

Diplomarbeit

Machbarkeitsstudie zum Heißverpressen von bepinnten Metallen mit glasfaserverstärktem Polyamid

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Herrn Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Koch und
Frau Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki

E308

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie
Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Robert Kodras

0647472

Wilhelminenstraße 76/28, 1160 Wien

Wien, am 01.03.2015

Danksagung

Ich möchte mich herzlichst bei folgenden Personen für Ihre Unterstützung, Motivation und kreativen Input bei der Erstellung dieser Diplomarbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt:

- Almedin Becirovic und Andreas Waldhoer für die Koordination des Projekts und das Aufschweißen der Pins.
- Alois Leitner für das Zuschneiden der bepinnten Metallplatten.
- Andreas Ehm für die Zurverfügungstellung der Faserverbundkunststoffplatten.
- Thomas Koch als Betreuer und Mentor, der immer mit einer helfenden Hand und mit Rat zur Seite stand.
- Sigrid Lüftl für ihre Unterstützung und kreativen Anregungen.
- Vasiliki-Maria Archodoulaki für die Entgegennahme und Bewertung der Arbeit.
- Sabine Dworak als Studienkollegin und gute Freundin.
- Meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten und mich immer unterstützten.

Kurzzusammenfassung

Leichtbau ist ein Konstruktionsprinzip, bei dem die Fügung von verschiedenen Materialien eine zentrale Rolle spielt. Die Wahl und Ausführung der Füge­technik beeinflusst maßgebend die Entfaltungsmöglichkeit der Eigenschaften der verwendeten Materialien. In diesem Sinne wird in dieser Diplomarbeit die Füge­technik von be­pinnten Metallplatten, gefügt durch ein Heiß­press­verfahren mit faserverstärkten Kunststoffen, genauer untersucht.

Primäres Ziel ist generell eine Machbarkeitsstudie, ob dieses Verfahren mit den verwendeten Fügema­terialien überhaupt möglich ist. Bei den verwendeten Metallen handelt es sich um Aluminium und Stahl und bei den Faserverbundkunststoffen um ein endlos- und kurzglasfaser­verstärktes Polyamid 66.

Nach Evaluierung der Machbarkeit geht es um die Ermittlung der Parameter wie Temperatur und Druck des angewendeten Füge­verfahrens, dem Heiß­pressen, um eine möglichst qualitativ hochwertige Füge­verbindung herzustellen und anschließend diese mit mechanischen Prüfverfahren zu prüfen. Wichtig für die gewählten mechanischen Prüfverfahren, bei denen es sich um den Scher-, Schäl- und Kopfzugversuch handelt, war eine für diese Versuche und Füge­technik geeignete Probengeometrie für möglichst reproduzierbare und aussagekräftige Ergebnisse zu wählen. Die Wahl der mechanischen Prüfmethoden erfolgte in Hinblick auf mögliche in der Anwendung auftretende Belastungen und einer guten Vergleichsmöglichkeit der Proben untereinander.

Die Vorversuche zur Ermittlung der optimalen Heiß­press­bedingungen wurden optisch ohne Hilfsmittel und mittels Lichtmikroskopie untersucht. Die Auswertung und Diskussion der finalen Versuche erfolgte durch grafische und tabellarische Auswertung der während der Versuche aufgenommenen Daten. Diese Daten werden für einen direkten Vergleich des Einflusses der Probenparameter auf die Füge­verbindung gegenübergestellt. Zum Abschluss erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse und der möglichen Einflüsse der gewählten Probenparameter auf die Füge­verbindung sowie mögliche weitere Parameter, die in Zukunft interessant zu untersuchen wären.

Abstract

Light weight construction is a construction principle where joining of different materials plays a major role. The choice and execution of the joining technology greatly influence the ability of the materials to unfold their full potential. In this spirit this diploma thesis researches the joining technology of joining metal plates with welded pins on it through a matched metal press molding with fiber-reinforced plastics.

Primary target is a feasibility study to demonstrate the suitability whether this process is possible with the used materials. The used metals with pins are aluminum and steel, the used fiber-reinforced plastics are short glass fiber and continuous glass strand reinforced polyamide 66.

After evaluating the feasibility of this process the focus is on the determination of the process parameters like temperature and pressure to optimize the joining and producing samples which will be tested on their mechanical properties. Important for the mechanical testing was the proper planning of the sample geometry for a reproducible and meaningful result. The chosen mechanical tests are the tensile shear test, peel test and cross tension test. The mechanical tests were chosen because of the possible strains in use and the facility of comparing the samples with each other.

The first samples for the determination of the process parameters were inspected without optical device and with light microscopy. The analysis and discussion of the final tests is done with a graphical and tabulation overview of the measured data. With the measured data the samples will be directly compared to each other concerning the influence of the sample parameter at the joining. Finally there will be a discussion of possible influences of the chosen sample parameters at the joining and some thoughts for future testing.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Zielstellung	2
3	Grundlagen.....	3
3.1	Arten von Kunststoffen	3
3.1.1	Thermoplastische Kunststoffe.....	3
3.1.2	Thermoplastische Elastomere	5
3.1.3	Elastomere.....	5
3.1.4	Duroplaste	5
3.2	Faserverbundwerkstoffe	6
3.2.1	Allgemeines	6
3.2.2	Faserverbundkunststoffe	6
3.3	Pins	16
3.3.1	Herstellung der Pins mittels cold metal transfer (CMT).....	17
4	Fügetechniken	19
4.1	Grundlagen.....	19
4.1.1	Wirkprinzip der Fügeverbindung.....	19
4.1.2	Lösbarkeit der Fügeverbindung.....	20
4.1.3	Kombinierte Fügeverbindungen.....	21
4.1.4	Kraftfluss von Fügeverbindungen.....	21
4.1.5	Häufig verwendete Fügemethoden für Faserverbundwerkstoffe	22
5	Prüfverfahren	26
5.1	Thermische Prüfverfahren.....	26
5.1.1	Thermogravimetrische Analyse (TGA).....	26
5.1.2	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	28
5.1.3	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA).....	30
5.2	Mechanische Prüfverfahren	32
5.2.1	Scherzugversuch.....	32
5.2.2	Schälzugversuch	34
5.2.3	Kopfzugversuch	36
5.3	Optische Untersuchung.....	38
5.3.1	Lichtmikroskopie	38
6	Proben	39
6.1	Probenmaterialien.....	39

6.2	Probenparameter	39
6.2.1	Parameter der Pinanordnung und der Pins.....	40
6.2.2	Bepinnte Metallplatten	41
6.3	Probenherstellung	46
6.3.1	Heißpressverfahren	46
6.3.2	Heißpressvorversuche	48
6.3.3	Heißpressversuchsparameter.....	56
7	Ergebnisse.....	57
7.1	Thermische Eigenschaften	57
7.1.1	Thermogravimetrische Analyse (TGA).....	57
7.1.2	Dynamische Differenzkalorimetrie.....	59
7.1.3	Untersuchung des Einsinkverhaltens der Pins in die Faserverbundkunststoffe	61
7.2	Optische Untersuchung.....	65
7.2.1	Ohne optische Hilfsmittel.....	65
7.2.2	Lichtmikroskopie	81
7.3	Mechanische Eigenschaften	93
7.3.1	Scherzugversuch.....	93
7.3.2	Schälzugversuch	98
7.3.3	Kopfzugversuch	104
8	Diskussion der Ergebnisse	109
8.1	Thermische Prüfverfahren.....	109
8.1.1	Bestimmung des Faseranteils mittels Pyrolyseverfahren	109
8.1.2	Auswahl der Verpresstemperaturen für die Vorversuche	109
8.2	Heißpressvorversuche	111
8.2.1	Kunststoff- und metallseitige Erwärmung.....	111
8.2.2	Kunststoffseitige Erwärmung	115
8.2.3	Metallseitige Erwärmung	116
8.3	Mechanische Eigenschaften	117
8.3.1	Ergebnisse der Scherzugversuche und deren Versagensarten	117
8.3.2	Ergebnisse der Schälzugversuche und deren Versagensarten.....	118
8.3.3	Ergebnisse der Kopfzugversuche und deren Versagensarten.....	120
8.3.4	Überblick und Vergleich der auftretenden Kräfte.....	121
8.4	Diskussion der Einflüsse auf die mechanische Festigkeit.....	122
9	Erreichte Ziele.....	129
10	Ideen und Alternativen für zukünftige Untersuchungen	130

11 Literaturverzeichnis 133

1 Einleitung

Dank der Erfindung der Faserverbundbauweise, der Kombination von hochfesten Fasern und einem formgebenden Matrixmaterial, lösen Kunststoffe die metallischen Werkstoffe in Fahrzeugen, Flugzeugen, bei der Raumfahrt und im Bauwesen immer mehr ab.

Dennoch können Kunststoffe nicht alle Werkstoffe ersetzen. Viele Einsatzgebiete erfordern eine Kombination von verschiedenen Werkstoffen. Beim Prinzip des Leichtbaus in der Automobilindustrie findet die Kombination von tragenden Metallteilen und gewichtersparenden Kunststoffteilen bereits breite Anwendung. Bei Bauteilen, die vor allem den Insassenschutz gewährleisten sollen, ist es hier natürlich besonders wichtig, dass beide in Symbiose verbauten Werkstoffe ihre Eigenschaften voll entfalten können. Dabei spielt die angewendete Füge-technik zwischen den Werkstoffen eine entscheidende Rolle. Ebenso spielt die Füge-technik bei der Wirtschaftlichkeit eine große Rolle, die Werkstoffe möglichst einfach, schnell und kostengünstig zu fügen.

Es gibt bereits eine Vielzahl an Füge-techniken, um Metall und Kunststoff in Symbiose zu vereinen wie Bolzenverbindungen, Schlaufenverbindungen, Klebeverbindungen und dergleichen. Eine dieser Fügeverbindungen, die sich noch zum größeren Teil in der Entwicklung befindet, ist das Fügen von faserverstärkten Kunststoffen, durch ein Heißpressverfahren, mit bepinnten Metallplatten. Die Pins werden auf die Metallplatte aufgeschweißt und sind nur wenige Millimeter groß (siehe Abbildung 1). Für die Fügung wird der Kunststoff direkt auf die bepinnten Metallplatten in eine Heißpresse gelegt und beide Füge-teile unter erhöhter Temperatur und Druck gefügt (siehe Abbildung 2). Diese Fügeverbindung hat das Potential sehr einfach und schnell maschinell und somit wirtschaftlich gefertigt zu werden. Doch zu einer guten Fügeverbindung gehört nicht nur Simplizität und Wirtschaftlichkeit, sondern es sind vor allem auch ihre mechanischen Eigenschaften unter bestimmten Belastungsarten von Interesse. Dafür werden in dieser Diplomarbeit bepinnte Platten aus Aluminium und Stahl mit kurz- und endlosglasfaser-verstärktem Polyamid 66 gefügt und auf ihre mechanischen Eigenschaften geprüft.

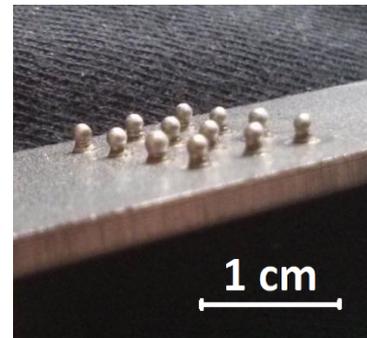


Abbildung 1 Bepinnte Stahlplatte

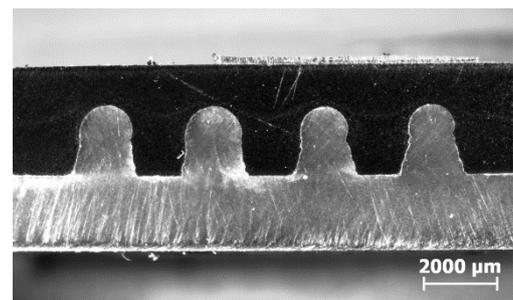


Abbildung 2 Gefügte Aluminiumprobe im Querschnitt

2 Zielstellung

In dieser Arbeit geht es um eine Machbarkeitsstudie über das Heißverpressen von bepinnten Aluminium- und Stahlplatten mit kurzglasfaser- und endlosglasfaserverstärktem Polyamid 66. Ziel ist speziell, ob dieses Verfahren überhaupt mit diesen Werkstoffen möglich ist, und wenn es möglich ist, sollen die Bedingungen ermittelt werden, mit denen man das beste Resultat der Fügeverbindung erhält. Es werden dabei mehrere Varianten des Erwärmens der Fügeteile beim Heißpressen untersucht: die kunststoff- und metallseitige, nur metallseitige und nur kunststoffseitige Erwärmung.

Es wird die Auswirkung der Variation der Abstände untersucht zwischen den aufgeschweißten Pins der Metallplatten auf die Verbindung in Form von Kraftaufnahme der Verbindung bei verschiedenen Belastungsarten. Für den Vergleich der Scherfestigkeit und Zugfestigkeit mit Belastungsrichtung normal auf die Verbindungsfläche werden der Scherzugversuch und der Kopfzugversuch durchgeführt. Die Kraftaufnahme in Form von Schälwiderstand wird mittels Schälzugprüfung ermittelt. Für die Prüfverfahren sollen speziell für diese Fügeverbindung geeignete Probenkörper entworfen werden.

Zuerst sollen die faserverstärkten Kunststoffe mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) und dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) charakterisiert werden. Auf Basis der Ergebnisse der TGA und DSC werden dann mit dem Gerät für dynamisch-mechanische Analysen (DMA) erste Heißpressversuche mit einzelnen Pins durchgeführt. Mit den Ergebnissen der DMA sollen dann anschließend wiederum erste Heißpressvorversuche mit den für die Prüfverfahren entwickelten Probenkörpern durchgeführt werden. Bei den Vorversuchen sollen die optimalen Bedingungen, wie Temperatur und Druck, für das Heißpressen ermittelt werden sowie die verschiedenen Erwärmungsmethoden getestet werden. Die Proben der Vorversuche sollen anschließend mittels Lichtmikroskopie an der Fügefläche auf Spalt- und Hohlraumbildung sowie auf Auffälligkeiten im Kunststoff oder bei den Faserbündeln untersucht werden.

Die Methoden, die sich bei den Vorversuchen am besten bewähren, sollen anschließend für die Probenherstellung verwendet werden und diese Proben mittels Scherzug-, Kopfzug- und Schälzugversuch auf ihre mechanischen Eigenschaften geprüft und verglichen werden.

3 Grundlagen

3.1 Arten von Kunststoffen

Es existieren 4 Hauptarten von Kunststoffen:

- Thermoplaste
- Thermoplastische Elastomere
- Elastomere
- Duroplaste

Wobei genauer auf den Thermoplasten Polyamid 66 eingegangen wird, da dies der verwendete Kunststoff für die späteren Versuche ist.

3.1.1 Thermoplastische Kunststoffe

Thermoplastische Kunststoffe bestehen aus unvernetzten Kettenmolekülen, die entweder amorph vorliegen oder teilkristallin angeordnet sind, siehe Abbildung 3. Die Thermoplaste zeichnen sich dadurch aus, dass sie bei zunehmender Temperatur erweichen und formbar werden, bis sie schlussendlich komplett aufschmelzen. Der erweichte oder aufgeschmolzene Thermoplast kann in Form gebracht bzw. gegossen werden. Wenn dem Thermoplast nun wieder Wärme entzogen wird und seine Temperatur unter den Schmelzpunkt fällt, erstarrt dieser und behält die Form bei. Es handelt sich dabei um einen reversiblen Prozess und kann somit beliebig oft durchgeführt werden. Dank dieser Eigenschaft können am Thermoplast Verfahren wie Schweißen angewendet werden. Ebenso eignen sich dadurch zu Bruch gegangene Bauteile zur Reparatur und müssen nicht komplett ersetzt werden. Auch für die Wiederverwendbarkeit spielt diese Eigenschaft eine große Rolle.

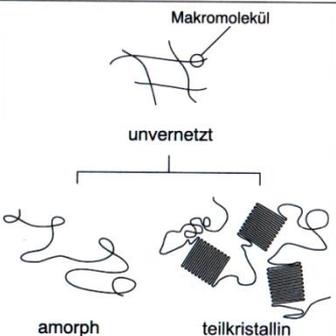
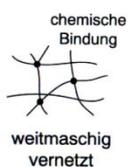
Polymere (Kunststoffe)				
	Thermoplaste	thermoplastische Elastomere	Elastomere	Duroplaste
Molekülstruktur	 <p>Makromolekül unvernetzt amorph teilkristallin</p>	 <p>unvernetzt</p>	 <p>chemische Bindung weitmaschig vernetzt</p>	 <p>engmaschig vernetzt</p>
Festkörpercharakteristik bei Raumtemperatur	spröde bis zähhart	gummielastisch	gummielastisch	spröde, hart
Temperaturcharakteristik	schmelzbar Kristallitschmelztemperatur vorhanden	schmelzbar Kristallitschmelztemperatur teilweise vorhanden	nicht schmelzbar	nicht schmelzbar
chemische / physikalische Charakteristik	löslich	löslich	quellbar, nicht löslich	schwer quellbar, nicht löslich

Abbildung 3 Übersicht der Kunststoffarten [1]

3.1.1.1 Polyamid (PA) 66

Für die später beschriebenen Versuche wurde das Polyamid 66 verwendet.

Chemische Struktur

PA 66 ist ein Polyamid, das aus zwei verschiedenen Ausgangsstoffen oder auch Bausteine genannt, aufgebaut ist. Diese aliphatischen Polyamide haben die allgemeine Strukturformel:

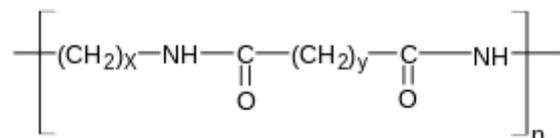


Abbildung 4 Allgemeine Strukturformel aliphatischer Polyamide aus zwei verschiedenen Ausgangsstoffen [2]

Die Bezeichnung PA 66 kommt folgendermaßen zustande:

Die erste Ziffer in PA 66 gibt die Anzahl der Kohlenstoffatome im $-(\text{CH}_2)_x-$ Teil an, wobei in diesem Fall x gleich 6 ist. Die zweite Ziffer in PA 66 gibt die Anzahl der Kohlenstoffatome im $-\text{CO}-(\text{CH}_2)_y-\text{CO}-$ Teil an, wobei in diesem Fall y gleich 4 ist.

Die chemische Strukturformel für PA 66 lautet somit: $[-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-\text{NH}-]$

Kennwerte

Tabelle 1 Kennwerte PA66 [2]

Kennwerte PA 66	
Dichte	1,12 g/cm ³ bis 1,14 g/cm ³
Schmelztemperatur	250°C bis 265°C
Wasseraufnahme	8,50%
Zugfestigkeit	63 N/mm ²
E-Modul	1500 N/mm ²

Tabelle 2 Gebrauchstemperatur von Polyamiden [2]

Gebrauchstemperatur von Polyamiden	
Obere Gebrauchstemperatur	80°C bis 120°C (kurzzeitig je nach Typ bis 140°C)
Untere Gebrauchstemperatur	-70°C bis -40°C

Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes sind bei trockenem Zustand spröde und hart. Im nassen Zustand gehen sie in sehr zähe Konsistenz über. PA 66 ist abriebfest und hat gute Gleiteigenschaften. Zur Erhöhung der Festigkeit ist die Kombination mit einem Füllstoff wie zum Beispiel Kohle- oder Glasfasern möglich.

Bei Formteilen, die Feuchtigkeitsschwankungen oder Wetter ausgesetzt sind, ist auf die Volumensänderung durch die Feuchtigkeitsaufnahme bzw. Abgabe zu achten.

PA 66 ist beständig gegen Lösemittel, Öle, Fette, Benzin, Benzol, Wasser und schwache Laugen. Wird teilweise als Material für Tanks bei Fahrzeugen verwendet. Es ist nicht beständig gegen Säuren und starke Laugen. [2] [7]

3.1.2 Thermoplastische Elastomere

Die thermoplastischen Elastomere unterscheiden sich nicht grundsätzlich von den Thermoplasten in Ihrem Aufbau. Beide Arten bestehen aus unvernetzten Makromolekülen. Jedoch befinden sich in dem amorphen/teilkristallinen aufschmelzbaren Material gummielastische Molekülbereiche, die dem thermoplastischen Elastomer auch bei Raumtemperatur eine verformbar elastische Konsistenz geben. Dadurch, dass thermoplastische Elastomere aus unvernetzten Makromolekülen bestehen, weisen sie einen zeitabhängigen viskosen Effekt auf. [1] [2]

3.1.3 Elastomere

Werden die Makromoleküle bei der Kunststoffherstellung durch Vulkanisation chemisch weitmaschig vernetzt, so entsteht ein Elastomer (Abbildung 3). Elastomere weisen aufgrund der weitmaschig vernetzten Makromoleküle bei Raumtemperatur ein gummielastisches Verhalten auf. Durch die Vernetzung der Moleküle kommt es bei Elastomeren auch bei längerer mechanischer Beanspruchung, im Gegensatz zu den thermoplastischen Elastomeren, zu keinen zeitabhängigen viskosen Effekten. Jedoch lassen sich Elastomere durch die Vulkanisation (Vernetzung der Makromoleküle) nicht mehr aufschmelzen. [1] [2]

3.1.4 Duroplaste

Bei Duroplasten werden ebenfalls die Makromoleküle, wie bei der Herstellung von Elastomeren, vernetzt. Der Unterschied zwischen Elastomer und Duroplast besteht darin, dass das Duroplast wesentlich engmaschiger vernetzt ist als ein Elastomer (Abbildung 3). Das Duroplast ist dadurch auch nicht aufschmelzbar und weist wegen der engmaschigen Vernetzung nur eine geringe Dehnbar- und Quellbarkeit auf. [1] [2]

3.2 Faserverbundwerkstoffe

3.2.1 Allgemeines

Faserverbundmaterialien beruhen auf einem Prinzip, welches bereits seit Jahrtausenden in der Natur zu finden ist. Faserverbundwerkstoffe sind Stoffe, die zu einem aus hochfesten Fasern bestehen die hohe Spannungen aufnehmen können und zu anderem aus einem formgebenden Matrixmaterial, das den Zusammenhalt und Schutz der Fasern vor äußeren Einflüssen gewährleistet.

Die Stängel von Pflanzen bestehen aus vielen einzelnen Fasern, die das Gewicht der Pflanze tragen. Knochen bestehen aus einer stabilen Hülle und einem zellenartigen Kern, der aus Fasern, aus sogenanntem Collagen besteht. Ein vor allem für den Menschen wichtigsten natürlichen Faserverbundwerkstoffe ist Holz. Es besteht aus hochfesten Cellulosefasern, eingebettet in einer Matrix aus Lignin. [4]

Eine der ersten Faserverbundkonstruktionen des Menschen im alten Ägypten war die Verstärkung von Lehmziegeln mit Stroh. Das Prinzip blieb bis heute in der Bauindustrie in Form von Stahlbeton erhalten. Stahldrähte als Fasern, die in eine Matrix aus Beton eingebettet sind.

Ausführungen von Faserverbundwerkstoffen gibt es in unzähligen Materialvariationen und Anwendungsgebieten. Einige der Materialvariationen davon sind die Faserverbundkunststoffe.

3.2.2 Faserverbundkunststoffe

Im Folgenden werden einige Materialien vorgestellt, aus denen die Fasern und die Matrix bestehen und auch die Möglichkeiten der Faserausrichtung, Längen und die Herstellungsprozesse der Faserverbundkunststoffe. Der Fokus liegt hierbei auf Glasfaserverbundkunststoff in Form von kurzfaserver- und endlosfaserverstärkten Kunststoffen, den Faserverbundkunststoffarten, die bei den Versuchen verwendet wurden.

3.2.2.1 Fasermaterialien

Glasfasern

Glasfasern sind amorph und entstehen durch ein Schmelzspinnverfahren aus einer Glasschmelze. Ihre isotropen Materialeigenschaften hängen von der chemischen Zusammensetzung der Glasschmelze ab. Sie haben einen Durchmesser von etwa 9 bis 15 μm . Die gängigsten Glaserfaserarten sind die E- R- S-Glasfasern und Quarzglasfasern.

E-Glasfasern zeichnen sich aus durch ihre niedrige elektrische Leitfähigkeit, hohe Chemikalien- und Witterungsbeständigkeit.

R- S-Glasfasern haben eine sehr hohe Zugfestigkeit, hohen E-Modul und keine Beeinträchtigung der Festigkeit bis 300°C.

Quarzglasfasern finden vor allem bei Hochtemperaturanwendungen Verwendung.

Glasfasern haben eine sehr weite Verbreitung, da sie isotrope Materialeigenschaften vorweisen und einfach zum Herstellen und Verarbeiten sind. Ebenso sind sie auch kostengünstiger als viele andere Faserarten. [3] Abbildung 5 zeigt eine Aufnahme von einer Glasfaser unter einem Auflichtmikroskop im Vergleich zu einem menschlichen Haar und weitere Fasern aus den gebräuchlichsten Materialien.

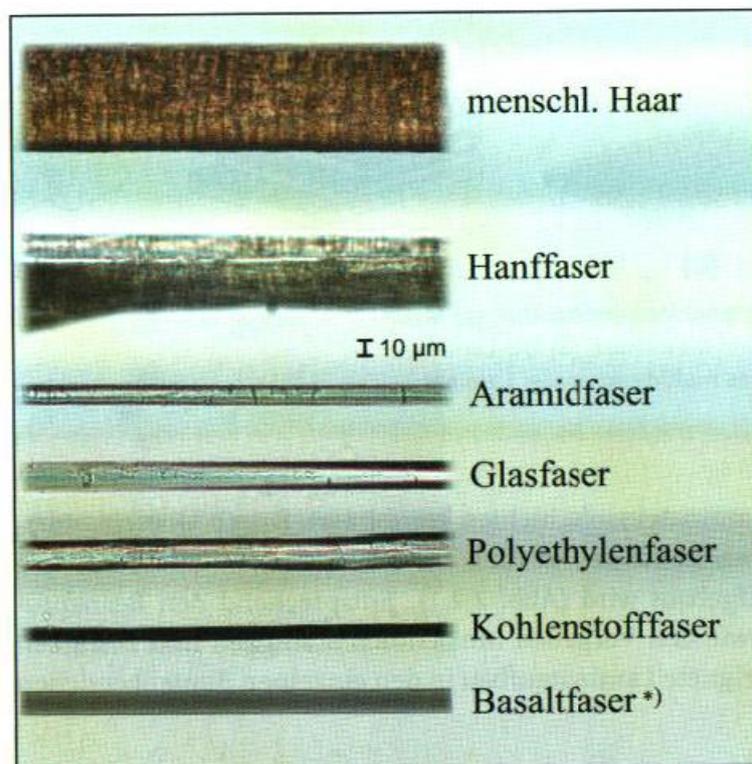


Abbildung 5 Fasermaterialien [3]

Kohlenstofffasern

Kohlenstofffasern oder auch Carbonfasern genannt, entstehen entweder aus polymeren Precursorfasern oder sie werden aus Pech gesponnen. Diese Fasern werden in einem Verkokungsprozess in Kohlenstofffasern umgewandelt. Sie haben einen Durchmesser von etwa 5 bis 8 μm , erreichen eine sehr hohe Zugfestigkeit. Sie finden ein sehr großes Anwendungsgebiet in der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt und in vielen weiteren Gebieten, in denen vor allem Leichtbau eine Rolle spielt. [3]

Aramidfasern

Aramidfasern entstehen durch Nassspinnen einer Polymerlösung und anschließendes Verstrecken unter erhöhten Temperaturen. Sie sind organische Fasern, die aus aromatischen Polyamiden aufgebaut sind. Erstmals kamen sie 1960 auf den Markt unter dem heute weit verbreiteten Namen Kevlar. Sie haben einen Durchmesser von etwa 12 μm und weisen eine sehr hohe Zugfestigkeit sowie Schlagfestigkeit auf. Sie finden Anwendung in Strukturbauteilen, ballistischen Hartlaminaten, Sportbekleidung und auch im Leichtbau. [3]

Polyethylenfasern

Polyethylenfasern werden durch Spinnen und Hochverstrecken aus einer ultrahochmolekularen PE-Lösung gewonnen. Sie haben eine sehr gute Beständigkeit gegen chemische Einwirkungen und UV-Strahlung sowie hohe Schlagfestigkeit. Sie finden Anwendung im Leichtbau sowie beim Segeltuch, bei Tauen, Seilen, Netzen und dergleichen. Ein Nachteil der Polyethylenfasern ist ihr großer thermischer Ausdehnungskoeffizient, ihr niedriger Schmelzpunkt und ihre starke Kriechneigung. [3]

Basaltfasern

Basaltfasern sind den Glasfasern sehr ähnlich. Sie haben ein amorphes Gefüge und werden als Endlosfasern aus Lavagestein hergestellt. Ihre Eigenschaften hängen wie bei den Glasfasern von der Basaltschmelze ab. Auch hinsichtlich der Eigenschaften wie Zugfestigkeit, chemische und thermische Beständigkeit oder E-Modul sind sie den Glasfasern relativ ähnlich. Aufgrund ihrer Entdeckungsgeschichte sind sie jedoch noch nicht so weit verbreitet wie Glasfasern, obwohl sie den Glasfasern in ökologischer Wiederverwertbarkeit und den Herstellungskosten überlegen sind. [3]

Naturfasern

Naturfasern bestehen meist aus Hanf oder Flachsfasern. Durch die stetig ansteigende Nachfrage an Nachhaltigkeit und Recycling werden Naturfasern in Kombination mit Biokunststoffen als Matrixmaterial immer populärer. Ihre Vorteile sind der geringe Preis und der im Vergleich geringe Energieverbrauch bei der Herstellung. Ebenso erreichen die Naturfasern die Kennwerte der Zugfestigkeit von Glasfasern. Der Nachteil ist die Streuung der mechanischen Eigenschaften aufgrund der ungleichmäßigen Beschaffenheit der Naturfasern, sowie die Wasseraufnahme und geringe thermische Stabilität. [3]

3.2.2.2 Matrixmaterialien

Die am meisten verwendeten Matrixmaterialien bei Faserverbundkunststoffen lassen sich grob in drei Sparten unterteilen: Duroplaste, Elastomere und Thermoplaste.

Duroplaste

Bei den verwendeten Harzen handelt es sich meist um synthetisch durch Polymerisations- Polyadditions- oder Polykondensationsreaktion hergestellte Kunstharze. Sie bestehen in der Regel aus zwei Komponenten, dem Harz und dem Härter. Durch das Vermischen von Harz und Härter steigt die Viskosität der Masse bis zur schlussendlichen Aushärtung immer weiter an. Bei der Aushärtung vernetzen sich die Makromoleküle des Harzes zu einem duroplastischen Kunststoff. (Siehe auch 3.1.4) Je nach verwendetem Harz und dementsprechendem Härter kann eine weite Bandbreite an Eigenschaften der ausgehärteten Harze erreicht werden, wie zum Beispiel chemische Beständigkeit, Zugfestigkeit, Abriebfestigkeit, Sprödigkeit, E-Modul und viele weitere. [3]

Die gängigsten Arten von Harzen sind:

- Epoxidharz
- ungesättigtes Polyesterharz
- Vinylesterharz
- Phenolharz

Elastomere

Bei den verwendeten Elastomeren als Matrixmaterial für Faserverbundbauteile handelt es sich vorrangig um Elastomere, die im unvernetzten Zustand eine niedrige Viskosität aufweisen, um eine möglichst gute Benetzung der Fasermaterialien zu gewährleisten. Als Verstärkungshalbzeuge werden bei Faserverbundmaterialien, die als Matrix ein Elastomer verwenden, Schnitffasern, Cords und Gewebe verwendet. Cords sind nichtflächige Verstärkungshalbzeuge, die meist für spezifische Anwendungen konzipiert werden wie zum Beispiel für einen Keilriemen von einem Auto.

Es wird zwischen drei Elastomersystemen unterschieden, die sich anhand ihres Aggregatzustandes unterscheiden:

- Gießelastomere (kann direkt vernetzt werden)
- Elastomerlösungen (Lösungsmittel muss vor Vernetzung entfernt werden)
- Dispersionen (Dispersionsmittel muss vor Vernetzung entfernt werden)

Die meistverwendeten Elastomere bei Faserverbundbauteilen sind:

- Silikone
- Polyurethane

Die Vernetzung des Elastomers erfolgt durch Vulkanisation. Elastomere als Matrixmaterial finden in einer Vielzahl von Bereichen Anwendung wie in der Klebstoff-, Auto- oder Textilindustrie. [16]

Thermoplaste

(Siehe 3.1.1).

3.2.2.3 *Materialparameter*

Aufgrund der laminaren Bauweise der Faserverbundkunststoffe gibt es eine Vielzahl an Parametern, die variiert werden können, um den Faserverbundkunststoff optimal an die Anforderungen seiner Anwendung anzupassen.

Faserlänge

Darunter fällt die Wahl der Länge der Fasern. Die Fasern werden nach folgenden Längen eingeteilt:

Kurzfasern $\approx 0,1 - 1 \text{ mm}$

Langfasern $\approx 1 - 50 \text{ mm}$

Endlosfasern $\approx > 50 \text{ mm}$

Generell gilt, je länger die Fasern, desto größer die Verstärkungswirkung. Die höchste Festigkeit, Steifigkeit und Schlagzähigkeit wird mit endlosfaserverstärkten Kunststoffen erzielt, allerdings nur bei Beanspruchung in Faserrichtung. Bei Belastung quer zur Faserorientierung haben die Fasern sogar eine Kerbwirkung und verringern die Belastungsgrenze des Verbundwerkstoffes unter die des reinen Kunststoffes. Deshalb finden endlosfaserverstärkte Kunststoffe vor allem dort Anwendung, wo die Faserorientierung nach der Belastungsrichtung ausgelegt werden kann. Je kürzer die Fasern, desto begrenzter ist die Lastübernahme der Fasern. Die Materialeigenschaften können dadurch isotrop werden. Kurzfaserverstärkte Kunststoffe weisen bei regelloser Verteilung der Fasern in alle Belastungsrichtungen die gleiche, jedoch aber geringere Festigkeit und Steifigkeit als in Faserorientierung der endlosfaserverstärkten Kunststoffe auf. Endlosfaserverstärkte Kunststoffe lassen bei der Verarbeitung der Halbzeuge nur ein gewisses Maß an Umformung zu, da sich bei zu großen Fließwegen die Matrix und die Fasern sonst zu sehr entmischen. Kurzfaserverstärkte Kunststoffe eignen sich somit besonders für Verfahren wie Spritzgießen und für kleine, dünne, komplexe Bauteile mit niedriger bis mittlerer mechanischen Beanspruchung. [3] [4]

Faserorientierung und Anordnung

In kurzfaserverstärkten Kunststoffen können die Fasern, wie in Abbildung 6 dargestellt, entweder unidirektional oder regellos verteilt sein. Unidirektionalität kommt zum Beispiel durch das Spritzgießverfahren zustande. Durch die Fließrichtung des Kunststoffes richten sich die Faser in Fließrichtung aus.

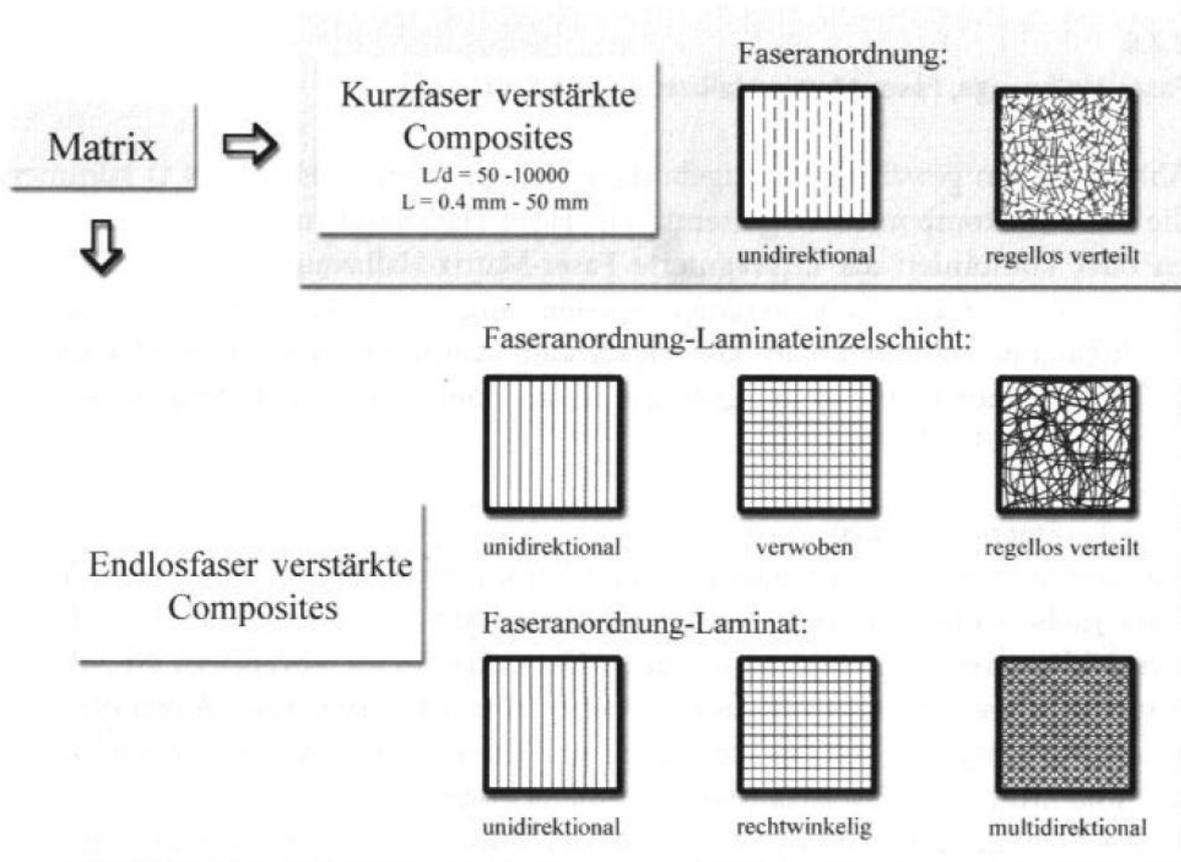


Abbildung 6 Faseranordnungen [3]

Bei endlosfaserverstärkten Kunststoffen gibt es zwei Faseranordnungen. Die Faseranordnung in der einzelnen Laminatschicht und die Faseranordnung von mehreren Laminatschichten. In einer einzelnen Laminatschicht können die Fasern unidirektional für eine einachsige Beanspruchung orientiert, verwoben für eine optimale Festigkeit einer 90° versetzten zweiachsigen Beanspruchung orientiert oder einfach regellos verteilt sein.

Für die Faseranordnung der Laminatschichten untereinander gibt es ebenfalls die Möglichkeit der unidirektionalen Anordnung für einachsige Beanspruchungen. Rechtwinkelig angeordnete, also um 90° zueinander verdrehte Laminatschichten (siehe Abbildung 6 "rechtwinkelig"), für eine 90° versetzte zweiachsige Beanspruchung oder eine multidirektionale Anordnung für angenähert isotrope Materialparameter bei einer ebenen Belastung.

Es besteht auch noch die relativ aufwendige Möglichkeit der 3D-Verwebung der Fasern, für besonders anspruchsvolle Anwendungen. [3]

3.2.2.4 Herstellung von Faserverbundbauteilen

Allgemein wird die Herstellung eines Faserverbundbauteils in folgende Schritte unterteilt:

- Formwerkzeug
- Laminataufbau
- Aushärtung
- Qualitätskontrolle
- Zusammenbau

Formwerkzeug

Das Formwerkzeug gibt dem Faserverbundkunststoff seine endgültige Form. Je nach Verfahren wird auf das Formwerkzeug entweder das Laminat aufgebracht, darin verpresst, eingespritzt, etc. Bei der Konstruktion des Formwerkzeuges ist auf viele Eigenschaften des zu formenden Faserverbundkunststoffes zu achten sowie auf nötige Bedingungen des Herstellungsverfahrens, Parameter wie Wärmeausdehnung, Aufheiz- Abkühlraten, Oberflächenbeschaffenheit und Ähnliches. Die gängigsten Materialien für Formwerkzeuge sind Stahl, Aluminium, Nickel oder auch Verbundwerkstoffe selbst. [3]

Laminataufbau

Man unterscheidet beim Laminataufbau zwischen zwei Verfahrensarten. Die, bei denen die Fasern trocken verwendet werden und die, bei denen die Fasern vorimprägniert sind. Je nach verwendetem Verfahren ist eine teilweise Automatisierung möglich und somit eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Bei diesem Schritt wird auch die Qualität des Bauteils entscheidend beeinflusst, durch Vermeidung von Poren und Rissen. Häufig verwendete Verfahren für den Laminataufbau sind Handlaminieren, Prepreg-Technologie, Harzinjektion, Harzinfusion, Pultrusion, Wickeltechnologie, Faserspritzen, SMC (Sheet Molding Compound) und BMC (Bulk Molding Compound). Für eine genauere Ausführung wird auf Literatur [3] verwiesen.

Aushärtung

Die Aushärtung erfolgt dann je nach Verfahren und Matrix Typ entweder durch einfaches Auskühlen wie zum Beispiel bei Thermoplasten oder unter Druck und erhöhter Temperatur im Formwerkzeug für die Vernetzung bei Harzen. Die gängigsten Aushärteverfahren sind Autoklavhärtung, Ofenhärtung und Pressenhärtung. Für eine genauere Ausführung wird auf Literatur [3] verwiesen.

Qualitätskontrolle

Bei der Qualitätskontrolle handelt es sich entweder um zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden, die am Bauteil selbst angewandt werden oder es werden Prüfkörper am überschüssigen Rand ausgeschnitten und mit Zerstörung geprüft.

Zusammenbau

Wenn die Bauteile all diese Schritte überstanden haben, können sie nun durch Einbau/Zusammenbau ihrem Bestimmungszweck zugeführt werden.

3.2.2.4.1 Herstellung von Faserverbundkunststoffen mit thermoplastischer Matrix

Es unterscheidet sich der Laminataufbau von faserverstärkten Kunststoffen mit thermoplastischer Matrix grundlegend von denen mit Harzmatrix. Während beim Halbzeug mit Harzmatrix auf die richtige Lagerung zu achten ist, da nach einmaliger Aushärtung keine zerstörungsfreie Formgebung mehr möglich ist, können Halbzeuge mit thermoplastischer Matrix immer wieder aufgeschmolzen und bearbeitet werden. Deshalb kann und wird bei manchen Verfahren als Ausgangsmaterial eine feste, bereits für den endgültigen Gebrauch verwendbare, Platte verwendet. [3] [4]

Kurzfaserverstärkte thermoplastische Kunststoffe

Spritzgießen

Das Halbzeug für das Spritzgussverfahren liegt als Granulat vor. Wie in Abbildung 7 abgebildet, wird das Granulat über einen Trichter dem Extruder zugeführt. In der Schnecke wird das Granulat bis zum Aufschmelzen erwärmt, verdichtet und über eine Düse in eine Form gespritzt. Nach dem Abkühlvorgang wird das fertige Spritzgussteil aus der Form ausgeworfen. [4] [9]

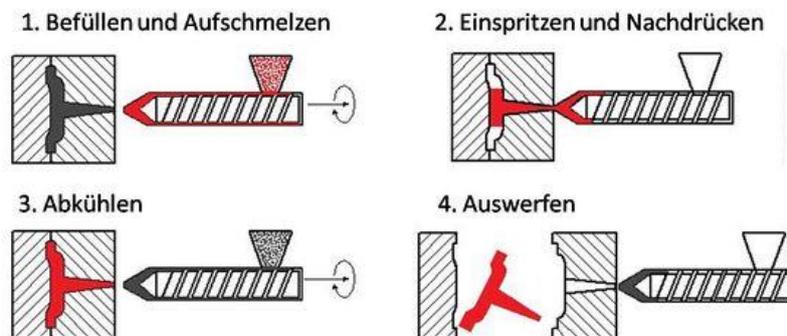


Abbildung 7 Spritzgussverfahren [12]

Extrusionsblasverfahren

Beim Extrusionsblasverfahren wird wie beim Spritzgießen das als Granulat vorliegende Halbzeug einem Extruder zugeführt, geschmolzen und durch einen Schlauchkopf gedrückt. Der so entstehende Schlauch wird direkt vom Extruder in die Werkzeugform eingeführt. Der Schlauch wird mit Druckluft aufgeblasen und dadurch in die Form gepresst. Nach dem Kühlvorgang in der Werkzeugform ist das Bauteil fertig und wird aus der Werkzeugform ausgestoßen. [10]

Lang- und Endlosfaserverstärkte thermoplastische Kunststoffe

Prepreg-Technologie

Prepreghalbzeuge, auch „Organobleche“ genannt, sind ein Zwischenprodukt in der Herstellung von Faserverbundkunststoffbauteilen. Prepregs sind vorimprägnierte Fasermatten, die sich sehr gut zur Weiterverarbeitung eignen. Sie werden meist in Massenproduktionen an einem Ort hergestellt und anschließend an mehrere Produktionsstätten für die Endfertigung geliefert. Hergestellt werden sie zum Beispiel wie mit dem anschließend beschriebenen „Schmelztränkung auf Doppelbandpresse“-Verfahren. Für die Weiterverarbeitung in den Endproduktionsstätten können die thermoplastischen Prepreghalbzeuge einfach aufgeschmolzen und in die endgültige Form gebracht werden.

