere Versuche gezeigt, dass dieses Verfahren für dünne Folien nicht geeignet ist. Eine Alternative stellt daher die Corona-Vorbehandlung dar, womit eine Oberflächenvorbehandlung mit kontrolliertem Wärmeeintrag möglich ist.

Dieses Verfahren wird bei einer Vielzahl von Materialien eingesetzt und erleichtert insbesondere das Bedrucken, Beschichten und Verkleben. Durch einen Hochfrequenzstrahl aus Hochspannungsentladungen werden die umliegenden Sauerstoffmoleküle dissoziiert⁶. Die dabei freigesetzten Elektronen besitzen ausreichend Energie, um molekulare Bindungen an der Kunststoffoberfläche aufzubrechen. Die resultierenden, hochreaktiven Sauerstoffatome binden an den modifizierten Molekülen des Substrats an und sorgen für eine chemische Aktivierung der Oberfläche. Obwohl sich eine Aktivierung von chemisch beständigen Kunststoffen oftmals sehr kompliziert gestaltet, bietet die Corona-Vorbehandlung einen chemikalienfreien Ansatz. Da die Oberfläche ohne Klebstoff oder Beschichtung Umwelteinflüssen ausgesetzt ist, weist sie eine zeitlich begrenzte Stabilität der Aktivierung auf. Aus diesem Grund sollte die Verarbeitung zeitnah erfolgen, um einen Rückgang der Haftfähigkeit zu vermeiden. Die gute Automatisierbarkeit sowie der kompakte Anlagenaufbau machen dieses Verfahren insbesondere für industrielle Anwendungen attraktiv. (vgl. [URL13])

Die charakteristisch leuchtenden Hochspannungsentladungen der Corona-Vorbehandlung entstehen durch eine Wechselspannung von 10 - 20kV mit einer Frequenz zwischen 10 und 40 kHz. Aufgrund der hohen Bindungsenergie von Stickstoffmolekülen, werden diese nur in geringem Maße in ihre reaktive Spezies überführt. (vgl. [Hab08, 667])

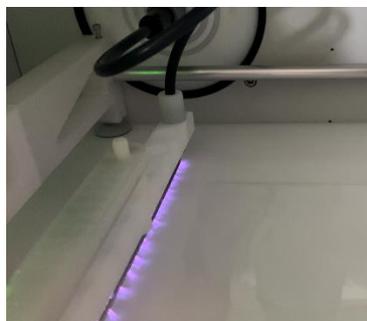


Abbildung 14: Corona-Vorbehandlung

⁶ Dissoziation – Aufspaltung chemischer Verbindungen in ihre Bestandteile
ZÄHMODIFIZIERTEN VERKLEBTEN

Während der Corona-Vorbehandlung wird in der Umgebungsluft enthaltener Sauerstoff in Ozon umgewandelt. Als starkes Oxidationsmittel ist Ozon instabil und zerfällt in reaktiven molekularen Sauerstoff sowie sehr reaktiven atomaren Sauerstoff. Die atomare Form kann mit Kunststoffoberflächen Oxidationsreaktionen eingehen und dadurch eine Reinigung als auch Aktivierung bewirken. Eine Absaugung ist bei diesem Prozess aufgrund der Gesundheitsrisiken für die menschliche Lunge unerlässlich. (vgl. [Hab08, 657])



Durch die Oxidationsreaktionen entstehen Carbonyl- (-C=O-), Carboxyl- (HOOC-), Hydroxyl- (HO-), und Hydroperoxid- (HOO-) Gruppen an der Materialoberfläche, die weitere Verbindungen eingehen können. (vgl. [URL14])

2.5.5 Oberflächenspannung und Oberflächenenergie

Oberflächenbehandlungen haben das Ziel, die Adhäsion zwischen Klebstoff und Fügepartnern zu verbessern. Wesentliche Einflussgrößen sind hierbei die Oberflächenspannung und die Oberflächenenergie. Während Flüssigkeiten ihre Form ändern und sicher der Oberfläche anpassen können, ist dies bei Festkörpern nicht der Fall sofern sie nicht auf Schmelztemperatur gebracht werden.

Bei Feststoffen wird die Eigenschaft mit einer Flüssigkeit zu interagieren, Oberflächenenergie genannt. Sie ist das Ausmaß, wie gut eine Flüssigkeit an einer Oberfläche haften kann. Wirkt eine Oberfläche anziehend auf eine Flüssigkeit, dann verteilt sich diese und wird als hydrophil⁷ bezeichnet. Umgekehrt spricht man bei einer geringen Benetzung von hydrophoben⁸ Oberflächen. (vgl. [TuD24, 1])

Zur quantitativen Ermittlung von Oberflächenenergien von Festkörpern werden sogenannte Testtinten eingesetzt, die definierte Oberflächenspannungen aufweisen. In *Abbildung 15* wurden Testtinten mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen auf eine TPU-Folie appliziert. Die 40 mN/m Testtinte hat hier die höchste Oberflächenspannung und zieht sich eng zusammen. Mit absteigender Oberflächenspannung verteilt sich der Tropfen weiter auf der Folie. Wird durch eine geeignete Vorbehandlung die Oberflächenenergie gesteigert, würde

⁷ hydrophil – flüssigkeitsanziehend, aufnehmend

⁸ hydrophob – flüssigkeitsabstoßend, nicht löslich

sich die 40 mN/m Tinte weiter verteilen. Ein anschauliches Beispiel für Oberflächenspannung ist das leicht über den Rand hinausragende Wasser bei einem randvollen Glas (Abbildung 15), verursacht durch Kohäsionskräfte.



Abbildung 15: Oberflächenspannung Glas Abbildung 16: Testtinte

Gemessen wird die Oberflächenenergie in Millinewton pro Meter (mN/m) und sie kann mittels Kontaktwinkelmessung ermittelt werden. Aus dem gemessenen Winkel Alpha und der folgenden Formel kann die Oberflächenenergie in mN/m berechnet werden.

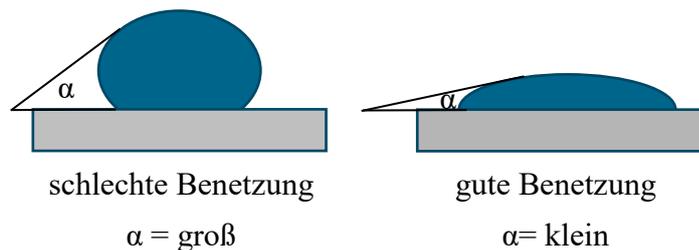


Abbildung 17: Kontaktwinkel

Durch die Interaktion von 3 Stoffen bildet sich in der Dreiphasengrenze ein thermodynamisches Gleichgewicht und kann mit der Young-Gleichung berechnet werden. Die Oberflächenspannung der Flüssigkeit, die Oberflächenenergie des Feststoffes und die Interaktion beider erzeugen eine Grenzflächenenergie. Die entstehenden Kräfte in Form eines Vektorgleichgewichts berechnet werden. (vgl. [TuD24, 1])

So ergibt sich folgende Gleichung:

$$\cos \alpha = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L} \quad \text{Gl. 5}$$

σ_S	Oberflächenenergie Festkörper	[mN/m]
σ_L	Oberflächenenergie Flüssigkeit	[mN/m]
σ_{LS}	Grenzflächenenergie flüssig/fest.	[mN/m]
α	Kontaktwinkel	[°]

Zusammenfassend lässt sich die Benetzung der Oberfläche wie folgt beurteilen.

Benetzung	Oberflächenspannung Flüssigkeit	Oberflächenenergie Feststoff
Gute Benetzung	niedrig	hoch
Schlechte Benetzung	hoch	niedrig

Tabelle 4: Young-Regel

Allgemein gilt: Ist die Oberflächenspannung der Flüssigkeit geringer als die Oberflächenenergie des Festkörpers, so ist eine gute Benetzung gegeben. Sind die Gegebenheiten umgekehrt, ist die Benetzung schlecht.

2.5.6 Einfluss Oberflächenrauheit auf Klebeflächen (mechanisch)

Die Oberflächenrauheit beschreibt die mikroskopische Unebenheit eines Festkörpers im Querschnitt. Mit steigender Rauheit vergrößert sich die effektive Kontaktfläche, die eine Verbesserung der mechanischen Verklammerung führt.

Durch mechanische Bearbeitung, wie Schleifen oder Sandstrahlen, kann die Rauheit einer Oberfläche verändert werden. Dies ermöglicht es, stärkere und ermüdungsresistente Klebverbindungen herzustellen. Allerdings ist Voraussetzung für diesen Effekt, dass der Klebstoff in der Lage ist, in alle Unebenheiten zu fließen. Hierbei spielt die Viskosität eine entscheidende Rolle. Hochviskose Klebstoffe weisen eine geringe Fließfähigkeit auf, besitzen jedoch gute Hohlraum- und Spaltfüllungseigenschaften. Für eine vollständige Benetzung ist ein Klebstoff mit geringerer Viskosität zu empfehlen. (vgl. [URL15])

Zur Qualitätssicherung bietet es sich an, Schliffbilder zu erstellen und unter dem Mikroskop zu analysieren. Abbildung 18 zeigt die Benetzung eines Klebstoffs auf einer CFK-Oberfläche. Es ist ersichtlich, dass der Klebstoff nicht die Möglichkeit hatte, alle Bereiche zu benetzen, was zu einer reduzierten Klebfestigkeit führen kann.



Abbildung 18: Verklebte CFK-Oberfläche [DLR]

2.6 Oberflächenzähmodifikation

Das Ziel der Oberflächenzähmodifikation (engl. *local Surface Toughening*; kurz. ST) ist eine Senkung von Spannungskonzentrationen in strukturellen Klebverbindungen. Lokale Spannungsspitzen können zur Initiierung von Rissen führen, die im schlimmsten Fall das Versagen der Verbindung verursachen. (vgl. [Sch24, 64])

Die Auswirkungen solcher Rissbildungen lassen sich anschaulich anhand von Kunststoffverpackungen demonstrieren: Die gezackten Öffnungshilfen an den Enden erleichtern das Einreißen der Verpackung, indem sie als Sollbruchstellen fungieren. Ähnlich wirken Risse auf Klebverbindungen, indem sie es angreifenden Kräften erleichtern, molekulare Bindungen aufzubrechen.

Bei der Oberflächenzähmodifikation wird gezielt ein duktiler Bereich in die Überlappungsklebung implementiert. Hierzu wird im Randbereich zwischen Fügepartner und Klebstoff, ein Werkstoff eingesetzt, dessen höhere Duktilität zu einer größeren Spannungsaufnahme führt. Durch den duktilen Bereich werden Spannungen in Schäl- und Schubrichtung effektiv absorbiert. Der zentrale Bereich der Klebung bleibt steif und übernimmt die Hauptlastübertragung in Schubrichtung. (vgl. [Sch24, 64])

Die Integration einer Oberflächenzähmodifikation kann als ein mechanisches Federsystem verstanden werden, das bereichsabhängige Steifigkeiten aufweist. Der duktile Bereich dient hierbei als Pufferzone, die eine Rissausbreitung hemmt oder gar ganz verhindert, indem Spannungsspitzen entschärft werden. (vgl. [Sch24, 64])

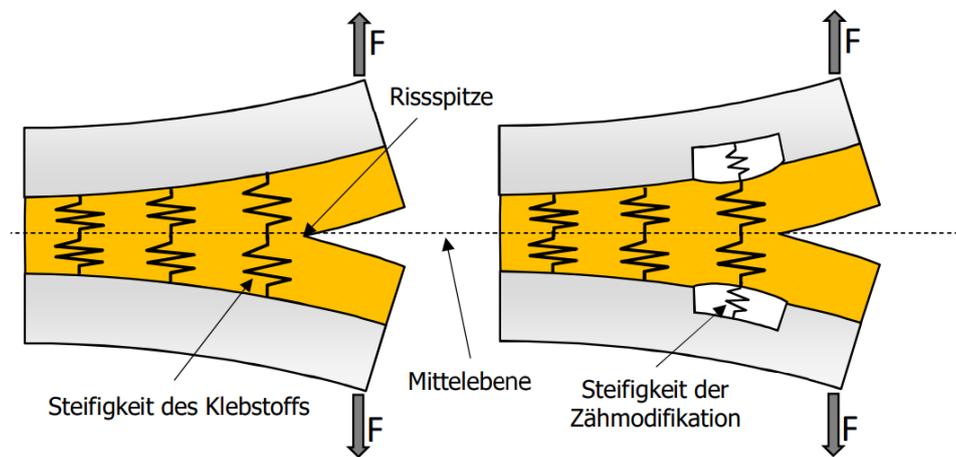


Abbildung 19: Oberflächenzähmodifikation Federmodell [Sch24]

Zur quantitativen Bewertung wird das System durch zwei symmetrisch zur Mittellinie angeordnete Substrate modelliert (siehe Abbildung 19). Aus den Elastizitäten der Oberflächenzähmodifikation und des Klebstoffs lässt sich ein Federsteifigkeitsverhältnis bilden. Dazu wird die Federsteifigkeit D eines Stabes aus dem Produkt von Elastizitätsmodul E und Querschnittsfläche A durch die Länge t dividiert:

$$D = \frac{E \cdot A}{t} \quad \text{Gl. 6}$$

D	Federsteifigkeit	[N/m]
E	Elastizitätsmodul	[N/mm ²]
A	Querschnittsfläche	[mm ²]
t	Länge	[mm]

Die Elastizitätsmodule wurden bereits in früheren Untersuchungen determiniert und wurden aus dem folgenden Diagramm für Raumtemperatur (23° C) übernommen.