Schmelztränkung auf Doppelbandpresse

Mit Glasmatten verstärkte thermoplastische Kunststoffe werden hergestellt mittels Schmelztränkung auf einer Doppelbandpresse (siehe Abbildung 8). Dabei werden zwei Halbzeuge in Form von Fasermatten von Rollen abgerollt und in die Bandpresse geführt. Zwischen die Fasermatten wird mittels einer Extruderdüse die thermoplastische Matrix eingebracht. Die Presse, die aus einem oben und unten geführten Stahlband sowie aus einem Heiz- und einem Kühlelement besteht, verdichtet zuerst die erhitzte Masse und kühlt sie anschließend unter bleibendem Druck aus. Am Ende der Bandpresse wird der glasfaserverstärkte Kunststoff in gewünschter Plattengröße abgetrennt. Diese ebenen Platten können nun entweder direkt verwendet werden oder noch durch ein **Umformverfahren** in eine gewünschte Form gebracht werden. Beim Umformverfahren werden plane GFK-Platten zugeschnitten, in eine Werkzeugform eingelegt und unter erhöhter Temperatur und Druck in die endgültige Bauteilform gepresst. [3] [4]

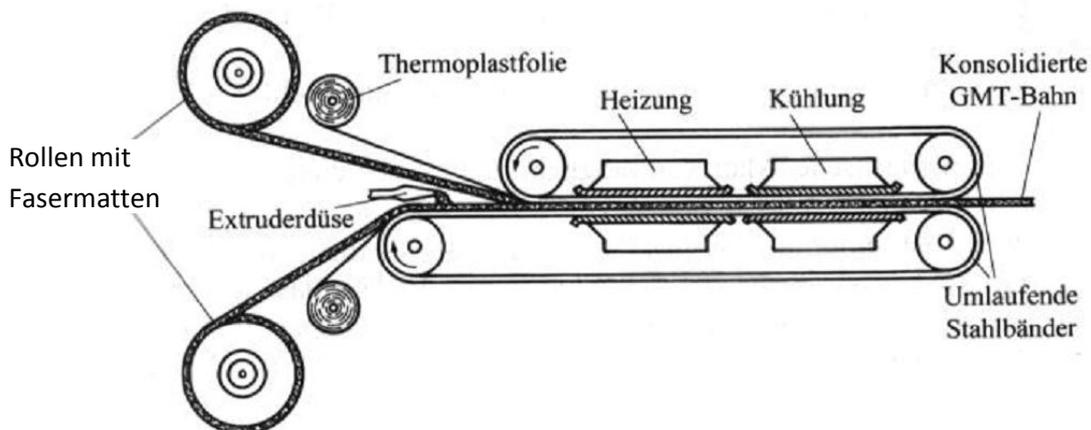


Abbildung 8 Schmelztränkung auf einer Doppelbandpresse [4]

Extrusion

Für die Extrusion wird ein Langfasergranulat verwendet. Die Herstellung des Granulats erfolgt aus einem Endlos-Glasfaser-Stäbchenprofil mit thermoplastischer Matrix, das pultrudiert und zu etwa 25mm langen Granulatstäbchen verarbeitet wird. Bei der Extrusion wird das Granulat im Extruder aufgeschmolzen, verdichtet und unter hohem Druck durch eine Düse gedrückt. Dabei ist die Düse das formgebende Element. Das Bauteil kommt in Form eines Endlosprofils aus dem Extruder. Nach dem Extruder wird das Endlosprofil gekühlt und anschließend mit einer Trenneinheit in gewünschter Länge abgetrennt. [11]

Pultrusion

Pultrusion oder auch Strangziehen genannt, ist ebenfalls ein heutzutage weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoff. Es handelt sich dabei um einen kontinuierlichen Prozess, bei dem vorimprägnierte Garne oder Prepregs durch ein beheizbares Werkzeug gezogen werden. Der Aushärtungsprozess findet nach der Formgebung statt. Nachdem der ausgehärtete Faserverbundkunststoff das Werkzeug verlassen hat, wird der Faserverbundkunststoff mit einer Säge auf die gewünschte Länge zugeschnitten. [24]

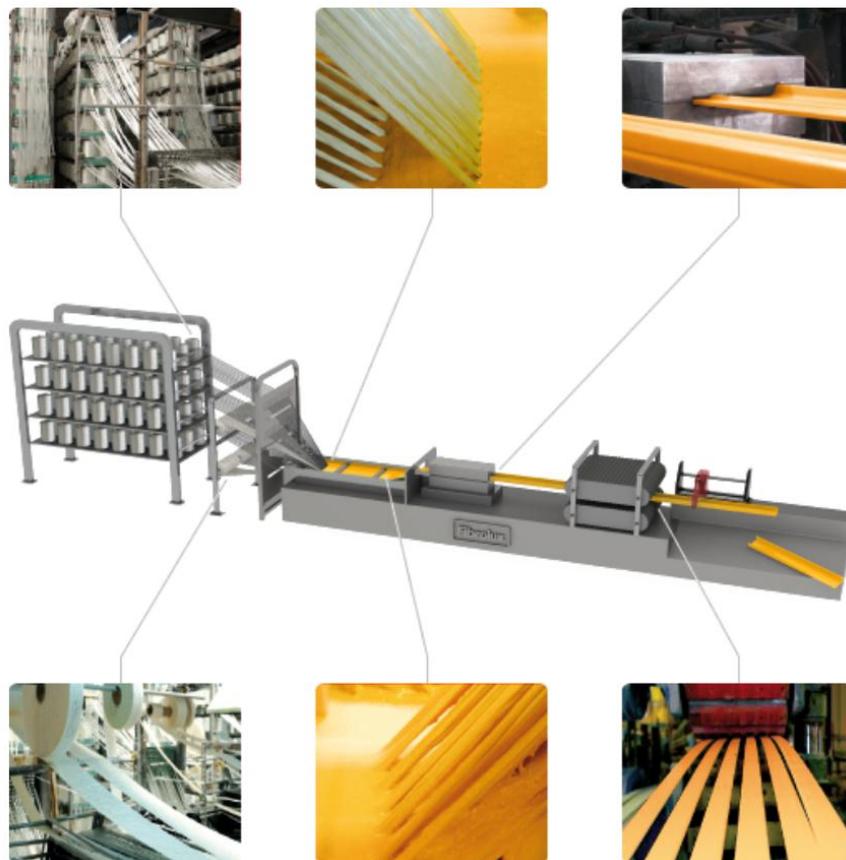


Abbildung 9 Pultrusionsprozess [24]

3.3 Pins

In dieser Arbeit handelt es sich bei Pins um eine auf Metallplatten aufgeschweißte Struktur, die einen Formschluss für die durch Heißpressen erstellte Fügeverbindung aus Metall und Kunststoff erzeugen. Dieser Formschluss stellt die Basis für diese Fügetechnik dar.

Für die Fügung zweier Bauteile mittels Pins wird nicht nur ein Pin verwendet, sondern meist eine größere Anzahl, die in Form einer Matrix flächig auf der Fügestelle angebracht werden. Dies bringt einige Vorteile gegenüber üblichen Bolzen oder Nietverbindungen, bei denen es zu einer ungleichmäßigen Kraftverteilung in der Fügeverbindung kommt, Spannungsspitzen auftreten und die Fügeverbindung frühzeitig versagen kann.

Pins eignen sich auch dazu, mit anderen Fügetechniken wie einer Klebverbindung kombiniert zu werden. Diese Kombination verleiht einer Fügeverbindung einen ausgeprägten Stoffschluss (durch die Klebverbindung) und Formschluss (durch die Pins).

Die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindung hängen dabei stark von der Methode der Pinerzeugung ab. Für die Pinerzeugung existieren mehrere Verfahren, die grob in zwei Kategorien unterteilt werden können. Der Neustrukturierung der Oberfläche des Metalls und dem schichtweisen Hinzufügen von Material zur Metalloberfläche (additive layer manufacture - ALM). Für das Verfahren, bei dem die Oberfläche des Metalls neu strukturiert wird, wird die Oberfläche mit Hilfe eines Elektronenstrahls und dessen spezieller Führungstechnik aufgeschmolzen und zu Pins umstrukturiert. Da bei diesem Verfahren jedoch ein massiver Eingriff in die Oberfläche des Metalls vorgenommen wird, werden auch dessen mechanischen Eigenschaften stark beeinflusst. Beim ALM -Verfahren werden die mechanischen Eigenschaften wesentlich weniger beeinflusst. Hier gibt es wiederum zwei verschiedene Techniken, das SLM (selektiv laser melting) und das LMD (laser metall deposition). Beim SLM- Verfahren werden mit einem Laser selektive Bereiche in einem Metallpulverbett schichtweise aufgeschmolzen. Beim LMD- Verfahren wird das Metallpulver zum Aufschmelzen in den Brennpunkt eines Lasers geblasen. Diese Verfahren eignen sich hervorragend zur Pinerzeugung in verschiedensten Geometrien für Forschungszwecke. Jedoch sind sie für die Herstellung in großer Stückzahl sehr kostenintensiv. [21]

Eine relativ neue Technik stellt CMT (cold metal transfer) dar. Mit ihr ist es möglich, relativ schnell und kostengünstig Pins in großer Stückzahl herzustellen. Sie bietet auch verschiedene Möglichkeiten der Gestaltung der Pin geometrien. Die Abbildung auf der folgenden Seite zeigt den schematischen Aufbau der Fügeverbindung mit Pins sowie drei der am meisten verwendeten Pinformen. Den zylindrischen Pin, den zylindrischen Pin mit Spitz und den zylindrischen Pin mit Kugelkopf. Der zylindrische Pin mit Kugelkopf ist der Pin, der für die kommenden Versuche verwendet wurde.

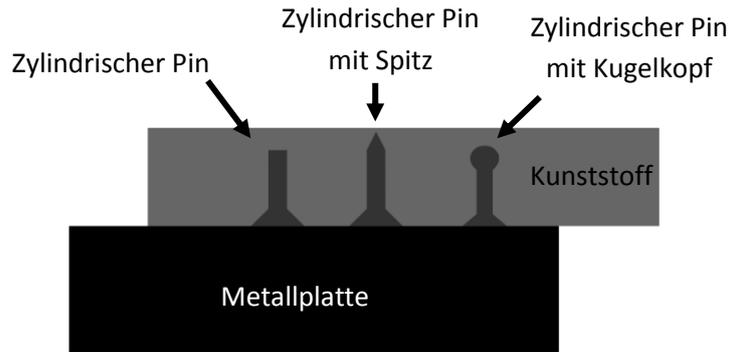


Abbildung 10 Schematischer Querschnitt der Fügeverbindung und der Pinformen [17]

3.3.1 Herstellung der Pins mittels cold metal transfer (CMT)

Das verwendete Verfahren zur Herstellung der Pins aus Stahl und Aluminium ist das CMT (cold metal transfer) Schweißverfahren und wurde von Fronius entwickelt. Diese Schweißart verfolgt eine ganz spezielle Technik, mit der der Schweißdraht geführt wird und der Strom angelegt wird, um aus dem verwendeten Schweißdraht einen Pin zu formen. Im Folgenden wird das Verfahren kurz erläutert, es ist in folgende Phasen unterteilt:

Zuführen: Zuerst wird der Schweißdraht der Schweißstelle zugeführt, bis die Spitze des Schweißdrahtes die Oberfläche berührt. Nun wird zum Vorheizen des Schweißdrahtes ein Strom von 100A 2ms lang angelegt.

Aufheizen: Danach kommt der Heizvorgang. Hier brennt der Lichtbogen 24 ms während sich der Schweißdraht der Metallplatte nähert, bis er sie berührt und der Lichtbogen verschwindet. Mit dem Verschwinden des Lichtbogens ist die Aufheizphase vorbei.

Zurückziehen: Nach dem Aufheizen wird der Schweißdraht 3ms nach oben gezogen.

Auskühlen: Während der Auskühlphase wird keine thermische Energie dem System zugeführt und es beginnt langsam auszukühlen. Aufgrund des unverhältnismäßig großen Volumens der Metallplatte zum Schweißdraht und der Tatsache, dass Metall generell ein sehr guter Wärmeleiter ist, fließt die Wärme vom Schweißdraht zur Metallplatte und die Zone im Schweißdraht mit der höchsten Temperatur wandert nach oben.

Formen: In der Formphase wird aus dem Schweißdraht nun der Pin geformt. Dabei kann durch Variation der Auskühlänge und der daraus resultierenden Verlagerung der Zone mit der höchsten Temperatur die Pinlänge bestimmt werden sowie durch spezielle Wiederaufheiz- und Drahtführungstechniken der Pin Kopf geformt werden. Abbildung 11 zeigt einen zylindrischen Pin in der Entstehung, wobei er sich gerade in der Abkühlphase befindet und die Zone mit der höchsten Temperatur im Draht eine gewisse Höhe erreicht hat. Durch den Umstand, dass der elektrische Widerstand in dem Bereich mit der höchsten Temperatur auch am höchsten ist, wird dieser Bereich durch erneutes Anlegen von Strom weiter aufgeheizt und hat dadurch im Verhältnis zum restlichen Schweißdraht die geringste Festigkeit. Wird der Draht nun zurückgezogen, reißt er an der Stelle mit der geringsten Festigkeit ab und der zylindrische Pin bleibt zurück. [17]

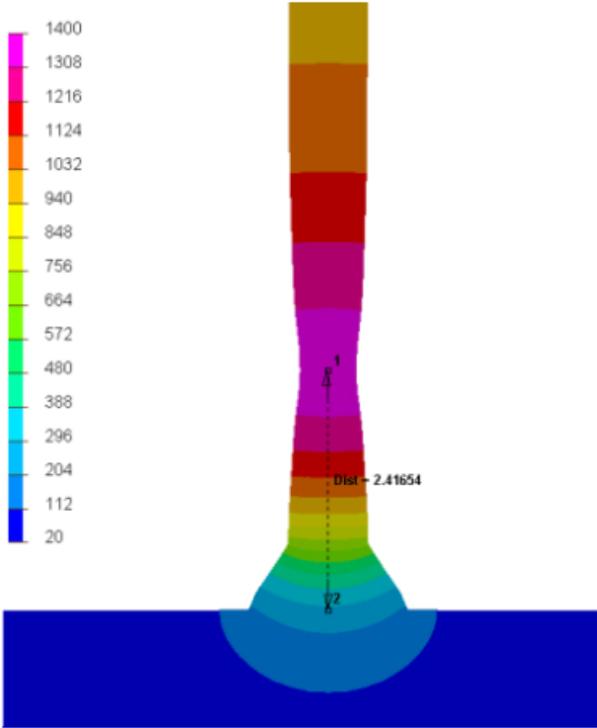


Abbildung 11 Wärmebild vom Querschnitt eines entstehenden zylindrischen Pins [17]

4 Fügetechniken

4.1 Grundlagen

4.1.1 Wirkprinzip der Fügeverbindung

Die Fügung von Bauteilen funktioniert nach folgenden drei Wirkprinzipien, die auch elementare Verbindungen genannt werden:

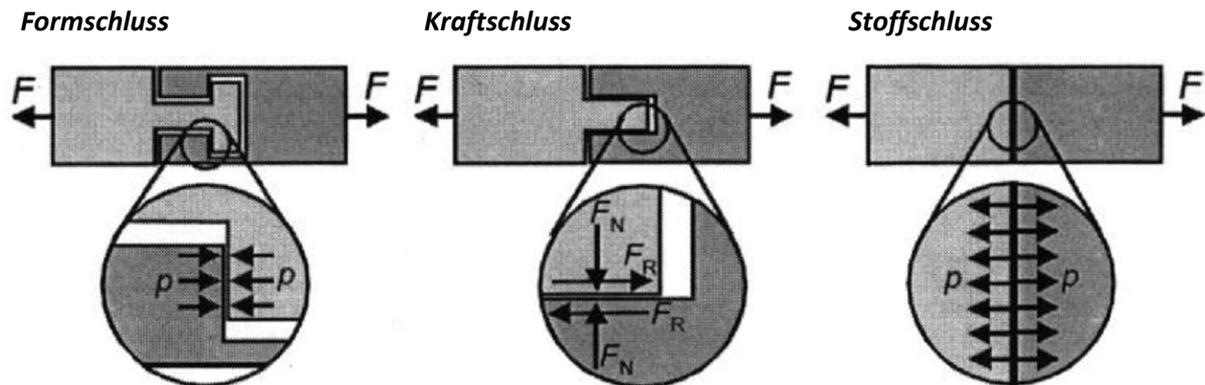


Abbildung 12 Wirkprinzip von Fügeverbindungen [8]

Formschluss

Der Formschluss kommt zustande durch den geometrischen Kontakt der beiden zu fügenden Bauteile. Kräfteinwirkungen oder Momente werden über geometrisch bestimmte Kontaktstellen oder Flächen von einem Bauteil auf das andere übertragen. Der Kontakt der Bauteile wird auch im unbelasteten Zustand durch die Schwerkraft aufrechterhalten. [8]

Kraftschluss

Ein Kraftschluss kommt durch die Wechselwirkung von Kräften zwischen den beiden zu fügenden Bauteilen zustande. Die Kräfte können dabei mechanisch (zum Beispiel Reibung) oder magnetisch (bei magnetisierbaren Bauteilen) sein. [8]

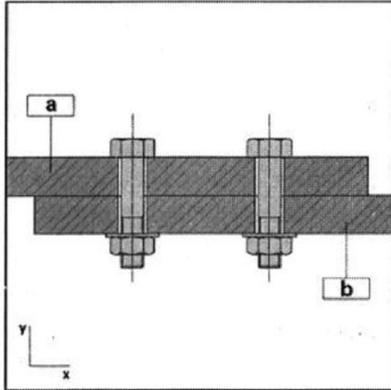
Stoffschluss

Bei Stoffschluss folgt die Verbindung auf atomarer Ebene. Es wird dabei eine atomare Verbindung zwischen den beiden Bauteilen hergestellt, die die Kräfte und Momente direkt von einem Bauteil auf das andere überträgt. Es kommt dabei zur sogenannten Stoffvereinigung. [8]

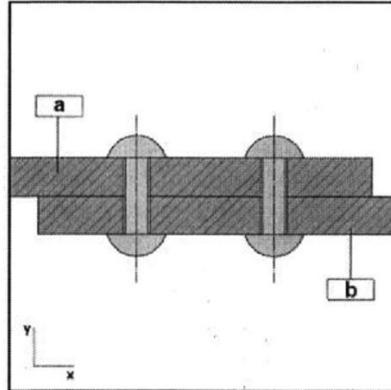
4.1.2 Lösbarkeit der Fügeverbindung

Es existieren drei Möglichkeiten der Lösbarkeit von Fügeverbindungen:

Voll lösbar



Bedingt lösbar



Nicht lösbar

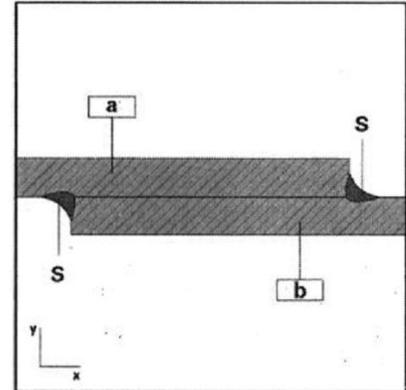


Abbildung 13 Lösbarkeit von Fügeverbindungen [8]

Voll lösbar

Eine voll lösbare Verbindung zwischen Bauteil a und b ist zum Beispiel eine Schraubverbindung. [8]

Bedingt lösbar

Bedingt lösbare Verbindungen zwischen Bauteil a und b sind zum Beispiel Nietverbindungen. Um eine Nietverbindung zu lösen, müssen die Nieten dauerhaft plastisch verformt werden. Die durch die Nietverbindung gefügten Bauteile kommen beim Lösen der Verbindung dabei nicht zu Schaden. [8]

Nicht lösbar

Eine nicht lösbare Fügeverbindung ist zum Beispiel, wenn die Bauteile a und b miteinander verschweißt werden (siehe Abbildung 13 rechts, Schweißstellen gekennzeichnet mit S). Dabei kommt es zur Stoffvereinigung der Bauteile und ein Lösen dieser Verbindung ist nur durch Beschädigen der Bauteile möglich. [8]

4.1.3 Kombinierte Fügeverbindungen

Bei kombinierten Fügeverbindungen oder auch Hybridverbindungen genannt, werden elementare Fügetechniken kombiniert. Durch die Kombination elementarer Fügetechniken ergibt sich eine große Vielfalt an Hybridverbindungen. Die geläufigsten Hybridverbindungen in der Industrie sind zum Beispiel die Kombination von punktförmigen Punktschweiß-, Clinch- und Nietverbindungen mit flächigen Klebeverbindungen. Durch die Kombination dieser Verbindungen lassen sich neue Eigenschaften der erzeugten Fügeverbindungen hinzufügen. Durch die flächige Klebung kann eine Nietverbindung wasserdicht gemacht werden. Die flächige Verteilung der Kraft kann sich positiv auf die Lebensdauer der Bindung auswirken oder eine schwingungsdämpfende Wirkung haben. [8]

4.1.4 Kraftfluss von Fügeverbindungen

Fügeverbindungen stellen einen Stetigkeitssprung im Eigenschaftsprofil von Konstruktionen dar. Je nach Fügungsfläche kommt es zu unterschiedlichen Kraftflüssen, die zu Spannungskonzentrationen im Fügebereich führen können. Abbildung 14 zeigt die Kraftflüsse bei punktförmigen, flächigen und linienförmigen Fügeverbindungen.

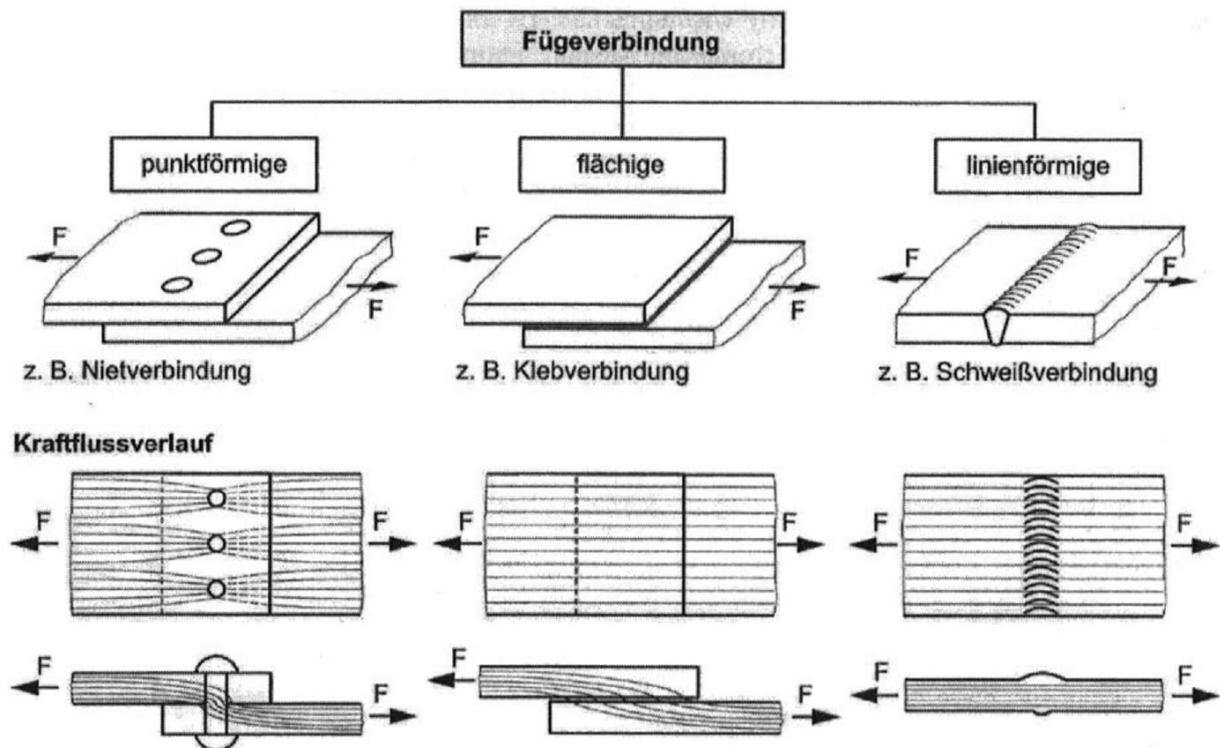


Abbildung 14 Kraftfluss von Fügeverbindungen [8]

4.1.5 Häufig verwendete Fügemethoden für Faserverbundwerkstoffe

Im Folgenden werden die derzeit am meisten verwendeten Fügemethoden vorgestellt, die bei Faserverbundwerkstoffen angewendet werden.

4.1.5.1 Schlaufenanschluss

Der Schlaufenanschluss ist eine der ersten Fügemethoden, die bei Faserverbundwerkstoffen angewandt wurde. Dabei wird ein Bolzen vom Faserverbundmaterial umschlungen. Für höchste Belastbarkeit bei minimalem Gewicht verwendet man unidirektionale Faserstränge. Diese wirken wie ein Seil und können große Kräfte in Faserrichtung aufnehmen. Es gibt die Ausführungen mit paralleler Schlaufe und mit einer sogenannten Augenschlaufe. (siehe Abbildung 15) [4]

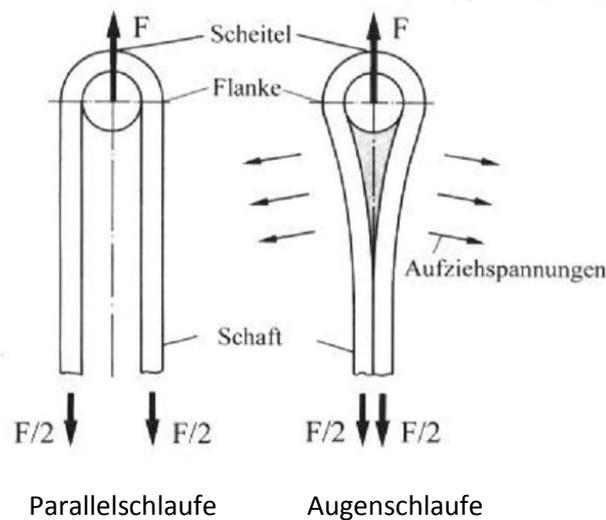


Abbildung 15 Parallel- und Augenschlaufen [4]

Bei der Augenschlaufe treten jedoch ungünstige Aufziehspannungen auf. Diese lassen sich dadurch vermeiden, dass die Schlaufe erst in einem größeren Abstand zum Bolzen zusammengeführt wird.

Als tragfähigere Variante des Schlaufenanschlusses gibt es die Schlaufenkaskade. Dabei werden mehrere Schlaufenanschlüsse ineinander verschachtelt.

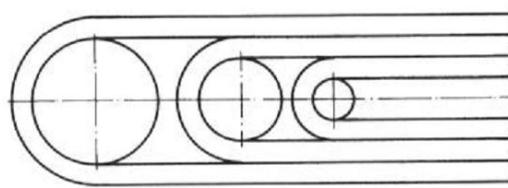


Abbildung 16 Schlaufenkaskaden [4]

4.1.5.2 Bolzenverbindung

Bolzenverbindung ist ein Überbegriff für Schraub- und Nietverbindungen. Eine Technik, die schon seit geraumer Zeit beim Fügen von Werkstoffen angewandt wird und auch für Faserverbundmaterialien geeignet ist. Die Bolzenverbindung ist eine sehr einfache und kostengünstige Fügetechnik. Sie kommt meist dann zum Einsatz, wenn großflächige, relativ dickwandige Bauteilkomponenten gefügt werden.

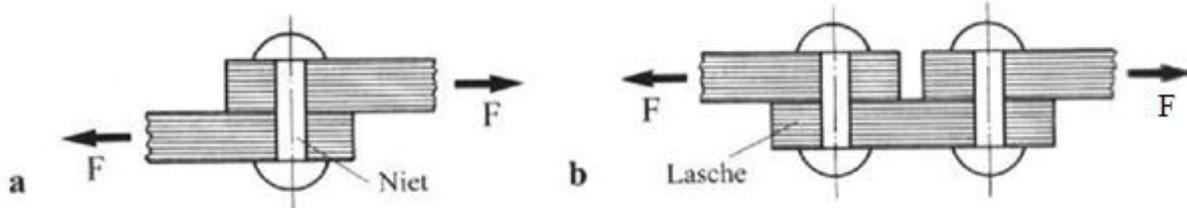


Abbildung 17 Einschnittige Bolzenverbindungen [4]

Problematisch bei Faserverbundwerkstoffen ist die Delamination aufgrund von Lochleibung (siehe Abbildung 18). An den Bauteilrändern treten durch die Bolzenverbindung, bei Beanspruchung, Spannungsspitzen auf. Diese ungleichmäßige Verteilung der Spannung über den Bauteilquerschnitt erzeugt Schubspannungen zwischen den einzelnen Laminatschichten. Durch diese Schubspannungen kommt es zur vorzeitigen Delamination des Faserverbundwerkstoffes.

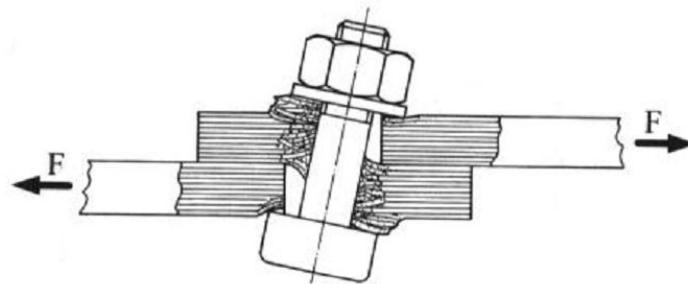


Abbildung 18 Delamination durch Lochleibung [4]

Um die Lochleibung zu reduzieren kann man entweder die Vorspannkraft der Bolzenverbindung erhöhen, indem man zum Beispiel die Schraube fester anzieht oder man führt die Verbindung, wie in Abbildung 19 dargestellt, als zweischnittige Verbindung aus.

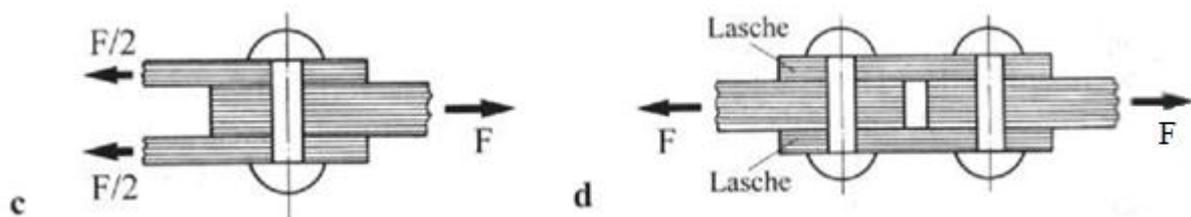


Abbildung 19 Zweischnittige Bolzenverbindungen [4]

4.1.5.3 Klebverbindung

Die Klebverbindung ist eine stoffschlüssige Verbindung, die dank stetiger Weiterentwicklung heute bereits eine so hohe Klebfestigkeit erreicht, dass sie auch bei höchstbelasteten Strukturbauteilen verwendet wird. Klebverbindungen eignen sich besonders gut für dünnwandige Bauteile mit großer Fügefläche. Es können auch verschiedenartige Werkstoffe, wie zum Beispiel GFK und Aluminium mit Kleben gefügt werden. Der Grundwerkstoff wird beim Fügen durch Kleben nicht thermisch beansprucht oder die tragenden Querschnitte durch Bohrungen beeinträchtigt. Klebverbindungen haben, wenn sie durchgehend ausgeführt werden auch die Eigenschaft wasserdicht zu sein, weshalb sie bei Anwendungen, die eine Wasserdichtheit erfordern, meist in Kombination mit anderen Fügetechniken verwendet werden. Abbildung 20 **A** zeigt eine unbelastete einschnittige Überlappungsklebung. Bei einschnittigen Überlappungsklebungen kommt es, wie in Abbildung 20 **B** dargestellt, bei Bauteilen mit einer geringen Steifigkeit zu einer Bauteilverformung und zusätzlichen Biegebeanspruchungen. Um dieses Problem zu meiden, gibt es die Möglichkeit der zweischnittigen Überlappungsklebung (siehe Abbildung 20 **C**). Dickwandigere Bauteile kann man auch als Schäftung ausführen (siehe Abbildung 20 **D**). [4]

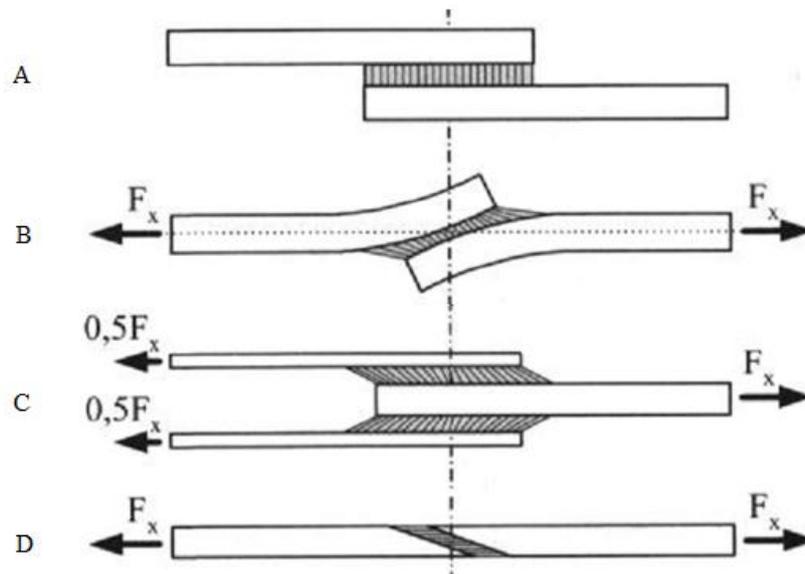


Abbildung 20 Klebmodelle [4]

Je nach Elastizität des Klebers ist bei Bauteilen mit geringer Bewegungstoleranz auf die Dehnung der Klebstoffschicht bei Belastung zu achten. Bei klebverbindungsgefügten Bauteilen kommt zur normalen Dehnung unter Belastung bei den Bauteilen auch die Dehnung der Klebstoffschicht hinzu (siehe Abbildung 21). [4]

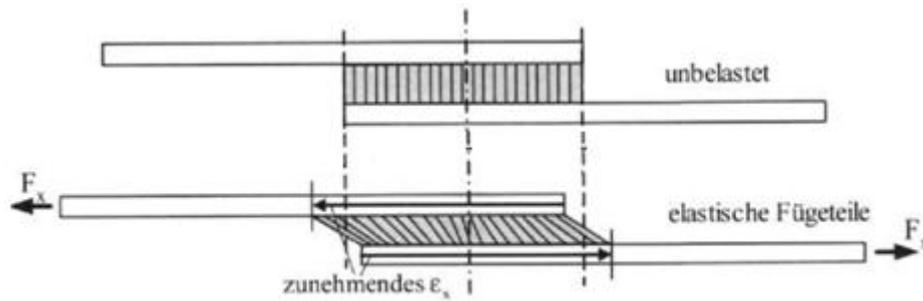


Abbildung 21 Dehnung der Bauteile und der Klebstoffschicht [4]

Nachteilig von Klebverbindungen ist auch die geringere thermische Beständigkeit und Streuung der Klebfestigkeit auf der Fügefläche. Aufgrund der Streuung kann es zu lokalen Spannungsspitzen in der Klebstoffschicht kommen und dadurch ein frühzeitiges Versagen auftreten. Klebverbindungen sind auch sehr anfällig für Schälbeanspruchung wie in Abbildung 22 dargestellt.

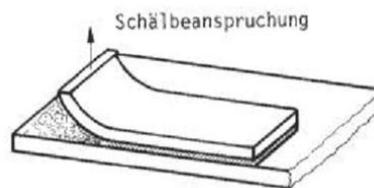


Abbildung 22 Schälbeanspruchung einer Klebverbindung [4]

Für eine höhere Festigkeit und Resistenz gegen Schälbeanspruchung gibt es die Ausführung der Klebverbindung als Hybridverbindung mit einer Bolzenverbindung (siehe Abbildung 23).

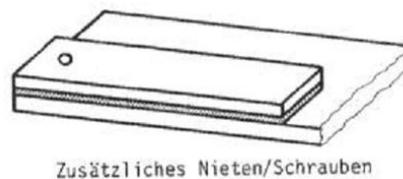


Abbildung 23 Hybridverbindung - Klebverbindung und Bolzenverbindung [4]

5 Prüfverfahren

5.1 Thermische Prüfverfahren

5.1.1 Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Die thermogravimetrische Analyse, kurz TGA, ist ein thermisches Prüfverfahren, bei dem die Masseänderung einer zu untersuchenden Probe in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit erfasst wird. Je nach Probe und Versuchsatmosphäre kann die Masseänderung positiv, zum Beispiel durch Oxidation, als auch negativ sein, durch Verdampfung, Zersetzung und dergleichen. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Massenänderung während des gesamten Versuchsablaufs können sowohl organische als auch anorganische Bestandteile zum Beispiel Füllstoffe oder Funktionsstoffe der Probe bestimmt werden. [1]

Die thermogravimetrische Analyse wurde verwendet, um den genauen Anteil der Fasern des Faserverbundkunststoffes zu ermitteln.

Abbildung 24 zeigt das für die folgenden Analysen verwendete Gerät.



Abbildung 24 Thermogravimetrisches Analysegerät

Ablauf und Messprinzip

Die Probe wird in einen Tiegel platziert, der beim Startvorgang des Versuchs automatisch in den Ofen geführt wird. Nachdem die Probe in den Ofen eingeführt wurde, verschließt sich dieser vakuumdicht. Die Probenmasse beträgt üblicherweise zwischen 10mg und 50mg bzw. maximal 100mg.

Sobald der Ofen vakuumdicht verschlossen ist, startet das vorgegebene Temperaturprogramm und es wird mit der Spülung der Ofenatmosphäre begonnen. Die Spülung besteht meist, je nach Versuchsvorhaben, aus Luft, Stickstoff und/oder Sauerstoff. Beim Temperaturprogramm beginnt sich der Ofen mit einer fest vorgegebenen Heizrate bis zu der gewünschten Endtemperatur zu erwärmen. Die Endtemperatur liegt meist weit über der Zersetzungstemperatur der Probe. Bei der Prüfung von Kunststoffen in etwa zwischen 600°C und 1000°C.

Abbildung 25 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau der Thermogravimetrischen Analyse.

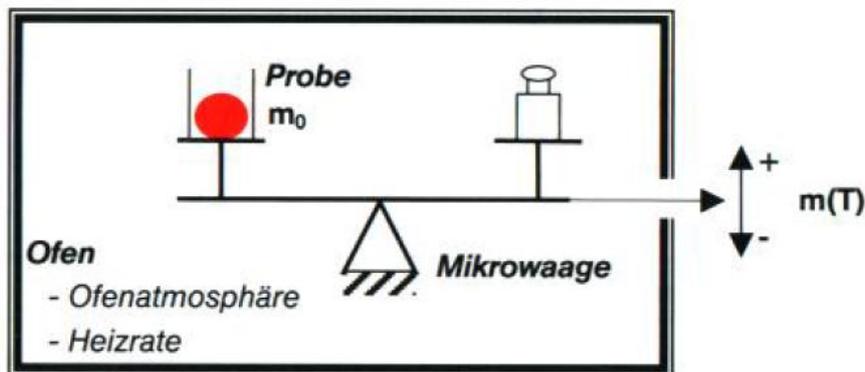


Abbildung 25 Versuchsanordnung der Thermogravimetrischen Analyse [1]

Die Masse und die Temperatur der Probe werden bei dem Aufheizvorgang durchgehend aufgezeichnet. Das Messprinzip der thermogravimetrischen Analyse basiert auf der Masseänderung der Probe in Abhängigkeit der Temperatur des Ofens. Verändert sich die Masse der Probe bedeutet dies, dass sie sich zu zersetzen beginnt. Um einen konstanten Reaktionsverlauf zu gewährleisten, wird die Atmosphäre des Ofens kontinuierlich nach Vorgabe mit Luft, Stickstoff und/oder Sauerstoff gespült. Die Kurve der Massenänderung gibt Aufschluss über mögliche brennbare Materialien. Nach dem Aufheizvorgang bleibt der nicht brennbare Bestandteil der Probe über, der bei Glasfaserverbundstoffen zum Beispiel den Glasfaseranteil ausmacht. [1]

Durchführung

Für die Durchführung wurden von den Kunststoffen jeweils zwei Proben mit einer angestrebten Masse von 50 mg entnommen. Die Proben wurden mit einer Semimikrowaage des Typs LE 225D der Firma Satorius gewogen. Für ein möglichst autonomes Ergebnis wurde darauf geachtet, dass die Entnahmestellen der Proben im Kunststoff nicht zu nahe beieinander lagen, um verfälschte Messergebnisse durch etwaige lokale Konzentrationsgefälle von Matrix oder Fasern am Ergebnis erkennen zu können.

Als Prüfmaschine wurde ein thermomechanisches Analysegerät der Firma TA Instruments verwendet. Das Temperaturprogramm wurde auf Raumtemperatur bis 820°C mit einer Aufheizrate von 10°C/min eingestellt. Die Atmosphäre des Ofens wurde während des gesamten Prüfvorgangs mit Luft gespült. Die gewonnenen Daten wurden anschließend am Computer mit dem Programm Universal Analysis ausgewertet.

5.1.2 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Die Dynamische Differenzkalorimetrie oder auch „Differential Scanning Calorimetry“ kurz DSC genannt ist ein thermisches Analyse Verfahren. Dabei werden die aufgenommenen und abgegebenen Wärmemengen Q einer Probe bei Aufheizvorgängen und Abkühlvorgängen aufgezeichnet. Je nachdem, ob eine Wärmemenge aufgenommen oder abgegeben wird, handelt es sich um endotherme oder exotherme Vorgänge. Aufgrund der aufgezeichneten aufgenommenen oder abgegebenen Wärmemengen der Probe kann man auf physikalische Umwandlungen, chemische Reaktionen oder physikalische Eigenschaften des Stoffes rückschließen. [1] Abbildung 26 zeigt das für die folgenden Analysen verwendete Gerät.



Abbildung 26 DSC Q2000

Ablauf und Messprinzip

Die zu untersuchende Probe wird in einem Tiegel zu einer inerten Referenz oder Vergleichsprobe in einem Ofen platziert. Die Masse der zu untersuchenden Probe liegt bei kristallinen Kunststoffen meist zwischen 5mg bis 10mg. Beide Proben werden einem vorgegebenen Temperatur-Zeit-Programm, unter einer definierten Ofenatmosphäre (meist Stickstoff- oder Sauerstoffatmosphäre), ausgesetzt. Dabei werden die auftretenden kalorischen Effekte der Probe im Vergleich zur verwendeten Referenz gemessen. Bei modernen Geräten für die dynamische Differenzkalorimetrie ist es auch möglich mehrere Proben parallel zu prüfen. Abbildung 27 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau der dynamischen Wärmestrom-Differenzkalorimetrie.

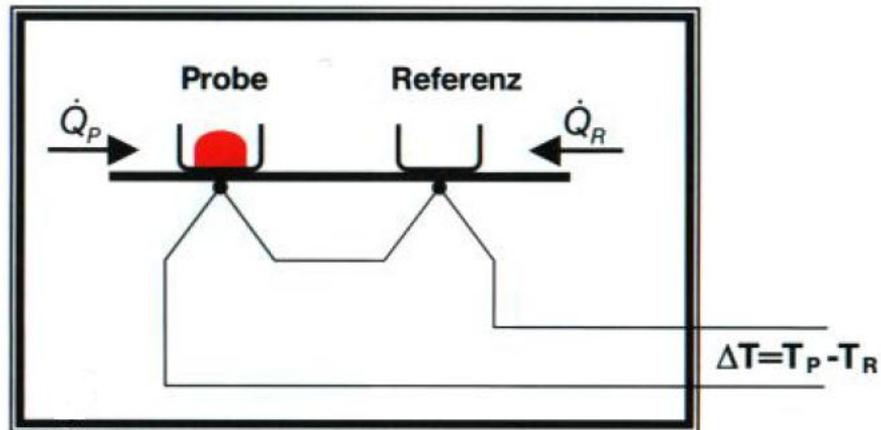


Abbildung 27 Versuchsanordnung der dynamischen Wärmestrom-Differenzkalorimetrie [1]

Beim Messprinzip der dynamischen Wärmestrom-Differenzkalorimetrie besteht die Vergleichsprobe/inerte Referenz meist aus einem leeren Tiegel. T_p bezeichnet die Temperatur der Probe und T_R die Temperatur der Referenz. Diese Temperaturen werden kontinuierlich während des gesamten Versuches gemessen. Der Messvorgang besteht üblicherweise aus zwei Aufheizvorgängen und einem dazwischenliegenden Abkühlvorgang. Der erste Aufheizvorgang liefert Information über die thermische Vorgeschichte bzw. bereinigt diese, der Abkühlvorgang und der zweite Aufheizvorgang liefern Informationen über den Werkstoff an sich. Tritt temperaturbedingt beim Versuch eine physikalische Umwandlung an der Probe auf, zum Beispiel ein endothermer Vorgang wie Schmelzen, benötigt diese zusätzliche Schmelzwärme. Dies hat zur Folge, dass die Wärmeströme an der Probe und Referenz nicht mehr gleich groß sind und es tritt eine Temperaturdifferenz zwischen T_p und T_R auf, die messtechnisch erfasst wird. Gleiches gilt auch für exotherme Vorgänge wie Kristallisation. Durch diese gemessenen Temperaturdifferenzen können Rückschlüsse auf Schmelz-, Kristallisations-, Glasübergangstemperatur, spezifische Wärmekapazität, thermische Vorgeschichte und noch weitere Eigenschaften der Probe geschlossen werden. [1]

Durchführung

Die Proben wurden zweimal zyklisch von 30°C auf 300°C mit einer Aufheizrate von 10K/min aufgeheizt und dazwischen auf 30°C mit einer Abkühlrate von 10K/min abgekühlt. Die Proben mit der angestrebten Masse von 5mg wurden mit einem Skalpell aus dem Kunststoff herausgeschnitten und mit der Semimikrowaage LE225D von Sartorius gewogen. Die gewonnenen Daten wurden anschließend am Computer mit dem Programm Universal Analysis ausgewertet.

5.1.3 Dynamisch-mechanische Analyse (DMA)

Die dynamisch-mechanische Analyse oder auch kurz „DMA“ ist ein thermisches Analyseverfahren, das bei gebräuchlichen Messungen Aufschluss über viskoelastische Eigenschaften der Probe gibt wie Steifigkeit und Dämpfung in Abhängigkeit von Temperatur und einer frequenziellen Belastung. [1]

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die DMA jedoch dazu verwendet um Vorversuche durchzuführen, bei denen einzelne Pins in den Faserverbundkunststoff mit verschiedenen Temperatur- und Druckprogrammen eingepresst wurden. Auf Basis der aufgezeichneten Daten wurden dann die Temperaturbereiche für die ersten Vorversuche in der Heißpresse festgelegt. Im Folgenden werden der Versuchsablauf und das Messprinzip erklärt.



Abbildung 28 DMA Q800

Ablauf und Messprinzip

Der zu untersuchende Kunststoff wurde auf ein festes Podest in der DMA gelegt und direkt darauf eine Metallplatte aus Stahl mit einem aufgeschweißten Pin. Beim Versuch selbst wird die bepinnte Metallplatte von oben mit einer Prüfkraft beaufschlagt, die den Pin in den Kunststoff drückt. Der Kunststoff und die bepinnte Metallplatte hatten Abmessungen von etwa 30mm x 30mm. Danach wurde das gewünschte Temperatur- und Druckprogramm eingestellt, mit dem der Pin in den Kunststoff gepresst wurde. Der Versuch wurde unter einer Atmosphäre aus Luft durchgeführt. Während des gesamten Versuches wurden Temperatur, Druck und vertikale Verschiebung der bepinnten Metallplatte gemessen. Die vertikale Verschiebung der bepinnten Metallplatte ist gleichzusetzen mit der Eindringtiefe des Pins in den Kunststoff. Durch die während des Versuchs aufgezeichneten Daten wurden Rückschlüsse auf das Erweichungs- und Schmelzverhalten des Kunststoffes gezogen.

Durchführung

Es wurden Versuche mit zwei verschiedenen Temperatur- und Druckprogrammen durchgeführt. Versuche mit ansteigender Temperatur und konstantem Druck und Versuche mit konstanter Temperatur und ansteigendem Druck. Der Versuchsaufbau war in beiden Fällen der gleiche.

Beim Versuch mit ansteigender Temperatur und konstantem Druck wurde die bepinnte Metallplatte mit einer fixen Prüfkraft beaufschlagt. Beim Versuch mit dem kurzfaserverstärkten Polyamid belief sich diese Prüfkraft auf 6N, beim Versuch mit dem endlosfaserverstärkten Polyamid wurde sie wegen der Faserbündel im Kunststoff etwas höher gewählt und belief sich auf 10N. Das Temperaturprogramm war für das kurzfaserverstärkte und endlosfaserverstärkte Polyamid gleich. Die Temperatur wurde mit 2 K/min von Raumtemperatur auf 270°C erhöht.

Auf der Basis der Versuche mit ansteigender Temperatur wurden dann die Versuche mit konstanter Temperatur und ansteigendem Druck durchgeführt. Die Versuche wurden dreimal bei verschiedenen Temperaturen (255°C, 260°C und 265°C) durchlaufen. Anders als beim Versuch mit ansteigender Temperatur wird hier am Anfang noch kein Druck beaufschlagt. Es wird zuerst langsam der Kunststoff erwärmt und eine Zeit lang durchgewärmt, um ihn auf die gewünschte Temperatur zu bringen. Sobald die Zeit zum Durchwärmen vorbei ist, wird der Prüfdruck konstant von 0N auf 16N erhöht und somit die bepinnte Metallplatte in den Kunststoff gedrückt. Mit diesen Temperatur- und Druckprogrammen wurde sowohl das kurzfaser- als auch das endlosfaserverstärkte Polyamid geprüft.

Die gewonnenen Daten wurden anschließend am Computer mit dem Programm Universal Analysis ausgewertet.

5.2 Mechanische Prüfverfahren

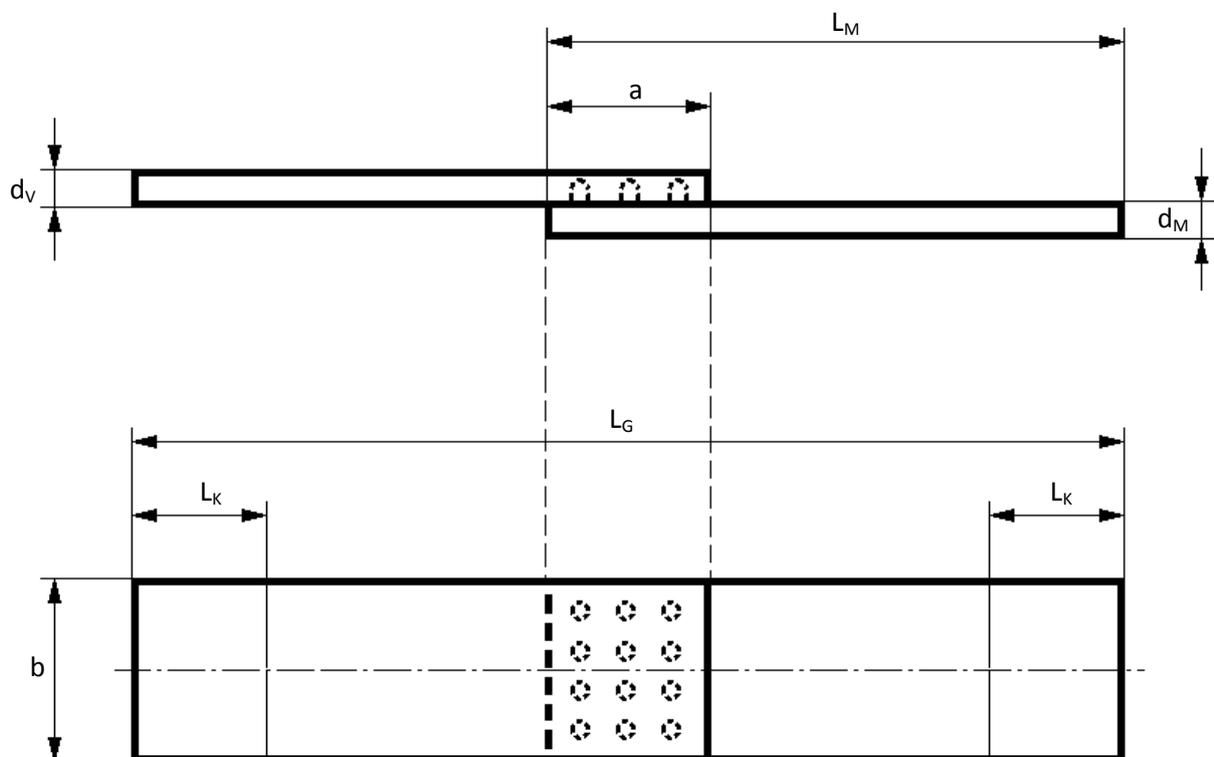
Im Folgenden werden die für die Proben leicht modifizierten Prüfverfahren erläutert.

5.2.1 Scherzugversuch

Für den Scherzugversuch wurde die Norm EN 2243-1:2005 als Vorlage verwendet. Sie dient der Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen. Für die notwendigen Probengeometrien wurde dieses Prüfverfahren geringfügig den Bedingungen angepasst.

Der Scherzugversuch wurde als Prüfverfahren gewählt, da er einfach durchzuführen ist und eine gute Vergleichsmöglichkeit der Zugscherfestigkeit der Fügeverbindung der Proben bietet.

Abbildung 29 zeigt die schematische Darstellung einer Scherzugversuchsprobe.



- | | |
|--|---|
| a... Überlappungslänge | b... Breite |
| L _G ... Gesamtlänge | L _M ... Länge der Metallplatte |
| L _K ... Klemmlänge | d _M ... Dicke der Metallplatte |
| d _V ... Dicke des Verbundes | |

Abbildung 29 Schematische Darstellung einer Scherzugversuchsprobe

Für die genaue Herstellung der Proben wird auf Kapitel 6.3 verwiesen.

Für die Proben wurden die Maße wie in Tabelle 3 angeführt gewählt.

Tabelle 3 gewählte Probengeometrie für den Scherzugversuch

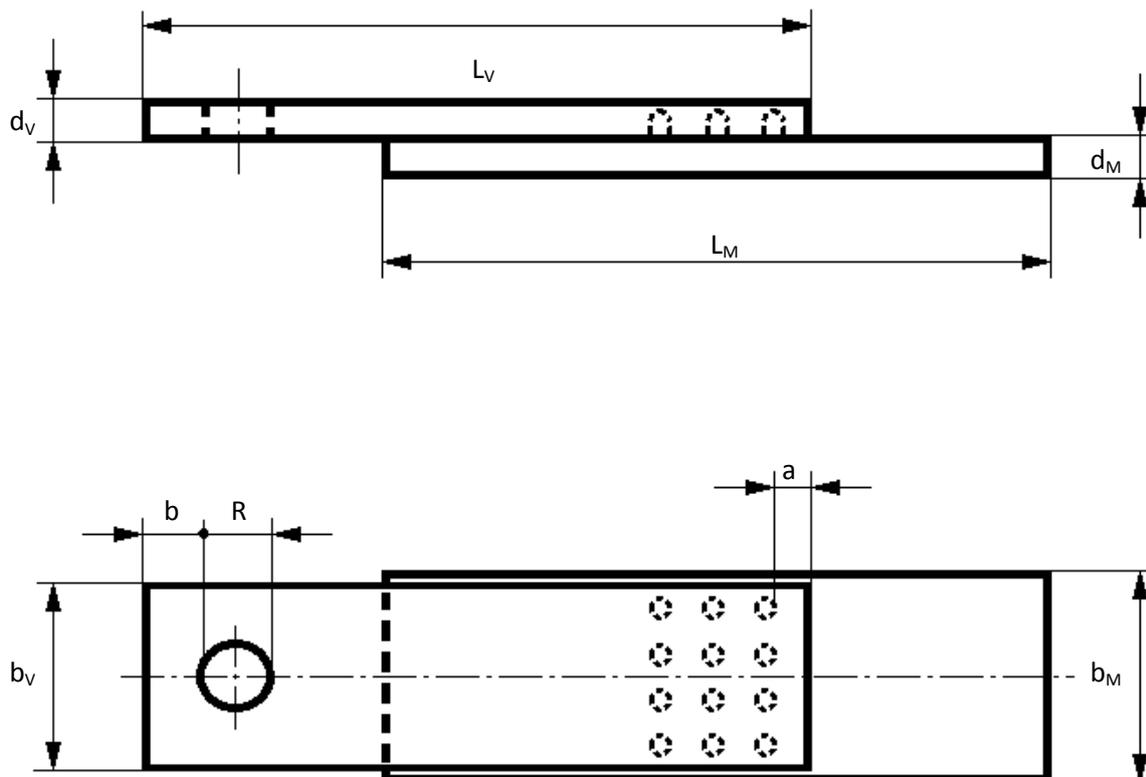
Probengeometrie Scherzugversuch	
	[mm]
$L_G =$	100
$L_F =$	65
$L_K =$	24
$d_M =$	2,2
$d_V =$	2,15
$a =$	22
$b =$	22

Für die Prüfung wurde eine Traversengeschwindigkeit von 10mm/min gewählt. Es wurden von jedem Probentyp 4 Stück bis zum Versagen der Probe geprüft und dabei die Zugfestigkeit ermittelt. Als Prüfmaschine wurde die Zwick/Roell Z050 verwendet.

5.2.2 Schälzugversuch

Für die Ermittlung des Schälwiderstandes der Fügeverbindung wurden Schälzugversuche, angelehnt an die deutsche Industrienorm EN 2243-2, durchgeführt. Anders als bei der Norm, bei der der Schälzugversuch an zwei durch Kleben gefügte Metallplatten ausgeführt wird, handelt es sich hier bei den Prüfkörpern um bepinnte Metallplatten, die durch ein Heißpressverfahren mit glasfaserverstärktem Polyamid gefügt wurden. Die Fügefläche beschränkt sich hier auf den Bereich der angeschweißten Pins an die Metallplatte.

Abbildung 30 zeigt die schematische Darstellung einer Schälzugversuchsprobe.



L_V ... Länge Verbund	L_M ... Länge Metallplatte
b_V ... Breite Verbund	b_M ... Breite Metallplatte
d_V ... Dicke des Verbundes	d_M ... Dicke der Metallplatte
a ... Überstand	b ... Bohrungsabstand zum Rand
R ... Bohrungsdurchmesser	

Abbildung 30 Schematische Darstellung einer Schälzugversuchsprobe

Für die genaue Herstellung der Proben wird auf Kapitel 6.3 verwiesen.

Für die Proben wurden die Maße wie in Tabelle 1 angeführt gewählt.

Tabelle 4 gewählte Probengeometrie für den Schälzugversuch

Probengeometrie Schälzugversuch	
	[mm]
$L_M =$	67
$L_V =$	65
$b_M =$	22
$b_V =$	20
$d_M =$	2,2
$d_V =$	2,15
$a =$	2
$b =$	5
$R =$	5

Wie in Abbildung 30 ersichtlich wurde in jede Probe in den Kunststoffteil ein Loch mit einem Durchmesser von 5mm gebohrt. An diesem Loch wurde eine Vorrichtung mit Scharnier montiert für die Durchführung der Prüfungen. Dabei wurde die bepinnte Metallplatte der Probe unten zwischen zwei Backen eingespannt und das am Kunststoff befestigte Scharnier an zwei um 90° zu den unteren Backen oben eingespannt (siehe Abbildung 31 a)). Abbildung 31 b) zeigt die Einzelteile der verwendeten Vorrichtung.

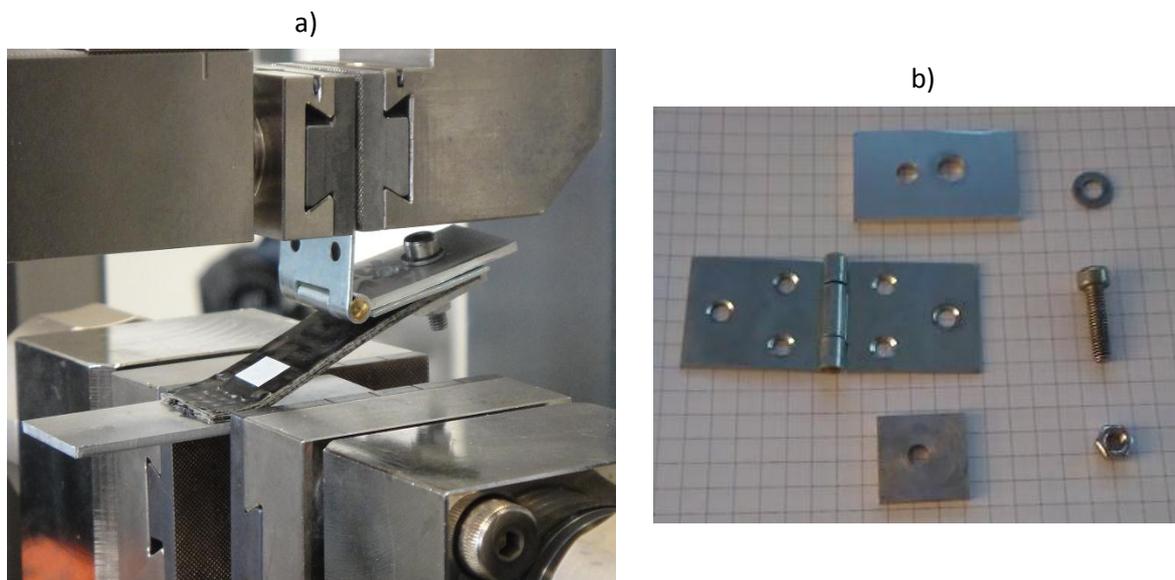


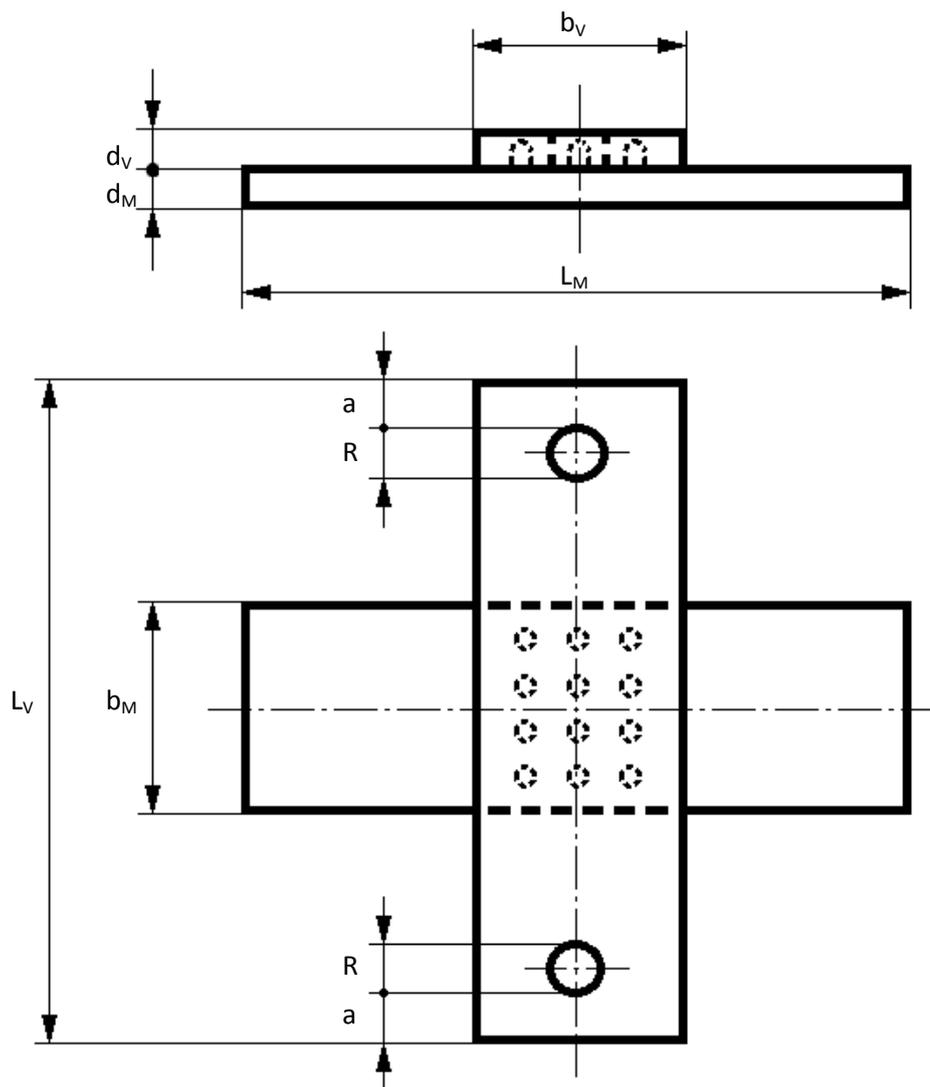
Abbildung 31 a) Schälzugversuch, **b)** Einzelteile Scharnier/Halterungsvorrichtung

Für die Prüfung wurde eine Traversengeschwindigkeit von 10mm/min gewählt. Es wurden von jedem Probentyp 4 Stück bis zum Versagen der Probe geprüft und dabei der Schälwiderstand ermittelt. Als Prüfmaschine wurde die Zwick/Roell Z050 verwendet.

5.2.3 Kopfbzugversuch

Der Kopfbzugversuch wurde verwendet um die Zugkraft zu ermitteln, die die Fügeverbindung in Belastungsform eines Kopfbzuges ertragen kann. Der Kopfbzugversuch wurde in Anlehnung an die deutsche Industrienorm EN ISO 14272[15] durchgeführt. Anders als bei der Norm handelt es sich hier nicht um eine Punktschweißung, sondern um die Fügeverbindung von heißverpressten Pins mit einer Kunststoffplatte. Die Fügefläche erstreckt sich somit über den Bereich der angeschweißten Pins.

Abbildung 32 zeigt die schematische Darstellung einer Kopfbzugversuchsprobe.



L_V ... Länge Verbund	L_M ... Länge Metallplatte
b_V ... Breite Verbund	b_M ... Breite Metallplatte
d_V ... Dicke des Verbundes	d_M ... Dicke der Metallplatte
a ... Abstand zum Rand	R ... Bohrungsdurchmesser

Abbildung 32 Schematische Darstellung einer Kopfbzugversuchsprobe

Für die genaue Herstellung der Proben wird auf Kapitel 6.3 verwiesen.

Für die Proben wurden die Maße wie in Tabelle 5 angeführt gewählt.

Tabelle 5 gewählte Probengeometrie für den Kopfzugversuch

Probengeometrie Kopfzugversuch	
	[mm]
$L_M =$	67
$L_V =$	65
$b_M =$	22
$b_V =$	22
$d_M =$	2,2
$d_V =$	2,15
$a =$	5
$R =$	5

Da es sich in diesem Fall nicht um zwei punktgeschweißte Metalle, sondern um eine bepinnte Metallplatte gefügt mit einem Faserverbundkunststoff handelt, wurde eine spezielle Stützvorrichtung für den kunststoffseitigen Teil der Fügeverbindung verwendet. Ohne die Stützvorrichtung würde sich der Faserverbundkunststoff stark verformen und das Messergebnis verfälschen. Abbildung 33 a) zeigt die bereits an einer Probe montierte Stützvorrichtung, eingelegt in die Prüfmaschine. Abbildung 33 b) zeigt die Einzelteile der Stützvorrichtung. Für die Montage der Stützvorrichtung auf der Probe kommen die größeren Metallplatten auf die Rückseite des Kunststoffs und die kleineren auf die Seite, an der sich auch die verpresste bepinnte Metallplatte befindet. Durch die Bohrungen im Kunststoff hindurch werden die einzelnen stützenden Metallplatten miteinander verschraubt.

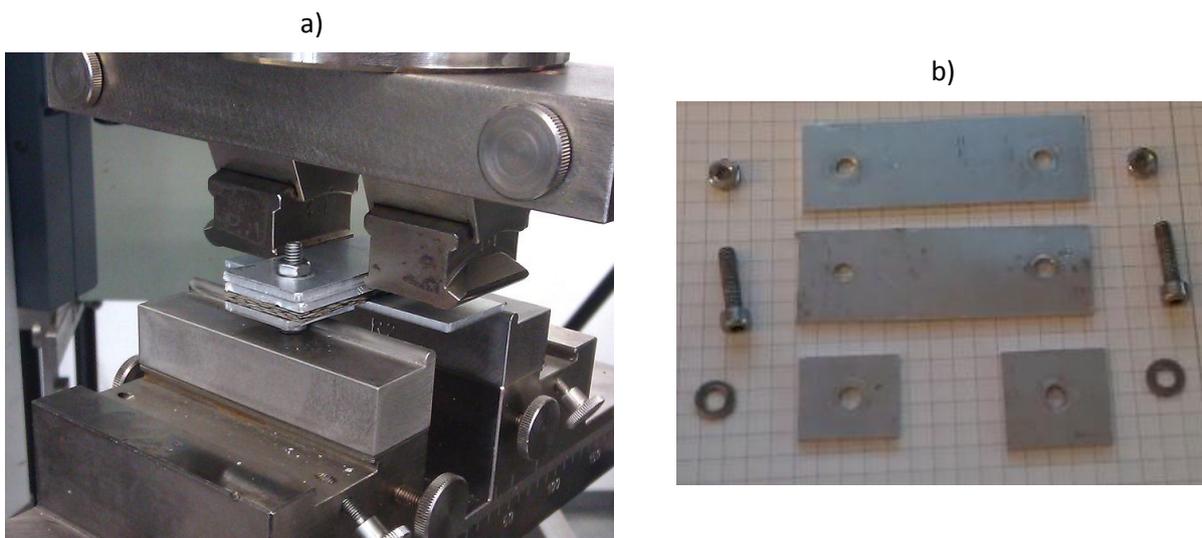


Abbildung 33 a) Kopfzugversuch, b) Einzelteile Verstärkungsvorrichtung

Für die Prüfung wurde eine Traversengeschwindigkeit von 10mm/min gewählt. Es wurden von jedem Probentyp 4 Stück bis zum Versagen der Probe geprüft und dabei die ertragene Zugkraft der Proben ermittelt. Als Prüfmaschine wurde die Zwick/Roell Z050 verwendet.

5.3 Optische Untersuchung

Alle Proben durchliefen direkt nach dem Heißpressvorgang eine optische Untersuchung mit bloßem Auge. Dabei wurden die Proben auf Risse, Blasenbildung, Verrinnen des Polyamids oder nach sonstigen Auffälligkeiten untersucht. Anschließend wurden auch einige Proben lichtmikroskopisch untersucht.

5.3.1 Lichtmikroskopie

Zur Charakterisierung und Beschreibung der Fügeverbindung wurden lichtmikroskopische Aufnahmen gemacht. Dabei wurden der Formschluss der Fügeverbindung und die Hohlraumbildung im Kunststoff untersucht.

Für die Untersuchung wurden die heißverpressten Proben mit einem Discotom der Firma Struers möglichst nahe entlang einer Pinreihe zerteilt. Danach wurden die Proben mit einer Schleif- und Poliermaschine für Probenpräparation des Typs ECOMET V von der Firma Buehler mit grobem Schleifpapier weiter abgetragen, bis die Mitte der Pins in der Pinreihe erreicht wurde. Anschließend wurde die Oberfläche der Probe mit immer feinerem Schleifpapier für die auflichtmikroskopischen Aufnahmen geschliffen. Die folgende Tabelle zeigt die durchgeführten Schritte.

Tabelle 6 Schleifprogramm

Schritt	Rauigkeit Schleifpapier	Kühlmittel
1	80	Wasser
2	120	Wasser
3	320	Wasser
4	1000	Wasser
5	2400	Wasser
6	4000	Wasser

Die so entstandene Oberfläche wird nun mit einem Axioplan Lichtmikroskop der Firma Zeiss unter Hellfeldbeleuchtung aufgenommen.

Diese Untersuchung wurde bei den Proben 1 bis 16 mit dem Heißpressverfahren mit kunststoff- und metallseitiger Erwärmung angewandt.

6 Proben

6.1 Probenmaterialien

Die Ausgangsmaterialien für die Proben wurden von den kooperierenden Firmen der Masterarbeit zur Verfügung gestellt.

Bei den geprüften Kunststoffen handelt es sich um **glasfaserverstärktes Polyamid 66** in zwei verschiedenen Ausführungen. Einmal als **kurzfaserverstärktes** und einmal als **endlosfaserverstärktes** Polyamid.

Die **bepinnten Metallplatten** sind aus **Stahl** und **Aluminium**.

6.2 Probenparameter

Nach Auswahl der Versuche für die Prüfung der Fügefestigkeit der Heißpressfügeverbindung galt es, nun die geeigneten Probengeometrien für die endgültigen Probenformen der Versuche zu entwerfen sowie die für die Herstellung benötigten Zwischenschritte.

Für die endgültig gewählten Probengeometrien der Versuche wird auf die vorherigen Kapitel verwiesen:

Probengeometrie für den Zugversuch siehe Kapitel 5.2.1.

Probengeometrie für den Schälzugversuch siehe Kapitel 5.2.2.

Probengeometrie für den Kopfzugversuch siehe Kapitel 5.2.3.

6.2.1 Parameter der Pinanordnung und der Pins

Für die Festigkeit der Fügeverbindung sind viele Parameter ausschlaggebend. Da die Prüfung aller Parameter jedoch sehr umfangreich ist, wurde bei den Pins die Variation auf die Abstände zwischen den Pins begrenzt. Die Pinanordnung und Fügefläche wurden in Anlehnung an die Normen EN 2243-1 [13], EN 2243-2 [14] und EN ISO 14272 [15] gestaltet, um eine einheitliche, prüfungsgerechte Fügefläche für alle drei Versuchsarten zu gewährleisten.

Es wurde eine Fügefläche mit rasterartiger Pinanordnung von 3 Reihen mit jeweils 4 Pins gewählt, einmal mit einem Abstand von 3mm und einmal mit einem von 4mm von Pinmitte zu Pinmitte.

Abbildung 34 zeigt schematisch die Pinanordnung mit 3mm Abstand von Pinmitte zu Pinmitte, Abbildung 35 zeigt die Pinanordnung mit 4mm Abstand.

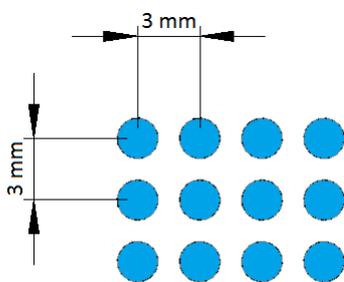


Abbildung 34 Pinanordnung mit 3mm Abstand

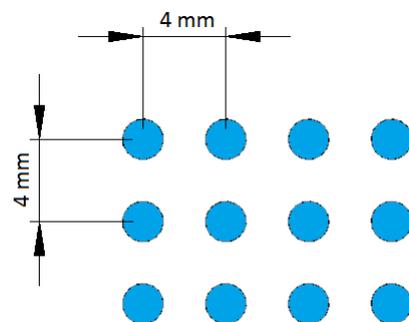


Abbildung 35 Pinanordnung mit 4mm Abstand

Als zu prüfende Pinform wurde der zylinderförmige Pin mit aufgesetztem Kugelkopf gewählt. Da der Kunststoff nur eine Dicke von 2mm hat, der bei den späteren Heißpressversuchen mit den bepinnten Metallplatten heißverpresst wird, darf die Höhe der Pins ebenfalls nicht 2 mm überschreiten. Abbildung 36 bildet schematisch die Seitenansicht eines zylinderförmigen Pins mit aufgesetztem Kugelkopf ab.

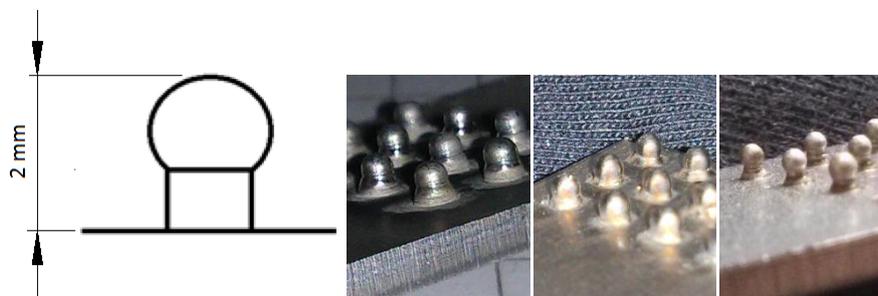


Abbildung 36 Schema eines zylinderförmigen Pins mit aufgesetztem Kugelkopf, Seitenansicht, und Beispiele von Pins auf Metallplatten

6.2.2 Bepinnte Metallplatten

Zur Überprüfung des Einflusses verschiedener Fügmaterialien auf der metallenen Seite der Fügeverbindung, wurden zwei verschiedene Materialien, Aluminium und Stahl, geprüft.

Die Größe der bepinnten Metallplatten der Proben wurde für alle drei Prüfverfahren und beide Materialien einheitlich gewählt. Sie haben eine Länge von 66,7 mm eine Breite von 22,2 mm und eine Dicke von 2 mm.

Es wird für die Prüfverfahren lediglich zwischen zwei Positionen der Pins, also der späteren Fügeflächen unterschieden. Für den Kopf- und Schälzugversuch wird eine andere Fügeflächenpositionierung benötigt als für den Scherzugversuch.

Für den Kopfbzugversuch und Schälzugversuch sind die Pins in der Mitte der Metallplatte positioniert (siehe Abbildung 37 Schema bepinnte Metallplatte). Für den Scherzugversuch sind die Pins am Rand der Metallplatten positioniert (siehe Abbildung 38).

Die folgenden Abbildungen zeigen schematisch die Metallplatten und die Lage der aufgeschweißten Pins mit einem Abstand von 3mm (jeweils links in den Abbildungen) und mit einem Abstand von 4mm (jeweils rechts in den Abbildungen).

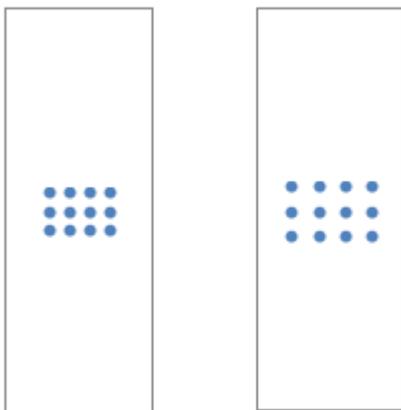


Abbildung 37 Schema bepinnte Metallplatte
Kopf- und Schälzugversuch

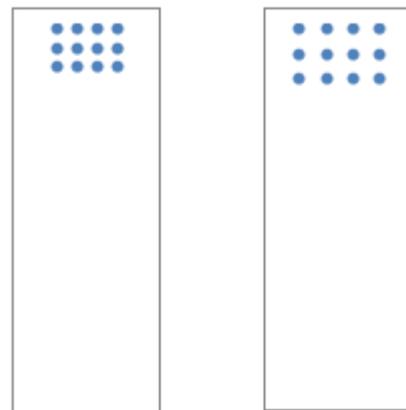


Abbildung 38 Schema bepinnte Metallplatte
Scherzugversuch

Für die Herstellung dieser bepinnten Metallplatten wurden zunächst die Pins auf eine große Grundmetallplatte aufgeschweißt und diese dann in der gewünschten Probengröße zugeschnitten. Aus verarbeitungstechnischen Gründen wurde die Größe der Grundmetallplatte auf 200mm x 200mm dimensioniert. Abbildung 39 zeigt das Schnittmuster der Metallplatten für den Zug- und Schälzugversuch. Die blauen Punkte zeigen schematisch die Positionen der aufgeschweißten Pins.

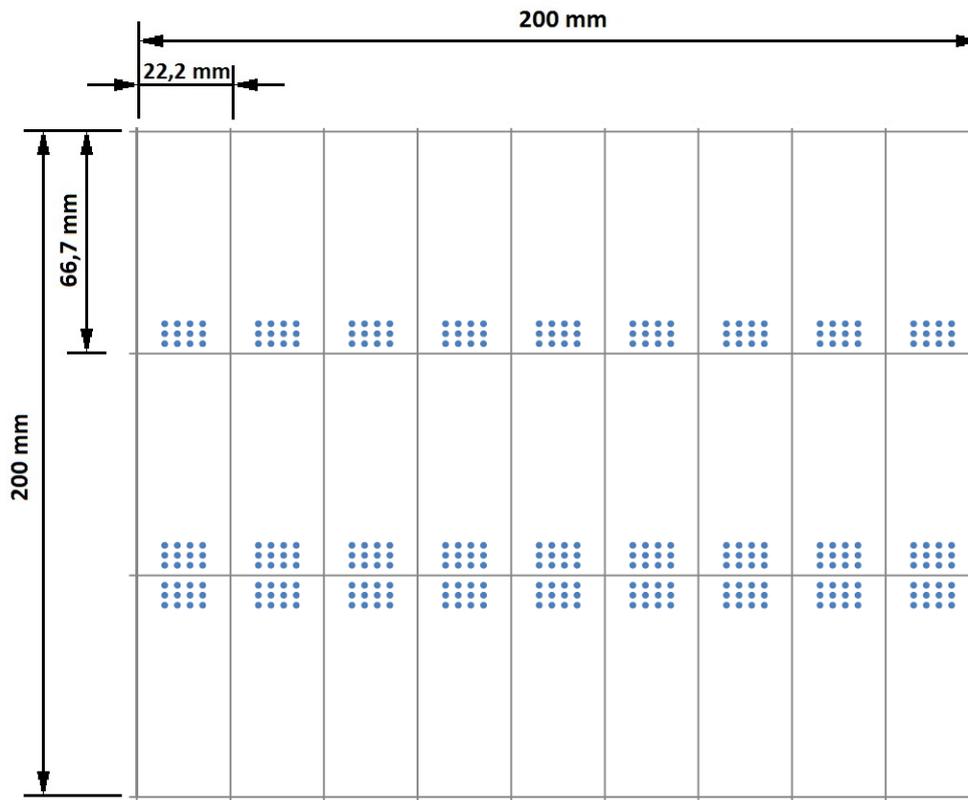


Abbildung 39 Schnittmuster der bepinnten Metallplatten für den Zugversuch

Abbildung 40 zeigt das Schnittmuster der Metallplatten für Kopf- und Schälzugversuch. Die blauen Punkte zeigen schematisch die Positionen der aufgeschweißten Pins.

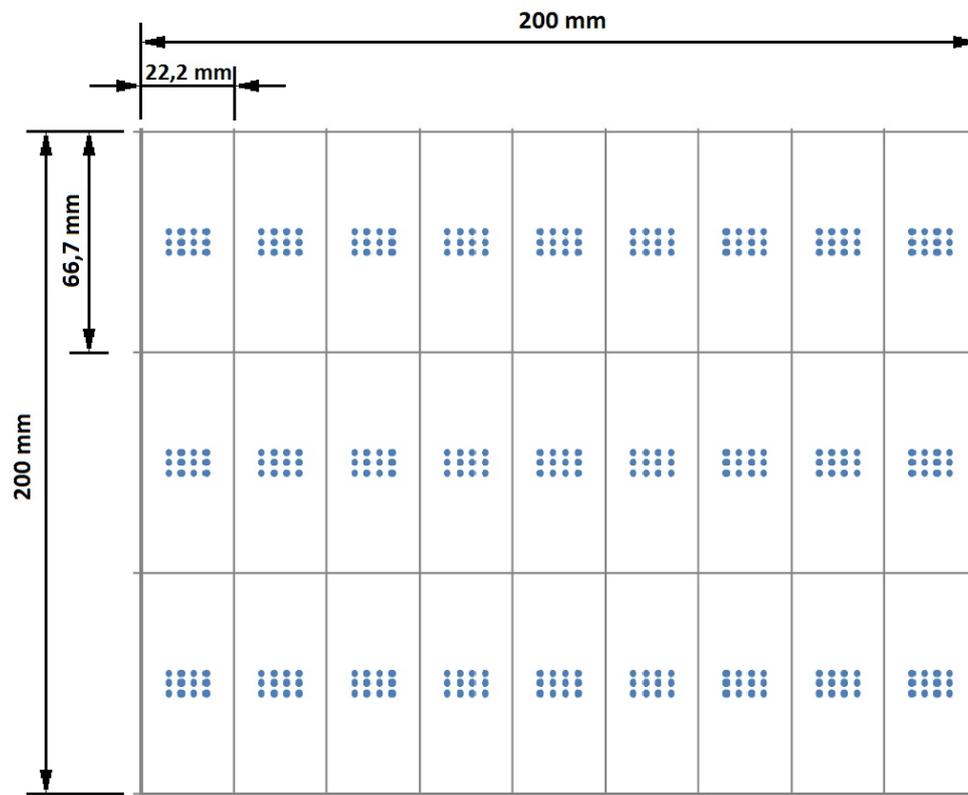


Abbildung 40 Schnittmuster der bepinnten Metallplatten für den Kopf- und Schälzugversuch

6.2.2.1 Herstellungsproblematik

Die bepinnten Metallplatten wurden bereits fertig zugeschnitten geliefert. Jedoch kam es bei der Herstellung der bepinnten Metallplatten zu Komplikationen und dadurch zu Unregelmäßigkeiten in der Ausführung. Abbildung 41 zeigt schematisch die optimale Probenausführung.

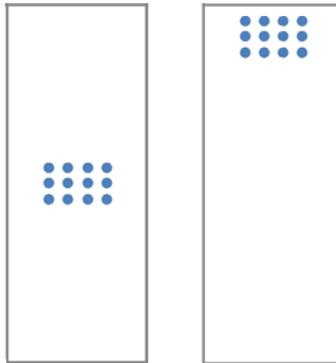


Abbildung 41 Schema bepinnte Metallplatten

Die Pins haben denselben Abstand zueinander und die bepinnte Fläche liegt zentriert entweder in der Mitte für Kopf- und Schälzugversuch oder am Ende mit einem geringen Abstand zum Rand.

Die folgenden Abbildungen zeigen aufgetretene Fehlstellungen der Pins und ungleichmäßige Zuschnitte der Metallplatten.

In Abbildung 42 **1.** sind die Pins nicht zentriert, sie liegen zu weit links. Bei der Metallplatte in Abbildung 42 **2.** wurde zu weit oben geschnitten und dadurch ist eine vierte Pinreihe vorhanden, die zu einer anderen Metallplatte gehört. Dementsprechend kam es zu Zuschnitten wie in Abbildung 42 **3.**, in der eine Pinreihe fehlt. Bei Abbildung 42 **4.** wurde so knapp an der Pinreihe abgeschnitten, dass die Pins bereits angeschnitten wurden.

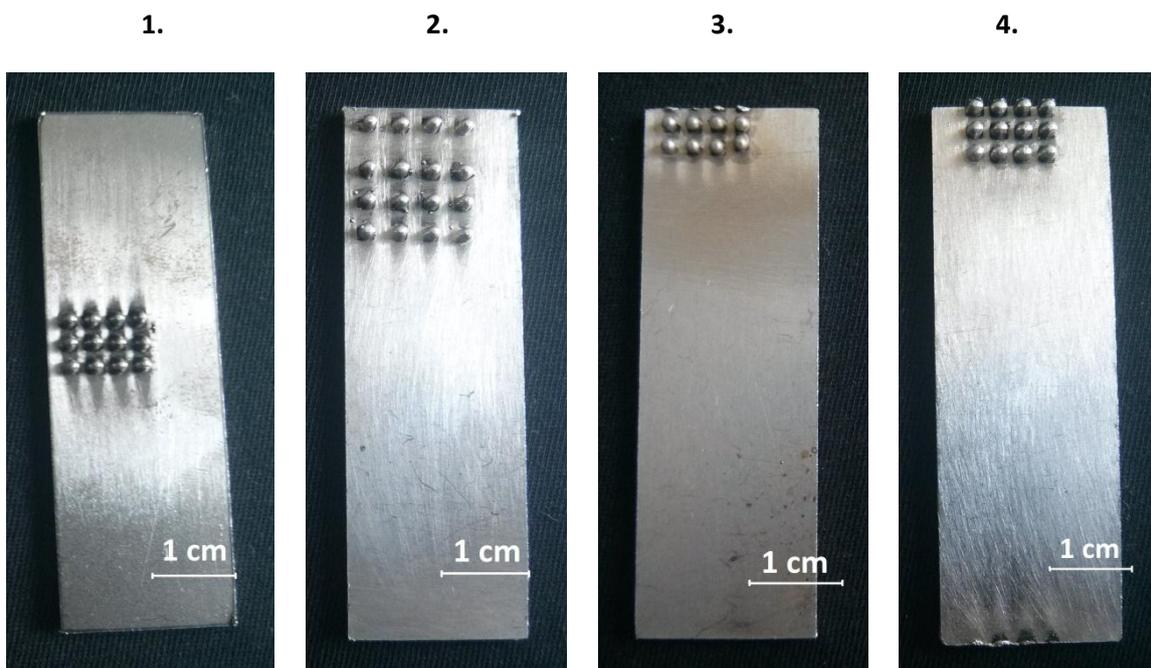


Abbildung 42 Schnittfehler

In Abbildung 43 **5.** verschmelzen die oberen Pinreihen zu einer. Abbildung 43 **6.** und **7.** zeigt die Fehlpositionierung einzelner Pins. In Abbildung 43 **8.** sind die Pins wesentlich dünner als bei den anderen Metallplatten. Dieser Fehler trat ausschließlich bei der Charge der Stahlplatten mit 4mm Pinabstand auf.