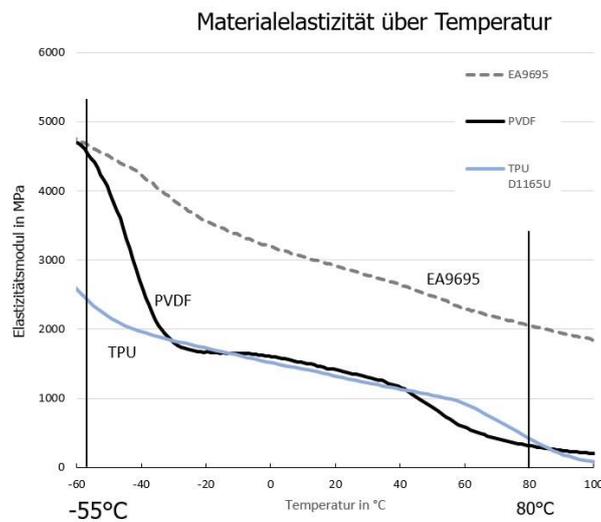


Diagramm 3: Temperaturabhängigkeit Elastizitätsmodul [Sch24]

Die Querschnittsfläche wird halbiert, um den Bezug zur Mittelebene herzustellen. Das Elastizitätsmodul für den verwendeten Filmklebstoff (Loctite EA9695) beträgt rund 2500 MPa und für TPU (BASF Elastollan D1165U) rund 1300 MPa.

$$D_{Klebstoff} = D = \frac{2500 \text{ MPa} \cdot A}{0,5 \cdot t} = \frac{5000 \text{ MPa} \cdot A}{t} \quad \text{Gl. 7}$$

$$D_{ST} = \frac{1300 \text{ MPa} \cdot A}{t} \quad \text{Gl. 8}$$

Die beiden Federsteifigkeiten werden geteilt und es ergibt sich das Verhältnis.

$$\frac{D_{Klebstoff}}{D_{ST}} = \frac{\frac{5000 \text{ MPa} \cdot A}{t}}{\frac{1300 \text{ MPa} \cdot A}{t}} = \frac{5000}{1300} = 3,846 \approx 4 \quad \text{Gl. 9}$$

Da sich A und t auflösen, wird zur Vereinfachung der Gleichung aufgerundet. Somit ergibt sich für die Federsteifigkeit des TPUs ein Viertel der Gesamtfedersteifigkeit. Daher ergibt sich für die Zähmodifikation:

$$D_{ST} = \frac{1}{4} \cdot D \quad \text{Gl. 10}$$

Schlussendlich ergibt sich für die neue Gesamtfedersteifigkeit D' eine Reihenschaltung beider Federn.

$$\frac{1}{D'} = \frac{1}{D_{Klebstoff}} + \frac{1}{\frac{1}{4} \cdot D_{Klebstoff}} \quad \text{Gl. 11}$$

$$\frac{1}{D'} = \frac{1}{D_{Klebstoff}} + \frac{4}{D_{Klebstoff}} \quad \text{Gl. 12}$$

$$D' = \frac{1}{\frac{1}{D_{Klebstoff}} + \frac{4}{D_{Klebstoff}}} = \frac{1}{5} * D_{Klebstoff} \quad \text{Gl. 13}$$

Somit ist die Gesamtfedersteifigkeit zwischen Klebstoff und TPU, fünfmal elastischer im Vergleich zum eigentlichen Klebstoff. Frühere Untersuchungen bestätigen die Wirksamkeit dieses Konzeptes. (vgl. [Sch24])

2.7 Prüfverfahren von Klebverbindungen

Klebverbindungen sind in ihrer Anwendung stets mechanischen Belastungen ausgesetzt. Um die Dauerhaftigkeit und Sicherheit solcher Verbindungen zu gewährleisten, sind geeignete Prüfverfahren erforderlich. Die im Betrieb auftretenden Lasten sollten dabei stets unterhalb der im Test ermittelten Grenzwerte liegen.

Aus ökonomischen Gründen ist eine Einzelprüfung jedes Bauteils in der Serienfertigung nicht praktikabel. Daher werden standardisierte Prüfmethoden angewandt, bei denen Kraft- richtung, Probengeometrie und Werkstoffparameter normativ definiert sind. Auf diese Weise ist eine Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf vergleichbare Anwendungsfälle möglich. (vgl. [IVK25, Abs. 6])

Neben thermischen und mechanischen Belastungen können auch Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit, chemische Einflüsse oder UV-Strahlung zu einer Alterung oder zum Versagen der Klebverbindung führen.

Prüfverfahren lassen sich grundsätzlich in zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen einordnen. Die folgende Übersicht beinhaltet einige Beispiele unterschiedlicher Prüfverfahren. (vgl. [IVK25, Abs. 6])

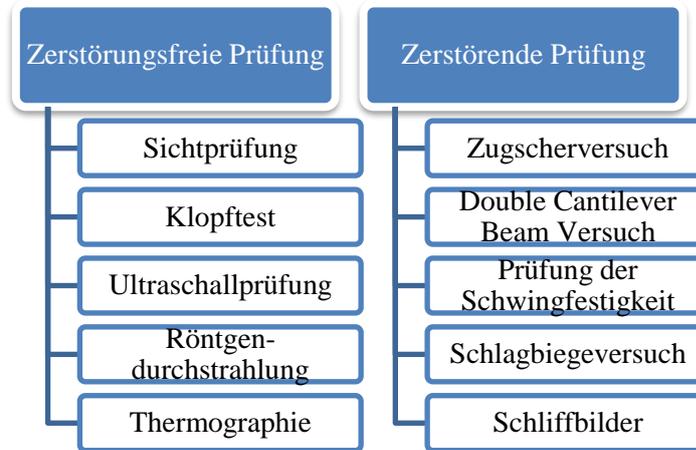


Abbildung 20: Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfung [IVK25]

Die Bestimmung der Oberflächenspannung mittels Testtinten stellt eine nicht zerstörende Sichtprüfung dar. Das untersuchende Material bleibt hierbei unversehrt, die Benetzung der Tinte liefert einen Eindruck über die Oberflächenenergie.

Eine weitere Art der Qualitätskontrolle der Klebverbindung ist die Erstellung von Schliffbildern. Sie zählt zu den zerstörenden Prüfverfahren, da ein spezieller Zuschnitt der Probe erfolgen muss. Die Schnittstücke werden in ein geeignetes Harz eingebettet und müssen nach dem Aushärten so lange geschliffen werden, bis die Oberflächenrauheit auf ein Minimum reduziert wurde. Unter Verwendung eines Mikroskops kann der Querschnitt im Detail auf die Qualität der Verbindung untersucht werden.

Eine der mit Abstand gängigsten Prüfungen von Klebverbindungen erfolgt durch Zugversuche oder Zugscherversuche. Zu den häufigsten Versagensarten von Zugscherversuchen zählen:

1. Adhäsionsbruch: Die Klebschicht bleibt intakt, löst sich jedoch vom Substrat.
2. Kohäsionsbruch: Der Klebstoff reißt innerhalb der Schicht, bleibt jedoch an beiden Fügepartnern haften.
3. Mischbruch: eine Kombination aus Adhäsions- und Kohäsionsversagen.
4. Delamination: Trennung von CFK-Lagen oder angebrachten Werkstoffen (z. B. TPU-Folie), wenn die Bindung zur Matrix unzureichend ist.

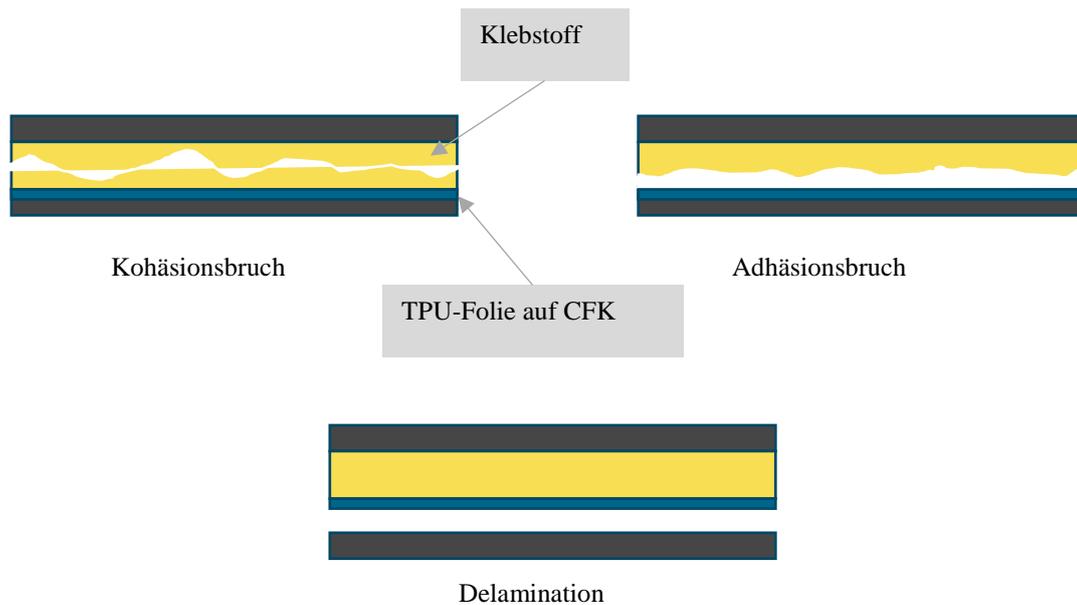


Abbildung 21: Versagensarten Klebverbindung mit Surface Toughening

In [Kapitel 3.2.7](#) werden sogenannte Kopfzugproben mit aufgeklebtem Stempel senkrecht zur Oberfläche auf Zug belastet. Die Lasteinleitung dieses Prüfverfahrens ähnelt dem Zugverfahren (siehe *Abbildung 22*) und zerstört die Proben.

Weiterhin wird die Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen mit Oberflächenzähmodifikation ermittelt. Der sogenannte Single-Lap-Shear-Test (kurz SLS) erfolgt nach speziell für faserverstärkte Kunststoffe ausgelegter Prüfnorm (ASTM D 5868). Die Prüfnorm legt Geometrie, Krafrichtung und Versuchsdurchführung fest. SLS-Prüfungen zählen zu den zerstörenden Verfahren mit Krafrichtung analog *Abbildung 22*. (vgl. [ASTM5868, 1–2])

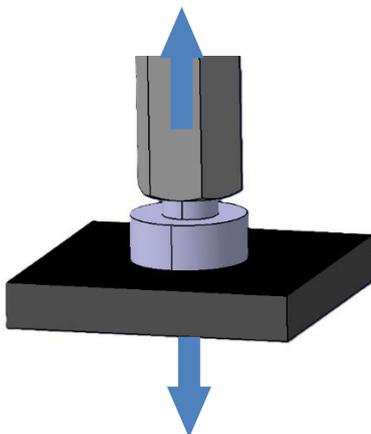


Abbildung 22: Kopfzugprobe

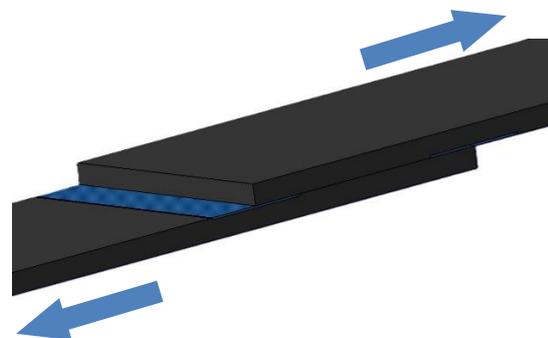


Abbildung 23: Single-Lap-Shear (SLS)

3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Das Ziel dieser Arbeit besteht nicht nur im theoretischen Wissensgewinn, sondern auch im experimentellen Erkenntnisgewinn durch systematisch geplante Versuche. Nach zuvor erfolgter Darstellung relevanter Technologien und Verfahren werden in diesem Kapitel die durchgeführten Experimente beschrieben, die zur finalen Ergebnisauswertung geführt haben.