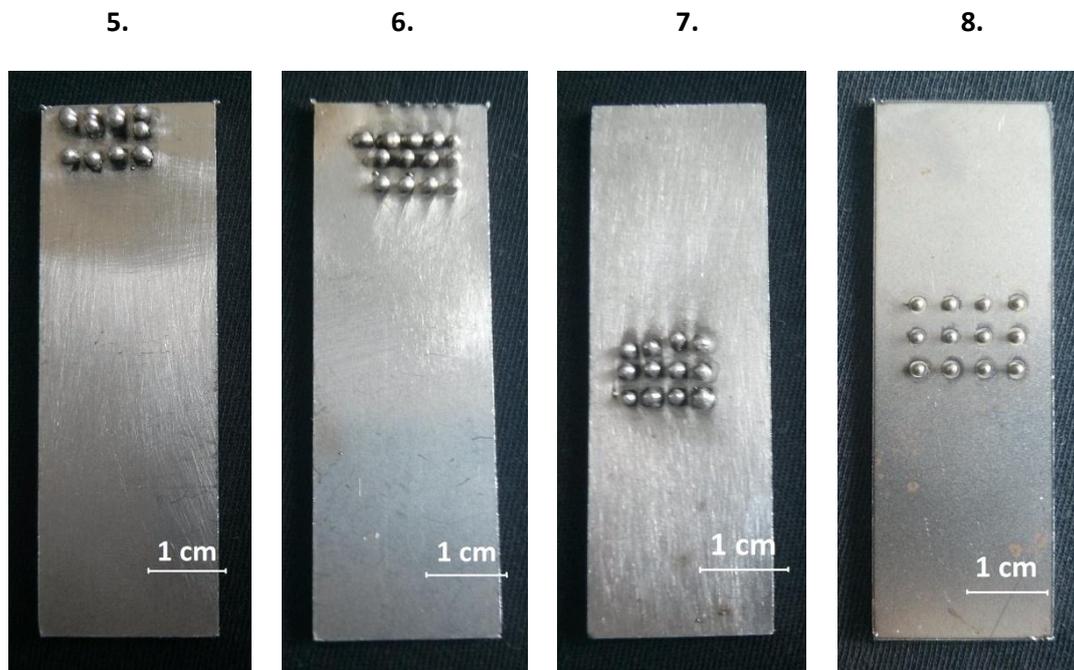


Abbildung 43 Pinfehler

Generell galt, dass es bei den Metallplatten aus Stahl nur zu Schnittfehlern kam und dass die Pins dünner waren. Bei denen aus Aluminium kam es zu Pinfehlern und Schnittfehlern.

Für die Probenherstellung an der Technischen Universität Wien wurde versucht, möglichst ähnlich geschnittene bzw. bepinnte Metallplatten zu verwenden, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Versuchen zu gewährleisten. Jedoch ist aufgrund dieser Problematik trotzdem mit einer größeren Streuung der Resultate zu rechnen.

Wichtig zu erwähnen ist auch, dass die dünneren Pins nicht nur einen geringeren Durchmesser besitzen, sondern auch einen ausgeprägteren Kugelkopf vorweisen (siehe Abbildung 44).



Abbildung 44 normaler Pin (links), dünner Pin (rechts)

Die bepinnten Metallplatten der folgenden Abbildungen entsprechen jenen, die durchschnittlich für die Probenherstellung verwendet wurden.

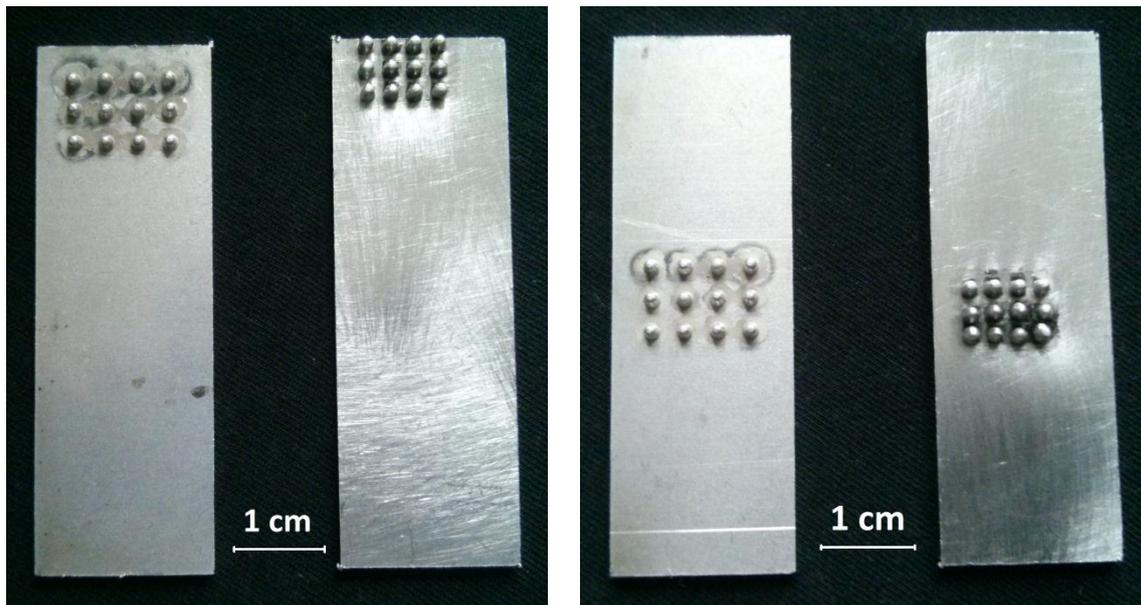


Abbildung 45 Aluminium mit 3mm und 4mm Pinabstand, links für Scherzugversuch, rechts für Kopf- und Schälzugversuch

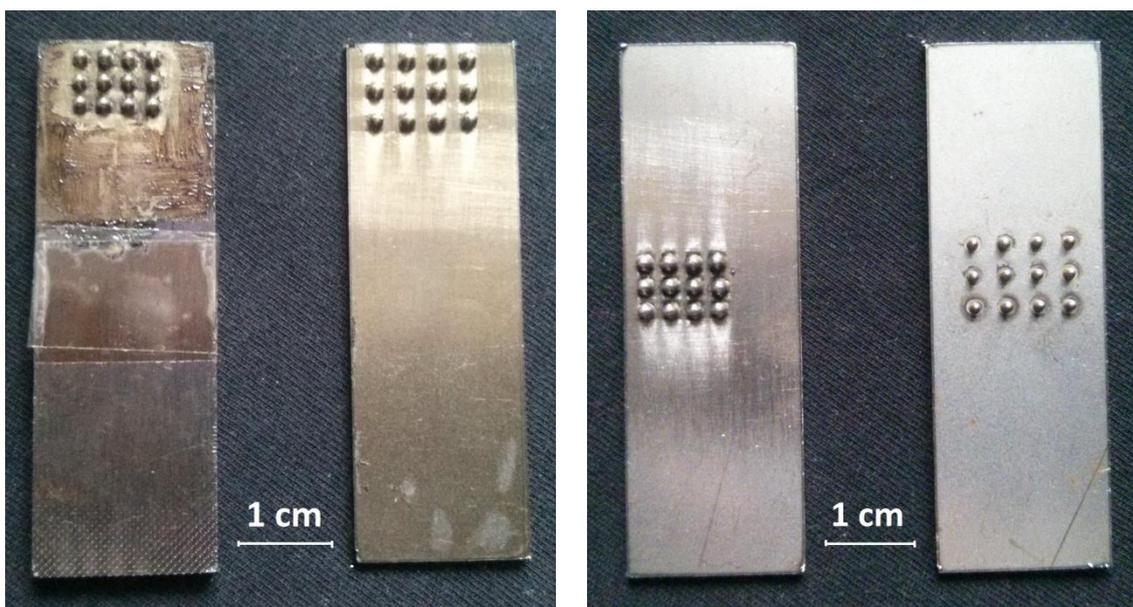


Abbildung 46 Stahl mit 3mm und 4mm Pinabstand, links für Scherzugversuch, rechts für Kopf- und Schälzugversuch

Die Aufnahme der bepinnten Metallplatte für den Scherzugversuch in Abbildung 46 mit 3mm Pinabstand wurde nach einem Versuch aufgenommen.

6.3 Probenherstellung

6.3.1 Heißpressverfahren

Die Proben für die anschließenden Versuche wurden mit dem Heißpressverfahren hergestellt.

Beim Heißpressverfahren werden zwei Füge­teile in ein beheizbares, in zwei Teile geteiltes Werkzeug eingelegt und durch Druck bei erhöhter Temperatur zusammengefügt.

Für das Heißpressen wurde die Labor-Plattenpresse des Typs P 200 P verwendet. Diese verfügt über ein integriertes Wasserkühlungssystem und ist laut Hersteller besonders geeignet für die Herstellung reproduzierbarer Proben. Abbildung 47 zeigt die zur Probenherstellung verwendete Labor-Plattenpresse.



Abbildung 47 Labor-Plattenpresse P 200 P

Ablauf des Heißpressverfahrens

In das offene Werkzeug, die Presse, werden die zu fügenden Teile übereinander eingelegt. Dabei ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Füge­flächen der zu fügenden Teile genau übereinander liegen. Bei der Heißpresse muss nun ein Temperatur-, Zeit- und Druckprogramm im Bedienfeld eingegeben werden. Beim Temperaturprogramm sind Starttemperatur (T_0), Aufheizrate, Verpresstemperatur (T_{MAX}), Abkühlrate und Endtemperatur (T_{End}) einzugeben. Beim Zeitprogramm sind die Vorheizdauer, Dauer des Aufheizens, Dauer des Verpressens und Dauer des Abkühlvorganges zu wählen. Beim Druckprogramm ist der Druck beim Aufheizvorgang, Verpressdruck und Druck während des Abkühlvorganges zu wählen. Wenn diese Parameter eingegeben wurden, kann das Heißpressverfahren gestartet werden.

Die Heißpresse wird geschlossen und erwärmt oder kühlt nun das Werkzeug mit maximaler Heiz- / Kühlleistung auf die gewünschte Anfangstemperatur und hält diese den vorgegebenen Zeitraum

konstant. Danach beginnt der Aufheizvorgang mit der gewählten Aufheizrate über die gewählte Zeitspanne unter dem vorgegebenen beaufschlagten Druck. Nach dem Aufheizvorgang erhöht sich der Druck auf den vorgegebenen Verpressdruck und die vorgegebene Zeit wird bei gleichbleibender Temperatur gehalten. Dies ist der eigentliche Fügeprozess. Nach dem Verpressen kommt die Abkühlphase. Hier wird wieder mit vorgegebener Abkühlrate mit Hilfe der Wasserkühlung der Füge teil unter vorgegebenem Druck abgekühlt. Danach öffnet sich die Presse und das gefügte Teil kann dem Werkzeug entnommen werden.

6.3.2 Heißpressvorversuche

Bevor die Proben für die tatsächlichen Versuche hergestellt wurden, sind Vorversuche durchgeführt und optisch ausgewertet worden, um eine möglichst hohe Qualität der Heißpressproben zu erreichen. Die Parameter für die Heißpressvorversuche wurden auf Basis der Erkenntnisse der Versuche aus dem Kapitel 7.1.3 gewählt. Zusätzlich zu den Angaben des gesamt aufgebrauchten Drucks der Labor-Plattenpresse auf die Proben wurde der Druck, der theoretisch auf einen einzelnen Pin beim Verpressen wirkt, angegeben mit der Einheit bar/Pin. Alle Angaben der Drücke liegen über Atmosphärendruck.

Die Heißpressvorversuche wurden bei allen Materialkombinationen mit drei verschiedenen Erwärmungsvariationen durchgeführt:

- Kunststoff- und metallseitige Erwärmung
- Metallseitige Erwärmung
- Kunststoffseitige Erwärmung

6.3.2.1 Kunststoff- und metallseitige Erwärmung

Beim kunststoff- und metallseitigen Erwärmen wurde der Kunststoff und die bepinnten Metallplatten gemeinsam im Werkzeug der Heißpresse erwärmt und anschließend verpresst. Die Verpresstemperaturen lagen 5°C und 10°C unterhalb des Schmelzpunktes des Polyamids. In den folgenden Tabellen sind die eingestellten Parameter aufgelistet. Es wurden immer alle vier Proben in einem Heißpressvorgang zugleich verpresst.

Tabelle 7 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C unter Schmelzpunkt, beidseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C unter Schmelzpunkt												
Probennummer	Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
1	Stahl	3 mm	25 °C	10 K/min	257 °C	2 min	5 bar (0,104 bar/Pin)	2 min	10 bar (0,208 bar/Pin)	10 K/min	5 bar (0,104 bar/Pin)	25 °C
2	Stahl	4 mm										
3	Alu	3 mm										
4	Alu	4 mm										

Tabelle 8 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C unter Schmelzpunkt, beidseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C unter Schmelzpunkt												
Probennummer	Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
5	Stahl	3 mm	32 °C	10 K/min	252 °C	2 min	5 bar (0,104 bar/Pin)	2 min	10 bar (0,208 bar/Pin)	10 K/min	5 bar (0,104 bar/Pin)	22 °C
6	Stahl	4 mm										
7	Alu	3 mm										
8	Alu	4 mm										

Tabelle 9 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C unter Schmelzpunkt, beidseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C unter Schmelzpunkt												
Probennummer	Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
9	Stahl	3 mm	27 °C	10 K/min	257 °C	2 min	5 bar (0,104 bar/Pin)	2 min	10 bar (0,208 bar/Pin)	10 K/min	5 bar (0,104 bar/Pin)	27 °C
10	Stahl	4 mm										
11	Alu	3 mm										
12	Alu	4 mm										

Tabelle 10 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C unter Schmelzpunkt, beidseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C unter Schmelzpunkt												
Probennummer	Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
13	Stahl	3 mm	32 °C	10 K/min	252 °C	2 min	5 bar (0,104 bar/Pin)	2 min	10 bar (0,208 bar/Pin)	10 K/min	5 bar (0,104 bar/Pin)	22 °C
14	Stahl	4 mm										
15	Alu	3 mm										
16	Alu	4 mm										

Zusätzlich zu den Heißpressversuchen knapp unterhalb des Schmelzpunktes des Polyamids wurden noch Heißpressversuche mit 200°C maximaler Verpresstemperatur durchgeführt, da, wenn es möglich ist, die Fügeteile bei 200°C zu verpressen, eine vorhergehende Beschichtung durch kathodisches Tauchlackieren (KTL) der bepinnten Metallplatten durchgeführt werden kann.

Die Versuchsreihe mit einer maximalen Heißpresstemperatur von 200°C wurde ebenfalls mit beidseitiger Erwärmung durchgeführt. Da durch geringere Temperatur die Viskosität des Kunststoffes höher ist, wurde ein wesentlich höherer Verpresdruck gewählt.

Tabelle 11 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 200°C Verpresstemperatur, beidseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 200°C Verpresstemperatur											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	20 °C	10 K/min	200 °C	5 min	15 bar <i>(0,313 bar/Pin)</i>	5 min	30 bar <i>(0,625 bar/Pin)</i>	10 K/min	15 bar <i>(0,313 bar/Pin)</i>	20 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 12 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 200°C Verpresstemperatur, beidseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 200°C Verpresstemperatur											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	50 °C	10 K/min	200 °C	5 min	15 bar <i>(0,313 bar/Pin)</i>	5 min	30 bar <i>(0,625 bar/Pin)</i>	10 K/min	15 bar <i>(0,313 bar/Pin)</i>	20 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 13 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 200°C Verpresstemperatur, beidseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 200°C Verpresstemperatur											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	25 °C	20 K/min	200 °C	5 min	30 bar <i>(0,625 bar/Pin)</i>	5 min	100 bar <i>(2,083 bar/Pin)</i>	20 K/min	50 bar <i>(1,042 bar/Pin)</i>	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 14 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 200°C Verpresstemperatur, beidseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 200°C Verpresstemperatur											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	25 °C	20 K/min	200 °C	5 min	30 bar <i>(0,625 bar/Pin)</i>	5 min	100 bar <i>(2,083 bar/Pin)</i>	20 K/min	50 bar <i>(1,042 bar/Pin)</i>	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

6.3.2.2 Metallseitige Erwärmung

Bei der Variante des metallseitigen Erwärms wurden zuerst nur die gepinnten Metallplatten in das Werkzeug der Heißpresse eingelegt, auf Verpresstemperatur erwärmt und die Zeit „Haltezeit 1“ bei Verpresstemperatur durchgewärmt. Anschließend wurde das Werkzeug geöffnet, der Kunststoff auf die gepinnten Metallplatten gelegt, das Werkzeug wieder geschlossen und der Heißverpressvorgang fortgesetzt. Die Abkühlvorgänge wurden auch hier variiert mit kontrolliertem und mit atmosphärischem Abkühlen bei Raumtemperatur.

Die folgenden Tabellen führen die gewählten Parameter beim metallseitigen Erwärmen an:

Tabelle 15 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C über Schmelzpunkt, metallseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C über Schmelzpunkt											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	27 °C	20 K/min	267 °C	1 min	5 bar (0,104 bar/Pin)	1 min	10 bar (0,208 bar/Pin)	10 K/min	0 bar (0,000 bar/Pin)	27 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 16 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C über Schmelzpunkt, metallseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C über Schmelzpunkt											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	27 °C	20 K/min	267 °C	1 min	5 bar (0,104 bar/Pin)	1 min	10 bar (0,208 bar/Pin)	10 K/min	0 bar (0,000 bar/Pin)	27 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 17 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre, metallseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	20 °C	max	272 °C	2 min	5 bar <i>(0,104 bar/Pin)</i>	2 min	10 bar <i>(0,208 bar/Pin)</i>	an Atm.	0 bar <i>(0,000 bar/Pin)</i>	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 18 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre, metallseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	60 °C	20 K/min	272 °C	2 min	5 bar <i>(0,104 bar/Pin)</i>	2 min	10 bar <i>(0,208 bar/Pin)</i>	an Atm.	0 bar <i>(0,000 bar/Pin)</i>	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 19 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre, metallseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	60 °C	20 K/min	272 °C	3 min	7 bar <i>(0,146 bar/Pin)</i>	2 min	15 bar <i>(0,313 bar/Pin)</i>	an Atm.	0 bar <i>(0,000 bar/Pin)</i>	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 20 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre, metallseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 10°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	60 °C	20 K/min	272 °C	3 min	0 bar <i>(0,000 bar/Pin)</i>	1 min	7 bar <i>(0,146 bar/Pin)</i>	an Atm.	0 bar <i>(0,000 bar/Pin)</i>	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 21 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; bei Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre, metallseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; bei Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	22 °C	20 K/min	262 °C	2 min	10 bar <i>(0,208 bar/Pin)</i>	2 min	30 bar <i>(0,625 bar/Pin)</i>	an Atm.	0 bar <i>(0,000 bar/Pin)</i>	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 22 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre, metallseitige Erwärmung

Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 66; 5°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	50 °C	20 K/min	267 °C	2 min	10 bar <i>(0,208 bar/Pin)</i>	2 min	30 bar <i>(0,625 bar/Pin)</i>	an Atm.	0 bar <i>(0,000 bar/Pin)</i>	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

6.3.2.3 Kunststoffseitige Erwärmung

Bei dieser Variante wurde zuerst nur der Kunststoff in das Werkzeug der Heißpresse eingelegt und auf Verpresstemperatur erwärmt. Nach einer kurzen Durchwärmphase, die der „Haltezeit 1“ entspricht, wurde das Werkzeug der Heißpresse geöffnet und die bepinnten Metallplatten auf den heißen Kunststoff aufgelegt. Anschließend wurde das Werkzeug wieder geschlossen und der Heißpressvorgang fortgeführt. Hierbei wurden zwei verschiedene Abkühlvorgänge verwendet. Abkühlung mit kontrollierter Abkühlrate und Abkühlung an der Atmosphäre. Beim Abkühlen an der Atmosphäre wurden die heißverpressten Proben direkt nach dem Fügevorgang im heißen Zustand aus dem Werkzeug entnommen und an der Atmosphäre bei Raumtemperatur abgekühlt.

Die folgenden Tabellen führen die gewählten Parameter beim kunststoffseitigen Erwärmen an:

Tabelle 23 Tabelle 10 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; bei Schmelzpunkt, kunststoffseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; Schmelzpunkt											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	22 °C	20 K/min	262 °C	1 min	5 bar (0,104 bar/Pin)	1 min	10 bar (0,208 bar/Pin)	10 K/min	0 bar (0,000 bar/Pin)	22 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

Tabelle 24 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 3°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre, kunststoffseitige Erwärmung

Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 66; 3°C über Schmelzpunkt, Abkühlung an Atmosphäre											
Metall	Pinabstand	T ₀	Aufheizrate	T _{max}	Haltezeit 1	Druck 1	Haltezeit 2	Druck 2	Abkühlrate	Druck 3	T _{End}
Stahl	3 mm	25 °C	20 K/min	265 °C	7 min	0 bar (0,000 bar/Pin)	2 min	7 bar (0,146 bar/Pin)	an Atm.	0 bar (0,000 bar/Pin)	25 °C
Stahl	4 mm										
Alu	3 mm										
Alu	4 mm										

6.3.3 Heißpressversuchsparameter

Auf Basis der zuvor durchgeführten Vorversuche und deren optischer Auswertung in Kapitel 7.2 wurden alle Proben für den Scher-, Kopf- und Schälzugversuch unter den in der folgenden Tabelle angeführten Bedingungen hergestellt. Die Parameter Druck 1, Druck 2 und Druck 3 beziehen sich dabei auf den gesamt aufgebrauchten Druck der Heißpresse. Da immer vier einzelne Proben miteinander verpresst wurden, ist der Druck per Probe nur ein Viertel oder auf die einzelnen Pins bezogen ein Viertel dieses Druckes dividiert durch die Anzahl der Pins pro Probe.

Tabelle 25 Heißpressversuchsparameter

Heißpressversuchsparameter	
Starttemperatur (T_0)	25°C
Aufheizrate	10 K/min
Maximaltemperatur (T_{\max})	257°C
Haltezeit 1	2 min
Druck 1	5 bar
Haltezeit 2	2 min
Druck 2	10 bar
Abkühlrate	10K/min
Druck 3	5 bar
Endtemperatur (T_{end})	25°C

Die folgende Abbildung veranschaulicht den gesamten Heißpressvorgang grafisch.

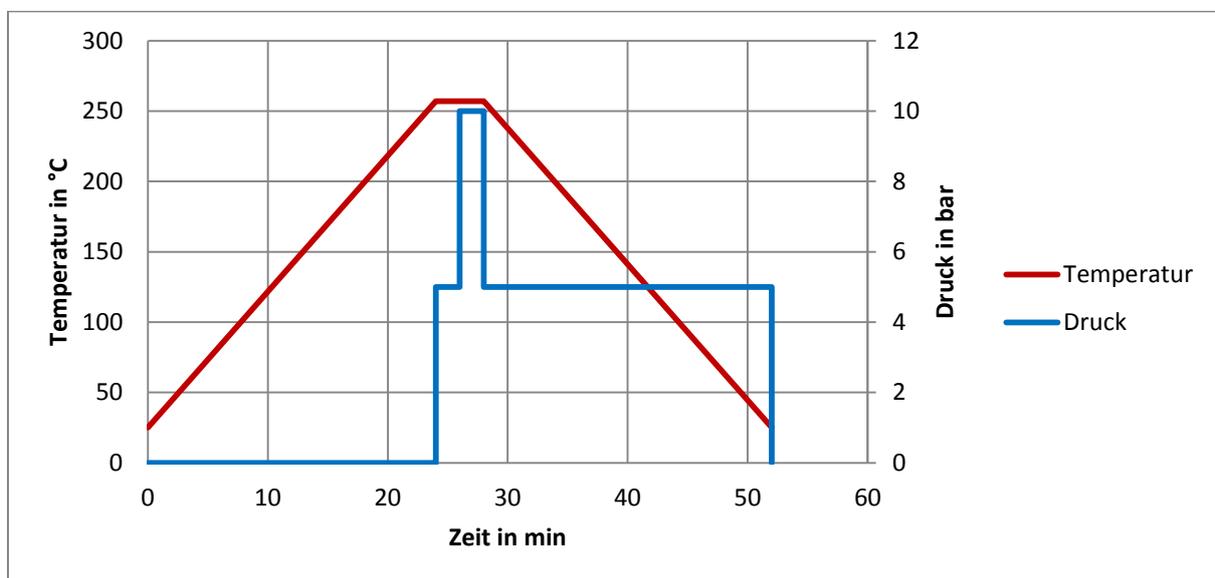


Abbildung 48 Druck- und Temperaturverlauf beim Heißpressvorgang

7 Ergebnisse

7.1 Thermische Eigenschaften

7.1.1 Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Die thermogravimetrische Analyse wurde verwendet, um den Faseranteil der kurz- und endlosglasfaserverstärkten Polyamide zu ermitteln. Die Analyse wurde zweimal mit jedem Material durchgeführt, wobei die Proben von unterschiedlichen Bereichen im Material entnommen wurden, um etwaigen Verfälschungen wie lokalen Konzentrationsunterschieden der Fasern entgegen zu wirken. Die Diagramme wurden mit dem Programm Universal Analysis erstellt.

Zusätzlich zur maschinellen Analyse wurde beim endlosfaserverstärktem Polyamid noch die klassische „Pyrolysemethode“ durchgeführt.

7.1.1.1 TGA kurzglasfaserverstärktes Polyamid

Abbildung 49 zeigt das Ergebnis der thermogravimetrischen Analyse vom kurzglasfaserverstärkten Polyamid. Der größte Teil der Matrix zersetzte sich bei ungefähr 450°C. Bei 560°C ist die Kurve komplett abgeflacht und somit die gesamte Matrix verdampft. Es bleibt bei Probe 1 ein prozentualer Gewichtsanteil von 34,9% und bei Probe 2 von 34,5% über. Dieser prozentuale Gewichtsanteil entspricht dem Faseranteil im Verbund.

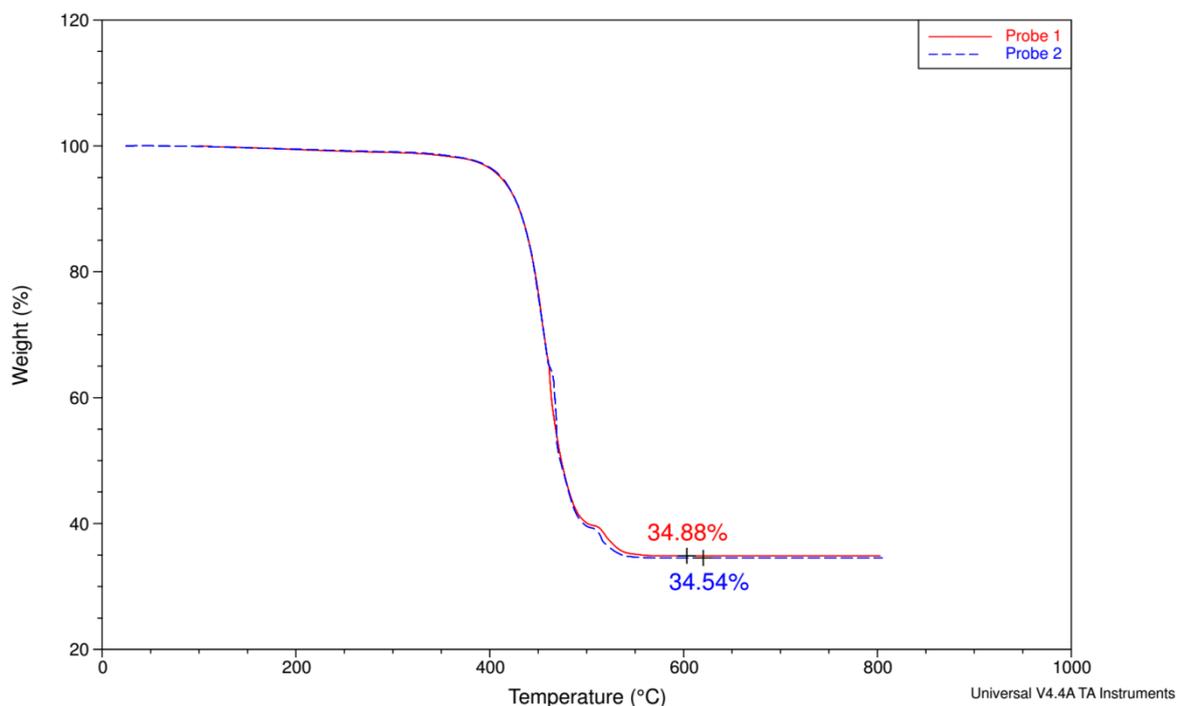


Abbildung 49 Ergebnis TGA kurzfaserverstärktes Polyamid

7.1.1.2 TGA endlosglasfaserverstärktes Polyamid

Abbildung 50 zeigt das Ergebnis der thermogravimetrischen Analyse vom endlosglasfaserverstärkten Polyamid. Da es sich um dasselbe Polyamid handelt wie beim kurzglasfaserverstärkten, wird auch hier der Großteil der Matrix bei ungefähr 450°C zersetzt. Die Kurve flacht allerdings erst bei etwa 600°C komplett ab. Dies ist höher als beim kurzglasfaserverstärkten Polyamid und ist darauf rückzuschließen, dass der höhere Faseranteil die gespülte Atmosphäre (Luft) nicht im selben Ausmaß wie beim kurzglasfaserverstärkten Polyamid in die inneren Bereiche der Probe vordringen kann. Es bleibt bei Probe 1 ein prozentualer Gewichtsanteil von 63,6% und bei Probe 2 von 63% über. Dieser prozentuale Gewichtsanteil entspricht dem Faseranteil des Verbundes.

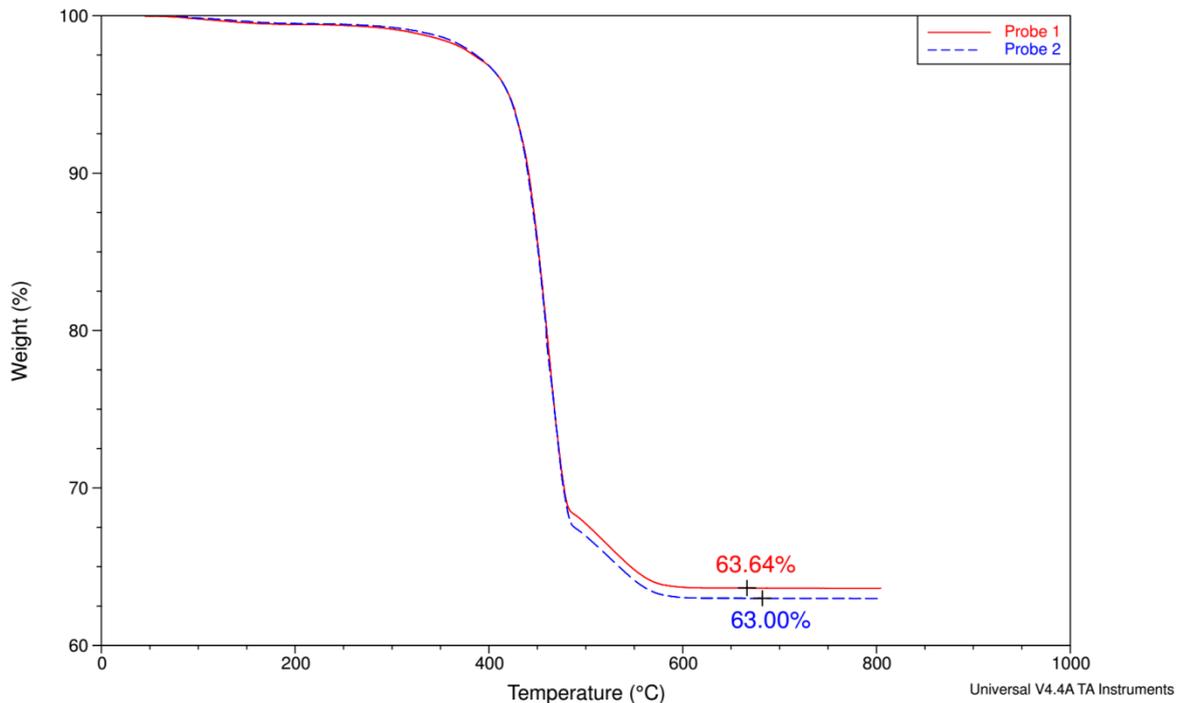


Abbildung 50 Ergebnis TGA endlosfaserverstärktes Polyamid

Da allerdings von einem Faseranteil von 45% ausgegangen wurde, der aus der Beschriftung der gelieferten Verbundplatten hervorging, ist noch eine manuelle Analyse durchgeführt worden. Dabei wurde eine Probe mit einem Gewicht von 1,478g in einem Reagenzglas mit einem Bunsenbrenner erhitzt, bis die Matrix komplett verdampft war. Das Gewicht wurde mit einer Präzisionswaage vor und nach dem Verdampfen gewogen. Es blieb ein prozentualer Gewichtsanteil von 64,2% über. Dies bestätigt die Ergebnisse der TGA.

Die folgende Tabelle zeigt noch einmal alle Ergebnisse der TGA im Überblick:

Tabelle 26 Ergebnisse TGA

	Faseranteil [M.-%]		
	Kurzfaser	Endlosfaser	Endlosfaser Manuelle Analyse
Probe 1	34,9%	63,6%	64,2%
Probe 2	34,54%	63%	-

7.1.2 Dynamische Differenzkalorimetrie

Die dynamische Differenzkalorimetrie wurde für die Ermittlung der Schmelz- und Kristallisations-temperatur verwendet. Die Diagramme wurden mit dem Programm Universal Analysis erstellt.

Abbildung 51 zeigt das Ergebnis des Versuches mit dem kurzfaserverstärkten Polyamid. Die Probe hatte eine Masse von 5,46mg. Der Schmelzpunkt liegt bei gerundeten 262°C. Der Kristallisationspunkt mit gerundeten 235°C sowie der Beginn der Kristallisation mit 240°C liegen unter dem Ergebnis des endlosfaserverstärkten Polyamids (siehe Abbildung 52). Die Ursache hierfür kann einerseits beim höheren Faseranteil des endlosfaserverstärkten Polyamids liegen und der daraus resultierenden größeren Grenzflächen oder andererseits kann es durch eine Inhomogenität des Werkstoffs oder durch Messabweichungen entstanden sein.

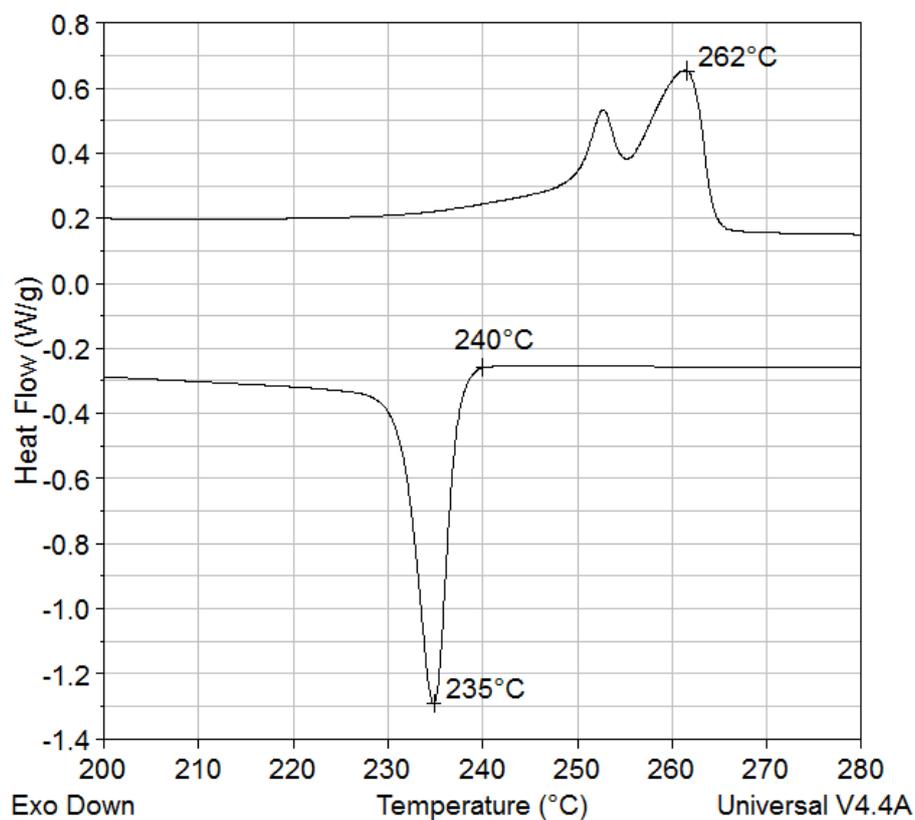


Abbildung 51 Ergebnis der DSC vom kurzfaserverstärkten Polyamid

Abbildung 52 zeigt das Ergebnis des Versuchs mit dem endlosfaserverstärkten Polyamid. Die Probe hatte eine Masse von 5,11mg. Der Kristallisationspunkt liegt bei gerundeten 237°C, der Beginn bei etwa 244°C. Da beim kurzfaserverstärkten Polyamid bei der ersten und zweiten Aufheizkurve sowie beim endlosfaserverstärkten Polyamid bei der zweiten Aufheizkurve ein Schmelzpeak bei 262°C erreicht wurde, wurde der allgemeine Schmelzpunkt für das Polyamid 66, trotz der gemessenen 261°C bei der ersten Aufheizkurve des endlosfaserverstärkten Polyamids, auf 262°C festgelegt.

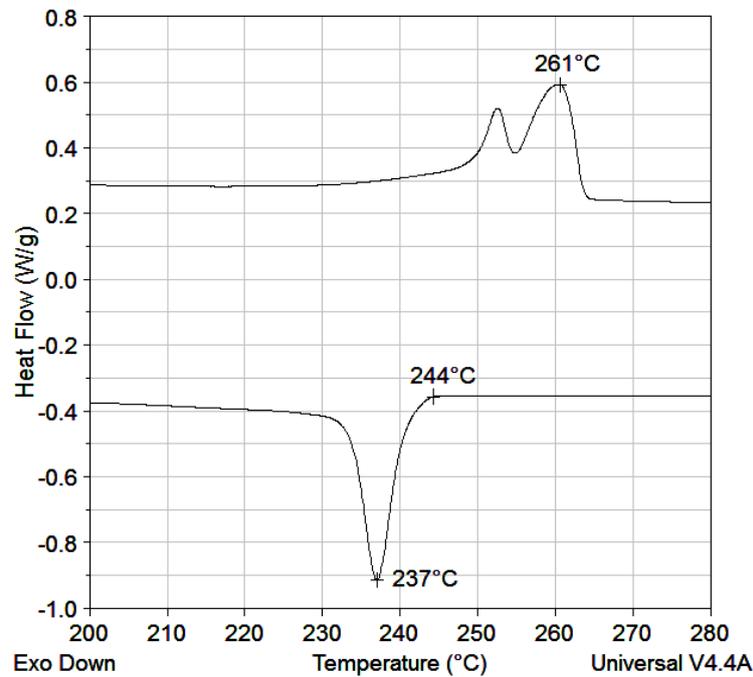


Abbildung 52 Ergebnis der DSC vom endlosfaserverstärkten Polyamid

Die folgende Abbildung zeigt die zweite Aufheizkurve des endlosfaserverstärkten Polyamids mit dem Schmelzpeak bei 262°C:

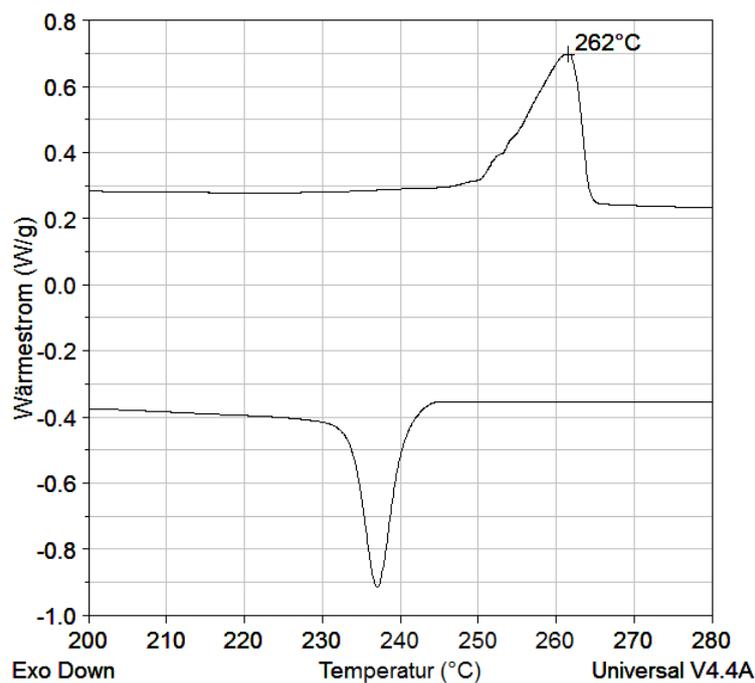


Abbildung 53 Ergebnis der DSC vom endlosfaserverstärkten Polyamid zweite Aufheiz- und Abkühlkurve

7.1.3 Untersuchung des Einsinkverhaltens der Pins in die Faserverbundkunststoffe

Das Gerät für die dynamisch-mechanische Analyse wurde im Rahmen dieser Masterarbeit nicht für die herkömmlichen Zwecke zur Bestimmung von Materialparametern wie Speichermodul, Verlustmodul und dergleichen verwendet, sondern als Vorversuch für die Ermittlung des Temperaturbereichs, in dem die späteren Heißpressversuche durchgeführt werden sollen.

Bei den folgenden Versuchen wurde ein auf ein 30mm x 30mm großes Stahlblech aufgeschweißter Stahlpin in das kurzfaserverstärkte sowie endlosfaserverstärkte Polyamid unter den vorgegebenen Temperaturprogrammen eingepresst. Die gewonnenen Messdaten wurden mithilfe des Programms Origin 8 ausgewertet und als Diagramme dargestellt.

7.1.3.1 Versuche bei ansteigender Temperatur

Die Versuche mit ansteigender Temperatur wurden unter einer konstanten Kraft, mit der der Stahlpin in das Polyamid eingedrückt wird, durchgeführt. Dabei wurde für das kurzfaserverstärkte Polyamid eine Prüfkraft von 6N gewählt und für das endlosfaserverstärkte Polyamid eine etwas höhere von 10N. Für das endlosfaserverstärkte Polyamid wurde eine höhere Prüfkraft gewählt, da der Stahlpin mehr Kraft benötigt, um in die Faserbündel einzudringen.

Abbildung 54 zeigt das Ergebnis mit dem kurzfaserverstärkten Polyamid bei einer Prüfkraft von 6N. Bei der Eindringtiefe repräsentiert 0 die Oberfläche des Kunststoffes und der negative Bereich das Eindringen in den Kunststoff.