3.1 Versuchsplanung

Wie bereits in [Kapitel 1.3](#) dargelegt, soll ein thermoplastisches Polyurethan (TPU) als Oberflächenzähmodifikation die Verbindungsfestigkeit von strukturellen Klebverbindungen steigern. Frühere SLS-Versuche mit Polyvinylidenfluorid (PVDF) haben die Wirksamkeit des zähmodifizierenden Effektes gezeigt. Allerdings hat das Material bei niedrigen Temperaturen nur geringere Festigkeiten als die Referenzproben erreicht. Die Referenzproben wurden ohne Oberflächenzähmodifikation gefertigt. (vgl. [Sch24])

Da TPU eine hohe Kälteflexibilität aufweist, war das Ziel, die Effektivität einer TPU-Oberflächenzähmodifikation bei Raumtemperatur sowie bei -55° zu testen.

Vorab sollte jedoch die Steigerung der Adhäsionsfähigkeit des TPUs auf CFK mit dem Corona-Vorbehandlungsverfahren experimentell untersucht werden. Während frühere Studien gezeigt haben, dass die Vorbehandlung von PEEK eine deutliche Verbesserung der Adhäsion erzielt, war der Einfluss auf die Adhäsion von PVDF deutlich geringer (siehe Abbildung 24). Aus diesem Grund ist der experimentelle Teil dieser Arbeit in Haupt- und Nebenversuche aufgeteilt.

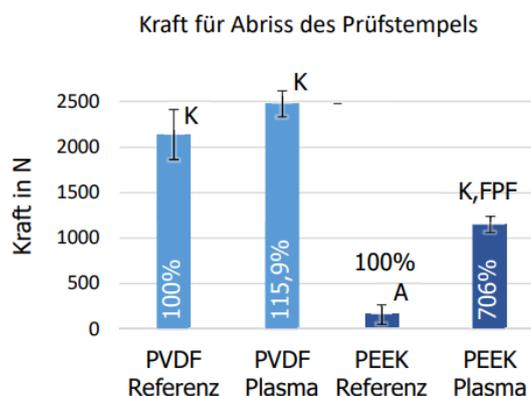


Abbildung 24: Vorbehandlung PVDF und PEEK [Sch24]

- Vorversuche – Einfluss der Corona-Vorbehandlung auf Adhäsion der TPU-Folie:
 - a. Konzipierung einer wiederholbaren Vorbehandlung
 - b. Corona-Vorbehandlung der TPU-Folie
 - c. Fertigung von Kopfzugproben mit 25mm x 25mm Probengeometrie
 - d. Konzipierung Einspannwerkzeug für Zugmaschine
 - e. Zugversuch der Kopfzugproben

- Hauptversuche:
 - a. Fertigung von SLS-Proben nach ASTM D 5868
 - b. Schliffbilder zur Qualitätssicherung der Klebverbindung
 - c. SLS Zugscherversuch mit $T = 23^\circ$ und $T = -55^\circ\text{C}$

Da die Kopfzugproben bisher nur mit einer Prüfzentrifuge getestet werden konnten, sollte ein Einspannwerkzeug für die Zugmaschine konzipiert werden, um eine höhere Genauigkeit der Prüfergebnisse zu erlangen. Um eine Dokumentation und Qualität der Erzeugnisse bereitzustellen, wurden die Bauteile und Proben in Eigeninitiative gefertigt.

3.2 Vorversuche

Die eingesetzte TPU-Folie ist eine kundenspezifische Entwicklung auf Basis eines BASF-Granulats und wurde im Folienextrusionsverfahren hergestellt. Zur Verbesserung der Adhäsion und zur Vermeidung von Delaminationen wird eine Corona-Vorbehandlung der Folie angewandt. Die resultierende Haftung wird über definierte Kopfzugproben quantitativ bewertet.

3.2.1 Hypothese der Vorversuche

„Die Corona-Vorbehandlung von TPU erhöht die Oberflächenenergie und steigert dadurch die Adhäsion in Klebverbindungen.“

Mittels elektrischer Entladung wird die Oberflächenenergie der TPU-Folie gezielt erhöht. Den Einfluss der Vorbehandlung auf die Oberflächenenergie, kann mit Kontaktwinkelmessungen optisch untersucht werden. Durch die Applikation der TPU-Folie auf CFK-Substrate, sollen Zugversuche senkrecht zur Klebefläche stattfinden. Die erzielten Zugspannungen werden mit den ermittelten Oberflächenenergien korreliert, um den Einfluss

unterschiedlicher Vorbehandlungsdauern systematisch zu analysieren. Als Vergleichsgruppen dienen unbehandelte sowie verschieden lang vorbehandelte TPU-Folien.

3.2.2 Lineartisch Corona-Vorbehandlung

Das in [Kapitel 2.5.4](#) geschilderte Corona-Vorbehandlungsverfahren stellt bei manueller Durchführung ein Problem für die Reproduzierbarkeit dar. Zur Verbesserung sollte ein automatisierter Lineartisch konzipiert und gefertigt werden.

Folgende Anforderungsliste verschafft eine bessere Übersicht der Vorüberlegungen:

Anf. Nr.	Art	Anforderung	Wert/Daten
1	M	Werkstoffe	Nicht elektrisch leitend
2	W	Kinematik	Geschwindigkeit steuerbar
3	M	Kräfte und Momente	Drehmoment durch Schrittmotor
4	W	Ergonomie	Einfache Montage/Demontage
5	W	Kommunikation	Hardware (Raspberry Pi) Software (Python-Interface)
6	M	Energie	elektrisch (Schuko-Stecker)
7	M	Geometrie	max. 400mm x 300mm

Die Entwicklung erfolgte durch Konstruktion und Anwendung additiver Fertigung (3D-Druck) mit PETG-Kunststoff, der elektrisch nicht leitfähig und mechanisch ausreichend belastbar ist.

Die Bewegung soll durch einen Schrittmotor mit Zahnriemenantrieb realisiert werden, dessen rotatorische Bewegung über eine Umlenkrolle in eine translatorische Bewegung des Schlittens umgesetzt wird. Für die Steuerung ist ein Raspberry Pi in Kombination mit einem Schrittmotortreiber zuständig. Eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche wurde mit der Programmiersprache Python codiert und ist mit einem Touchdisplay zugänglich. Die Verwendung von Saugnäpfen garantiert die Fixierung der Einheit auf der Kunststoffoberfläche der Anlage.

Der Schlitten trägt die Elektrode der Corona-Anlage und bewegt sich linear entlang einer Führung. Durch die entwickelte Vorrichtung können TPU-Folien teilautomatisiert und reproduzierbar vorbehandelt werden.

Aufgrund additiver Fertigung (3D-Druck) können Bauteile innerhalb kurzer Zeit, kostengünstig angefertigt werden. Ein Schrittmotor wurde mit einem Zahnriemen auf die Vorrichtung gespannt. Die Fixierung der Elektrode fand durch einen Führungsblock statt. Eine Umlenkrolle sorgt durch Wechseln der Drehrichtung des Schrittmotors für eine translatorische Bewegung vor oder zurück.

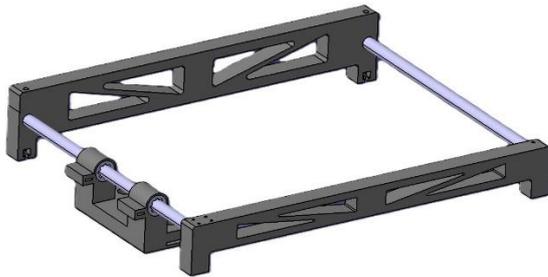


Abbildung 25: Lineartischkonstruktion

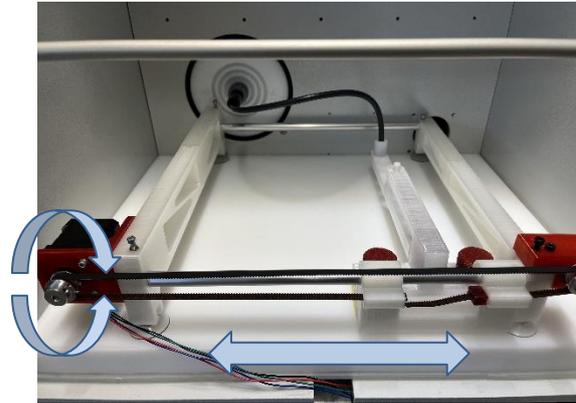


Abbildung 26: Lineartisch

Das Interface sendet über den Raspberry Pi das Signal an einen Schrittmotortreiber. Der Schrittmotortreiber gibt dem Schrittmotor die notwendigen Impulse.

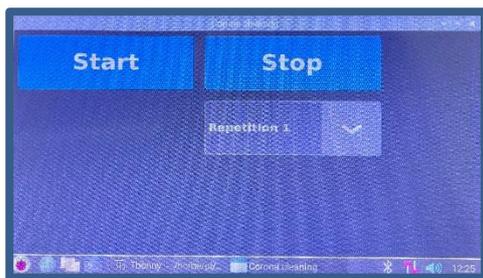


Abbildung 27: Benutzeroberfläche



Abbildung 28: Displaygehäuse

3.2.3 Corona-Vorbehandlung TPU-Folie

Um den optimalen Behandlungsgrad zu ermitteln, wurde die Anzahl der Vorbehandlungsdurchläufe variiert. Zur Ermittlung der Oberflächenenergie wurden die Folien mit einer Testtinte untersucht (vgl. [Kapitel 2.5.5](#)). Das Auftragen der Testtinte erfolgte mit einem kleinen Pinsel. Ein gleichmäßiges Verlaufen der Tinte deutet auf eine höhere Oberflächenenergie hin, als die Referenz der Tinte angibt. Im folgenden Diagramm wurden die Oberflächenenergien von zehn TPU-Folien gleichen Ursprungs mit unterschiedlicher Anzahl an Behandlungszyklen dokumentiert. Die eingesetzten Tinten deckten einen Bereich von 30 bis 40 mN/m ab.



Abbildung 29: Testtinte auf Folie

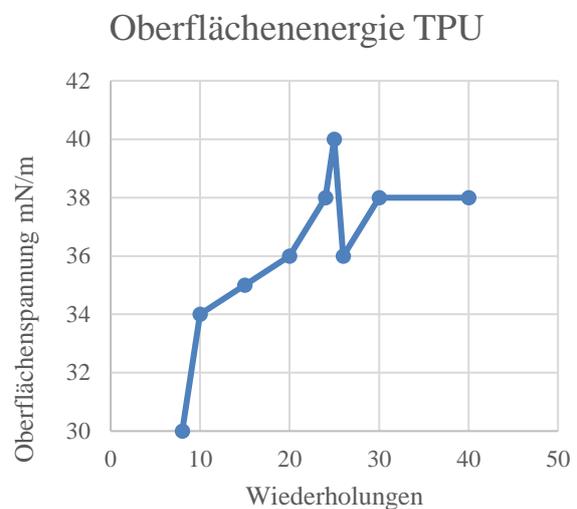


Diagramm 4: Oberflächenenergie TPU-Folie

Unbehandelte Folien wiesen eine Oberflächenenergie von unter 30 mN/m auf. Ab zehn Zyklen konnte eine signifikante Steigerung beobachtet werden, wobei bei 25 Wiederholungen ein Maximalwert von etwa 40 mN/m erreicht wurde. Darüber hinaus führten zusätzliche Wiederholungen nicht zu weiterer Verbesserung; vereinzelt waren sogar Verschlechterungen zu erkennen. Ein subjektiver Messfehler ist hier nicht auszuschließen.

Deshalb wurde zur Verifizierung eine Kontaktwinkelmessung durchgeführt. Eine Berechnung des Kontaktwinkels ist aufgrund von unbeeinflussbarer Variablen, nicht möglich und benötigt weitere Untersuchungen. Aufgrund der Krümmung der Folie gestaltete sich die Messung des Winkels kompliziert, jedoch ist die Tendenz der Winkelmessung eindeutig.