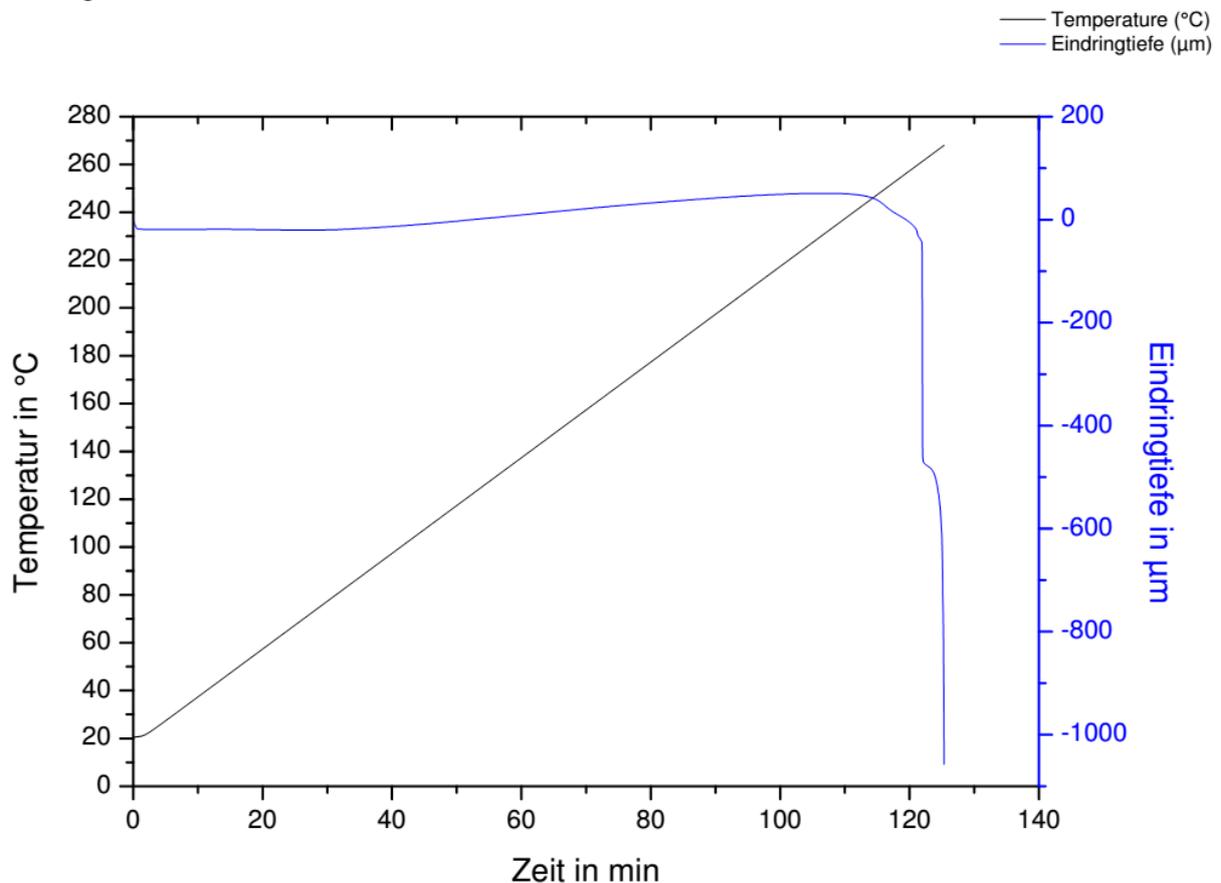


Abbildung 54 Analyse des Einsinkverhaltens eines Pins in das kurzfaserverstärkte Polyamid bei ansteigender Temperatur

Die Kurve der Eindringtiefe beginnt leicht unter 0, da bereits durch das Aufbringen der Prüfkraft der Pin geringfügig, durch elastische Verformung, in den Kunststoff eindringt. Das Ansteigen der Eindringtiefe in den positiven Bereich entsteht durch die Ausdehnung des Kunststoffes wegen der ansteigenden Temperatur. Das erste Abfallen der Kurve und somit Eindringen des Pins in den Kunststoff tritt bei 240°C auf. Erst bei knapp unter 260°C hat die Festigkeit des Kunststoffes durch die Erwärmung so stark abgenommen, dass der Pin tiefer in die Probe eindringen kann. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde die Temperatur für die Einpressversuche bei konstanter Temperatur für das kurzfaserverstärkte Polyamid bei 255°C, 260°C und 265°C gewählt.

Abbildung 55 zeigt das Ergebnis mit dem kurzfaserverstärkten Polyamid bei einer Einpresskraft von 10N. Auch hier wird der Kunststoff aufgrund der anfangs aufgebrachten Prüfkraft leicht elastisch verformt und der Pin aufgrund der Wärmeausdehnung des Kunststoffes nach oben gedrückt. Jedoch tritt hier zwischen der anfangs aufgebrachten Prüfkraft und der späteren Wärmeausdehnung noch ein leichtes Absinken der Kurve in den Minuten 15 bis 35 auf. Dies ist durch Relaxations- und Retardationsvorgänge zu erklären. Durch die höhere Prüfkraft von 10N und wegen der langen Prüfdauer kommen die zeitabhängigen mechanischen Eigenschaften des viskoelastischen Körpers, (dem Kunststoff) zu tragen.

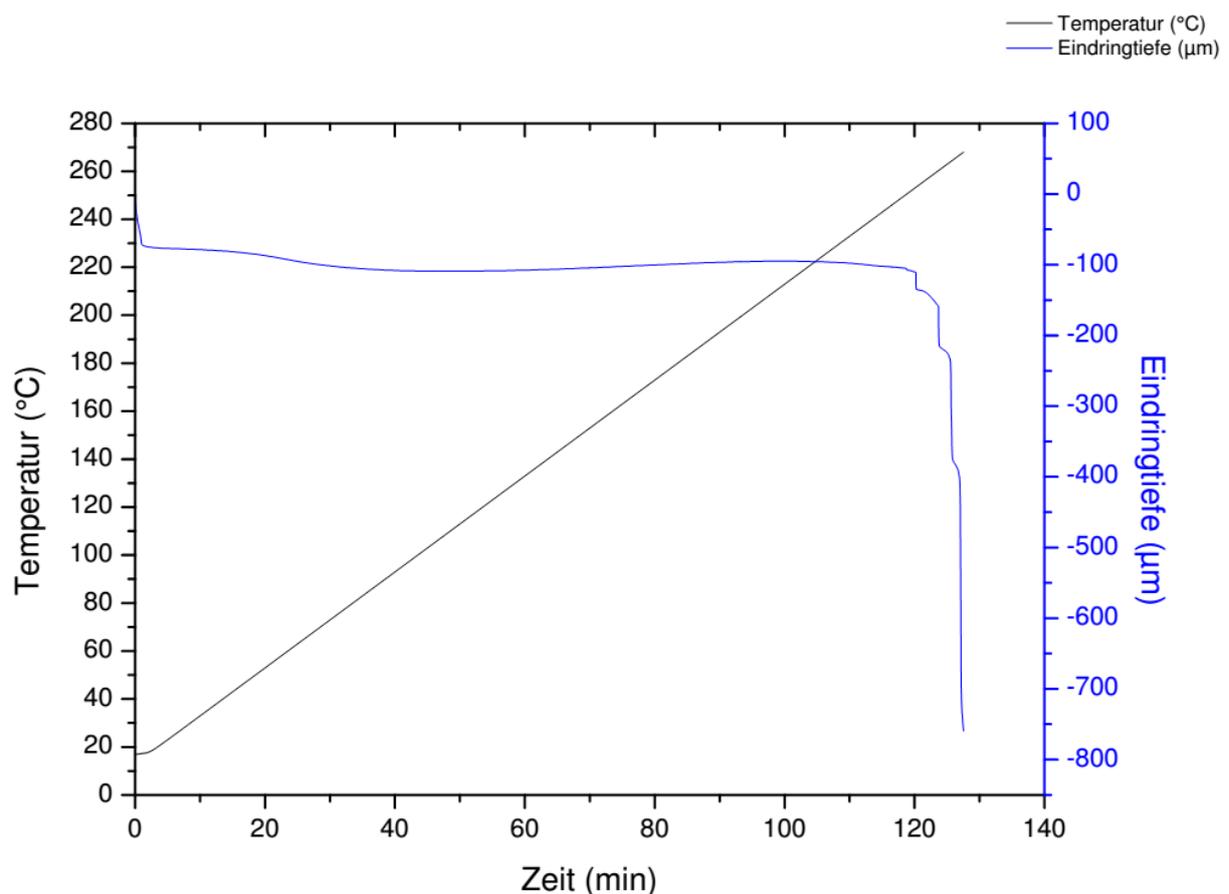


Abbildung 55 Analyse des Einsinkverhaltens eines Pins in das endlosfaserverstärkte Polyamid bei ansteigender Temperatur

Auch beim endlosfaserverstärkten Polyamid tritt das erste Abfallen der Kurve bei 240°C auf. Ein tatsächliches Eindringen des Pins auch erst bei knapp unter 260°C. Das stufenförmige Abfallen der Eindringkurve ist auf die Faserbündel, die der Pin beim Einpressen durchdringen muss,

zurückzuführen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde die Temperatur für die Einpressversuche bei konstanter Temperatur für das endlosfaserverstärkte Polyamid bei 255°C, 260°C und 265°C gewählt.

7.1.3.2 Versuche bei konstanter Temperatur

Bei den Versuchen mit konstanter Temperatur liegt zu Beginn am Stahlpin noch keine Prüfkraft an. Es wird zuerst auf die Temperatur für die Versuchsdurchführung aufgeheizt, dann wird 12 Minuten lang die Temperatur gehalten, sodass sich die Probe auch im Inneren auf die Temperatur aufheizt. Danach wird die Prüfkraft aufgebracht.

Kurzfaserverstärktes Polyamid

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Versuche mit dem kurzfaserverstärkten Polyamid. Bei 255°C dringt der Pin bereits tief in den Kunststoff ein, jedoch bleibt ein geringer Spalt zwischen Kunststoff und Stahlplatte bestehen. Bei 260°C kann der Pin so tief eindringen, dass der Kunststoff und die Stahlplatte bündig gefügt werden. Der Kunststoff zeigt geringe Veränderungen durch das Aufschmelzen. Da er von der Stahlplatte im teilweise flüssigen Zustand verdrängt wurde, quillt er geringfügig zu den Rändern hinaus. Bei 265°C dringt der Pin bereits komplett in den Kunststoff ein ohne Beaufschlagung der Prüfkraft. Mit Aufbringen der Prüfkraft fließt der Kunststoff, von der Stahlplatte verdrängt, zu den Rändern hin weg.

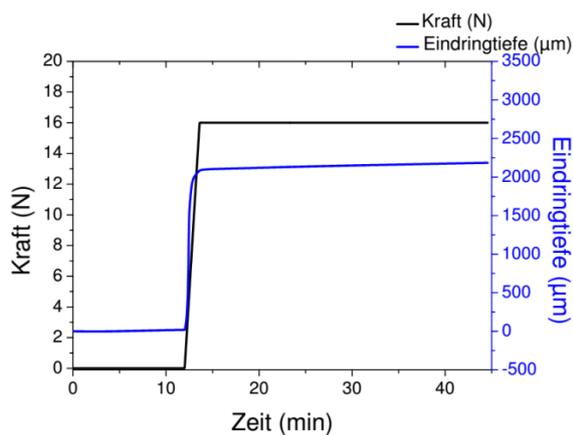


Abbildung 56 Kurzfaserverstärktes Polyamid bei 255°C

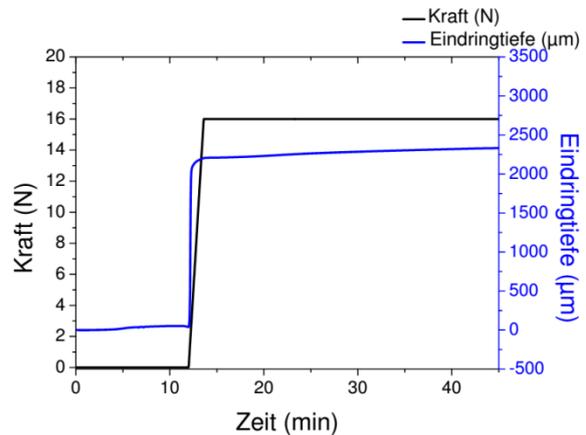


Abbildung 57 Kurzfaserverstärktes Polyamid bei 260°C

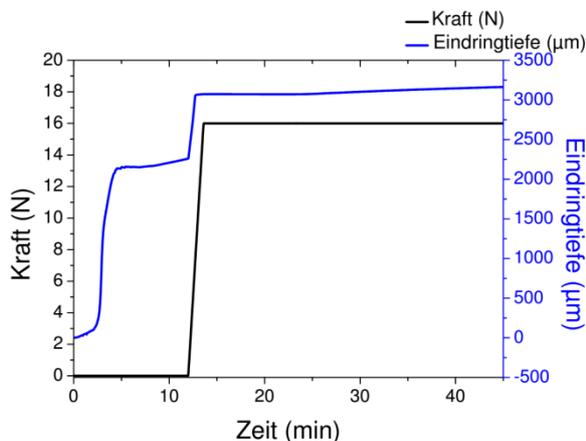


Abbildung 58 Kurzfaserverstärktes Polyamid bei 265°C

Endlofaserverstärktes Polyamid

Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse der Versuche des endlofaserverstärkten Polyamids bei konstanter Temperatur. Bei 255°C dringt der Pin nur sehr oberflächlich in den Kunststoff ein. Bei 260°C dringt der Pin vollständig in den Kunststoff ein und fügt die bepinnte Stahlplatte bündig mit dem Kunststoff. Es sind dabei keine Folgeerscheinungen durch das Erhitzen des Kunststoffes zu erkennen. Bei 265°C dringt der Pin ebenfalls komplett in den Kunststoff ein, jedoch kommt es zur Bläschenbildung durch Verdampfen von Wassereinschlüssen und der weiteren Verminderung der Festigkeit in Form von vollständigem Aufschmelzen des Kunststoffes durch die höheren Temperaturen.

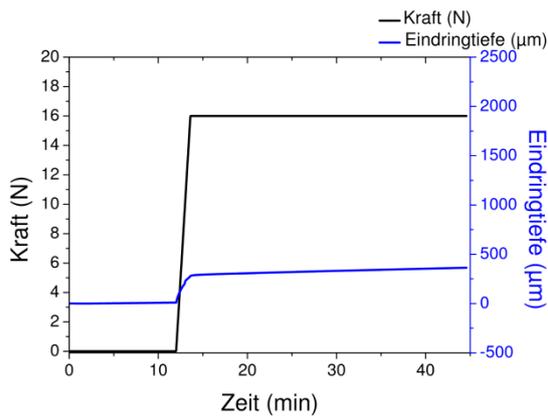


Abbildung 59 Endlofaserverstärktes Polyamid bei 255°C

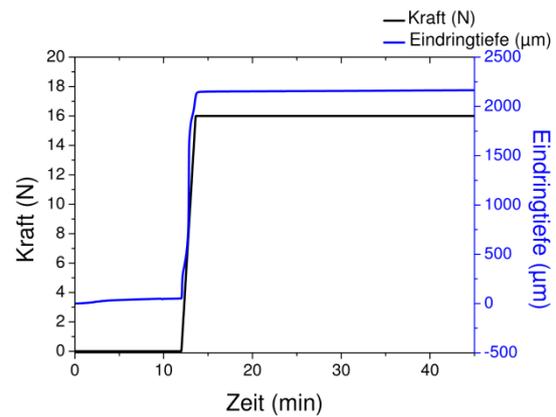


Abbildung 60 Endlofaserverstärktes Polyamid bei 260°C

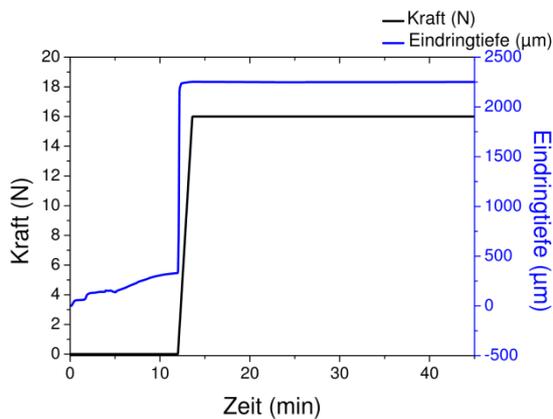


Abbildung 61 Endlofaserverstärktes Polyamid bei 265°C

7.2 Optische Untersuchung

7.2.1 Ohne optische Hilfsmittel

7.2.1.1 Kunststoff- und metallseitige Erwärmung

Die Proben 1-16 der Versuche mit der Methode des kunststoff- und metallseitigen Erwärms bei 5°C und 10°C unter der Schmelztemperatur des Polyamids werden in Kapitel 7.2.2 genauer untersucht. Hier in diesem Kapitel werden sie nur überblicksmäßig ausgewertet.

Verpresstemperatur 257°C und 252°C, Verpresdruck 10 bar (0,208 bar/Pin)

Bei den Versuchen mit dem endlosfaserverstärkten Polyamid kam es zu keinen Auffälligkeiten. Das endlosfaserverstärkte Polyamid und die bepinnten Metallplatten sind bündig gefügt.

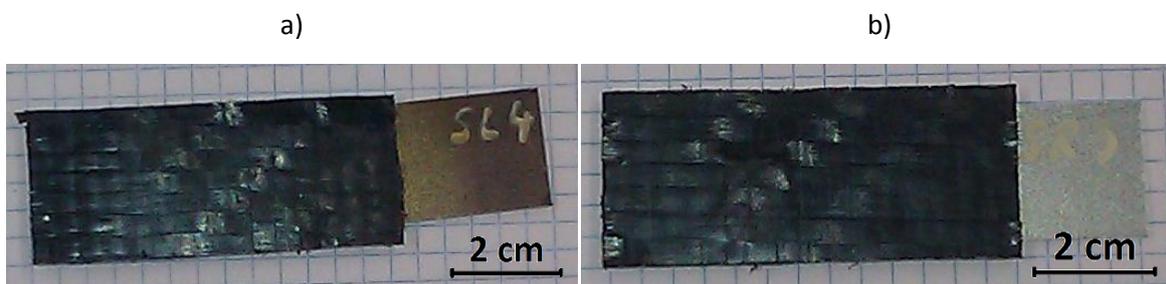


Abbildung 62 Endlosfaserverstärktes Polyamid, beidseitige Erwärmung, , Verpresdruck 10 bar, a) Stahlpins 4 mm Abstand Verpresstemperatur 257°C b) Aluminiumpins 3 mm Abstand Verpresstemperatur 252°C

Das kurzfaserverstärkte Polyamid und die bepinnten Metallplatten wurden ebenfalls bündig gefügt, es kam aber bei nahezu allen Proben zu Rissen im Kunststoff. Die Risse wurden in den Abbildungen rot markiert.

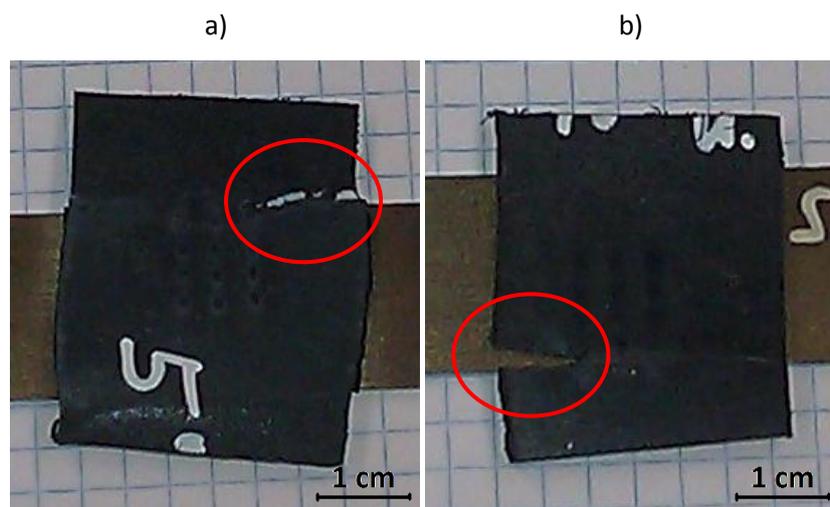


Abbildung 63 Kurzfaserverstärktes Polyamid, beidseitige Erwärmung, Verpresdruck 10bar, a) Stahlpins 4 mm Abstand Verpresstemperatur 257°C b) Stahlpins 3 mm Abstand Verpresstemperatur 252°C

Abbildung 64 b) zeigt feine Risse im Verbund, die als leicht weißliche Verfärbung zu erkennen sind.

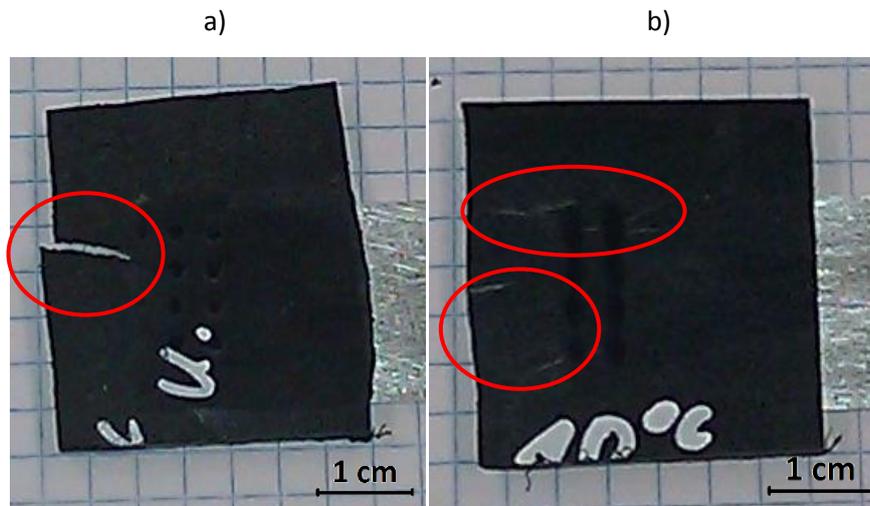


Abbildung 64 Kurzfaserverstärktes Polyamid, beidseitige Erwärmung, , Verpressdruck 10 bar, a) Aluminiumpins 4 mm Abstand Verpresstemperatur 257°C b) Aluminiumpins 3 mm Abstand Verpresstemperatur 252°C

Verpresstemperatur 200°C, Verpressdruck 30 bar (0,625 bar/Pin)

Abbildung 65 zeigt den Versuch vom endlosfaserverstärkten Polyamid verpresst bei 200°C und einem Druck von 30 bar mit den bepinnten Metallplatten aus Aluminium und Stahl.

Nach dem Verpressvorgang ließen sich alle bepinnten Metallplatten ohne oder mit geringem Kraftaufwand aus dem Kunststoff lösen. Wie in Abbildung 65 b) ersichtlich sind die Pins nur geringfügig in den Kunststoff eingedrungen.

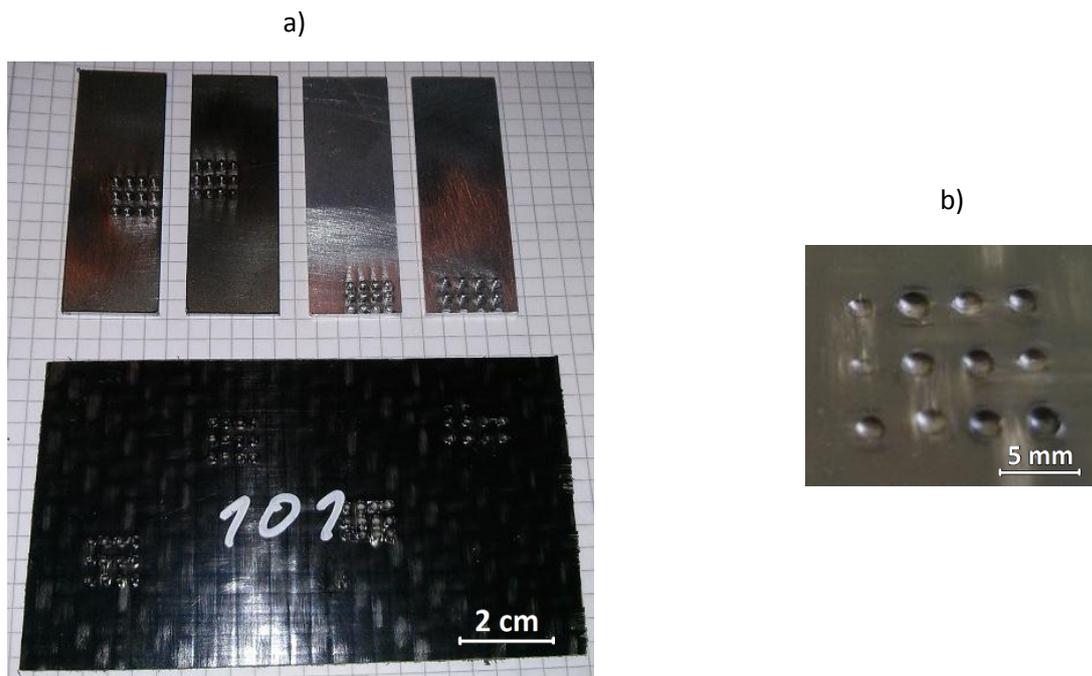
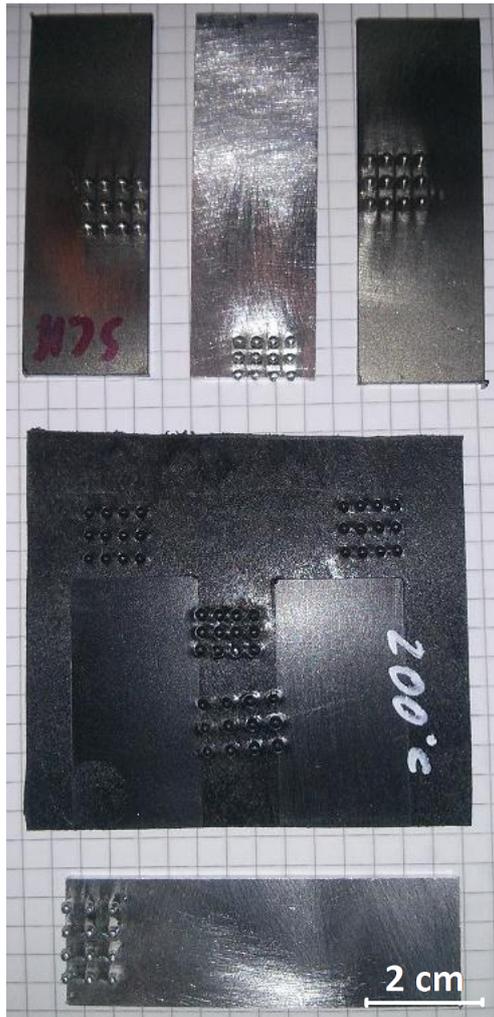


Abbildung 65 Endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 200°C, Verpressdruck 30 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme PINEINDRÜCKE

a)



in

Abbildung 66 zeigt den Versuch vom kurzfaserverstärkten Polyamid, verpresst bei 200°C und einem Druck von 30bar mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium und Stahl.

Nach dem Verpressvorgang ließen sich ebenfalls wie beim endlosfaserverstärkten Polyamid alle bepinnten Metallplatten ohne oder mit geringem Kraftaufwand aus dem Kunststoff lösen.

Abbildung 66 b) zeigt das geringe Eindringen der Pins den Kunststoff.

b)

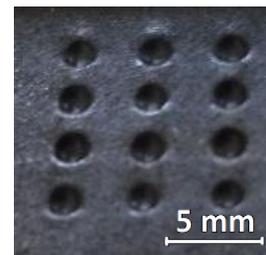


Abbildung 66 Kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 200°C, Verpressdruck 30 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Pineindrücke

Verpresstemperatur 200°C, Verpresdruck 100 bar (2,083 bar/Pin)

Die Pins der Metallplatten drangen deutlich tiefer in das endlosfaserverstärkte Polyamid ein als beim vorhergehenden Versuch mit einem Druck von 30 bar. Die Metallplatten schlossen jedoch nicht bündig mit dem Verbund ab. Es blieb ein Spalt von etwa 0,5 mm zwischen Metallplatte und Verbund.

Es kam eine Fügeverbindung zustande. Die bepinnten Metallplatten ließen sich mit leichtem Kraftaufwand aus dem Verbund lösen. Die Pins der Metallplatten weisen nach dem Lösen keine sichtbaren Spuren des Verbunds auf. Am Rand der Eindrücke der Pins kommt es zu einer Aufwölbung des Verbunds (siehe Abbildung 67 a), im Detail Abbildung 67 b). Die Höhe der Aufwölbung entspricht der Breite des Spaltes zwischen Verbund und Metallplatten im gefügten Zustand.

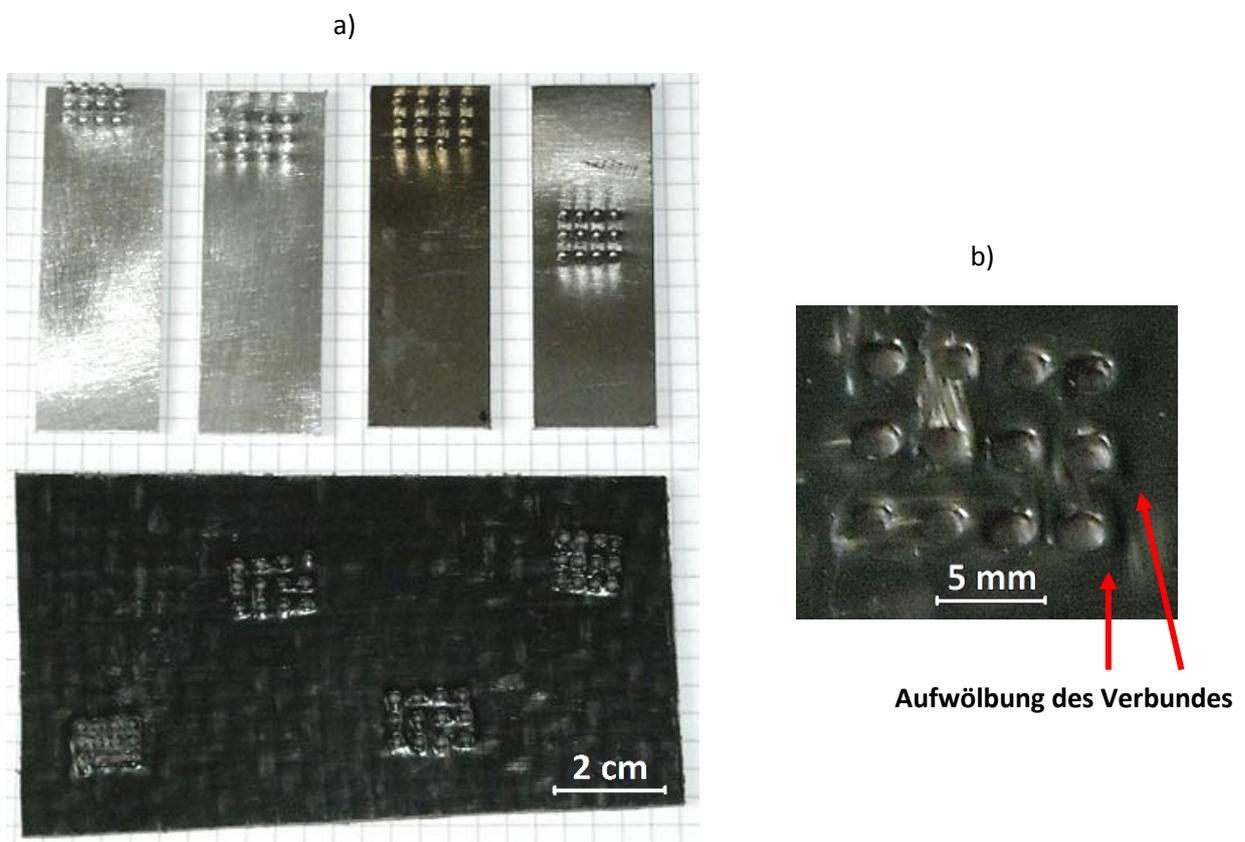


Abbildung 67 Endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 200°C, Verpresdruck 100 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Pineindrücke

Beim kurzfaserverstärkten Polyamid drangen die Pins der Metallplatten komplett in den Verbund ein und die Metallplatten schlossen bündig mit dem Verbund ab. Die bepinnten Metallplatten ließen sich mit leichtem Kraftaufwand aus dem Verbund lösen. Sie weisen nach dem Lösen der Fügeverbindung keine Spuren des Verbundes auf.

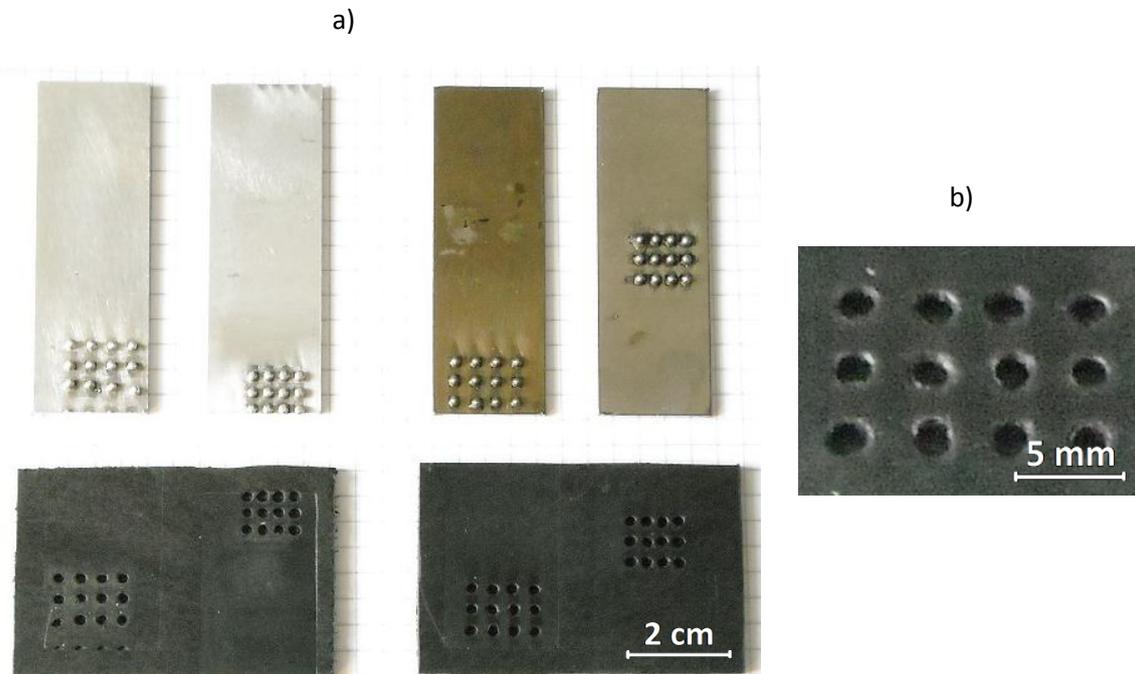


Abbildung 68 Kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 200°C, Verpresdruck 100 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Pineindrücke

7.2.1.2 Metallseitige Erwärmung

Verpresstemperatur 267°C, Verpressdruck 10 bar (0,208 bar/Pin)

Abbildung 69 zeigt den Versuch mit endlosfaserverstärktem Polyamid. Die Verpresstemperatur der bepinnten Metallplatten lag 5°C über der Schmelztemperatur (262°C) des Polyamids. Das Polyamid selbst hatte beim Verpressvorgang Raumtemperatur.

In Abbildung 69 b) ist eine leichte Weißverfärbung der Pineindrücke im Polyamid zu erkennen. Beim Verpressvorgang hat sich das Matrix-Fasergefüge aufgetrennt und es liegen in den Pineindrücken die blanken Fasern vor.

Die Fügeverbindung zwischen den Metallplatten und dem endlosfaserverstärkten Polyamid ließen sich ohne oder mit geringem Kraftaufwand lösen.

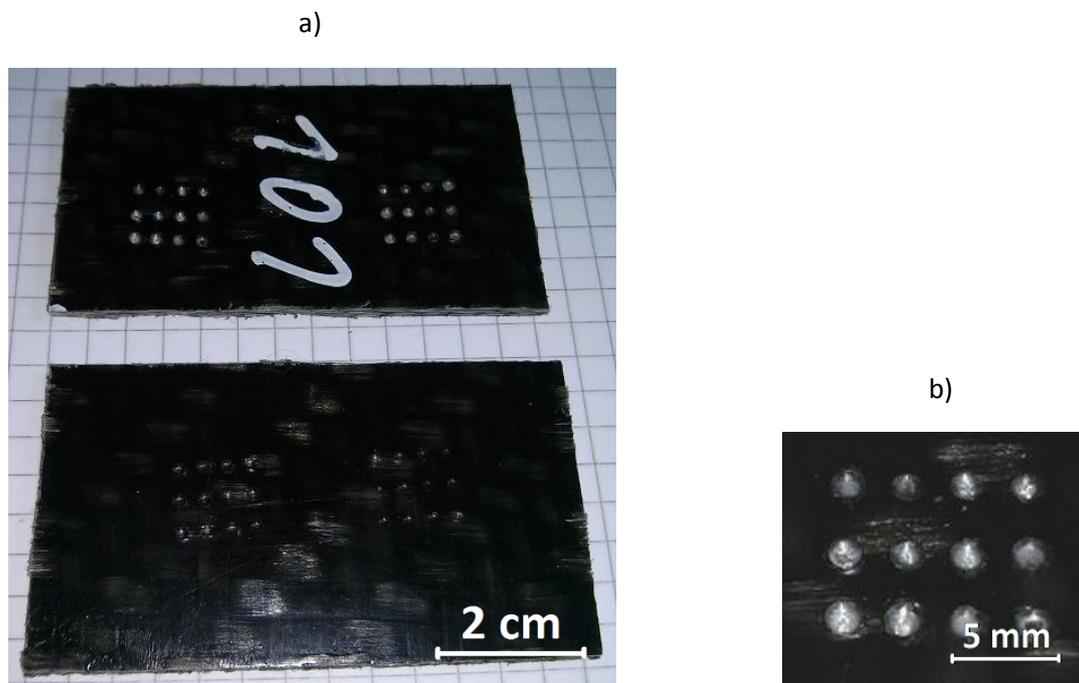


Abbildung 69 Endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, metallseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 267°C, Verpressdruck 10 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Pineindrücke

Beim Versuch mit dem kurzfaserverstärkten Polyamid kam es zu einer ungleichmäßigen Belastung der bepinnten Metallplatten. Wie in Abbildung 70 b) ersichtlich, sind die Abdrücke auf der linken Seite von den bepinnten Metallplatten deutlich im Polyamid zu erkennen. Die rechts liegenden Abdrücke wurden in der Abbildung rot markiert. Trotz des wesentlich höheren Drucks auf die links verpressten Metallplatten drangen die Pins nur gering in den Kunststoff ein (siehe Abbildung 70 a)). Eine Wiederholung des Versuchs war somit nicht notwendig, da es auch bei einer gleichmäßigen Verteilung des Drucks nicht zu einer festen Fügeverbindung gekommen wäre.

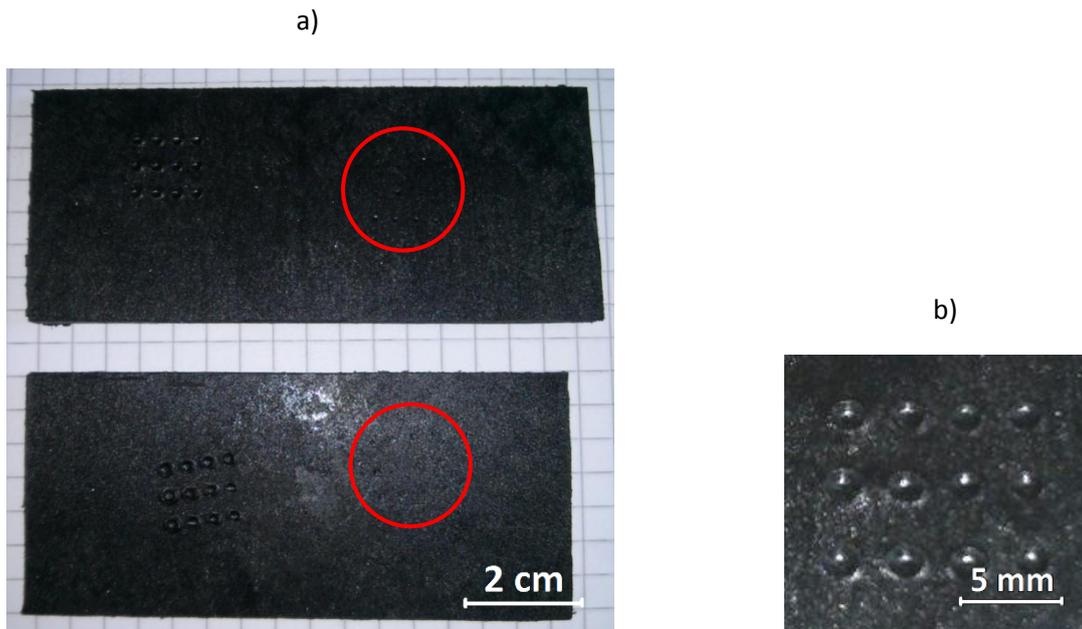


Abbildung 70 Kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, metallseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 267°C, Verpresdruck 10 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Pineindrücke

Verpresstemperatur 272°C, Verpressdruck 10bar (0,208 bar/Pin)

Bei einer Temperatur von 272°C der bepinnten Metallplatten, die 10°C über der Schmelztemperatur (262°C) des Polyamids liegt, dringen die Pins komplett in das endlosfaserverstärkte Polyamid ein. Durch die über dem Schmelzpunkt liegende Temperatur der bepinnten Metallplatten wird das Polyamid aufgeschmolzen und wie in Abbildung 71 ersichtlich, beginnt das Polyamid zu fließen und aus dem Verbund beim Verpressen hervorzuquellen. In Abbildung 71 b) erkennt man, dass sich kleine Bläschen an der Kunststoffoberfläche bilden. Durch das Verflüssigen des Polyamids separieren sich Matrix und Fasern, die Fasern kommen weiß an der Kunststoffoberfläche zum Vorschein. Die geschilderten Phänomene treten sowohl beim Verpressen mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium als auch aus Stahl auf.

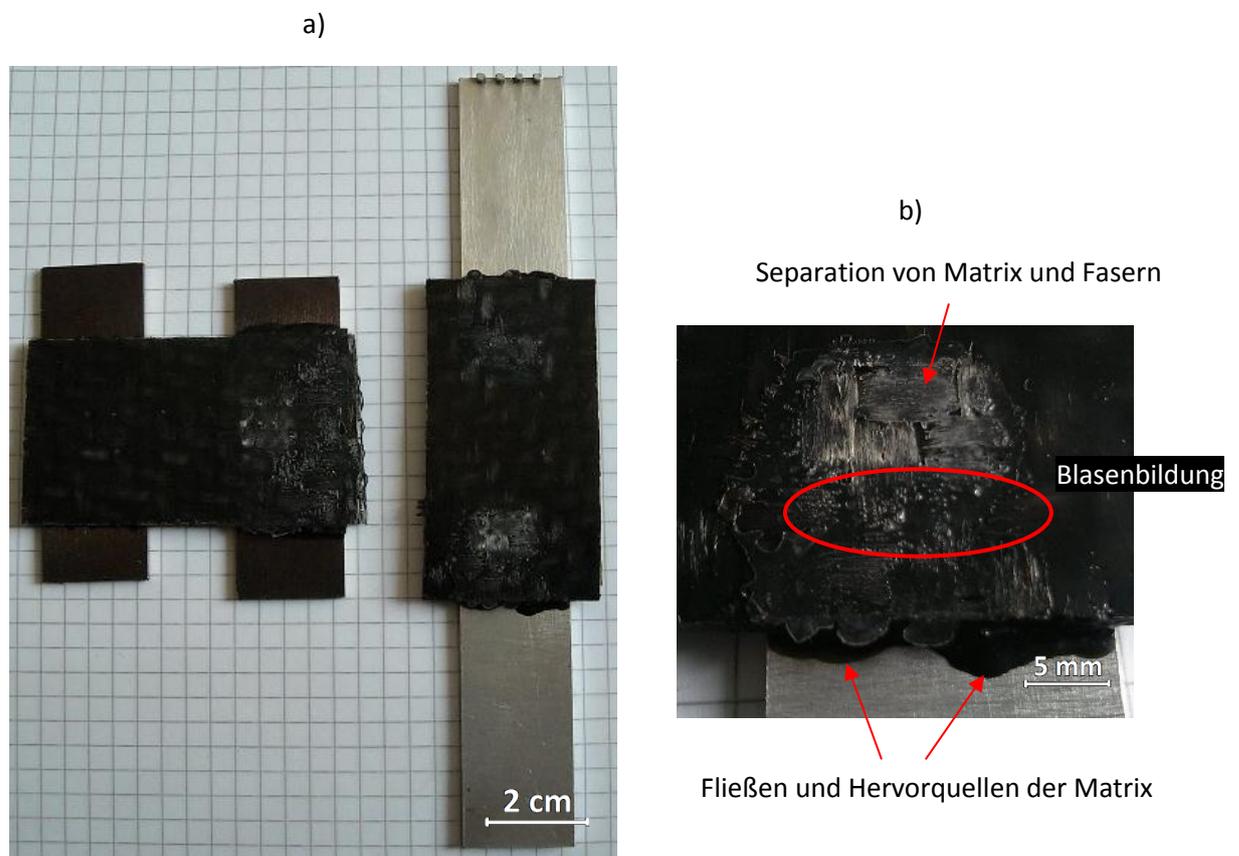


Abbildung 71 Endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, metallseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 272°C, Verpressdruck 10 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme verpresste Probe

Bei den Verpressbedingungen von 272°C und einem Druck von 10 bar fließt das kurzfaserverstärkte Polyamid, wie in Abbildung 72 a) ersichtlich, bei direktem Kontakt mit den bepinnten Metallplatten in alle Richtungen weg. Die Pins dringen durch das Wegfließen des Matrixmaterials und der daraus resultierenden Verringerung der Dicke des kurzfaserverstärkten Polyamids durch den Verbund durch (siehe Abbildung 72 b)).