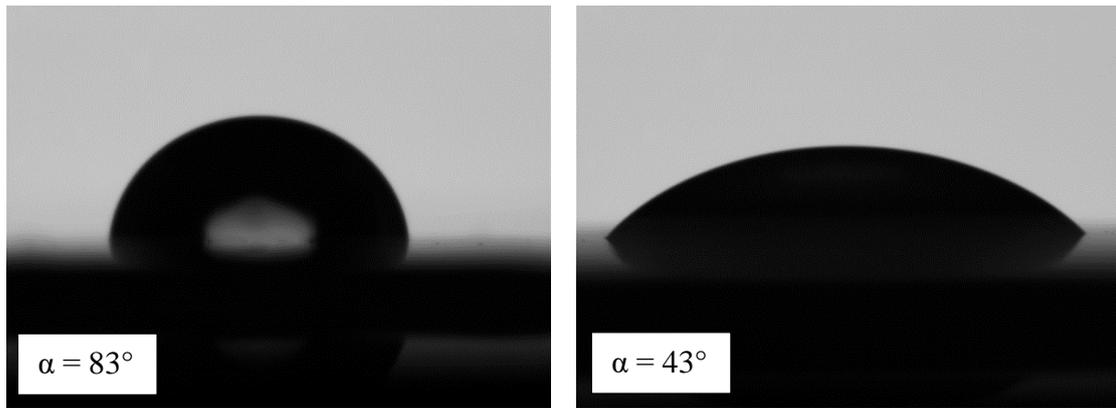


Abbildung 30: Kontaktwinkelmessung (unvor-

Abbildung 31: Kontaktwinkelmessung (vorbehandelt)

Die Messung des Winkels ergab ohne Vorbehandlung einen Winkel von $\alpha = 83^\circ$. Bei 25 Vorbehandlungsdurchgängen wurde ein Winkel von $\alpha = 43^\circ$ erreicht. Es wurde eine Wassermenge von 20 μl – mikroliter aufgetragen.

Eine Steigerung der Oberflächenenergie ist daher nicht nur durch die Testtinte, sondern auch durch eine Kontaktwinkelmessung nachgewiesen.

3.2.4 Fertigung Prepreg im Autoklaven

Anknüpfend an [Kapitel 2.1.2](#) soll folglich auch der Fertigungsprozess von Prepreg anhand der hergestellten Proben erläutert werden. Das verwendete Prepregmaterial (HexPly 8552 IM7) besteht aus unidirektionalen Kohlenstofffasern und einer duroplastischen Matrix, die während des Aushärtezyklus chemisch vernetzt wird.

Aus einer 2 Meter breiten Prepreg-Rolle wurden die Lagen in gewünschten Abmessungen herausgeschnitten. Um eine multidirektionale Kraftaufnahme zu ermöglichen, wurden Rechtecke in 0° , $\pm 45^\circ$ und 90° Faserorientierung zugeschnitten. Für die Genauigkeit der Schnitte ist ein Cutter zuständig (siehe Abbildung 32). Die aufeinanderfolgenden Lagen können je nach Belastungsfall konfiguriert und durch ihre selbstklebenden Eigenschaften stabil miteinander verbunden werden. Ein nachträgliches Korrigieren der Lagepositionen ist dadurch nur eingeschränkt möglich, weshalb ein sorgfältiges Arbeiten unerlässlich ist.



Abbildung 32: Cutter

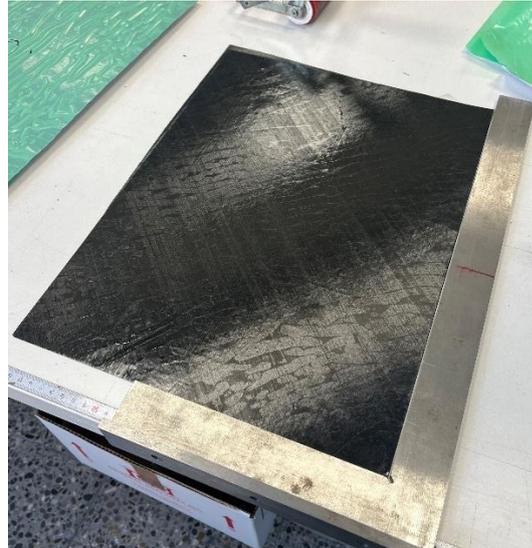


Abbildung 33: gelegtes Prepreg

Nach dem Auflegen der Prepreg-Lagen können weitere Materialien ko-laminiert werden. Dieser Prozess wird als Co-Curing bezeichnet, da alle Schichten gemeinsam ausgehärtet werden. (vgl. [Sch24, 83])

Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen im Laminat wird ein Vakuumaufbau verwendet, der die Luft zwischen den Lagen vollständig entfernt und eine dichte Packung der Faserschichten gewährleistet. Werkzeuge werden für Antihafteigenschaften mit einem Trennmittel behandelt und sorgen für eine einfache Trennung des Bauteils nach Verarbeitung. Bei komplizierten Werkzeugen wird das Prepreg schichtweise aufgelegt. Platten können auf einem flachen Untergrund mit geringem Aufwand vorgefertigt werden. Aus Aluminium können Werkzeugformen in unterschiedlichen Geometrien gefertigt werden. Bei flachen Platten werden Deckbleche auf das Prepreg gelegt, um eine gleichmäßige Dicke der Bauteile zu gewährleisten. Deckbleche werden in Trennfolie eingepackt, die sich durch Antihafteigenschaften nach Verarbeitung ohne großen Aufwand vom Bauteil lösen lässt. Zwischen Werkzeug und Bauteil kann ebenfalls Trennfolie verwendet werden.

Über Werkzeug und Bauteil wird eine Vakuumfolie gespannt und mit Siegelkitt luftdicht verschlossen. Entstehen durch die Bauteildicke hohe Absätze, könnte die Vakuumfolie in diesem Bereich reißen. Deshalb werden Korkstreifen an Übergangsstellen verwendet, um einen Druckabfall zu verhindern. Siegelkitt besteht aus Butyl und ist bis 204° C einsetzbar, was ihn für den typischen Aushärtezyklus von 180° C ausreichend qualifiziert. (vgl. [URL16])

Für den Anschluss der Vakuumpumpe wird ein Vakuumteller mit einem Vakuumstutzen verschraubt. Der Vakuumteller liegt unterhalb der Vakuumfolie.

Das Siegelkitt wird mit etwas Druck auf die nicht imprägnierten Flächen des Werkzeugs geklebt. Der Vakuumstutzen schneidet ein Loch in die Vakuumfolie und wird in den Teller geschraubt. Die herausgeschnittene Folie muss unbedingt aus dem Stutzen entfernt werden, um eine ungehinderte Evakuierung zu ermöglichen.

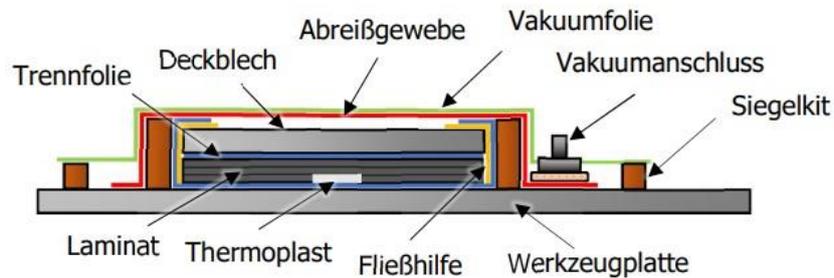


Abbildung 34: Vakuumaufbau Prepreg [Sch24]

Der Evakuierungsvorgang wird für mehrere Stunden zur Detektion von Undichtigkeiten aufrechterhalten. Der Druckabfall ist über die Messeinheit der Vakuumpumpe erkennbar.

Im Autoklaven, einem Druckbehälter mit temperaturgeregeltem Innenraum, kann ein Druck von bis zu 7 bar erzeugt werden. Dieser zusätzliche Druck verbessert die Laminatqualität, indem er verbleibende Poren schließt und die Verdichtung erhöht.

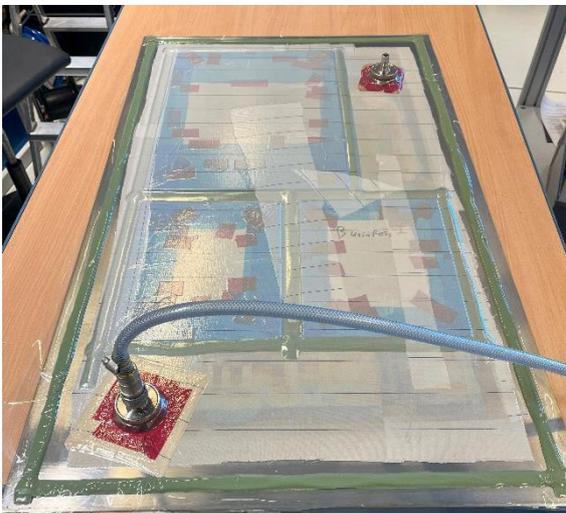


Abbildung 35: Vakuumaufbau



Abbildung 36: Autoklav DLR

Der Aushärtezyklus erfolgt gemäß materialspezifischer Parameter hinsichtlich Temperatur und Zeit, wie in Abbildung 37 dargestellt. Während des Zyklus verflüssigt sich das Harz temporär, durchdringt Zwischenräume und vernetzt anschließend chemisch zu endgültiger Matrixstruktur.

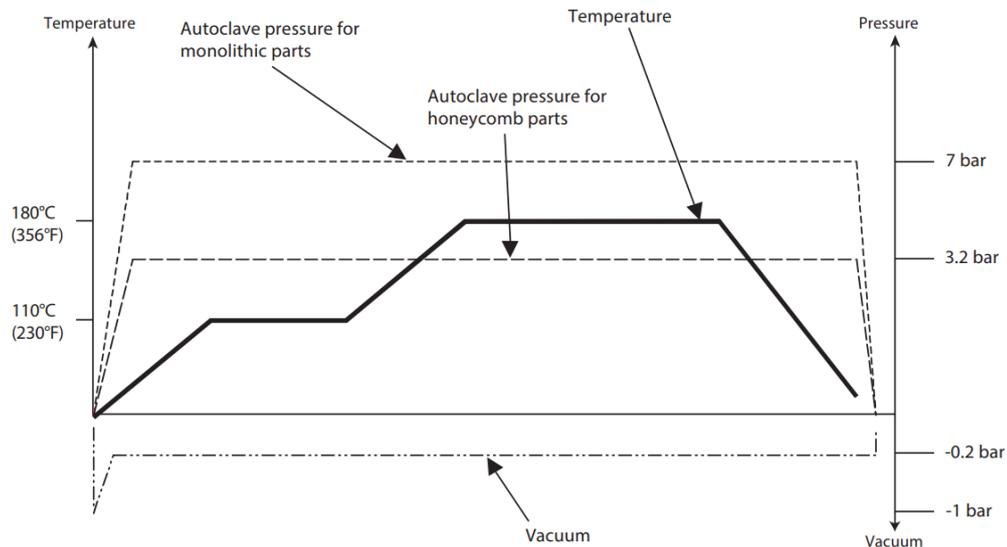


Abbildung 37: Aushärtezyklus 8552 IM7 [Live-Data-Sheet]

Nach dem Aushärteprozess kann das Bauteil entformt und in die gewünschte Geometrie zugeschnitten werden. Zur Bearbeitung von CFK empfiehlt sich der Einsatz von Diamantsägeblättern mit Wasserspülung oder ein Wasserstrahlschneidverfahren, um die entstehenden gesundheitsgefährdenden Kohlenstoffpartikel zu binden.

3.2.5 Fertigung Kopfzugproben

Die Herstellung der Kopfzugproben erfolgt analog zur in [Kapitel 3.2.4](#) beschriebenen Laminierungsmethode. Vor dem Auflegen der Deckplatte werden jedoch die aus [Kapitel 3.2.3](#) vorbehandelten TPU-Folien co-cured.

Die Folien wurden auf 16-lagiges Prepreg-Laminat appliziert und im Autoklav ausgehärtet. Nach dem Entformen wurden die Proben in die definierten Probengeometrien (25mm x 25mm) zugeschnitten. Um die für den Zugversuch notwendige senkrechte Krafteinleitung sicherzustellen, wurden Aluminiumstempel mit einem M5-Gewinde bei 130° C über 2,5 Stunden mittels eines Filmklebstoffs (Loctite EA9695) fixiert. Ein Zentrierwerkzeug ermöglichte eine exakte Positionierung der Stempel während der Klebung.

Insgesamt wurden 60 Proben gefertigt, um eine statistisch belastbare Aussagekraft der Testergebnisse zu gewährleisten.



Abbildung 38: Kopfzugproben Fertigungsverlauf

3.2.6 Design und Fertigung Kopfzugvorrichtung

Die Kopfzugproben wurden bisher in einer Prüfzentrifuge getestet, wobei ein Gewicht an einem M5 Gewinde bei ausreichender Zentrifugalkraft zum Versagen der Verbindung führte. Dieses Testverfahren gab jedoch keine Auskunft über die Dehnungswerte der Probe, weshalb eine Spannvorrichtung für eine Zwick-Roell-Zugmaschine entwickelt wurde.

Die Vorrichtung wurde so konstruiert, dass sie die Kräfte auf die Probenfläche verteilt und eine symmetrische Krafteinleitung über zwei Einspannzapfen ermöglicht. Nach Abschluss der Konstruktion konnten die technischen Zeichnungen für die manuelle Fertigung auf einer 3-Achs-Fräsmaschine erstellt werden.



Abbildung 39: Kopfzugvorrichtung

Die Spannvorrichtung besteht aus Edelstahl und verwendet Bolzenverbindungen zur Befestigung an der Zugmaschine. Beidseitig integrierte Gelenkköpfe kompensieren potenzielle Winkelfehler. Die Probe wird über das aufgeklebte M5-Gewinde in eine Langmutter geschraubt und in die Vorrichtung eingeschoben.

Mit dieser Vorrichtung lassen sich Kopfzugversuche nun effizient, reproduzierbar und mit deutlich reduziertem Arbeitsaufwand durchführen – ein signifikanter Vorteil bei einer hohen Anzahl an Testkörpern.

3.2.7 Kopfzugversuche

Nach Einspannen der Probe wird eine Vorspannkraft von 10 N angefahren. Diese Kraft ist notwendig, um ungewollte Bewegungen der Probe während des Testlaufs zu verhindern. Die Zugmaschine von Zwick und Roell (Modell: Z5.0 TS) nimmt die Zugfestigkeit und Dehnung mit einer Kraftmessdose auf. Die Ergebnisse werden zeitgleich auf einem Computer aufgezeichnet und gespeichert. Das Prüfprogramm erstellt automatisch ein Kraft-Weg-Diagramm für die getesteten Proben.

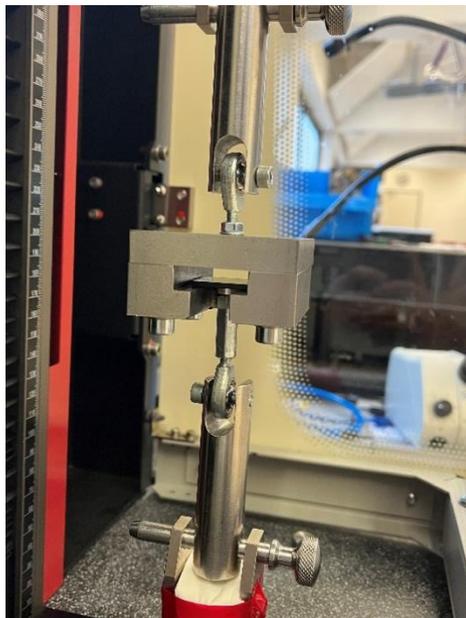


Abbildung 40: Einspannung KZP

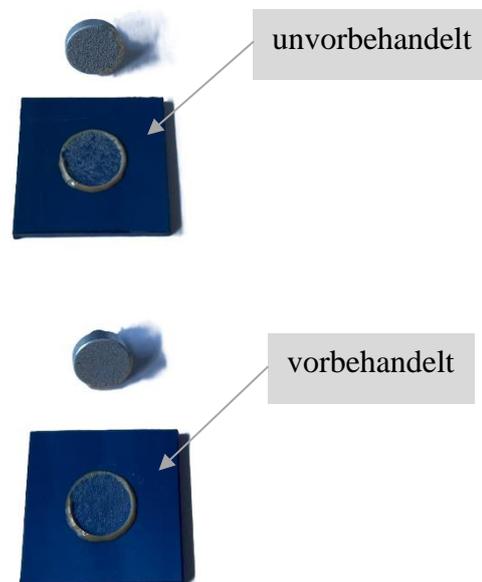


Abbildung 41: Bruchbilder KZP

Abbildung 40 zeigt die Bruchbilder einer unvorbehandelter und einer vorbehandelter Kopfzugprobe. Bei Analyse der Bruchstelle ist bei beiden ein kohäsives Versagen feststellbar.

3.3 Zwischenauswertung

Die Kopfzugprobe mit der höchsten ermittelten Zugfestigkeit zeigt eine ausgeprägte Adhäsion zwischen TPU-Folie und Substratmaterial. Um in den nachfolgenden Hauptversuchen reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse sicherzustellen, sollte die TPU-Folie künftig mit der gleichen Anzahl an Vorbehandlungsdurchgängen hergestellt werden wie bei dieser Probe.

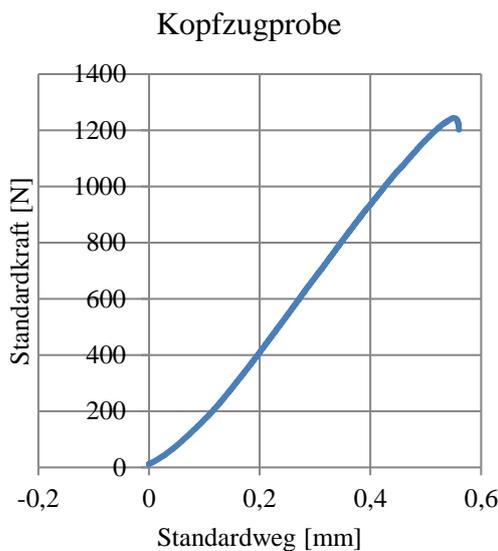


Diagramm 5: Kraft-Weg-Diagramm

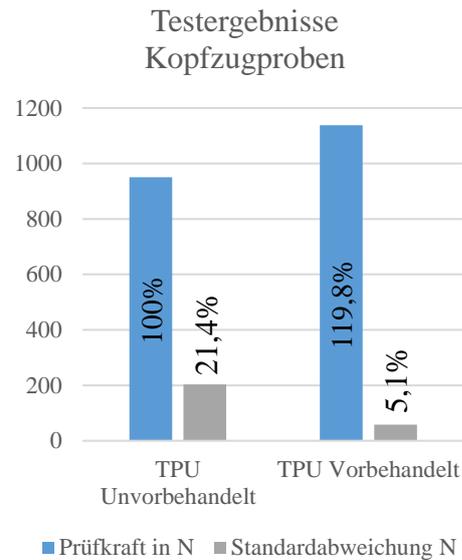


Diagramm 6: Testergebnisse KZP

Das vorliegende Kraft-Weg-Diagramm stammt von der Probe mit der höchsten gemessenen Zugfestigkeit. Zwei zentrale Kennwerte lassen sich aus dieser Darstellung ableiten: die Steifigkeit (vgl. Federkonstante Oberflächenzähmodifikation) sowie das Elastizitätsmodul.

Bis zu einer Längung von 0,5 mm stieg die Zugkraft linear von der Vorspannkraft (10 N) auf 1170 N an. Da keine ausgeprägte plastische Längung der Probe in der Kraft-Weg-Kurve zu erkennen ist, wird für die Berechnung von einem elastischen Verformungsverhalten ausgegangen. Unter Anwendung des Hooke'schen Gesetzes ergibt sich für die Steifigkeit D:

$$D = \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{F - F_0}{x - x_0} = \frac{1170\text{N} - 10\text{N}}{0,5\text{ m}} = 2320\text{ N/mm} \quad \text{Gl. 17}$$

Darüber hinaus kann das Elastizitätsmodul E der Probe bestimmt werden. Der verwendete Aluminiumstempel hat einen Durchmesser von 10mm. Die Probe versagte bei einer maximalen Zugkraft von 1240 N und einer Dehnung von 3,7 %.

Die resultierende Zugspannung σ berechnet sich zu:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1240N}{\frac{\pi * (10mm)^2}{4}} = 15,78 N/mm^2 \quad \text{Gl. 18}$$

Daraus ergibt sich für das Elastizitätsmodul:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{15,78 N/mm^2}{0,037} = 426,5 N/mm^2 \quad \text{Gl. 19}$$

Zur quantitativen Bewertung des Effekts der Vorbehandlung wurden die Ergebnisse zweier Probeserien – unvorbehandelt und vorbehandelt – miteinander verglichen. Aus beiden Gruppen wurden der Mittelwert sowie die Standardabweichung der maximalen Zugfestigkeit berechnet. Die grafische Darstellung in Diagramm 6 veranschaulicht die Verteilung der Ergebnisse. Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächenvorbehandlung der TPU-Folie zu einer höheren Zugfestigkeit und zu einer geringeren Streuung der Messergebnisse führt.

„Die Corona-Vorbehandlung von TPU erhöht die Oberflächenenergie und steigert dadurch die Adhäsion in Klebverbindungen.“

Die Steigerung der Zugfestigkeit nach Vorbehandlung lässt sich somit auf eine verbesserte Adhäsion durch die Corona-Vorbehandlung zurückführen. Aufgrund von Steigerung der intermolekularen Bindungen und chemischer Aktivierung durch die Corona-Vorbehandlung entstehen höhere Zugfestigkeiten. Die These konnte somit durch die experimentellen Befunde verifiziert werden.

3.4 Hauptversuche

Auf Basis der Voruntersuchungen können nun die Hauptversuche durchgeführt werden. Ziel ist die Herstellung und Prüfung von SLS-Proben mit TPU-Oberflächenzähmodifikation (Surface-Toughening) bei Raumtemperatur (23° C) sowie bei -55 °C.

Die übergeordnete Forschungshypothese lautet:

„Eine Oberflächenzähmodifikation mit TPU reduziert Schälbelastungen und wirkt dadurch festigkeitssteigernd in SLS-Proben.“

Laut dem in [Kapitel 2.4](#) dargestellten FEM-Modell treten in einschnittigen Überlappungsklebung die höchsten Belastungen kurz vor der Fügestelle auf. Aufgrund der Bauteilverformung entstehen dort Schälbeanspruchungen, die zum Versagen des Klebstoffs führen können. Durch den Einsatz von TPU soll in diesem kritischen Bereich eine Spannungsreduktion erzielt und somit eine höhere Festigkeit erreicht werden.

3.4.1 Fertigung SLS-Proben

Die Fertigung der Proben erfolgt analog zum Verfahren in [Kapitel 3.2.4](#). Nach dem Legen des Prepregs wird ein 10 mm breiter TPU-Folienstreifen aufgelegt und im Co-Curing-Prozess mitgehärtet. Um eine Maßhaltigkeit des Streifens zu gewährleisten, wurde dieser mit einem Präzisionscutter geschnitten. Die TPU-Folie wurde vor der Laminierung mittels 25 Wiederholungen unter Verwendung der Corona-Vorbehandlungsanlage präpariert.

Anschließend erfolgte der Vakuumaufbau und die Aushärtung der Platte im Autoklaven. Nach dem Zuschnitt wurden die Platten überlappend miteinander verklebt. Für eine optimale Adhäsion wurde die Atmosphärendruck-Plasmabehandlung eingesetzt. Es wurde der Filmklebstoff Loctite EA9695 verwendet.

Um Winkelfehler während des Zugscherversuchs zu vermeiden, wurden Aufleimer aufgebracht. Der Verklebevorgang wurde ebenfalls im Vakuum durchgeführt, um einen konstanten Anpressdruck sicherzustellen. Die Aushärtung des Filmklebstoffs erfolgte bei 130°C über 2,5 Stunden. Nach dem Entformen wurden die Proben zugeschnitten, beschriftet und gemäß ASTM D 5868 vermessen (siehe Anhang: Vermessungsprotokoll).