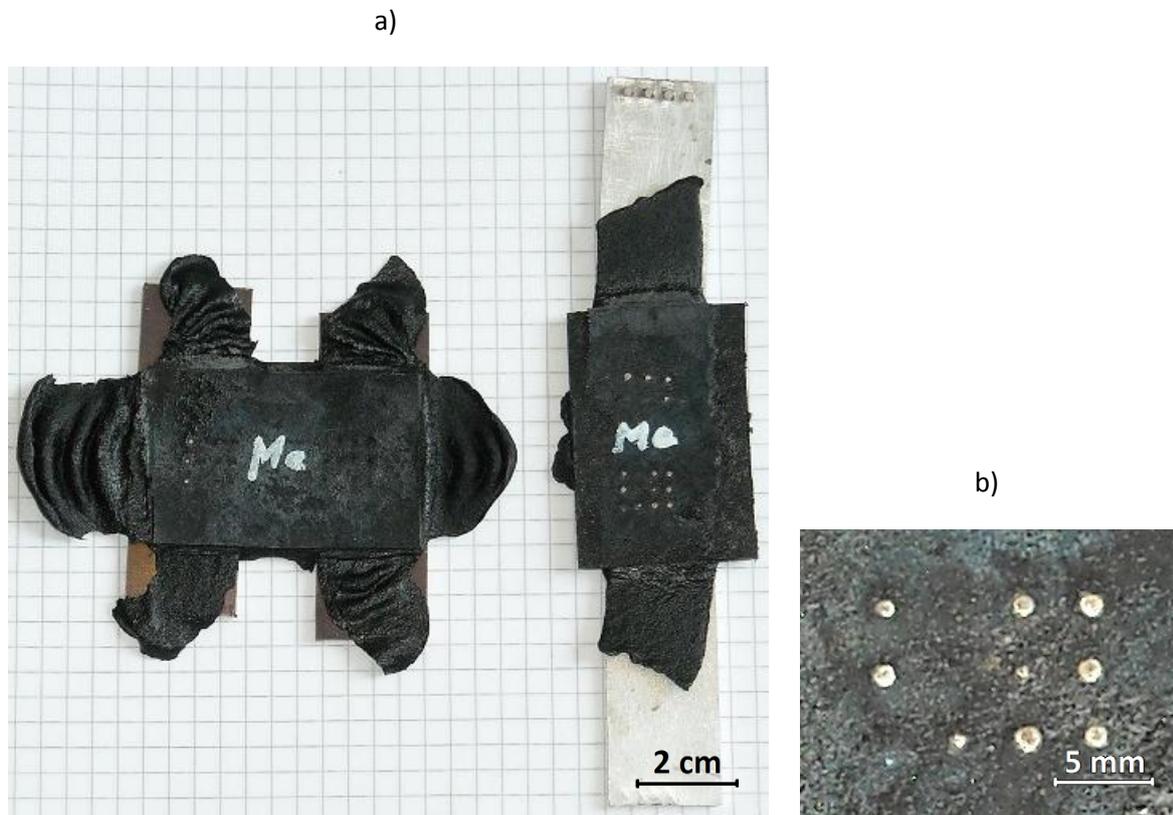


Abbildung 72 Kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, metallseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 272°C, Verpressdruck 10 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme perforierender Pins

Verpresstemperatur 272°C, Verpresdruck 15bar (0,313 bar/Pin)

Das endlosfaserverstärkte Polyamid weist bei den bepinnten Metallplatten aus Aluminium eine deutliche Deformation auf. Das Polyamid und ganze Faserbündel sind am Rand hervorgequollen. Ebenso haben sich auf der Rückseite der Fügefläche vom Verbund Matrix und Fasern separiert (siehe Abbildung 73 a)). Die Fasern treten weiß zum Vorschein. Beim Verpressen mit den bepinnten Metallplatten aus Stahl kommt es nur zum Hervorquellen des Polyamids und der Fasern. Wie in Abbildung 73 b) ersichtlich nur in geringerem Ausmaß.

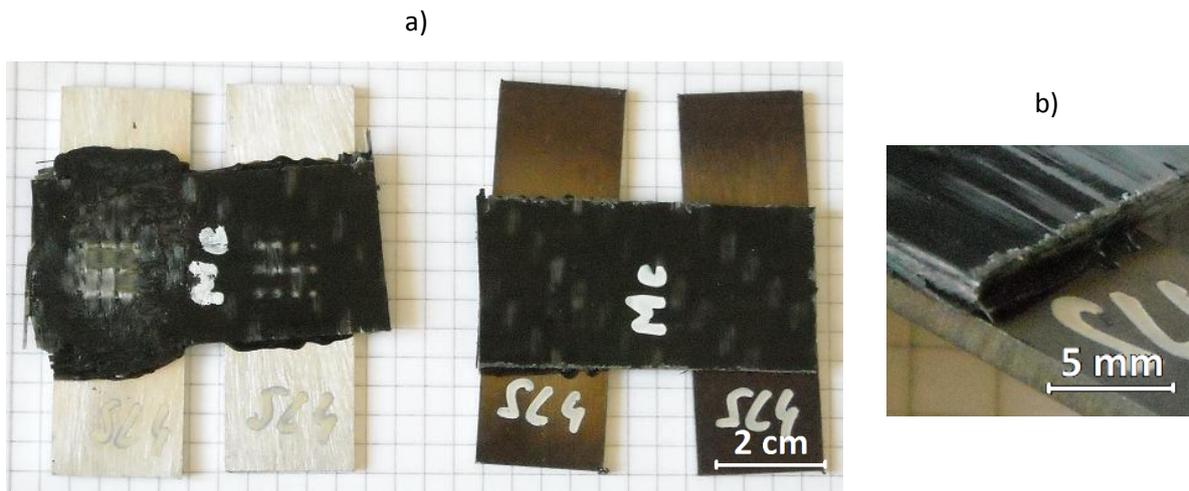


Abbildung 73 Endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, metallseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 272°C, Verpresdruck 15 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme verpresste Probe

Verpresstemperatur 272°C, Verpresdruck 7bar (0,146 bar/Pin)

Wie in Abbildung 74 ersichtlich fließt das kurzfaserverstärkte Polyamid auch beim verminderten Druck von 7bar an den Kontaktstellen mit den bepinnten Metallplatten in alle Richtungen weg. Bei den bepinnten Metallplatten aus Aluminium kommen die Pins auf der Rückseite des kurzfaserverstärkten Polyamids zum Vorschein.

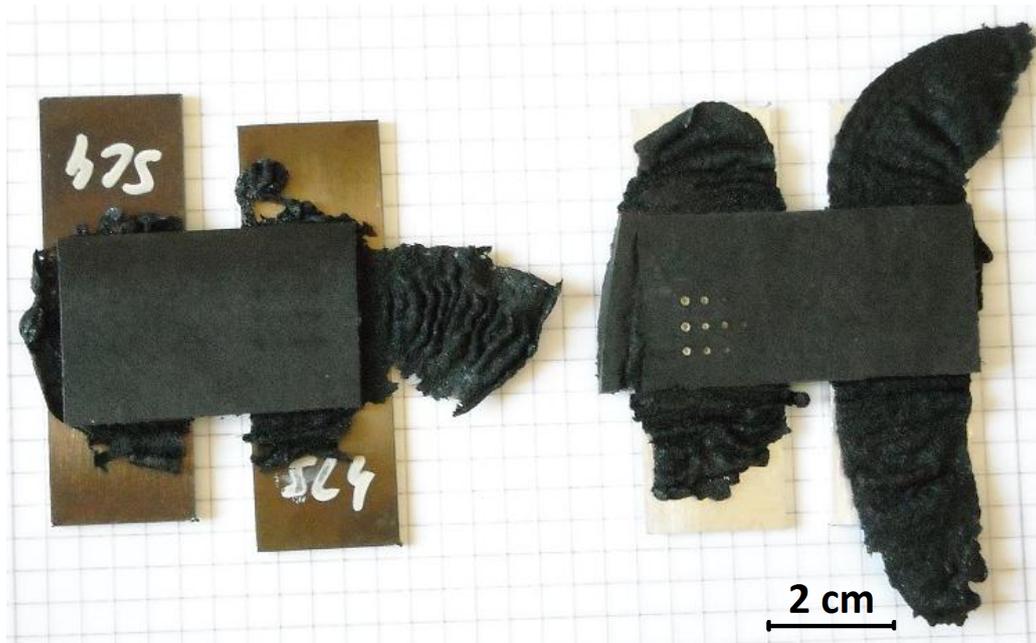


Abbildung 74 Kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, metallseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 272°C, Verpresdruck 7 bar

Verpresstemperatur 262°C, Verpressdruck 30 bar (0,625 bar/Pin)

Eine bepinnte Stahlplatte und beide bepinnten Aluminiumplatten ließen sich ohne Kraftaufwand vom endlosfaserverstärkten Polyamid lösen. Sie drangen in etwa die halbe Pinlänge in den Verbund ein. Durch eine ungleichmäßige Belastung bei den bepinnten Stahlplatten drang eine tiefer in den Verbund ein und ließ sich nicht durch leichten Kraftaufwand lösen. Wie in Abbildung 75 b) durch die weiße Verfärbung in den Pineindrücken ersichtlich liegen die blanken Fasern vor.

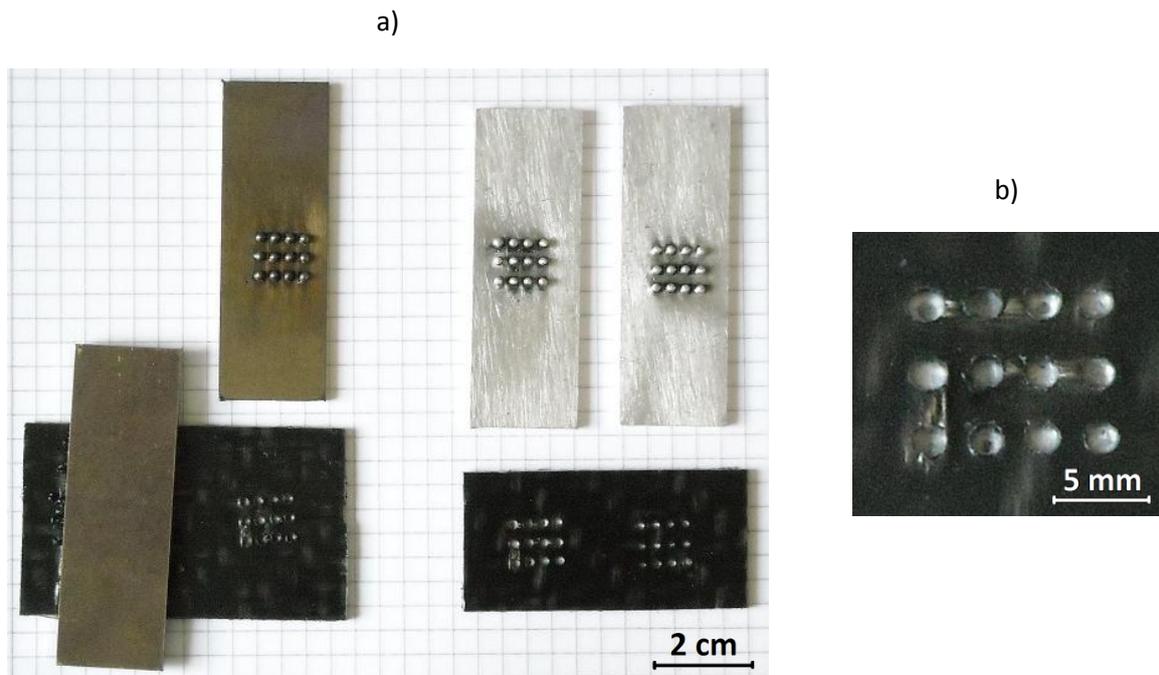


Abbildung 75 Endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, metallseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 262°C, Verpressdruck 30 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Pineindrücke

Verpresstemperatur 267°C, Verpressdruck 30 bar (0,625 bar/Pin)

Bei der Wiederholung des Versuchs mit einem Druck von 30 bar mit einer um 5°C höheren Verpresstemperatur von 267°C kommt es zu einer deutlichen Deformierung des endlosfaserverstärkten Polyamids. Während bei den bepinnten Metallplatten, die noch einen geringen Abstand zum Polyamid haben, der Verbund gänzlich unversehrt ist, sind bei den Metallplatten, die direkten Kontakt mit dem Verbund haben, die Matrix geschmolzen und die Faserbündel seitlich hervorgequollen. In Abbildung 76 b) sieht man, dass die Pins den Verbund perforiert haben.

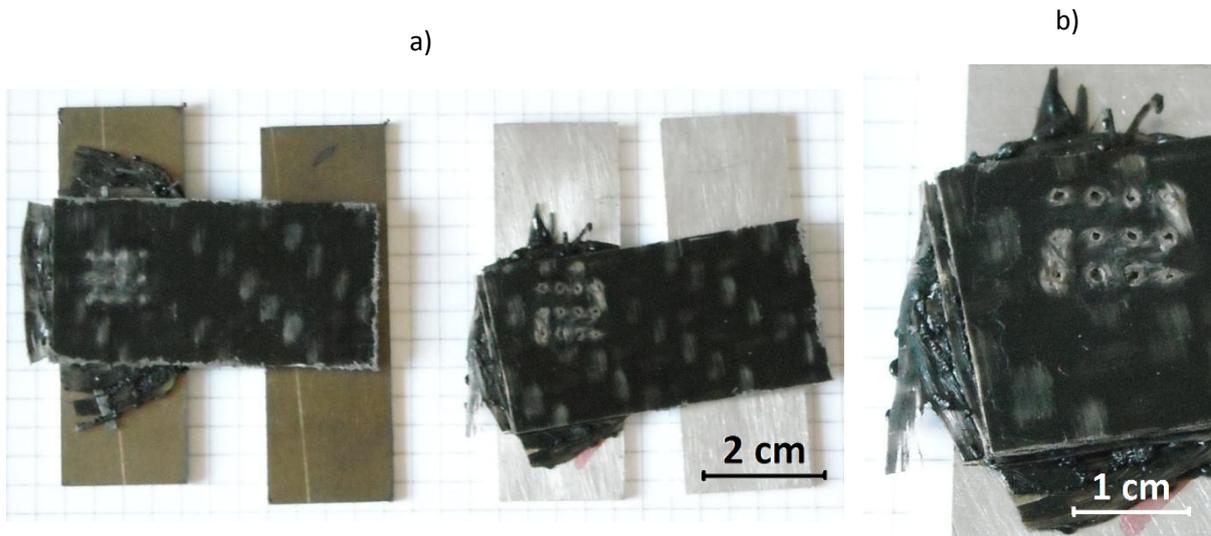


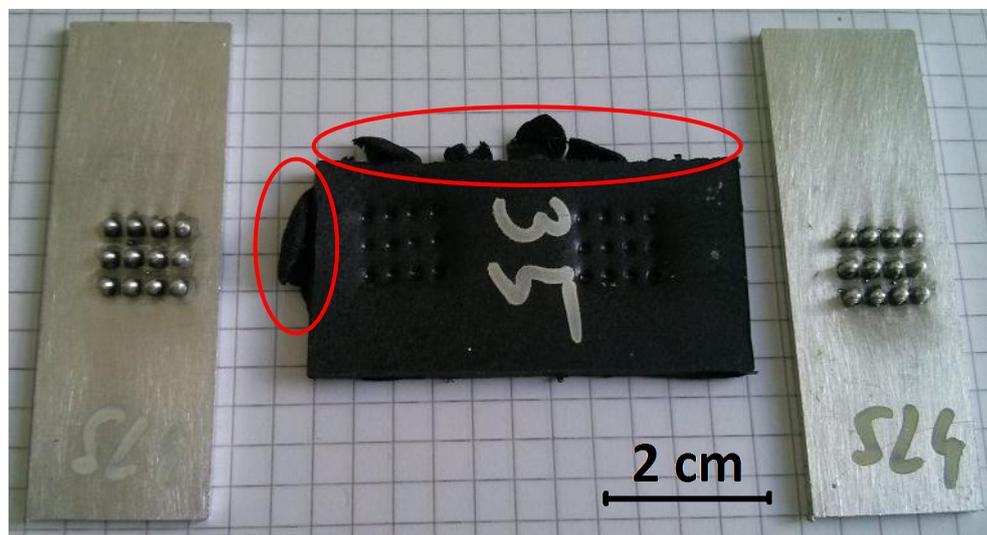
Abbildung 76 Endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, metallseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 267°C, Verpressdruck 30 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme perforierter Probe

7.2.1.3 Kunststoffseitige Erwärmung

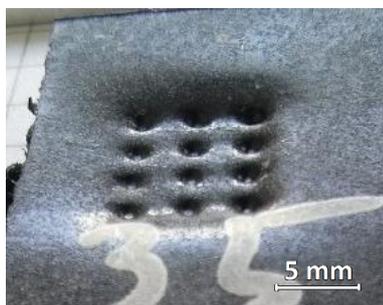
Verpresstemperatur 265°C, Verpressdruck 7 bar (0,146 bar/Pin)

Abbildung 77 zeigt den Versuch mit einer bepinnten Metallplatte aus Aluminium bei einer kunststoffseitigen Verpresstemperatur von 265°C. Wie aus der Abbildung ersichtlich entstand keine Fügeverbindung zwischen dem Metall und dem Kunststoff. Nach dem Verpressvorgang ließen sich beide Fügeiteile ohne Kraftaufwand voneinander trennen. In Abbildung 77 a) ist am Kunststoff zu erkennen, dass der Kunststoff beim Verpressen verdrängt wurde und seitlich hervorquoll (im Bild rot markiert). Dies weist auf eine zu hohe Verpresstemperatur hin, da dadurch die Viskosität des Kunststoffes schon so sehr abgenommen hat, dass er seine Form beim Verpressen nicht mehr beibehält. Trotzdem drangen die Pins nur geringfügig in den Kunststoff ein. Dadurch, dass das Metall nicht mit aufgewärmt wurde, sank die Temperatur des Polyamids an der Kontaktfläche zu schnell ab und verfestigte sich, bevor die Pins eindringen konnten.

a)



b)



c)

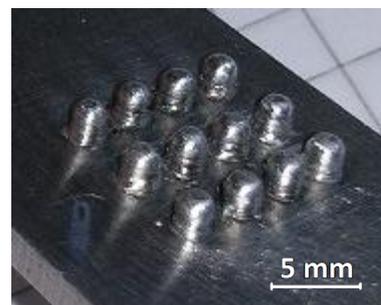


Abbildung 77 Kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins, kunststoffseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 265°C, Verpressdruck 7 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Pineindrücke c) Nahaufnahme Aluminiumpins

Man erkennt in Abbildung 77 b) deutlich eine Absenkung der gesamten Fläche, in der die Pins eindringen sollten. Hier wurde durch die zu früh verfestigte Kunststoffoberfläche der noch im hochviskosen Zustand darunter liegende Kunststoff beim Verpressen verdrängt. Abbildung 77 c) zeigt die bepinnte Metallplatte nach dem Verpressvorgang. Es sind keine Kunststoffrückstände an den Pins zu erkennen.

Abbildung 78 zeigt den Versuch mit einer bepinnten Metallplatte aus Stahl und dem kurzglasfaser-verstärkten Polyamid. Es kam hier zur selben Problematik wie bei der Metallplatte aus Aluminium. Auch hier ist der Kunststoff großflächig abgesenkt (siehe Abbildung 78 c)) und auch hier befinden sich keine Kunststoffrückstände an den Pins (siehe Abbildung 78 b)). Ebenso quoll der Kunststoff beim Verpressen auf der Seite hervor (siehe Abbildung 78 a) rot markiert). Zusätzlich dazu kam es zur Rissbildung im Kunststoff am Rand der Fügefläche (siehe Abbildung 78 c) rot markiert).

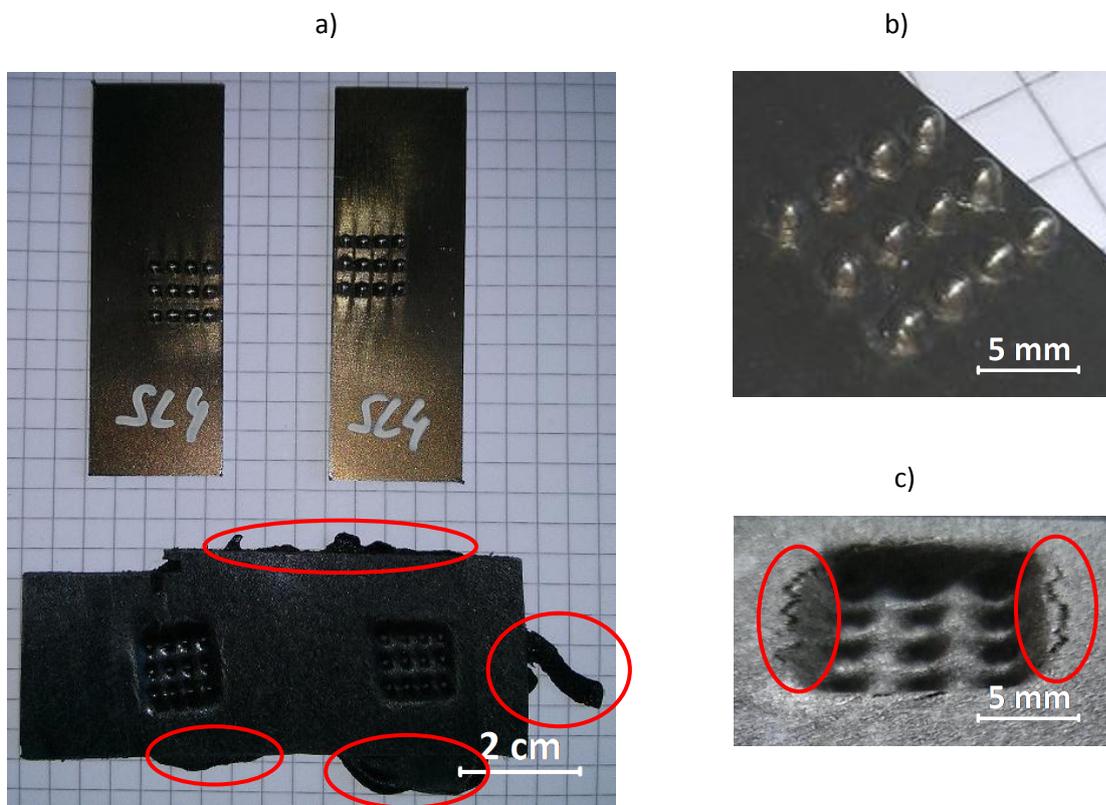


Abbildung 78 Kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins, kunststoffseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 265°C, Verpressdruck 7 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Stahlpins, c) Nahaufnahme Pineindrücke

Verpresstemperatur 262°C, Verpressdruck 10 bar (0,208 bar/Pin)

Auch bei dem Versuch mit einer 3°C niedrigeren Verpresstemperatur von 262°C, die exakt der Schmelztemperatur des Polyamids entspricht, kommt es zum Zerfließen des Kunststoffes beim Verpressvorgang (rot in Abbildung 79 b) markiert).

Die Pins der Stahl- und Aluminiumplatten dringen durch die noch schnellere Verfestigung des Kunststoffes geringer in den Kunststoff ein (siehe Abbildung 79 a)). Die bepinnten Metallplatten lassen sich ohne Kraftaufwand aus dem Kunststoff entfernen.

Es entsteht keine wirksame Fügeverbindung zwischen den bepinnten Metallplatten und dem kurzfaserverstärkten Polyamid.

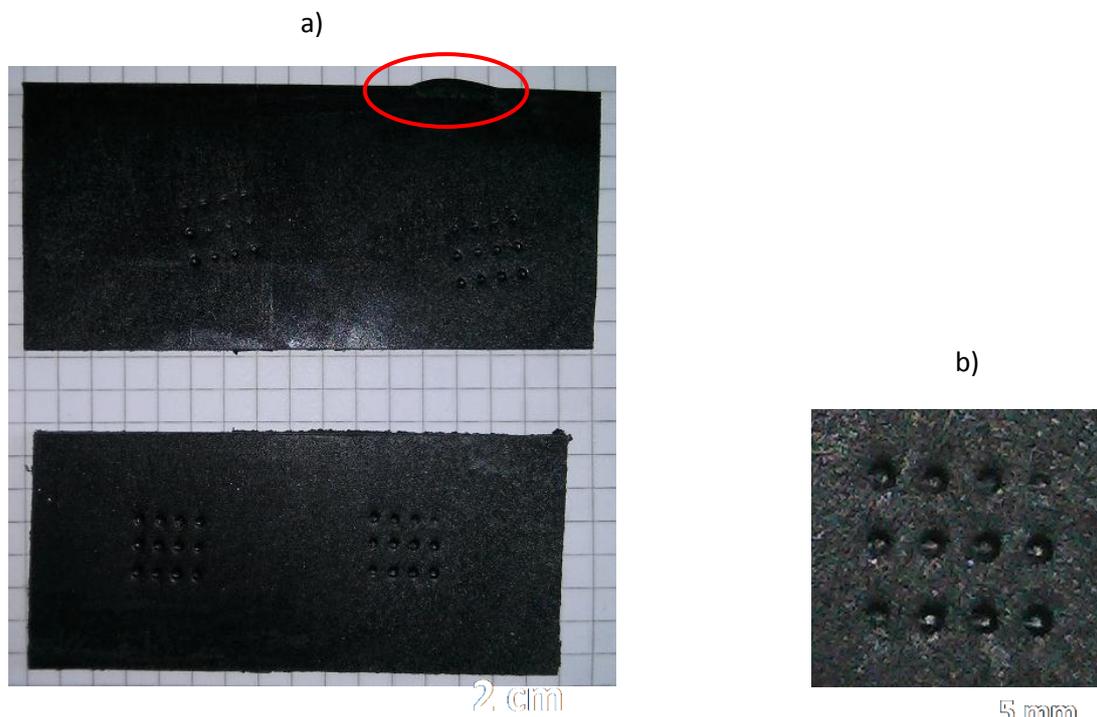


Abbildung 79 Kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium, kunststoffseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 262°C, Verpressdruck 10 bar, a) verpresste Proben, b) Nahaufnahme Pineindrücke

7.2.2 Lichtmikroskopie

Die Aufnahmen der Lichtmikroskopie geben Aufschluss über die Qualität der Fügeverbindung in Form von Formschluss der verpressten Materialien und Auftreten von Hohlräumen im Polyamid. In diesem Kapitel werden Aufnahmen von jeder Probe vom Querschnitt der Fügefläche gezeigt und deren Qualität der Fügeverbindung interpretiert.

Die gezeigten Proben wurden mit dem **Verfahren des metall- und kunststoffseitigen Erwärmens** heißverpresst (siehe Kapitel 6.3.2.1).

7.2.2.1 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid 6.6

Verpresstemperatur 257°C, Verpressdruck 10bar (0,208 bar/Pin)

Probe 1: Stahlpins 3 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Es ist kein Spalt zwischen den Fügeanteilen.

Im Verbund befindet sich wenige Hunderte Mikrometer neben dem äußerst rechten Pin ein kleiner Hohlraum.

Der Verlauf der Fasern hat durch das Eindringen der Pins einen leicht wellenförmigen Verlauf angenommen.

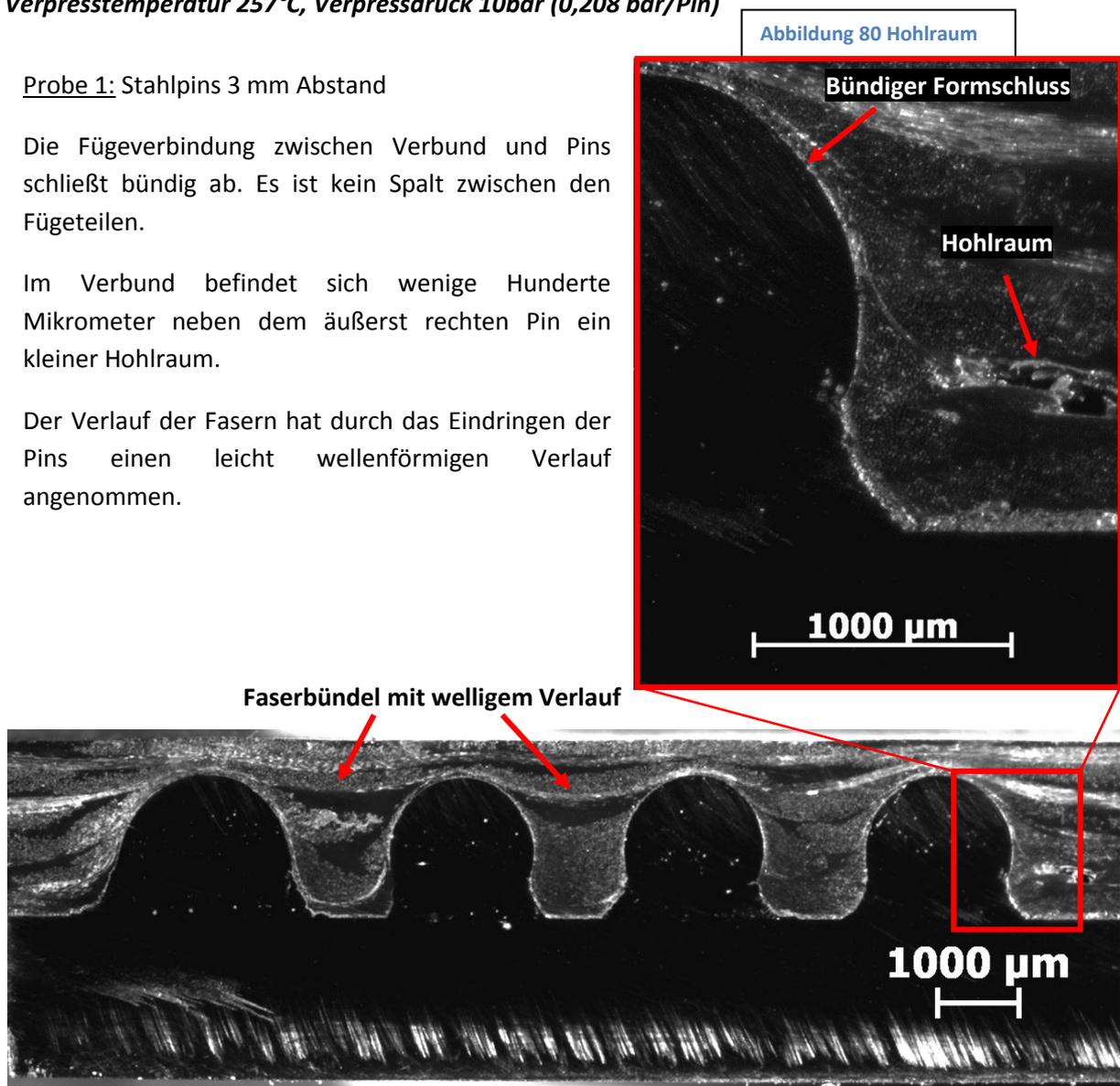


Abbildung 81 Querschnitt Fügeverbindung endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins 3 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 257°C, Verpressdruck 10 bar

Abbildung 82 Porenhäufung

Probe 2: Stahlpins 4 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Es ist kein Spalt zwischen den Fügeteilen.

Im Verbund befindet sich direkt neben dem äußerst linken Pin eine Porenhäufung.

Der Verlauf der Fasern hat durch das Eindringen der Pins einen leicht wellenförmigen Verlauf angenommen.

Porenhäufung

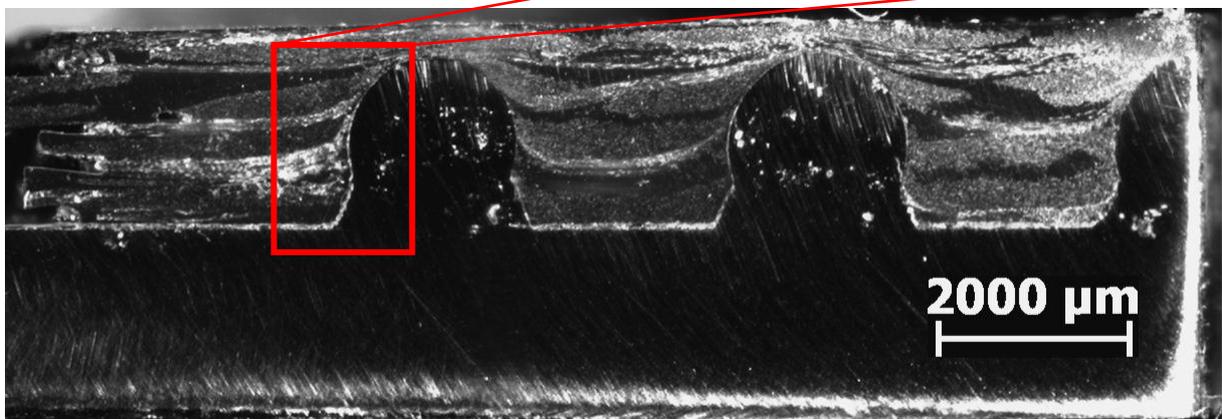
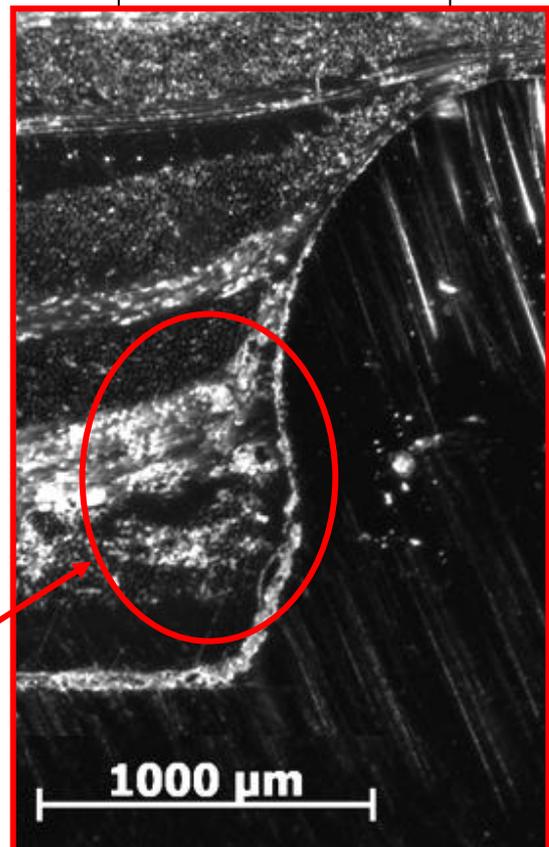


Abbildung 83 Querschnitt Fügeverbindung endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins 4 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 257°C, Verpresdruck 10 bar

Probe 3: Aluminiumpins 3 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Der Verlauf der Fasern hat durch das Eindringen der Pins einen leicht wellenförmigen Verlauf angenommen.

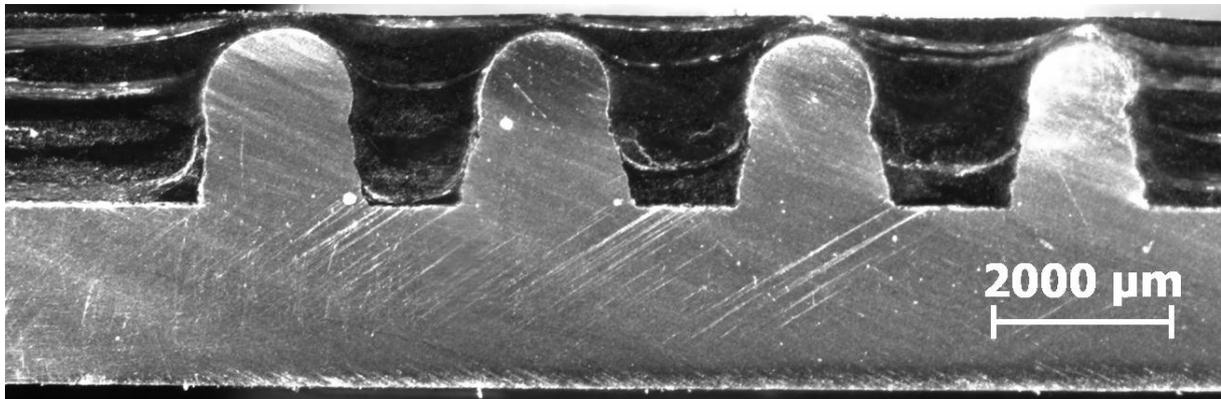


Abbildung 84 Querschnitt Fügeverbindung endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins 3 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 257°C, Verpresdruck 10 bar

Abbildung 85 Poren

Probe 4: Aluminiumpins 4 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Es befinden sich nur 2 Poren mit weniger als 100 µm Größe zwischen Verbund und Metallplatte.

Der Verlauf der Fasern hat durch das Eindringen der Pins einen leicht wellenförmigen Verlauf angenommen.

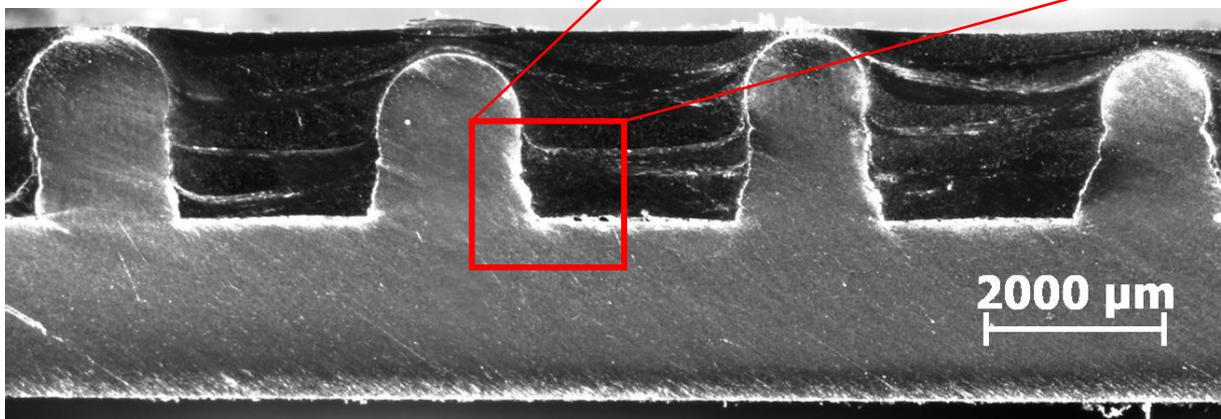
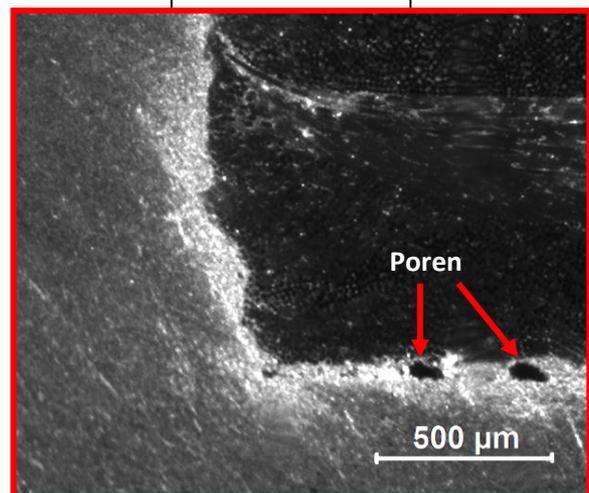


Abbildung 86 Querschnitt Fügeverbindung endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins 4 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 257°C, Verpresdruck 10 bar

Verpresstemperatur 252°C, Verpressdruck 10 bar (0,208 bar/Pin)

Probe 5: Stahlpins 3 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab.

Es befinden sich einige Hohlräume von mehreren Hundert Mikrometern im Verbund. Der Hohlraum von Abbildung 89 erstreckt sich nahezu über den gesamten Zwischenraum zwischen zwei Pins.

Es sind einige Delaminationen der Laminatschichten zu erkennen. Die Delamination folgt dem wellenförmigen Verlauf der zu erkennenden Faserbündel.

Der Verlauf der Fasern hat durch das Eindringen der Pins einen leicht wellenförmigen Verlauf angenommen.

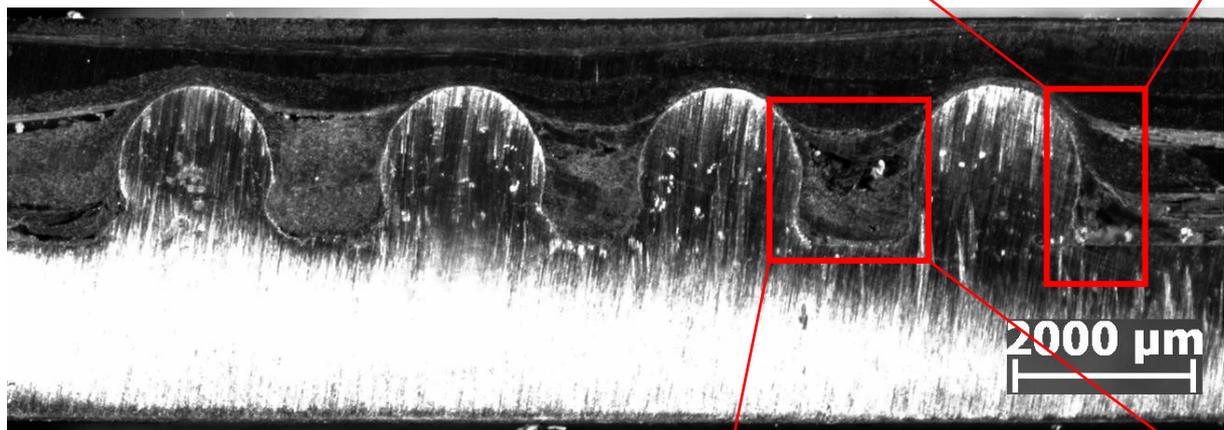
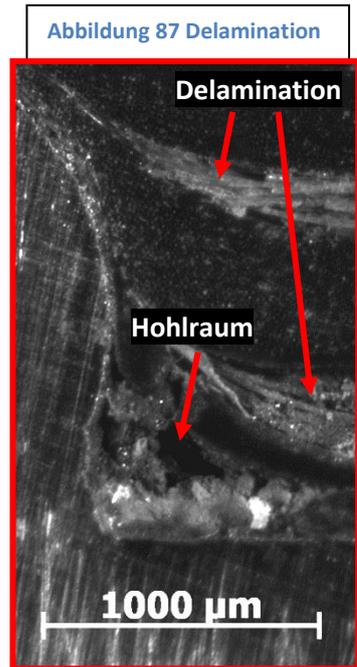


Abbildung 88 Querschnitt Fügeverbindung endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins 3 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 252°C, Verpressdruck 10 bar

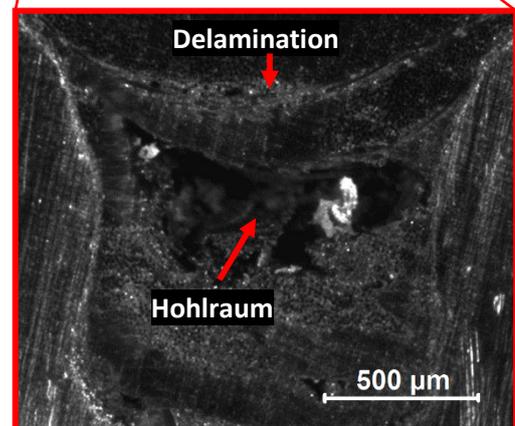


Abbildung 89 Hohlraum zwischen zwei Pins

Probe 6: Stahlpins 4 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab.

Es befinden sich auch hier, wie bei den Stahlpins mit 3 mm Abstand, einige Hohlräume von mehreren Hundert Mikrometern bis zu wenigen Millimetern im Verbund. Wie aus Abbildung 91 ersichtlich erstreckt sich ein Hohlraum über den gesamten Abstand zwischen den Pins.

Es sind einige Delaminationen der Laminatschichten zu erkennen. Die Delamination folgt dem wellenförmigen Verlauf der Faserbündel.

Der Verlauf der Fasern hat durch das Eindringen der Pins einen leicht wellenförmigen Verlauf angenommen.