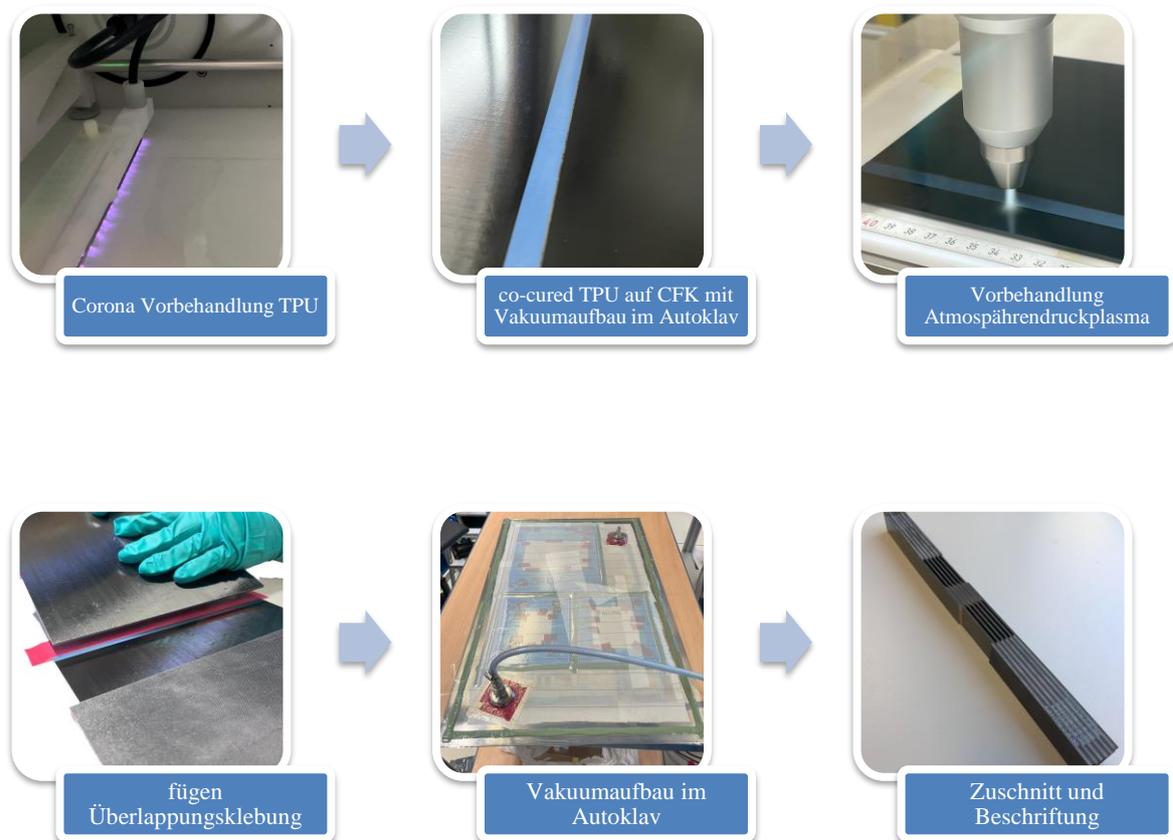


Abbildung 42: Fertigung SLS-Proben

3.4.2 Schliffbilder SLS-Proben

Zur qualitativen Beurteilung der Klebverbindungsgüte wurden metallographische Schliffbilder der Überlappungsklebung angefertigt. Hierzu wurden 20 mm breite Segmente der SLS-Proben in ein spezielles Harz eingebettet. Nach vollständiger Aushärtung des Harzes erfolgten das Schleifen und anschließende Polieren der Probenoberfläche, um eine mikroskopische Analyse zu ermöglichen.

Die Untersuchung der Proben erfolgte bei einer 2500-fachen Vergrößerung mittels Lichtmikroskopie. In den analysierten Schnitten konnten keine Abspaltungen an den Grenzflächen zwischen CFK, Filmklebstoff und TPU-Folie festgestellt werden. Visuell lässt sich somit zunächst auf eine gute Adhäsion der Fügepartner schließen.

Auffällig waren jedoch einzelne Lufteinschlüsse (sogenannte Lunken) im Bereich des Filmklebstoffs, welche potenziell die mechanische Integrität der Verbindung negativ

beeinflussen könnten. Des Weiteren befand sich ausgetretener Klebstoff (beigefarben) außerhalb der Klebefläche. Da dieser hohl ist, übernimmt er keine signifikante Kraftübertragung.

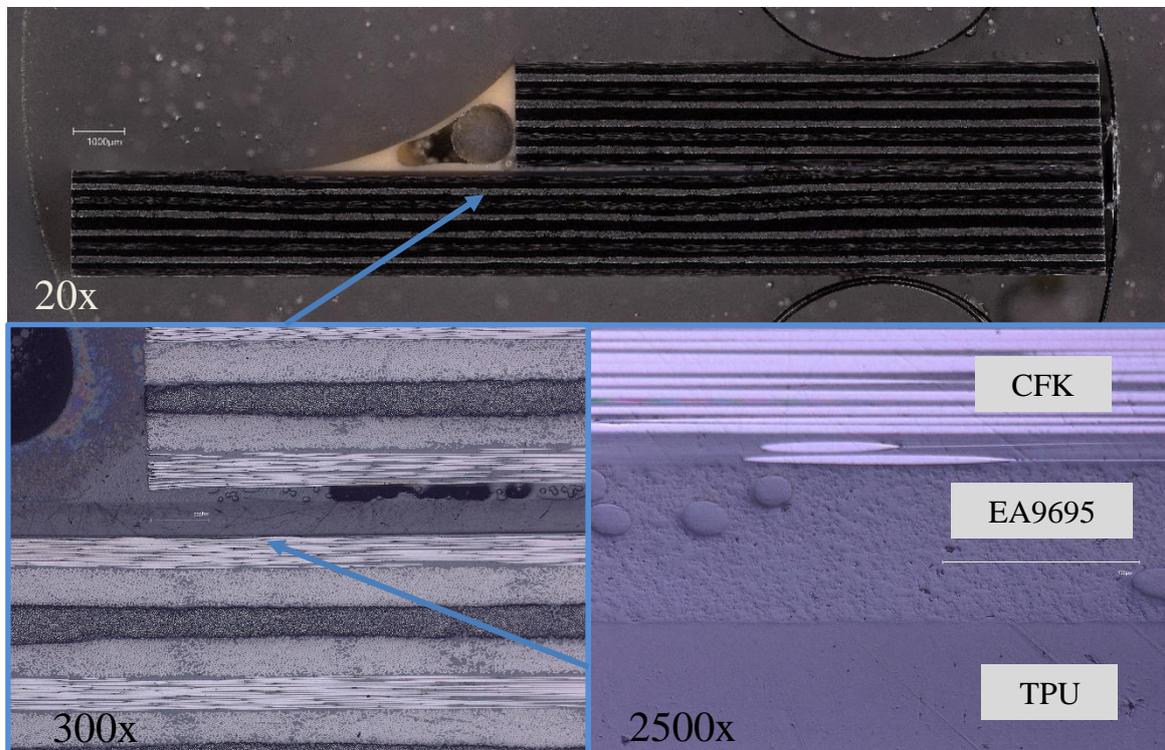


Abbildung 43: Schliffbild SLS-Probe

3.4.3 SLS Zugscherversuch

Zur quantitativen Bestimmung der mechanischen Eigenschaften oberflächenzähmodifizierter Klebverbindungen wurden experimentelle Zugscherversuche nach dem SLS-Prinzip (Single-Lap-Shear) durchgeführt. Hierbei wurde ein thermoplastisches Polyurethan (TPU) als Surface-Toughening-Material verwendet. Aufgrund seiner niedrigen Glasübergangstemperatur von (ca. $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$) besitzt TPU auch bei tiefen Temperaturen eine hohe Zähigkeit, wodurch ein verbesserter Verbundmechanismus bei Kälte zu erwarten ist. Frühere Untersuchungen mit PVDF als Toughening-Material zeigten bereits die grundsätzliche Wirksamkeit dieses Konzepts.

Die Prüfung erfolgte gemäß der Prüfnorm ASTM D 5868 unter konstanten Geometrie- und Versuchsparametern. Zur Reduktion von Winkelfehlern und zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Lastverteilung wurden die Probekörper mit sogenannten Aufleimern versehen. Die

Versuchsreihe umfasste insgesamt neun Proben – sechs bei Raumtemperatur (23°C) und drei bei -55°C.

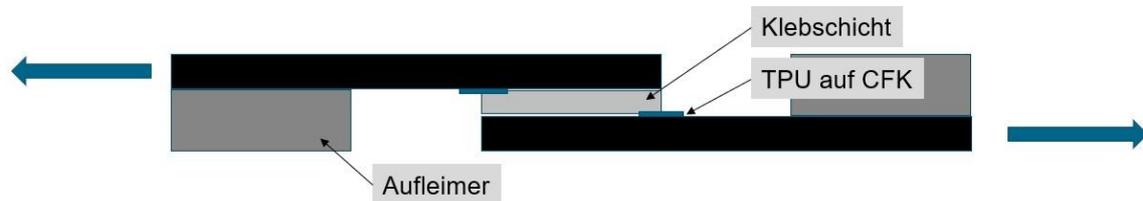


Abbildung 44: SLS-Probekörper mit TPU-Surface-Toughening und Aufleimer

Die Prüfkörper wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,5 mm/min belastet. Die Versuche bei Raumtemperatur wurden auf einer Zwick Z400 Universalprüfmaschine durchgeführt, während für die Tieftemperaturprüfungen eine Zwick 1484 mit integrierter Temperierkammer verwendet wurde. Die Kühlung der Kammer erfolgte mittels flüssigen Stickstoffs, wobei ein automatisiertes System die Temperaturregelung bei -55°C sicherstellte.



Abbildung 45: SLS bei Raumtemperatur



Abbildung 46: SLS bei -55°C

Vor Beginn jedes Versuchs wurde eine definierte Vorspannkraft von 100 N aufgebracht. Anschließend erfolgte die Belastung bis zum Versagen der Verbindung. Mittels Kraftmessdose wurden die Kraft-Weg-Diagramme sowie Bruchkräfte aufgezeichnet, die anschließend zur Bewertung der Klebverbindung und zur Analyse der Bruchmechanismen nützlich sein sollten.

4 AUSWERTUNG

Die Auswertung der Hauptversuche stellt den zentralen Teil dieser Arbeit dar. Die zuvor beschriebene Probenpräparation sowie die mechanischen Prüfungen münden in der nun folgenden Analyse. Anhand der aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramme und Bruchbilder soll die Evaluierung der aufgestellten Hypothese stattfinden.

4.1 Ergebnisauswertung

Die Kraft-Weg-Kurven sind aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Prüfmaschinen und Spannsysteme nur eingeschränkt direkt miteinander vergleichbar. Insbesondere Setzvorgänge in den Spannvorrichtungen führten zu systematischen Abweichungen im gemessenen Verformungsverhalten. Aus diesem Grund sieht der Verlauf der Kraft-Weg-Kurven unterschiedlich aus. Die Zugfestigkeit hingegen stellt einen vergleichbaren und übergeordneten Kennwert dar.

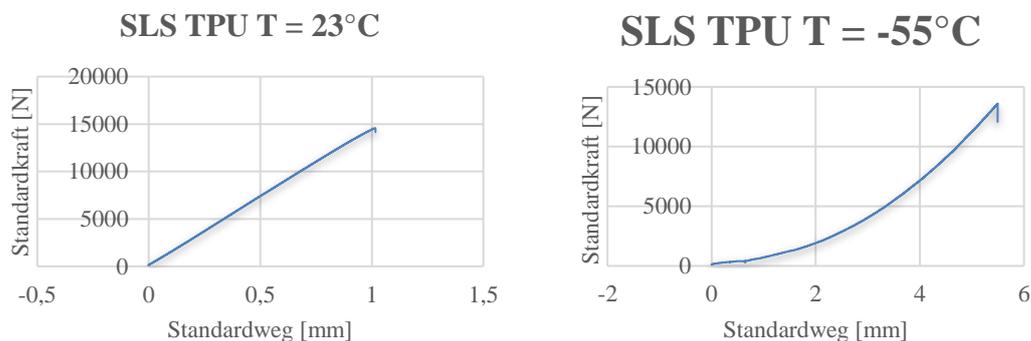


Diagramm 7: Kraft-Weg-Kurve $T = 23^{\circ}\text{C}$ Diagramm 8: Kraft-Weg-Kurve $T = -55^{\circ}\text{C}$

Trotz der signifikanten Temperaturunterschiede lagen die gemessenen Zugfestigkeiten der untersuchten SLS-Proben mit TPU in einem ähnlichen Bereich. Interessant war der Unterschied zwischen PVDF- und TPU-Oberflächenzähmodifikation:

- PVDF-SLS-Proben wiesen bei Raumtemperatur eine deutlich höhere Verbindungsfestigkeit auf. Allerdings fand bei -55°C ein drastischer Rückgang der Festigkeit statt, was auf das spröde Verhalten von PVDF unterhalb seiner Glasübergangstemperatur zurückzuführen ist.

- TPU-SLS-Proben erreichten bei Raumtemperatur geringere Zugfestigkeiten, konnten jedoch bei -55°C eine vergleichsweise hohe Festigkeit aufrechterhalten. Dies lässt sich auf die niedrige Glasübergangstemperatur von TPU (ca. -70°C) zurückführen, wodurch das Material auch bei tiefen Temperaturen noch eine gewisse Zähigkeit aufweist. Gleichzeitig zeigte sich bei diesen Proben eine geringere Streuung der Messergebnisse, was ein präzises Ergebnis zur Folge hat.

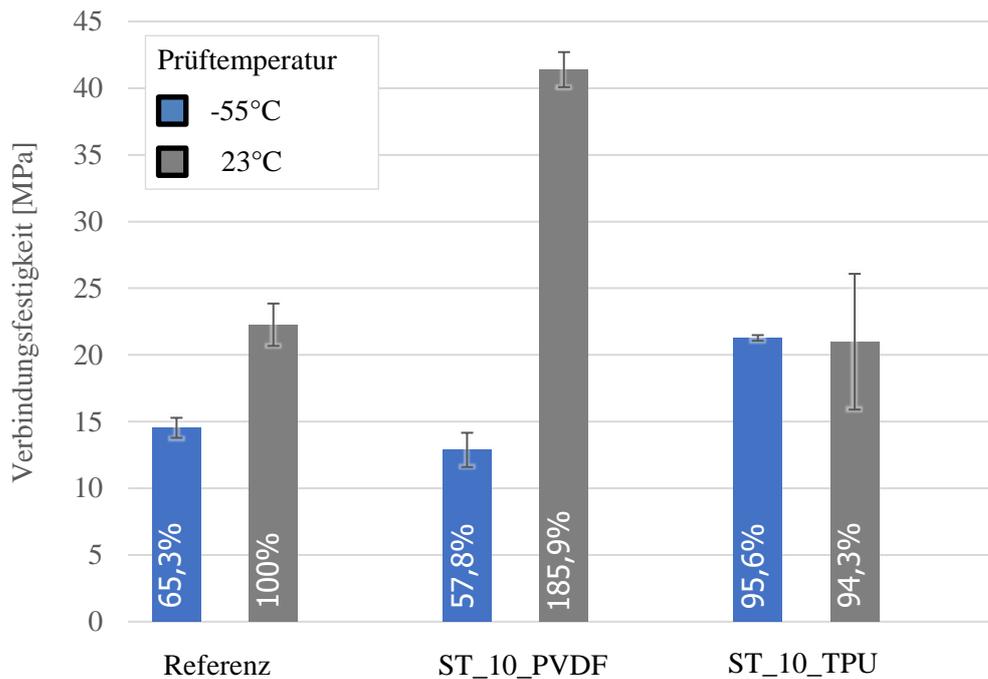


Diagramm 9: Einfluss der Prüfkörpertemperatur bei PVDF und TPU

Prinzipiell wäre bei tiefen Temperaturen ein spröderes Verhalten der Klebverbindung zu erwarten – wie es bei PVDF der Fall war. Im Fall von TPU blieb der Unterschied in der Zugfestigkeit zwischen Raumtemperatur und -55°C jedoch gering, was auf das temperaturstabile Deformationsverhalten des TPUs hinweist.

Die Analyse der Bruchflächen zeigt ein überwiegend kohäsives Versagen innerhalb des Filmklebstoffs. Einzelne kleine Delaminationen des TPU-Streifens traten bei -55°C auf. Ein ideales Versagensbild im Sinne der Oberflächenzähmodifikation wäre eine großflächige Delamination zwischen TPU-Streifen und CFK-Substrat, was auf eine effektive Energieabsorption durch das Surface-Toughening-Material hinweisen würde.

Da die Kopfzugversuche sowohl die SLS-Proben ein überwiegend kohäsives Versagen zeigten, weist dies auf eine gute Adhäsion zwischen TPU und CFK-Substrat hin.

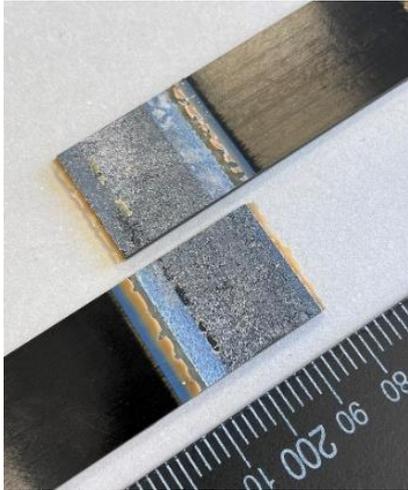


Abbildung 47: Bruchbild 23°C

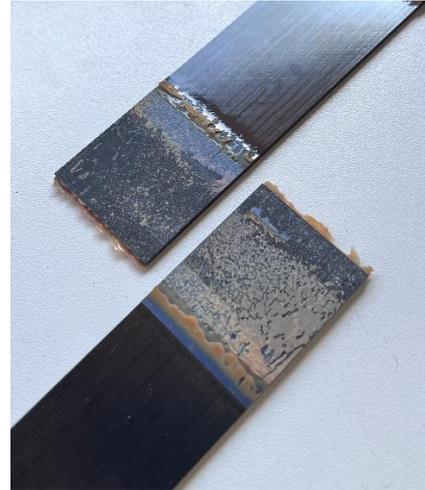


Abbildung 48: Bruchbild -55°C

Die Hypothese lautete:

„Eine Oberflächenzähmodifikation mit TPU reduziert Schälbelastungen und wirkt dadurch festigkeitssteigernd in SLS-Proben.“

Diese Hypothese kann teilweise bestätigt werden. Bei niedrigen Temperaturen konnte eine Reduzierung der Schälbeanspruchung sowie eine Steigerung der Bruchlast beobachtet werden. Dies ist auf das geringere Deformationsverhalten des TPU-Streifens bei niedrigen Temperaturen zurückzuführen. Bei Raumtemperatur hingegen zeigte TPU ein duktileres Verhalten, das zu größeren Verformungen führte. Da sich TPU, CFK und Klebstoff unterschiedlich dehnen, entstehen im Klebstoff Spannungsspitzen, die zur Rissbildung und letztlich zum Versagen führen. Erst bei tieferen Temperaturen verringert sich die Dehnbarkeit des TPU, wodurch der gewünschte Oberflächenzähmodifizierende-Effekt entsteht.

Die Federsteifigkeit soll anhand des Elastizitätsmoduls von TPU bei -55°C aus Diagramm 2 unter Verwendung von Gleichung 9 berechnet werden. Die Federsteifigkeit des Surface-Toughening bei Raumtemperatur wurde in Gleichung 9 bereits berechnet.

$$\frac{D_{\text{Klebstoff}}}{D_{ST}} = \frac{\frac{5000 \text{ MPa} \cdot A}{t}}{\frac{1300 \text{ MPa} \cdot A}{t}} = \frac{5000}{1300} = 3,846 \approx 4 \quad \text{Gl. 9}$$

$$D_{ST} = \frac{1}{4} \cdot D \quad \text{Gl. 10}$$

Bei -55°C besitzt TPU ein Elastizitätsmodul von ca. 2400 MPa.

Das Elastizitätsmodul des Filmklebstoffs beträgt bei -55°C ca. 4600 MPa.

$$\frac{D_{\text{Klebstoff}}}{D_{ST}} = \frac{\frac{4600 \text{ MPa} \cdot A}{t}}{\frac{2400 \text{ MPa} \cdot A}{t}} = \frac{4600}{2400} = 1,92 \approx 2 \quad \text{Gl. 20}$$

$$D_{ST} = \frac{1}{2} \cdot D \quad \text{Gl. 21}$$

Durch den Temperaturunterschied hat sich die Federsteifigkeit verdoppelt. Da das TPU seine Glasübergangstemperatur noch nicht erreicht hat, zeigt TPU noch kein sprödes Verhalten wie PVDF bei -55°C . Dies erklärt die beobachtete Temperaturstabilität der TPU-SLS-Proben.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Zusammenfassend soll der Wissensgewinn dieser Arbeit in Bezug auf die Kernaussagen wiedergegeben werden.

5.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die experimentelle Untersuchung der Wirksamkeit thermoplastischen Polyurethans (TPU) als Oberflächenzähmodifikation für strukturelle Klebverbindungen mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Zur Erarbeitung eines fundierten Verständnisses über die relevanten Fertigungsverfahren, Werkstoffe und Vorbehandlungsverfahren wurde zunächst eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Diese zeigte eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Verbesserung der Festigkeit von Klebverbindungen auf.

Die experimentellen Untersuchungen teilten sich in Vor- und Hauptversuche auf, wobei die Prüfverfahren sowie Probengeometrien im Vorfeld festgelegt wurden.

In den Vorversuchen sollte der Einfluss einer Corona-Vorbehandlung auf die Adhäsion von TPU-Folien auf CFK-Substraten untersucht werden – Konfigurationen aus nicht vorbehandelter Folie und Steigerung der Vorbehandlungsdurchläufe wurden vor Applikation auf ihre Oberflächenenergie getestet. Die zugrunde liegende These lautete:

„Die Corona-Vorbehandlung von TPU erhöht die Oberflächenenergie und steigert dadurch die Adhäsion in Klebverbindungen.“

Die Ergebnisse bestätigten eine Steigerung der Adhäsion – eine Erhöhung der Zugfestigkeit um nahezu 20 % unterstreicht das Potenzial der Corona-Vorbehandlung. Die entwickelten Konzepte zur Vorbehandlung sowie die Kopfzugprobenaufnahme bieten eine Grundlage für zukünftige Untersuchungen neuartiger Surface-Toughening-Materialien. Auf diese Weise können reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Die überwiegend kohäsiven Versagensbilder deuten darauf hin, dass eine zuverlässige Aussage der Adhäsionsgrenze erst bei Delamination der TPU-Folie vom CFK-Substrat getroffen werden kann.

Darauf aufbauend wurde die potentielle, festigkeitssteigernde Wirkung der TPU-Oberflächenmodifikation in Single-Lap-Shear-(SLS-)Proben analysiert. Die Probengeometrien und Prüfnormen orientierten sich an bewährten Versuchen mit PVDF, die bereits

vielversprechende Resultate lieferten (vgl. [Sch24]). Diagramm 2 zeigt die Veränderung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit von der Temperatur von PVDF, TPU und Filmklebstoff. Im Vergleich zu PVDF bleibt TPU weiterhin elastisch, selbst bei niedrigen Temperaturen. Die dazugehörige These lautete:

„Eine Oberflächenzähmodifikation mit TPU reduziert Schälbelastungen und wirkt dadurch festigkeitssteigernd in SLS-Proben.“

Die SLS-Proben lieferten bei Raumtemperatur sowie bei -55°C fast gleiche Zugfestigkeiten. Zwar konnte TPU bei Raumtemperatur nicht die Zugfestigkeiten von PVDF übertreffen, jedoch zeigte sich gerade bei tiefen Temperaturen – wie sie im Luftfahrtbetrieb auftreten – die bisher höchste Zugfestigkeit. Wiederholt war ein überwiegend kohäsives Versagen zu erkennen.

Es ließe sich argumentieren, dass das beobachtete Versagen auf eine unzureichende Festigkeit des verwendeten Klebstoffs zurückzuführen ist. Jedoch sollte in diesem Zusammenhang das mechanische Wirkprinzip der Oberflächenzähmodifikation in Form des Federmodells erneut in Betracht gezogen werden. Mit abnehmender Temperatur erhöht sich die Steifigkeit der TPU-Folie, wodurch ein Versagen der Klebverbindung infolge einer Versprödung wahrscheinlicher wird. Die Berechnungen gemäß Gleichung 10 und Gleichung 21 verdeutlichen die temperaturabhängige Veränderung des Steifigkeitsverhältnisses zwischen TPU und Klebstoff. Bei zu großer Dehnung kommt es zu Rissbildung im Klebstoff, die schließlich zu einem Abschälen der Klebschicht führt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Wirksamkeit der Oberflächenzähmodifikation bei übermäßig duktilen Surface-Toughening-Materialien begrenzt ist.

5.2 Schlussfolgerung

Zukünftige Untersuchungen sollten die Temperaturabhängigkeit weitergehend analysieren, etwa durch Tests bei noch niedrigeren Temperaturen (z. B. -70°C), um festzustellen, ob sich das Steifigkeitsverhältnis weiter zugunsten der Oberflächenzähmodifikation verschiebt.