Abbildung 90 Querschnitt Fügeverbindung endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins 4 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 252°C, Verpresdruck 10 bar

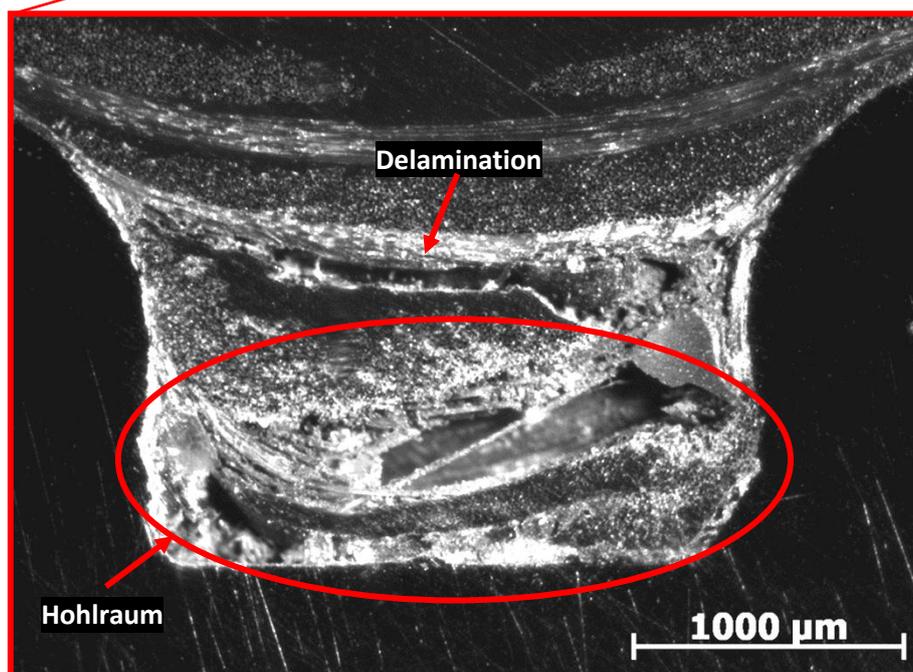
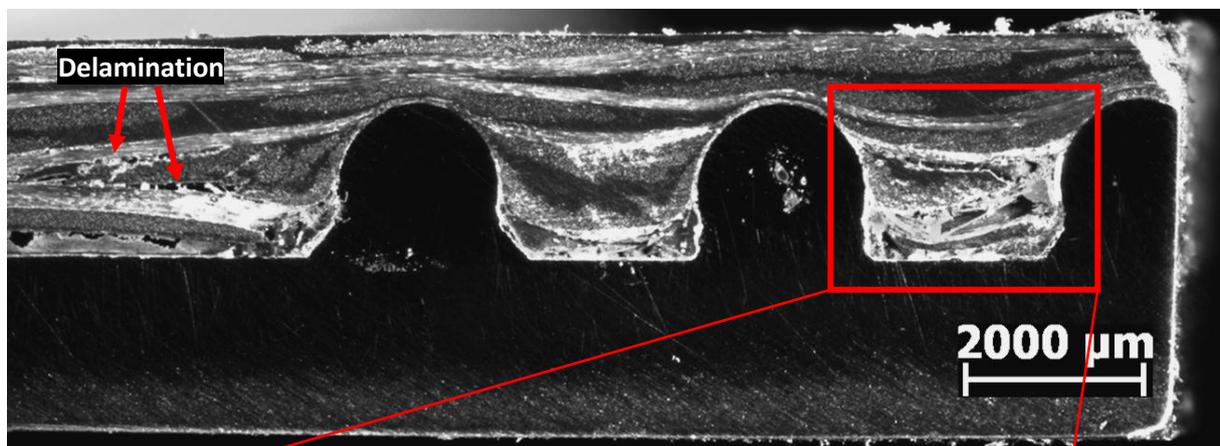


Abbildung 91 Hohlraum zwischen zwei Pins

Probe 7: Aluminiumpins 3 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab.

Es befinden sich einige Hohlräume von mehreren Hundert Mikrometern bis zu wenigen Millimetern im Verbund.

Es sind einige Delaminationen der Laminatschichten zu erkennen. Die Delamination folgt dem wellenförmigen Verlauf der Faserbündel.

Der Verlauf der Fasern hat durch das Eindringen der Pins einen leicht wellenförmigen Verlauf angenommen.

Abbildung 92 Hohlraum und Delamination

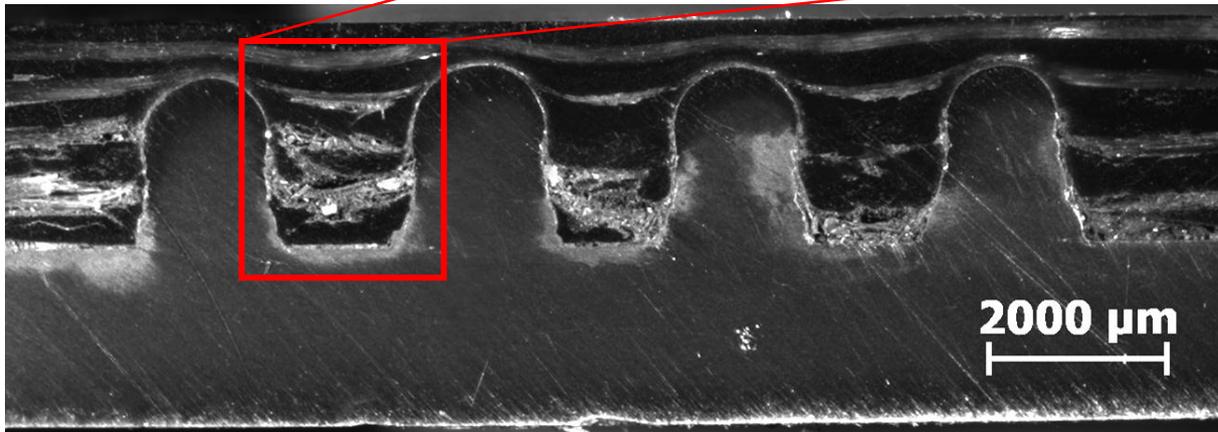
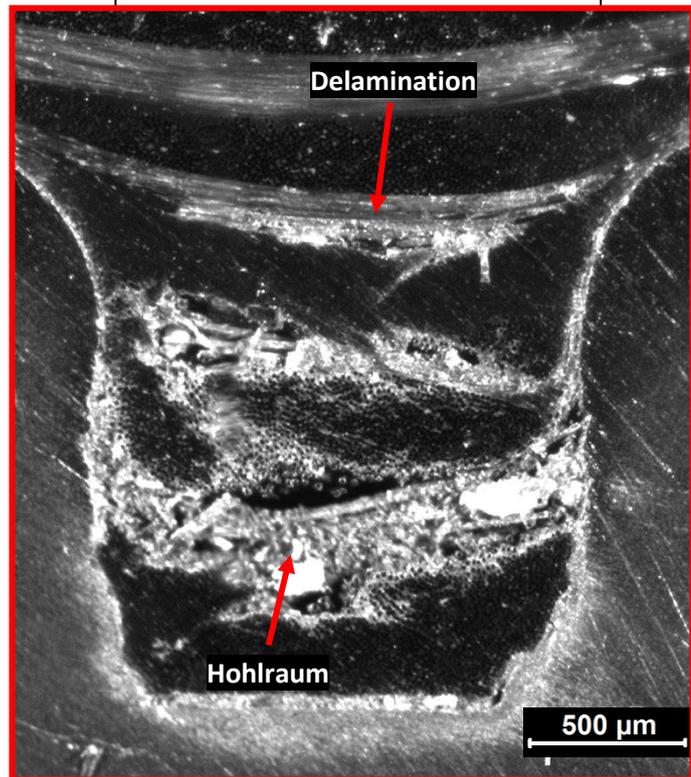


Abbildung 93 Querschnitt Fügeverbindung endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins 3mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 252°C, Verpresdruck 10 bar

Probe 8: Aluminiumpins 4 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab.

Es sind mehrere Delaminationen zwischen allen Pins zu erkennen. Die Delamination folgt dem wellenförmigen Verlauf der Faserbündel.

Der Verlauf der Fasern hat durch das Eindringen der Pins einen leicht wellenförmigen Verlauf angenommen.

Abbildung 94 Querschnitt Fügeverbindung endlosfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins 4mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 252°C, Verpresdruck 10 bar

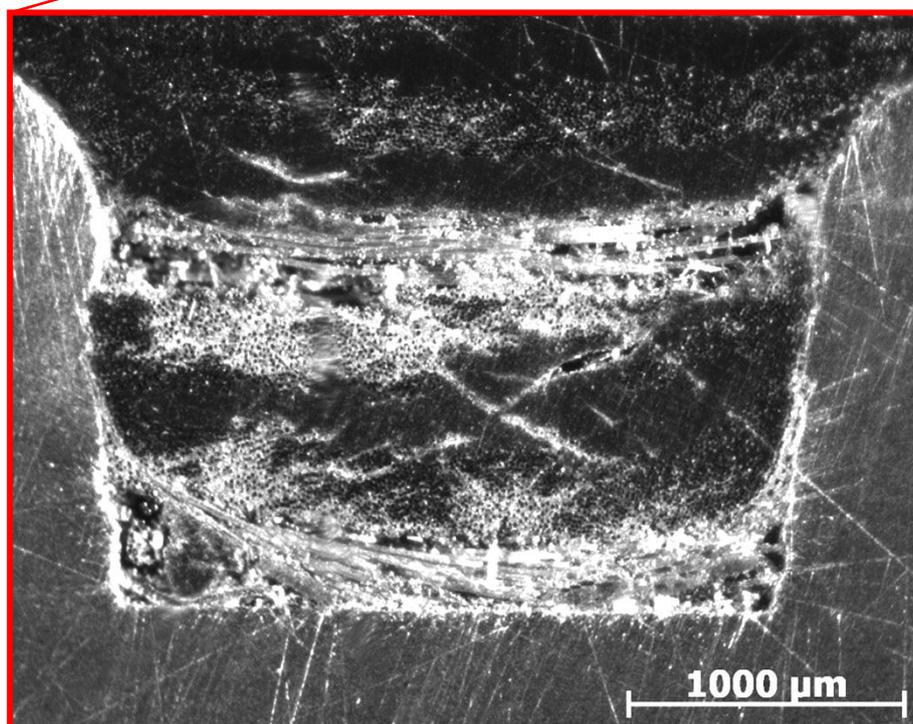
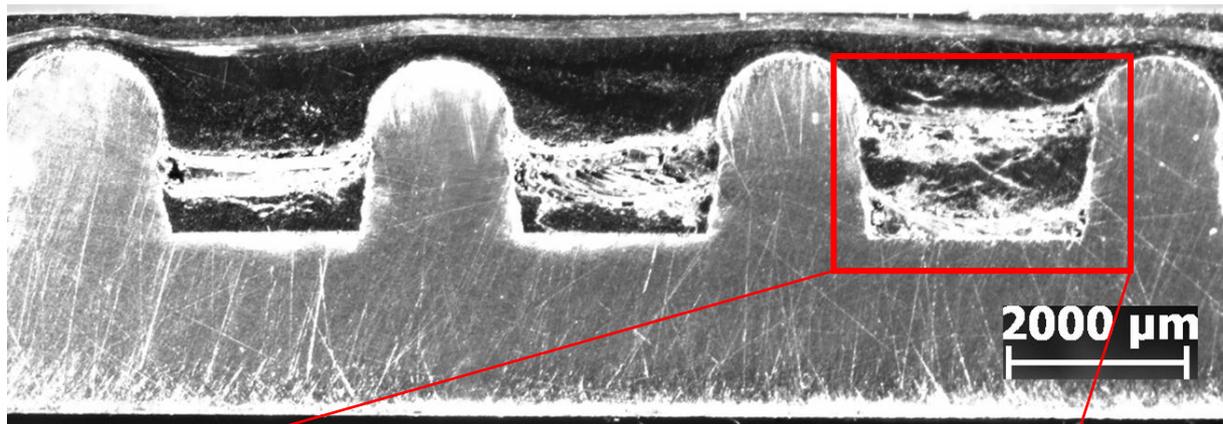


Abbildung 95 Delamination

7.2.2.2 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid 6.6

Verpresstemperatur 257°C, Verpresdruck 10 bar (0,208 bar/Pin)

Probe 9: Stahlpins 3mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Es sind keine Poren oder Hohlräume im Fugebereich zu erkennen. Ausgenommen auf der linken Seite der Abbildung 96 ist, wie in Kapitel 6.3.2.1 bereits erläutert, ein Riss im Querschnitt im kurzfaserverstärkten Polyamid zu sehen.

Abbildung 96 Querschnitt Fügeverbindung kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins 3 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 257°C, Verpresdruck 10 bar

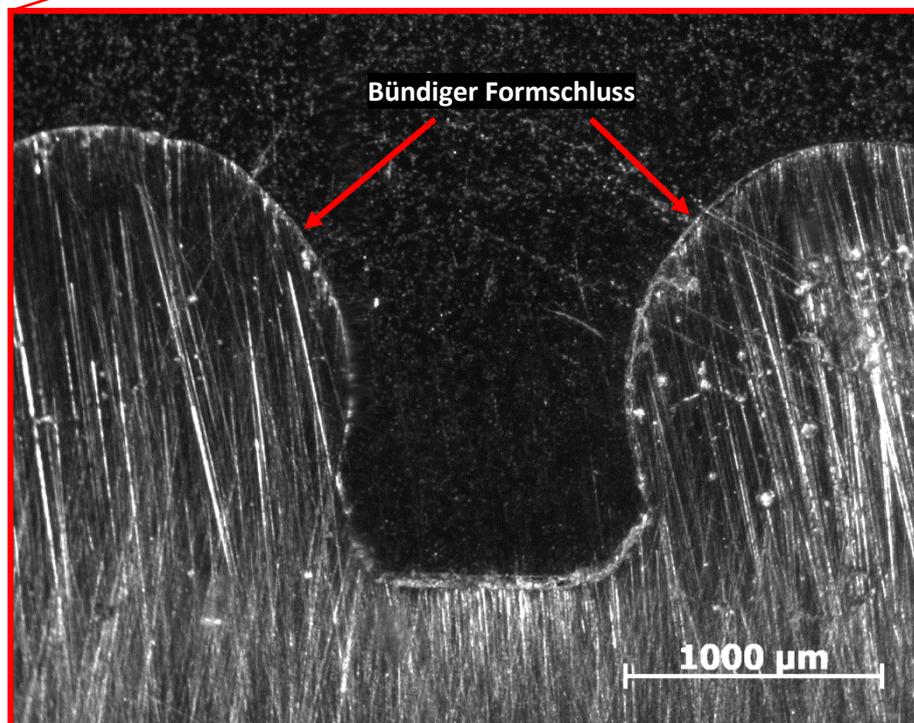
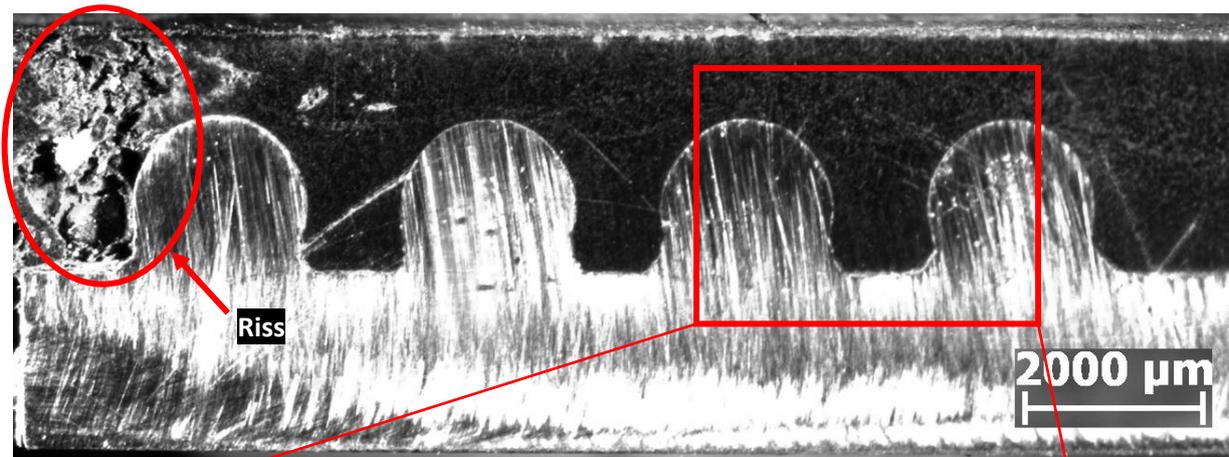


Abbildung 97 Formschluss

Probe 10: Stahlpins 4 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Es sind keine Poren oder Hohlräume im Fugebereich zu erkennen.

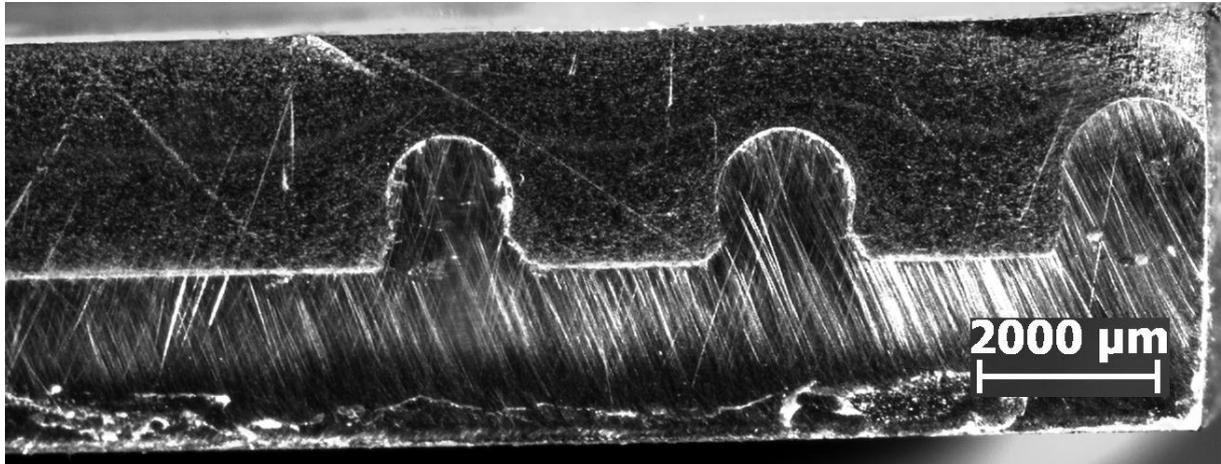


Abbildung 98 Querschnitt Fügeverbindung kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins 4 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 257°C, Verpresdruck 10 bar

Probe 11: Aluminiumpins 3 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Es sind keine Poren oder Hohlräume im Fugebereich zu erkennen. Ausgenommen auf der linken Seite ist, wie in Kapitel 6.3.2.1 bereits erläutert, ein Riss im Querschnitt im kurzfaserverstärkten Polyamid zu sehen.

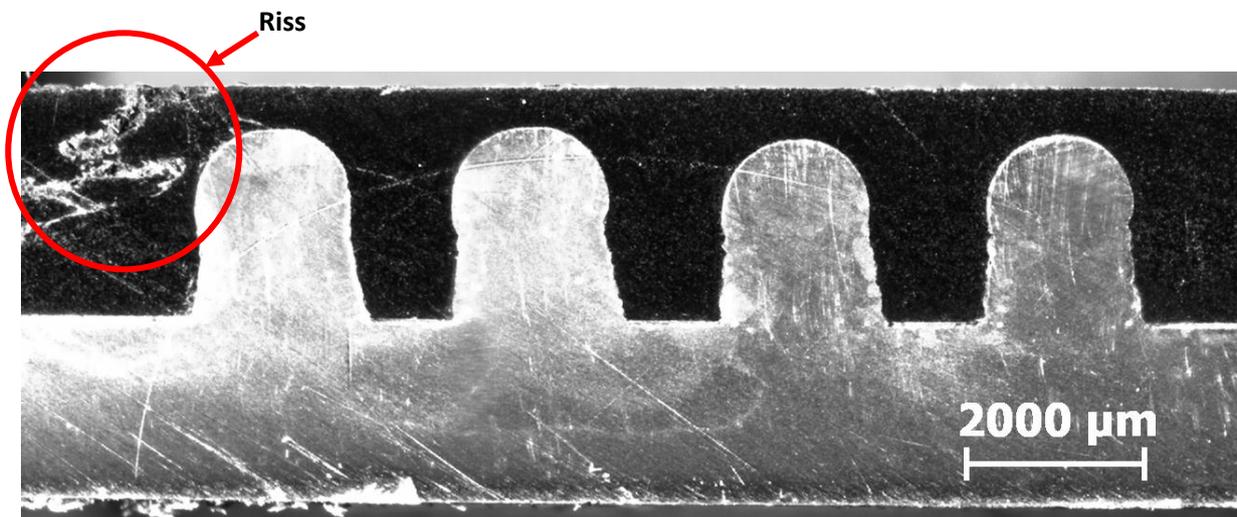


Abbildung 99 Querschnitt Fügeverbindung kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins 3 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 257°C, Verpresdruck 10 bar

Probe 12: Aluminiumpins 4 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Am äußerst rechten Pin kam es auch hier zu einem Riss, der in Abbildung 101 als Hohlraum zu erkennen ist. Ebenso kam es an diesem Pin auf der linken Seite zur Spaltbildung zwischen kurzfaserverstärktem Polyamid und Pin.

Abbildung 100 Querschnitt Fügeverbindung kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins 4mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 257°C, Verpresdruck 10 bar

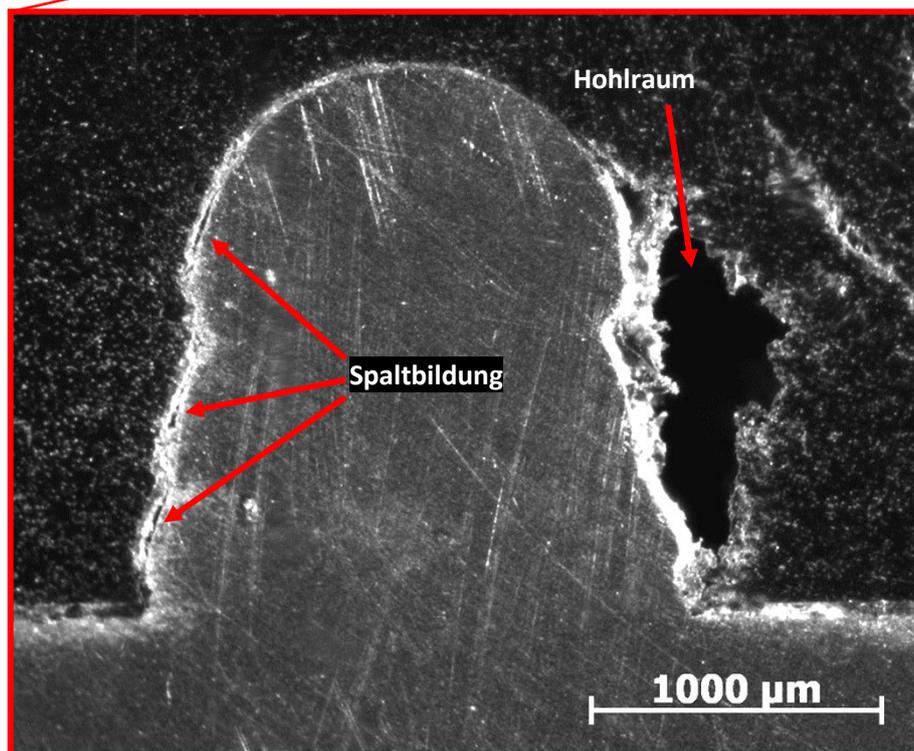
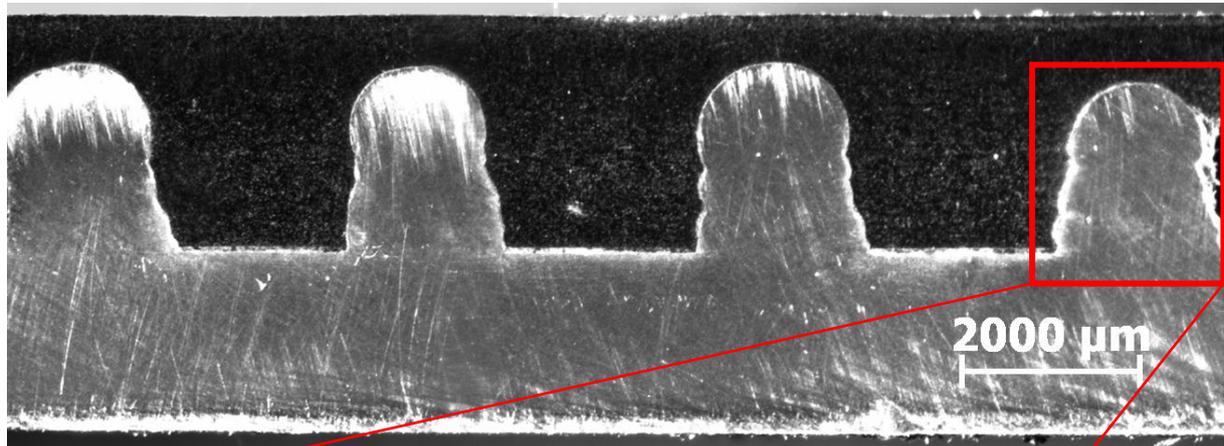


Abbildung 101 Spaltbildung

Verpresstemperatur 252°C, Verpresdruck 10 bar (0,208 bar/Pin)Probe 13: Stahlpins 3 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Neben dem äußerst rechten Pin ist, wie in Kapitel 6.3.2.1 bereits erläutert, ein Riss im Querschnitt im kurzfaserverstärkten Polyamid zu sehen.

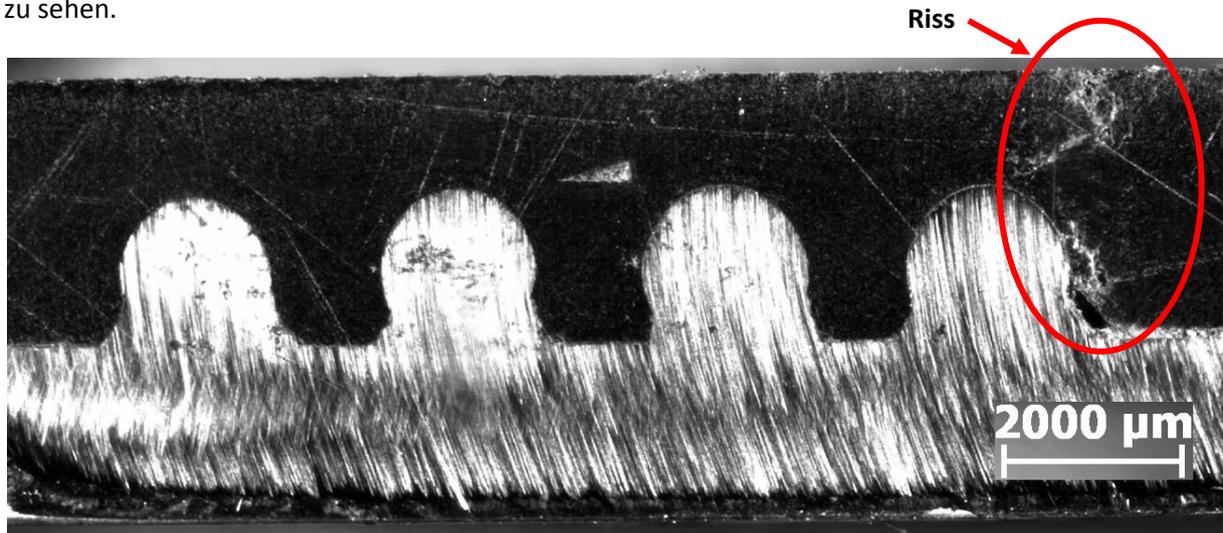


Abbildung 102 Querschnitt Fügeverbindung kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins 3 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 252°C, Verpresdruck 10 bar

Probe 14: Stahlpins 4 mm Abstand

Dieser Querschnitt verläuft längs in einem Riss im kurzfaserverstärkten Polyamid. Es sind massive Hohlräume über den gesamten Querschnitt zu erkennen.

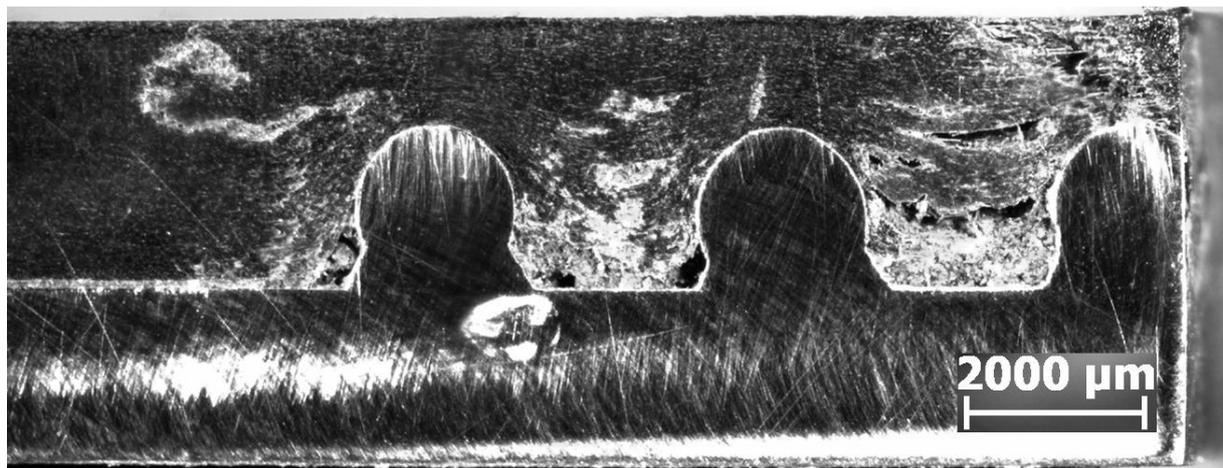


Abbildung 103 Querschnitt Fügeverbindung kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Stahlpins 4 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 252°C, Verpresdruck 10 bar

Probe 15: Aluminiumpins 3 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Es sind keine Poren oder Hohlräume im Fugebereich zu erkennen.

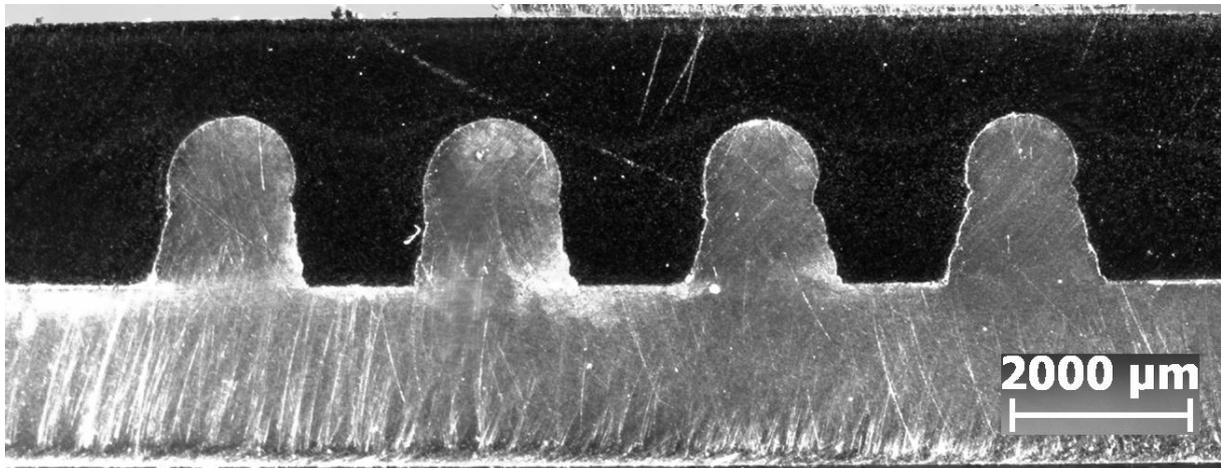


Abbildung 104 Querschnitt Fügeverbindung kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins 3 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 252°C, Verpresdruck 10 bar

Probe 16: Aluminiumpins 4 mm Abstand

Die Fügeverbindung zwischen Verbund und Pins schließt bündig ab. Es sind keine Poren oder Hohlräume im Fugebereich zu erkennen.

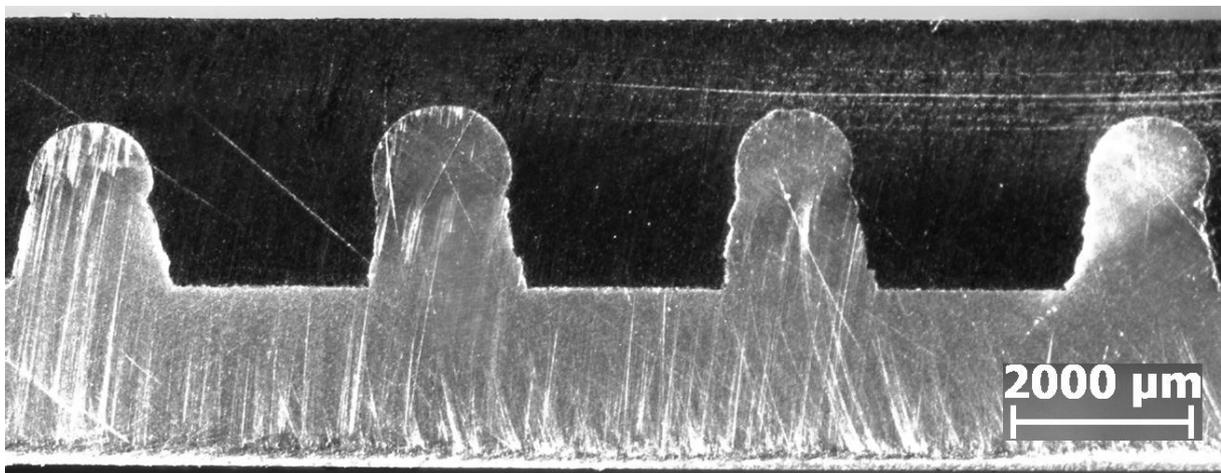


Abbildung 105 Querschnitt Fügeverbindung kurzfaserverstärktes Polyamid heißverpresst mit Aluminiumpins 4 mm Pinabstand, beidseitige Erwärmung, Verpresstemperatur 252°C, Verpresdruck 10 bar

7.3 Mechanische Eigenschaften

Um die Eigenschaften der Fügeverbindungen hinsichtlich verschiedener Belastungsarten miteinander vergleichen zu können, wurden mit den Proben Scherzugversuche, Schälzugversuche und Kopfzugversuche durchgeführt. Da es sich hier nicht um normgerechte Prüfungen, sondern lediglich an Klebe- und Schweißverbindungen orientierte Prüfungen handelt, konnten nicht alle Vorgaben der Normen erfüllt werden. Da es zu dieser Fügeverbindung noch keine Normen für Prüfverfahren gibt, wurden alle Ergebnisse der Versuche als Kraft-Weg-Diagramme dargestellt. Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche mit dem kurzglasfaserverstärkten Polyamid wurden die folgenden Versuche ausschließlich mit dem endlosglasfaserverstärkten Polyamid durchgeführt.

7.3.1 Scherzugversuch

7.3.1.1 Ergebnisse der Scherzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium

Von jedem Probentyp wurden 4 Stück bis zum Versagen geprüft. Abbildung 106 zeigt die Ergebnisse der Aluminiumpins im direkten Vergleich mit 3 mm und 4 mm Pinabstand. Man erkennt, dass die Kraft so lange ansteigt, bis es zum Versagen der Probe kommt. Das Versagen der Proben tritt auf zwei Arten auf, zum Ersten durch das Ausreißen der Pins aus dem Kunststoff und zum Zweiten durch das Versagen der Pins durch Abscherung. Es ist kein merklicher Unterschied der auftretenden Maximalkräfte zwischen den Pins mit 3 mm und 4 mm Abstand zu erkennen. Einzig Probe AI3 – 3 versagt schon bei einer deutlich niedrigeren Maximalkraft. Es waren optisch aber keine Unterschiede zwischen dieser geprüften Probe und den anderen zu erkennen.

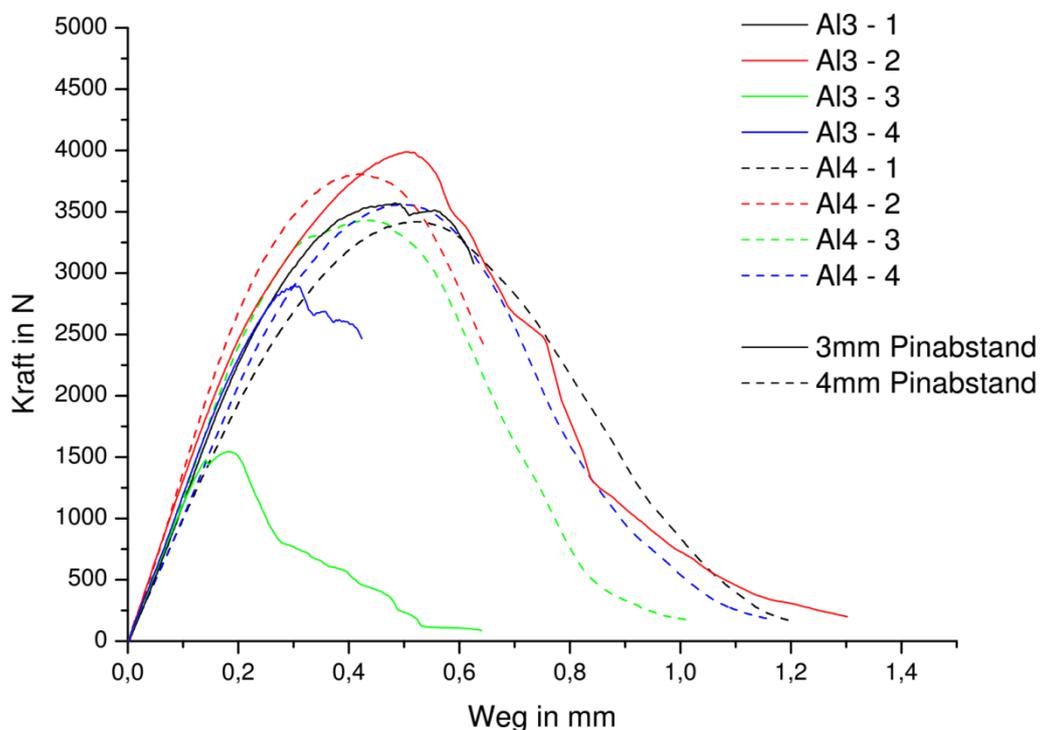


Abbildung 106 Ergebnisse Scherzugversuch Aluminiumpins 3 mm und 4 mm Abstand

In der folgenden Tabelle sind die Maximalkräfte der einzelnen Proben sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 27 Ergebnisse Scherzugversuch Aluminiumpins 3 mm und 4 mm Abstand

Name	Werkstoff	Pinabstand	Maximalkraft	Mittelwert	Standardabweichung
Al3 - 1	Aluminium	3mm	3570 N	3000 N	± 1069 N
Al3 - 2	Aluminium	3mm	3988 N		
Al3 - 3	Aluminium	3mm	1545 N		
Al3 - 4	Aluminium	3mm	2899 N		
Al4 - 1	Aluminium	4mm	3419 N	3554 N	± 181 N
Al4 - 2	Aluminium	4mm	3808 N		
Al4 - 3	Aluminium	4mm	3430 N		
Al4 - 4	Aluminium	4mm	3560 N		

7.3.1.2 Probenversagen der Scherzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium

Wie bereits vorher erwähnt, traten zwei Hauptversagensarten der Proben auf. Das Ausreißen der Pins aus dem Kunststoff und das Abscheren der Pins. Bei den Proben mit einem Pinabstand von 3 mm wurden von allen bepinnten Metallplatten, ausgenommen einer, alle Pins beim Scherzugversuch abgesichert. Abbildung 107 und Abbildung 108 zeigen zwei der geprüften Proben mit 3 mm Pinabstand. Die in Abbildung 107 abgebildete Probe ist jene, bei der nicht alle Pins abgesichert wurden. Es ist eine deutliche plastische Verformung der Pins zu erkennen. Sie haben sich in Richtung der aufgebrachtten Prüfkraft geneigt. Die abgesicherten Pins sind nicht oberflächennahe mit der bepinnten Metallplatte abgesichert worden, sondern hinterließen ein Residuum von kreisförmigen, geringfügig eingebuchteten Flächen. Bei den hinterbliebenen Eindrücken der nicht abgesicherten Pins ist eine Deformation des Polyamids am Rand einiger Eindrücke zu erkennen. Es sind keine hervortretenden oder beschädigten Glasfasern zu erkennen.

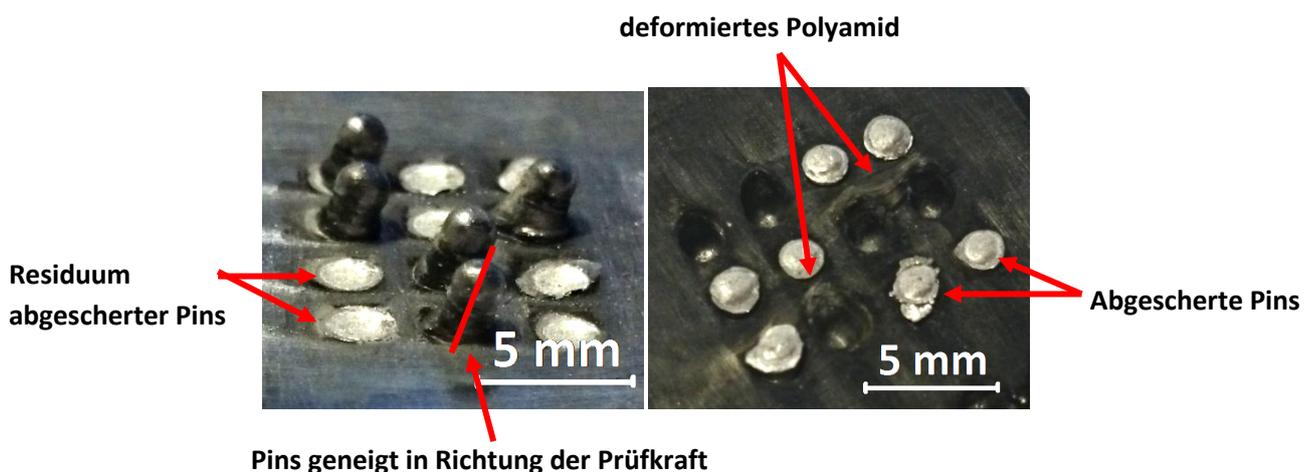


Abbildung 107 Probenversagen Scherzugversuch mit Aluminiumpins mit 3 mm Abstand, Probe 1

Abbildung 108 zeigt eine Probe, bei der alle Pins abgesichert wurden. Wie bei der Probe zuvor hinterließen die abgesicherten Pins ein Residuum von kreisförmigen, geringfügig eingebuchteten Flächen. Auf der Aufnahme rechts, die schräg zur Fügefläche aufgenommen wurde, sind die

aufgewölbten Enden der Pins zu erkennen, die das Gegenstück zu den Einbuchtungen an den bepinnten Metallplatten darstellen.

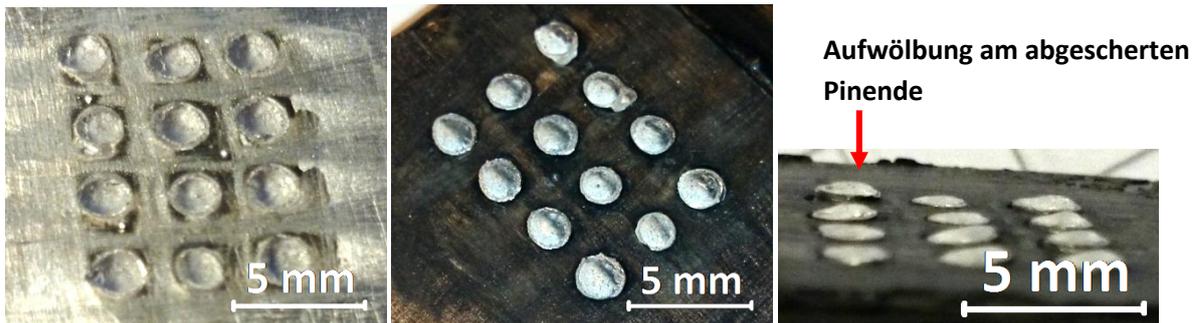
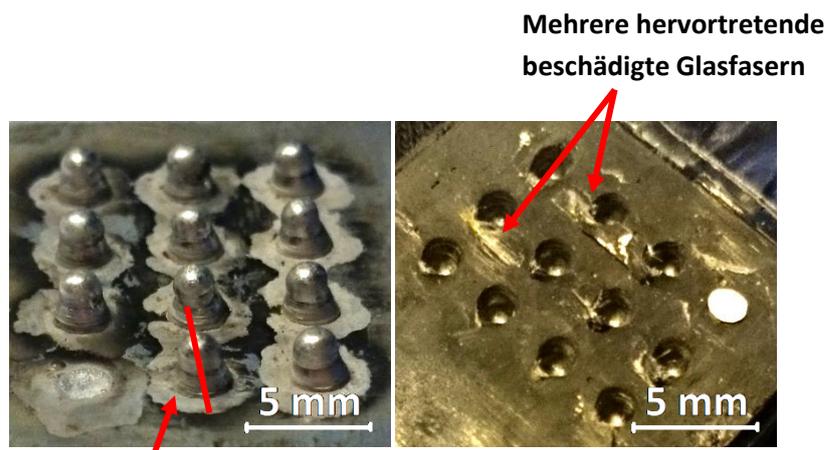


Abbildung 108 Probenversagen Scherzugversuch mit Aluminiumpins mit 3 mm Abstand, Probe 2

Im Gegensatz zu den Proben mit 3 mm Pinabstand gab es bei den Proben mit 4 mm Pinabstand nur eine Probe, bei der ein Pin abgesichert wurde und bei allen anderen Proben wurde kein Pin abgesichert. Wie in Abbildung 109 ersichtlich neigten sich auch hier die Pins in Richtung der Prüfkraft und der abgesicherte Pin hinterließ eine kreisförmige, geringfügig eingebuchtete Fläche. Nahezu bei jedem hinterlassenen Eindruck der Pins ist eine Deformation des Polyamids zu erkennen und hervorstehende, beschädigte Glasfasern bzw. Teile von ganzen Glasfaserbündeln.