Auch die Wahl eines bei Raumtemperatur duktileren Klebstoffs mit vergleichbaren Eigenschaften bei tiefen Temperaturen wie des Filmklebstoffs EA9695 könnte eine höhere Dehnung ermöglichen. Eine Delamination der TPU-Folie vom CFK-Substrat würde Aufschluss über die Belastungsgrenze der co-cured gefertigten Verbindung geben.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob die kristallinen Eigenschaften von TPU (vgl. [Hep92, 245]) mit der kristallinen Gitterstruktur des CFK in Wechselwirkung treten können – eine makroskopische Analyse mittels geeigneter Verfahren könnte diesbezüglich Aufschluss geben.

Die gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen das Entwicklungspotential von TPU als Oberflächenzähmodifikation und bieten eine Grundlage für weiterführende Forschungen. Forschung ist ein iterativer Prozess – und jede weitere Erkenntnis bringt uns der optimalen Lösung ein Stück näher.

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Abbildungs- und Diagrammverzeichnis

Abbildung 1: Strukturierung der Arbeit	5
<i>Abbildung 2: CFK Rumpfteil [URL06]</i>	8
<i>Abbildung 3: Roboterarm Fertigung [URL06]</i>	8
Abbildung 4: Faseranteil Schliffprobe [DLR]	9
<i>Abbildung 5: Last in Faserrichtung</i>	10
<i>Abbildung 6: Last entgegen Faserrichtung</i>	10
Abbildung 7: Aminhärtung mit und ohne Katalysator [Bas23]	12
Abbildung 8: TPU-Kettensegment [URL10]	13
Abbildung 9: Mechanismen der Klebverbindung – Adhäsion und Kohäsion [Seu20]	14
Abbildung 10: Gestaltungsmöglichkeiten Überlappungsklebung [Sch24]	16
Abbildung 11: Finite-Elemente-Analyse SLS	17
<i>Abbildung 12: Anlage im Einsatz [DLR]</i>	20
<i>Abbildung 13: Funktionsweise Anlage [Hab08]</i>	20
Abbildung 14: Corona-Vorbehandlung	21
<i>Abbildung 15: Oberflächenspannung Glas</i>	23
<i>Abbildung 16: Testtinte</i>	23
Abbildung 17: Kontaktwinkel	23
Abbildung 18: Verklebte CFK-Oberfläche [DLR]	25
Abbildung 19: Oberflächenzähmodifikation Federmodell [Sch24]	26
Abbildung 20: Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfung [IVK25]	29
Abbildung 21: Versagensarten Klebverbindung mit Surface Toughening	30
<i>Abbildung 22: Kopfzugprobe</i>	30
<i>Abbildung 23: Single-Lap-Shear (SLS)</i>	30
Abbildung 24: Vorbehandlung PVDF und PEEK [Sch24]	31
<i>Abbildung 25: Lineartischkonstruktion</i>	34
<i>Abbildung 26: Lineartisch</i>	34
<i>Abbildung 27: Benutzeroberfläche</i>	34
<i>Abbildung 28: Displaygehäuse</i>	34
<i>Abbildung 29: Testtinte auf Folie</i>	35
Abbildung 30: Kontaktwinkelmessung (unvorbehandelt)	36
Abbildung 31: Kontaktwinkelmessung (vorbehandelt)	36
<i>Abbildung 32: Cutter</i>	37
<i>Abbildung 33: gelegtes Prepreg</i>	37

Abbildung 34: Vakuumaufbau Prepreg [Sch24] 38

Abbildung 35: Vakuumaufbau 38

Abbildung 36: Autoklav DLR 38

Abbildung 37: Aushärtezyklus 8552 IM7 [Live-Data-Sheet] 39

Abbildung 38: Kopfbzugproben Fertigungsverlauf 40

Abbildung 39: Kopfbzugvorrichtung 40

Abbildung 40: Einspannung KZP 41

Abbildung 41: Bruchbilder KZP 41

Abbildung 42: Fertigung SLS-Proben 45

Abbildung 43: Schliffbild SLS-Probe 46

Abbildung 44: SLS-Probenkörper mit TPU-Surface-Toughening und Aufleimer 47

Abbildung 45: SLS bei Raumtemperatur 47

Abbildung 46: SLS bei -55°C 47

Abbildung 47: Bruchbild 23°C 50

Abbildung 48: Bruchbild -55°C 50

Diagramm 1: Werkstoffvergleich mit Dichte und E-Modul [URL04] 6

Diagramm 2: Härungsverlauf eines Duromers [Len20, 20] 11

Diagramm 3: Temperaturabhängigkeit Elastizitätsmodul [Sch24] 27

Diagramm 4: Oberflächenenergie TPU-Folie 35

Diagramm 5: Kraft-Weg-Diagramm 42

Diagramm 6: Testergebnisse KZP 42

Diagramm 7: Kraft-Weg-Kurve $T = 23^{\circ}\text{C}$ 48

Diagramm 8: Kraft-Weg-Kurve $T = -55^{\circ}\text{C}$ 48

Diagramm 9: Einfluss der Prüfkörpertemperatur bei PVDF und TPU 49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abbindemechanismen [Seu20] 15

Tabelle 2: Vor- und Nachteile Klebverbindungsgeometrien 17

Tabelle 3: Einteilung Oberflächenbehandlung [Hab08] 18

Tabelle 4: Young-Regel 24

LITERATUR

- [ASTM5868] NORM ASTM D 5868: TEST METHOD FOR LAP SHEAR
- [Bar87] BARTL, H., FALBE, J. (HRSG.): *Methoden der Organischen Chemie*. 4. Auflage, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1990.
- [Bas23] BASHIR, M.: *Cure Kinetics of Commercial Epoxy-Amine Products with ISO-Conversional Methods, Jotun Performance Coatings*, Sandefjord, Norwegen, Forschungsbericht, 2023.
- [Di110] DILLINGER, J.: *Fachkunde Metall*. 56. Auflage, Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel Verlag, 2010.
- [EAS24] EASA: *Easy Access Rules for Initial Airworthiness and Environmental Protection (Regulation (EU) No 748/2012)*, 2024
- [Hab08] HABENICHT, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, Institut für Kunststoffverarbeitung, 6. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 2008.
- [Hep92] HEPBURN, C.: *Polyurethane Elastomers*. 2. Auflage, Dordrecht, Niederlande, Springer Verlag Niederlande, 1992.
- [Hex25] HEXCEL: Prepreg Data Sheet (8552 IM7), URL: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg>, abgerufen am 27.05.2025.
- [IVK25] INDUSTRIEVERBAND KUNSTSTOFFE E.V.: Leitfaden Klebstoffe, URL: <https://leitfaden.klebstoffe.com/6-gebrauchssicherheit-der-klebung-nachweisen/6-7-langzeitbestaendigkeit/> Kleben, abgerufen am 11.06.2025.
- [Len20] LENGSELD, H.: *Faserverbundwerkstoffe; Prepregs und ihre Verarbeitung*. 2. Auflage, München, Hanser Verlag, 2020.
- [Sch24] SCHOLLERER, M.: *Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2023.
- [Seu20] SEUL, T.; ROTH, S. (HRSG.): *Kunststoffe in der Medizintechnik; Vorschriften und Regularien, Produktrealisierung, Herstellungsprozesse, Qualifizierungs- und Validierungsstrategien*. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [The25] THEMENBESCHREIBUNG: *Experimentelle untersuchungen zu TPU-zähmodifizierten verklebten Faserverbundwerkstoffen*, 2025.
- [TuD24] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN: Kontaktwinkel- und Oberflächenenergiebestimmung; Professur für Makromolekulare Chemie, 2024. URL: https://tu-dresden.de/mn/chemie/mc/mc1/ressourcen/dateien/studium/bachelor-chemie/mc-praktikum-2024_2025/Kontaktwinkel_Oberflae-chenergiebestimmung_2024.pdf?lang=de, abgerufen am 28.05.2025.

- [URL01] REGENWALD.ORG: Aluminium; leichtes Metall – schwere Schäden [online], 2025. URL: <https://www.regenwald.org/themen/aluminium>, abgerufen am 10.04.2025.
- [URL02] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: Flugzeuge aus Glas und Kohle? [online], 2025. URL: <https://www.dlr.de/de/next/luftfahrt/technik/flugzeuge-aus-glas-und-kohle/>, abgerufen am 10.04.2025.
- [URL03] UNIVERSITÄT PADERBORN: Masterstudiengang Materialwissenschaften [online], 2025. URL: <https://www.dlr.de/de/next/luftfahrt/technik/flugzeuge-aus-glas-und-kohle/>, abgerufen am 10.04.2025.
- [URL04] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: Flugzeuge aus Glas und Kohle? [online], 2025. URL: <https://www.dlr.de/de/next/luftfahrt/technik/flugzeuge-aus-glas-und-kohle/>, abgerufen am 13.04.2025.
- [URL06] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: MFFD – Thermoplaste statt Aluminium beim Flugzeugbau [online], 2025. URL: <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/03/mffd-thermoplaste>, abgerufen am 02.05.2025.
- [URL07] PRIVATE HOCHSCHULE GÖTTINGEN: Wie werden Kohlenstofffasern hergestellt? [online], 2025. URL: <https://www.pfh.de/blog/wie-werden-kohlenstofffasern-hergestellt>, abgerufen am 10.05.2025.
- [URL08] TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN: Faservolumenanteil [online], 2025. URL: <http://svfs.ifm.tu-berlin.de/faservolumenanteil.html>, abgerufen am 20.05.2025.
- [URL09] CHEMIE.DE: Wie werden Kohlenstofffasern hergestellt? [online], 2025. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Viskosität.html>, abgerufen am 20.05.2025.
- [URL10] SYSTEMSEALS: Polyurethane [online], 2025. URL: <https://www.systemseals.com/materials/polyurethane/#>, abgerufen am 05.06.2025.
- [URL11] OTTOZEUS: Chemikalien-beständige Klebstoffe [online], 2025. URL: <https://www.ottozeus.com/klebstoffe/nach-anwendung/besondere-eigenschaften-z-b-bestandigkeiten/gute-chemikalienbestandigkeit.html>, abgerufen am 25.05.2025.
- [URL12] PLASMATREAT: Plasmabehandlung und Oberflächenmodifikation [online], 2025. URL: <https://www.plasmatreat.com/de/>, abgerufen am 15.05.2025.
- [URL13] TANTEC-GMBH: Die Grundlagen der Coronabearbeitung [online], 2025. URL: <https://www.tantec-gmbh.de/die-grundlagen-der-coronabearbeitung/>, abgerufen am 26.05.2025.

- [URL14] TANTEC-GMBH: Was ist Coronabehandlung? [online], 2025. URL: <https://www.tantec-gmbh.de/was-ist-corona-behandlung/>, abgerufen am 26.05.2025.
- [URL15] 3M-DEUTSCHLAND: Der Einfluss der Oberflächenrauheit [online], 2025. URL: https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/kleben-und-verbinden/schulung-weiterbildung/die-wissenschaft-des-klebens/einfluss-der-oberflaechenrauheit/, abgerufen am 29.05.2025.
- [URL16] GENERAL-SEALANTS, INC.: GS# 213 Sealant [online], 2025. URL: <https://generalsealants.com/product/gs-213-sealant/>, abgerufen am 29.05.2025.
- [URL17] LUFTHANSA-GROUP: Airbus A320-200 [online], 2025. URL: <https://www.lufthansagroup.com/de/unternehmen/flotte/lufthansa-und-regionalpartner/airbus-a320-200.html>, abgerufen am 10.05.2025.
- [Wie22] WIEDEMANN, M. (HRSG.): *Systemleichtbau für die Luftfahrt*. Braunschweig: Springer Vieweg, 2022.
- [Xi24] XI, YINGXIAO.: *Enhancing epoxy resin curing: Investigating the catalytic role of water as a trace impurity in dense crosslinked network formation using an advanced cat-GRRM/MC/MD Method*, Department of Chemistry, Tohoku University, Sendai, Japan, Forschungsbericht, 2024, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386124010115?via%3Dihub>, abgerufen am 15.05.2025.

6 ANHANG

Anhang A: Norm ASTM D 5868

Anhang B: Datenblatt Hexcel IM7 8552

Anhang C: Live Data Sheet

Anhang D: Kopfzugproben Prüfdokumentation

Anhang E: SLS-Prüfung Raumtemperatur Prüfdokumentation

Anhang F: SLS-Prüfung T= -55°C Prüfdokumentation

Anhang G: SLS-Proben Raumtemperatur Vermessungsprotokoll

Anhang H: SLS-Proben T= -55°C Vermessungsprotokoll

Anhang I: Zeichnung Gegenplatte Kopfzugprobenaufnahme

Anhang J: Zeichnung Grundplatte Kopfzugprobenaufnahme