Pins geneigt in Richtung der Prüfkraft

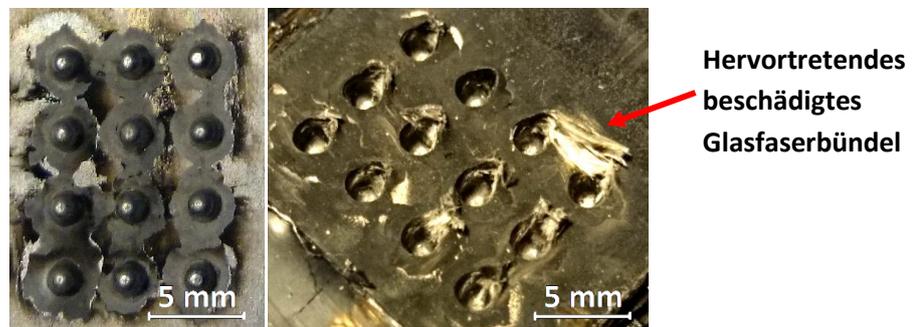


Abbildung 109 Probenversagen Scherzugversuch mit Aluminiumpins mit 4 mm Abstand

7.3.1.3 Ergebnisse der Scherzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Stahl

Ähnlich wie bei den Scherzugversuchen mit den bepinnten Metallplatten aus Aluminium ist auch hier bei den Ergebnissen kaum ein Unterschied zwischen den Pinabständen von 3 mm und 4 mm zu erkennen. Die Ergebnisse der bepinnten Metallplatten aus Stahl mit 3 mm und 4 mm Pinabstand werden im direkten Vergleich in Abbildung 110 dargestellt. Man erkennt auch hier, dass die Kraft so lange ansteigt, bis es zum Versagen der Probe kommt. Das Versagen der Proben tritt hier allerdings nur kunststoffseitig auf. Bei keiner Probe kam es zum Versagen der bepinnten Metallplatte aus Stahl.

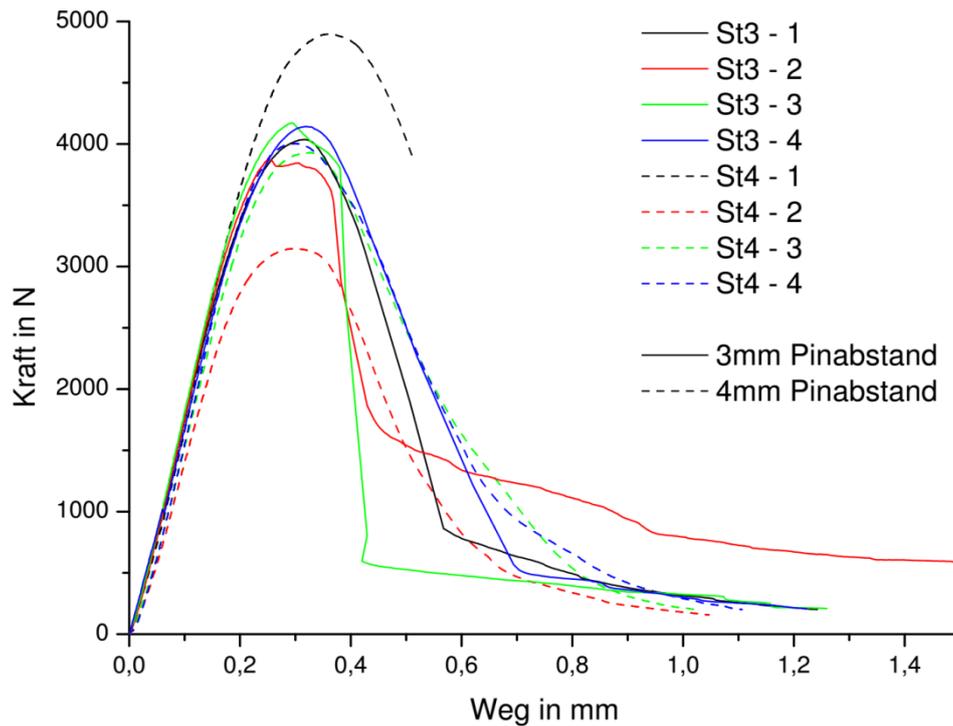


Abbildung 110 Ergebnisse Scherzugversuch Stahlpins 3 mm und 4 mm Abstand

In der folgenden Tabelle sind die Maximalkräfte der einzelnen Proben sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 28 Ergebnisse Scherzugversuch Stahlpins 3 mm und 4 mm Abstand

Name	Werkstoff	Pinabstand	Maximalkraft	Mittelwert	Standardabweichung
St3 - 1	Stahl	3 mm	4037 N	4056 N	± 136 N
St3 - 2	Stahl	3 mm	3871 N		
St3 - 3	Stahl	3 mm	4172 N		
St3 - 4	Stahl	3 mm	4142 N		
St4 - 1	Stahl	4 mm	4899 N	3995 N	± 717 N
St4 - 2	Stahl	4 mm	3147 N		
St4 - 3	Stahl	4 mm	3930 N		
St4 - 4	Stahl	4 mm	4004 N		

7.3.1.4 Probenversagen der Scherzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Stahl

Hier tritt das Versagen der Proben ausschließlich kunststoffseitig auf. Es sind, wie in Abbildung 111 mit den Proben mit 3 mm Pinabstand ersichtlich, deutliche Schäden am Faserverbundkunststoff zu erkennen. Bei der Probe in den oberen zwei Bildern stehen aus dem Kunststoff einzelne Fasern sowie beschädigte Faserbündel hervor und es haben sich vereinzelt Risse im Faserverbundkunststoff gebildet. Die oberste Laminatschicht wurde teilweise von der darunterliegenden abgelöst. Bei der Probe in den unteren zwei Bildern wurden mehrere Laminatschichten aus dem Faserverbundkunststoff zusammen herausgerissen.

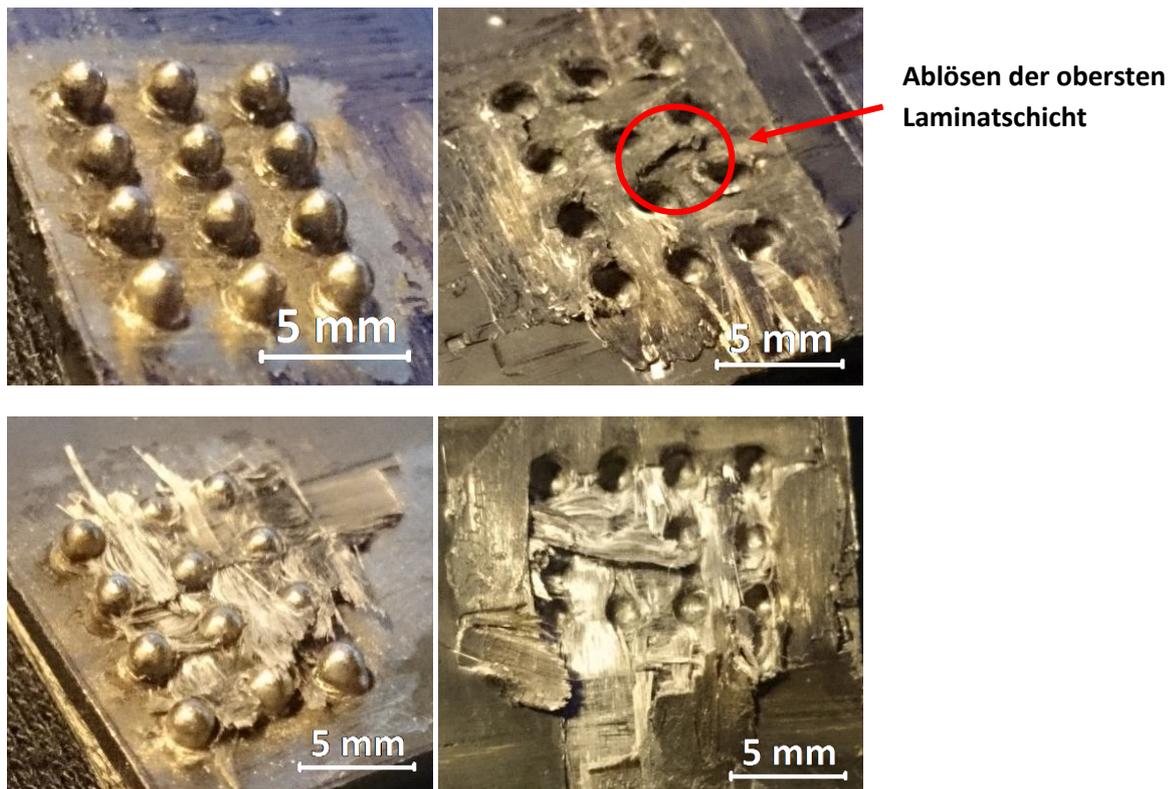


Abbildung 111 Probenversagen Scherzugversuch mit Stahlpins mit 3 mm Abstand

Bei den Proben mit 4 mm Pinabstand kam es zu keinen größeren Beschädigungen des Faserverbundkunststoffes. Es sind hervortretende beschädigte Glasfaserbündel zu erkennen sowie eine teilweise Ablösung der obersten Laminatschicht.

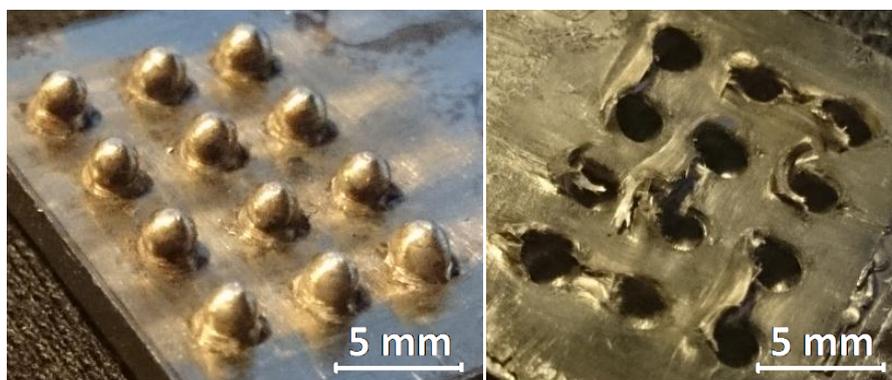


Abbildung 112 Probenversagen Scherzugversuch mit Stahlpins mit 4 mm Abstand

7.3.2 Schälzugversuch

7.3.2.1 Ergebnisse der Schälzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium

Es wurden 4 Proben mit 3 mm und 3 Proben mit 4 mm Pinabstand bis zum Versagen geprüft. Abbildung 113 zeigt die Proben mit 3 mm und 4 mm Pinabstand im direkten Vergleich. Es ist ein Anstieg der aufgenommenen Schälkraft der Proben zu erkennen, bis es zum Versagen der Proben kommt. Dabei ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Proben mit 3 mm und 4 mm Pinabstand zu erkennen. Die Proben mit 3 mm Pinabstand nehmen eine viel größere Schälkraft auf als die Proben mit 4 mm Pinabstand und besitzen somit auch einen viel größeren Schälwiderstand. Untereinander haben die aufgenommenen Kurven derselben Pinabstände eine sehr ähnliche Charakteristik. Das Versagen tritt durch Auslösen der Pins aus dem Kunststoff auf und in manchen Fällen durch Brechen der Pins an ihrer Schweißnaht.

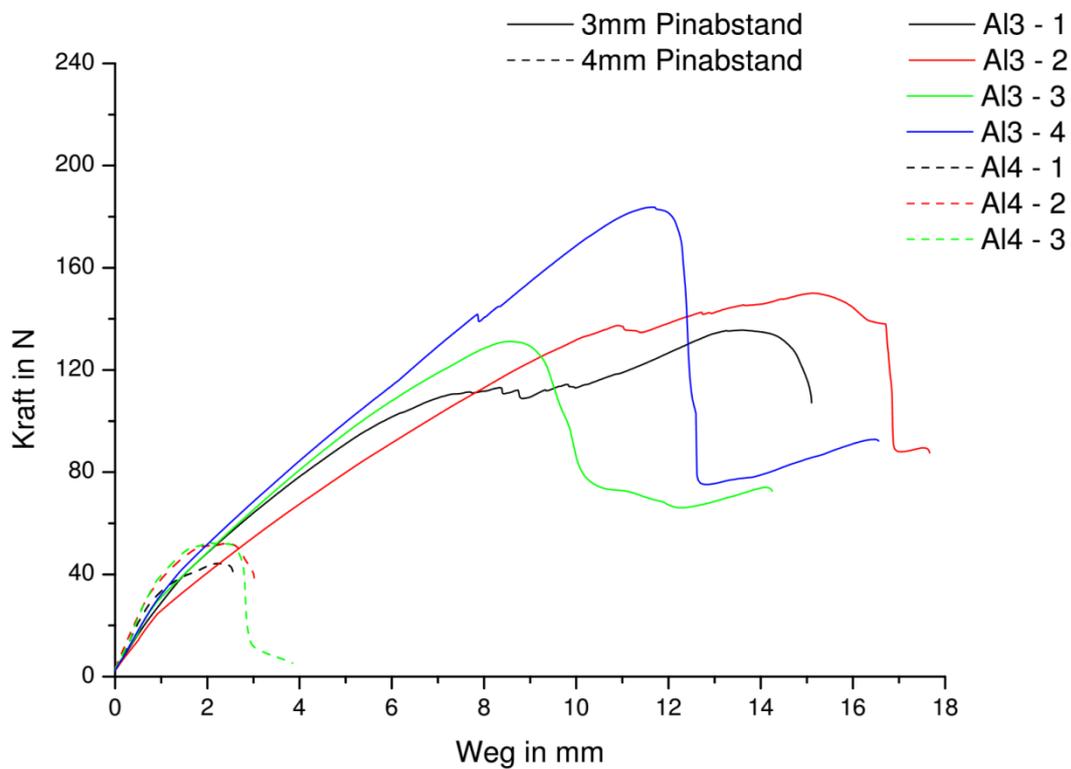


Abbildung 113 Ergebnisse Schälzugversuch Aluminiumpins 3 mm und 4 mm Abstand

In der folgenden Tabelle sind die Maximalkräfte der einzelnen Proben sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 29 Ergebnisse Schälzugversuch Aluminiumpins 3 mm und 4 mm Abstand

Name	Werkstoff	Pinabstand	Maximalkraft	Mittelwert	Standardabweichung
Al3 - 1	Aluminium	3 mm	136 N	150 N	± 23,8 N
Al3 - 2	Aluminium	3 mm	150 N		
Al3 - 3	Aluminium	3 mm	131 N		
Al3 - 4	Aluminium	3 mm	184 N		
Al4 - 1	Aluminium	4 mm	44,2 N	49,5 N	± 4,5 N
Al4 - 2	Aluminium	4 mm	52,1 N		
Al4 - 3	Aluminium	4 mm	52,0 N		

7.3.2.2 Probenversagen der Schälzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium

Beim Schälzugversuch mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium und einem Pinabstand von 3 mm tritt das Versagen auf beiden Seiten der Fügeverbindung auf, sprich sowohl metall- als auch kunststoffseitig. Die intakten Pins weisen keine plastische Deformation auf. Die ausgebrochenen Pins hinterlassen wie beim Scherzugversuch ein Residuum von kreisförmigen, geringfügig eingebuchteten Flächen. Beim Faserverbundkunststoff sind einige Faserbündel beschädigt und ragen am Rand der Pineindrücke empor. Es ist ebenfalls eine leichte plastische Deformation des Faserverbundkunststoffes am Rand der Pineindrücke zu erkennen.

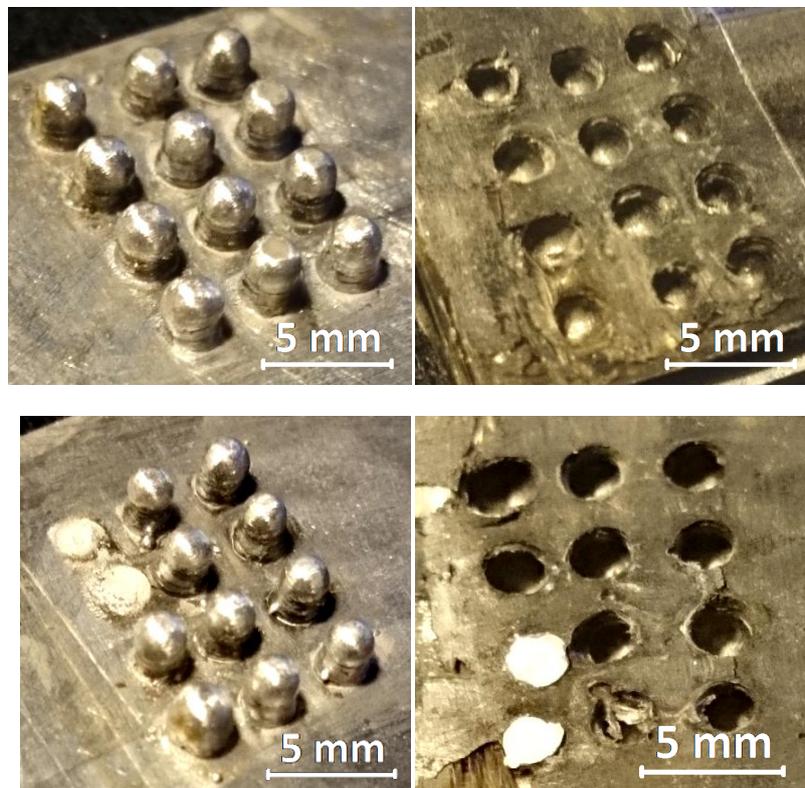


Abbildung 114 Probenversagen Schälzugversuch mit Aluminiumpins mit 3 mm Abstand

Das Versagen der Proben mit 4 mm Pinabstand tritt auf durch Lösen der Pins aus dem Kunststoff. Der Kunststoff weist keine Beschädigungen durch die Prüfung auf. Er weist nur die Spuren des Heißverpressens des Faserverbundkunststoffes mit den bepinnten Metallplatten auf.

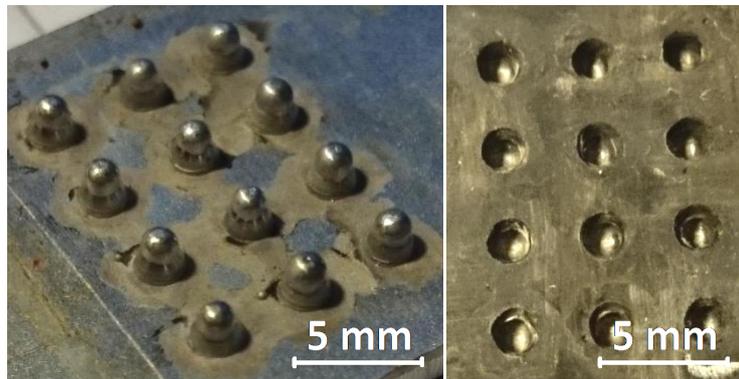


Abbildung 115 Probenversagen Schälzugversuch mit Aluminiumpins mit 4 mm Abstand

7.3.2.3 Ergebnisse der Schälzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Stahl

Da bei den Versuchen mit den bepinnten Metallplatten aus Stahl, wie in Kapiteln 6.2.2.1 zuvor erwähnt, unterschiedliche Pinntypen bei den Proben mit 3 mm und 4 mm Pinabstand vorliegen, können die Ergebnisse nicht direkt verglichen werden. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Versuche mit den Proben mit 3mm Pinabstand.

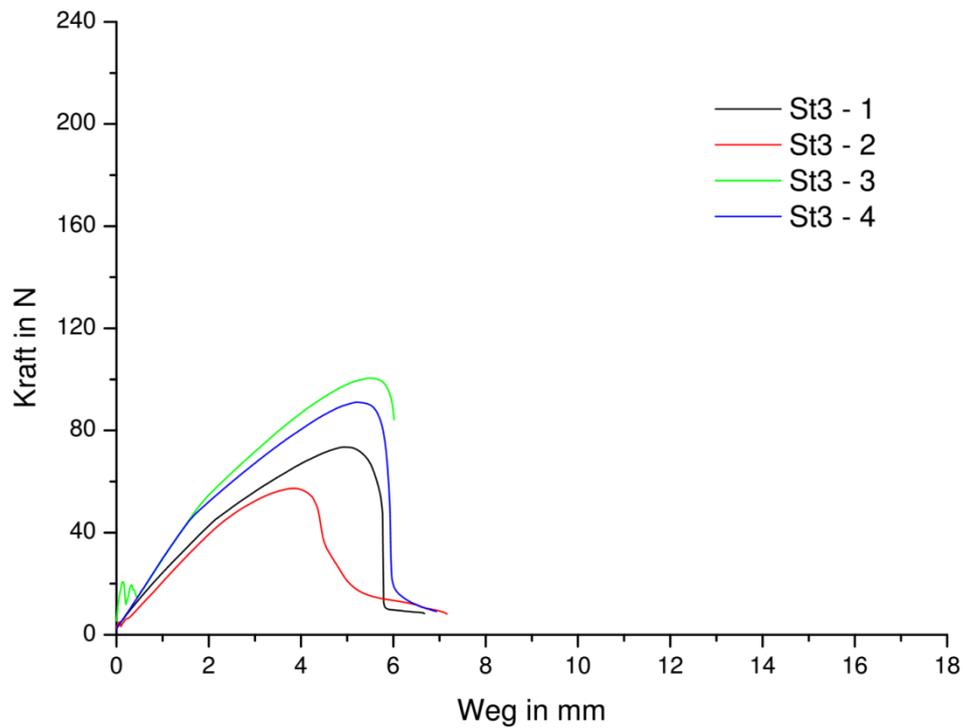


Abbildung 116 Ergebnisse Schälzugversuch Stahlpins 3 mm Abstand

In der folgenden Tabelle sind die Maximalkräfte der einzelnen Proben mit 3 mm Pinabstand sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 30 Ergebnisse Schälzugversuch Stahlpins 3 mm Abstand

Name	Werkstoff	Pinabstand	Maximalkraft	Mittelwert	Standardabweichung
St3 - 1	Stahl	3 mm	73,5 N	80,6 N	± 19,1 N
St3 - 2	Stahl	3 mm	57,3 N		
St3 - 3	Stahl	3 mm	101 N		
St3 - 4	Stahl	3 mm	91,1 N		

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Proben mit 4 mm Pinabstand. Die Pinform ist gegenüber den Pins mit 3 mm Abstand wesentlich schmaler und mit ausgeprägterem Kugelkopf. Wie aus Abbildung 117 ersichtlich nehmen sie eine größere Schälkraft als die Pins mit 3 mm Abstand auf, bevor sie versagen. Die Anfangsgeraden liegen auch wesentlich näher zusammen als bei den Pins mit 3 mm Abstand.

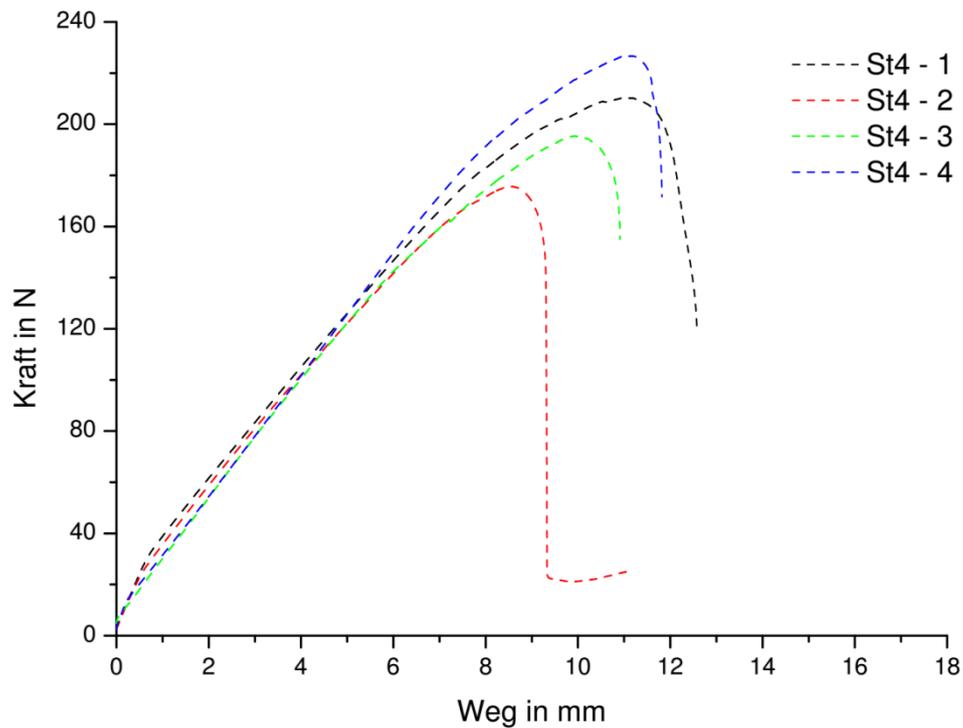


Abbildung 117 Ergebnisse Schälzugversuch dünne Stahlpins 4 mm Abstand

In der folgenden Tabelle sind die Maximalkräfte der einzelnen Proben mit 4 mm Pinabstand sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 31 Ergebnisse Schälzugversuch dünne Stahlpins 4mm Abstand

Name	Werkstoff	Pinabstand	Maximalkraft	Mittelwert	Standardabweichung	Anmerkung
St4 - 1	Stahl	4 mm	210 N	202 N	± 21,8 N	dünne Pins
St4 - 2	Stahl	4 mm	176 N			
St4 - 3	Stahl	4 mm	195 N			
St4 - 4	Stahl	4 mm	227 N			

7.3.2.4 Probenversagen der Schälzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Stahl

Das Versagen der Proben mit 3 mm Pinabstand tritt auf durch Lösen der Pins aus dem Kunststoff. Der Kunststoff weist nur sehr geringe Beschädigungen durch die Prüfung auf. Er weist hauptsächlich nur die Spuren des Heißverpressens des Faserverbundkunststoffes mit den bepinnten Metallplatten auf.

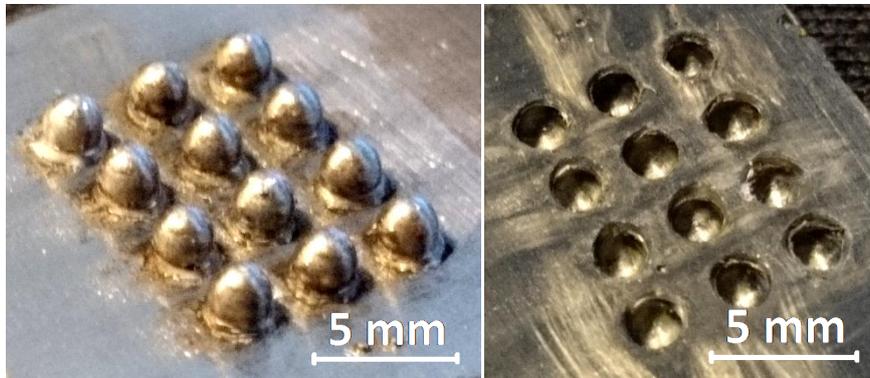


Abbildung 118 Probenversagen Schälzugversuch mit Stahlpins mit 3 mm Abstand

Das Versagen der Proben mit 4 mm Pinabstand tritt auch durch Lösen der Pins aus dem Kunststoff auf, aber der Kunststoff weist einige Schäden durch die Prüfung auf. Der Faserverbundkunststoff hat einige Risse in Richtung der darin verlaufenden Faserbündel. Am Rand der Pineindrücke ist eine leichte plastische Deformation des Faserverbundwerkstoffes zu erkennen. Einige Glasfaserbündel sind beschädigt, haben sich etwas aus der Laminatschicht gelöst und stehen leicht empor.

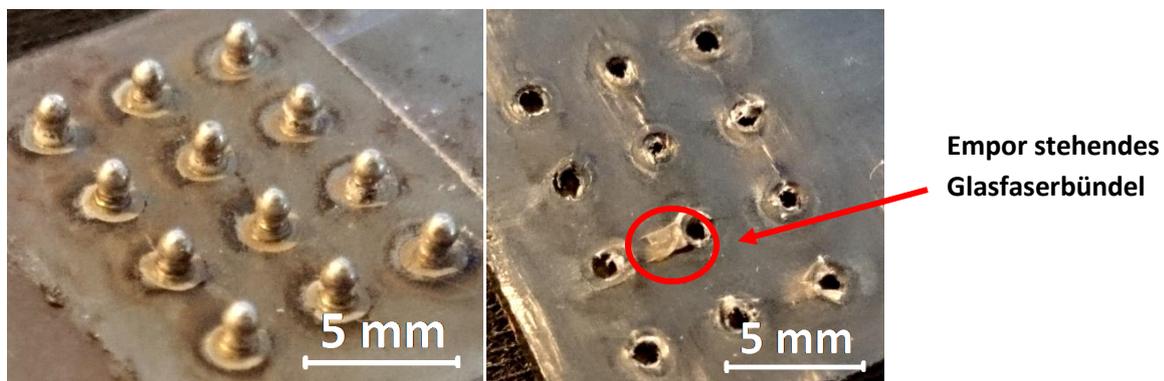


Abbildung 119 Probenversagen Schälzugversuch mit Stahlpins mit 4 mm Abstand

7.3.3 Kopfzugversuch

7.3.3.1 Ergebnisse der Kopfzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium

Es wurden jeweils 4 Proben mit 3 mm und 4 mm Pinabstand bis zum Versagen geprüft. Abbildung 120 zeigt die Proben mit 3 mm und 4 mm Pinabstand im direkten Vergleich. Es ist ein Anstieg der aufgenommenen Zugkraft der Proben zu erkennen, bis es zum Versagen der Proben kommt. Dabei ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Proben mit 3 mm und 4 mm Pinabstand zu erkennen. Die Proben mit 3 mm Pinabstand nehmen eine viel größere Zugkraft auf als die Proben mit 4 mm Pinabstand. Das Versagen tritt durch Auslösen der Pins aus dem Kunststoff auf und in manchen Fällen durch Brechen der Pins in ihrer Schweißnaht.

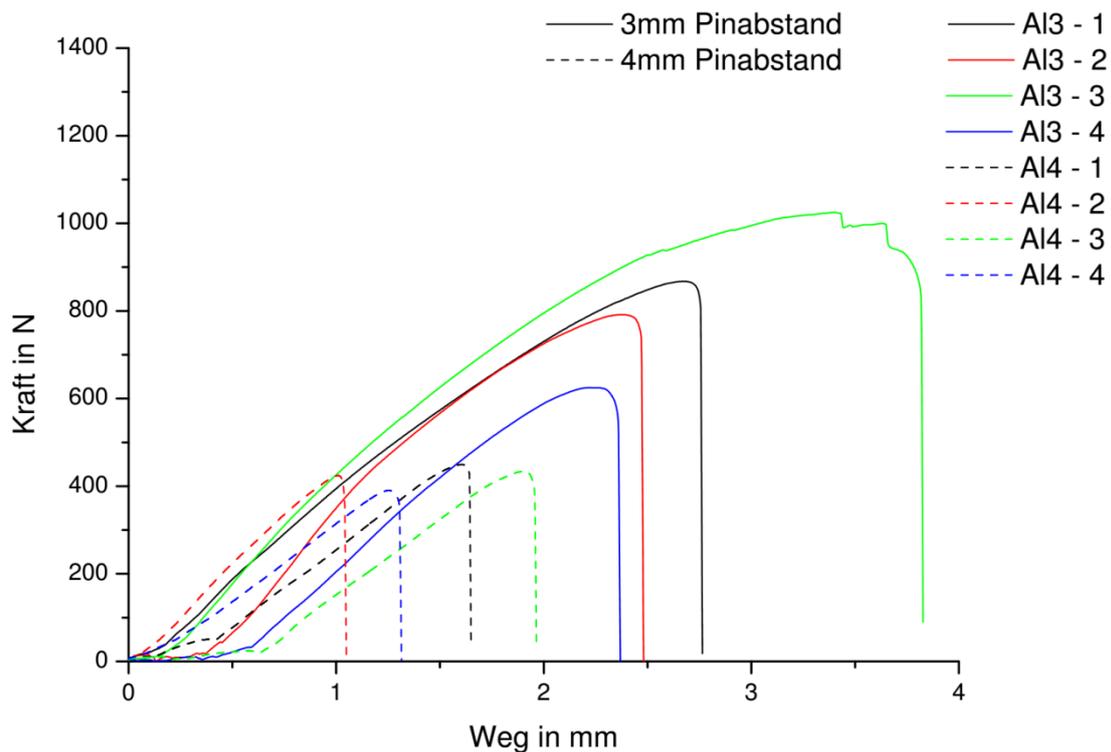


Abbildung 120 Ergebnisse Kopfzugversuch Aluminiumpins 3 mm und 4 mm Abstand

In der folgenden Tabelle sind die Maximalkräfte der einzelnen Proben sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 32 Ergebnisse Kopfzugversuch Aluminiumpins 3 mm und 4 mm Abstand

Name	Werkstoff	Pinabstand	Maximalkraft	Mittelwert	Standardabweichung
Al3 - 1	Aluminium	3 mm	868 N	827 N	± 166 N
Al3 - 2	Aluminium	3 mm	791 N		
Al3 - 3	Aluminium	3 mm	1025 N		
Al3 - 4	Aluminium	3 mm	625 N		
Al4 - 1	Aluminium	4 mm	450 N	425 N	± 24,9 N
Al4 - 2	Aluminium	4 mm	425 N		
Al4 - 3	Aluminium	4 mm	434 N		
Al4 - 4	Aluminium	4 mm	391 N		

7.3.3.2 Probenversagen der Kopfzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Aluminium

Das Versagen der Proben mit einem Pinabstand von 3 mm tritt durch Auslösen der Pins aus dem Kunststoff auf sowie in manchen Fällen durch Brechen der Pins an ihrer Schweißnaht. Es sind auch leichte Beschädigungen am Kunststoff zu erkennen. Einige Teile von Faserbündeln wurden herausgerissen und stehen empor und man erkennt leichte Deformationen am Rand der Pineindrücke.

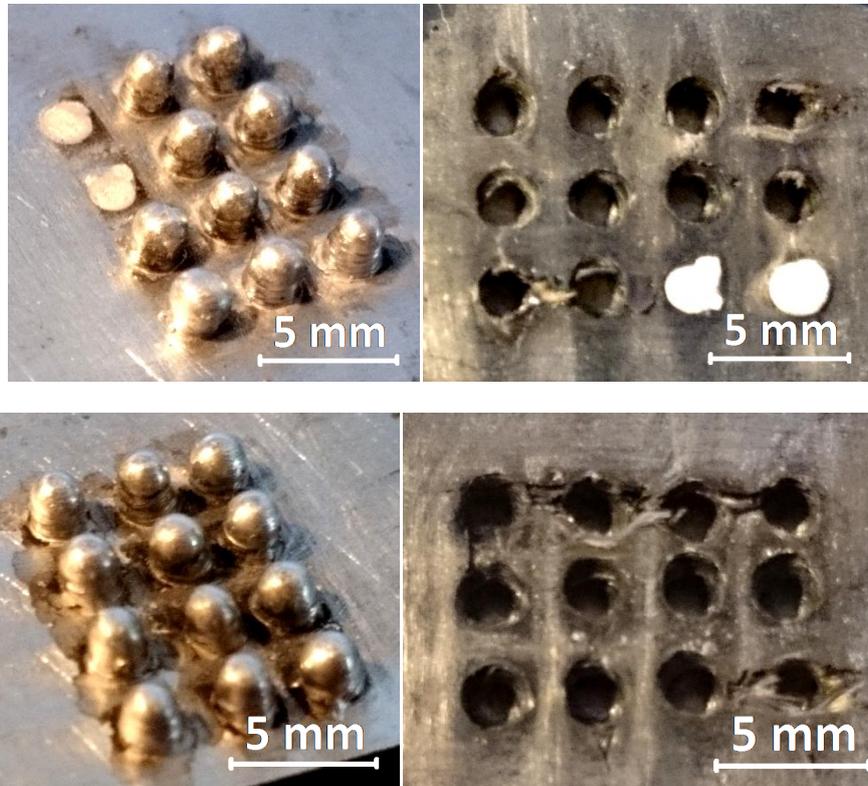


Abbildung 121 Probenversagen Kopfzugversuch mit Aluminiumpins mit 3 mm Abstand

Das Versagen der Proben mit 4 mm Pinabstand tritt nur durch Auslösen der Pins aus dem Kunststoff auf. Der Faserverbundkunststoff weist weniger Beschädigungen auf als die Proben mit 3 mm Pinabstand. Nur einige wenige Glasfaserbündel wurden beschädigt und aus dem Faserverbundkunststoff gerissen.

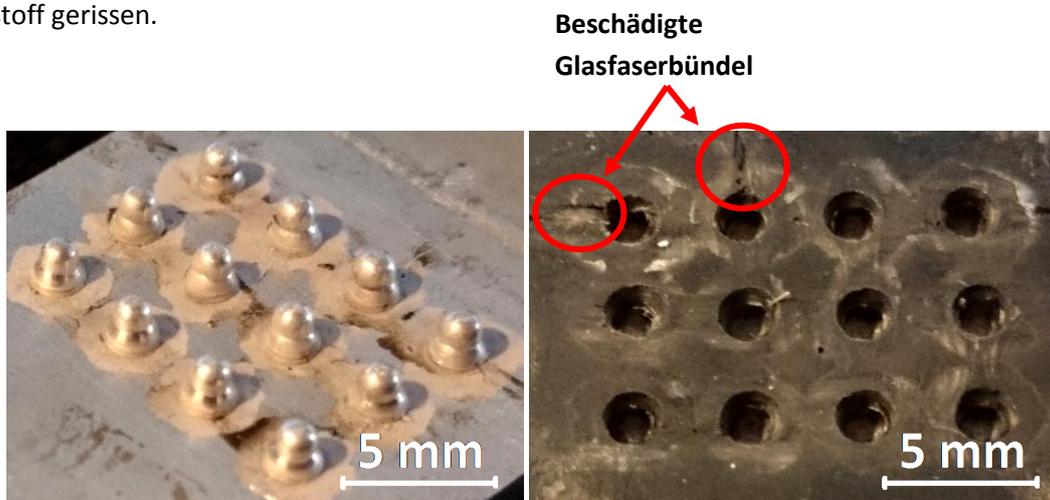


Abbildung 122 Probenversagen Kopfzugversuch mit Aluminiumpins mit 4 mm Abstand

7.3.3.3 Ergebnisse der Kopfzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Stahl

Da bei den Versuchen mit den bepinnten Metallplatten aus Stahl, wie im Kapitel 6.2.2.1 zuvor erwähnt, unterschiedliche Pintypen bei den Proben mit 3 mm und 4 mm Pinabstand vorliegen, können die Ergebnisse nicht direkt verglichen werden. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Versuche mit den Proben mit 3 mm Pinabstand.

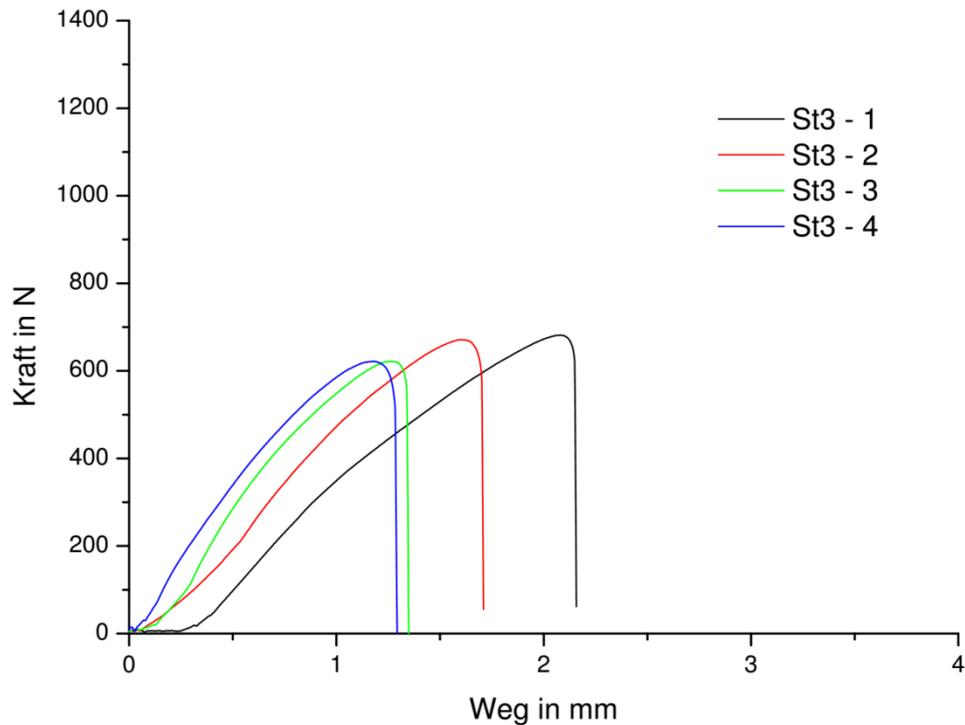


Abbildung 123 Ergebnisse Kopfzugversuch Stahlpins 3 mm Abstand

In der folgenden Tabelle sind die Maximalkräfte der einzelnen Proben sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 33 Ergebnisse Kopfzugversuch Stahlpins 3 mm Abstand

Name	Werkstoff	Pinabstand	Maximalkraft	Mittelwert	Standardabweichung
St3 - 1	Stahl	3 mm	682 N	649 N	± 32,2 N
St3 - 2	Stahl	3 mm	671 N		
St3 - 3	Stahl	3 mm	621 N		
St3 - 4	Stahl	3 mm	622 N		

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Proben mit 4 mm Pinabstand. Die Pinform ist gegenüber den Pins mit 3 mm Abstand wesentlich schmaler und mit ausgeprägterem Kugelkopf. Sie können eine größere Zugkraft aufnehmen, bevor sie versagen, weisen aber eine ähnliche Charakteristik der aufgenommenen Kurve auf.

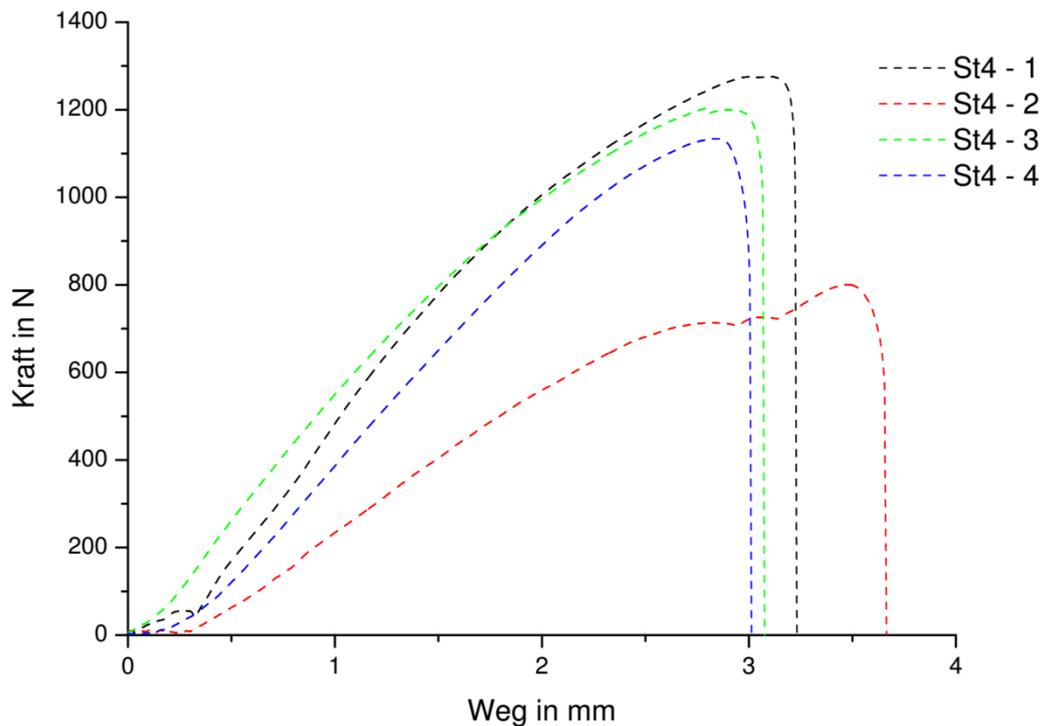


Abbildung 124 Ergebnisse Kopfzugversuch dünne Stahlpins 4 mm Abstand

In der folgenden Tabelle sind die Maximalkräfte der einzelnen Proben sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 34 Ergebnisse Kopfzugversuch dünne Stahlpins 4mm Abstand

Name	Werkstoff	Pinabstand	Maximalkraft	Mittelwert	Standardabweichung	Anmerkung
St4 - 1	Stahl	4 mm	1276 N	1104 N	± 210 N	dünne Pins
St4 - 2	Stahl	4 mm	801 N			
St4 - 3	Stahl	4 mm	1204 N			
St4 - 4	Stahl	4 mm	1134 N			

7.3.3.4 Probenversagen der Kopfzugversuche mit bepinnten Metallplatten aus Stahl

Das Versagen der Proben liegt bei beiden geprüften Pinabständen am Auslösen der Pins aus dem Kunststoff. Die Stahlpins blieben dabei zur Gänze unbeschädigt. Im Faserverbundkunststoff sind, wie den folgenden Abbildungen zu entnehmen ist, bei den Proben mit 3 mm Pinabstand Risse im Kunststoff zu erkennen sowie beschädigte Faserbündel.

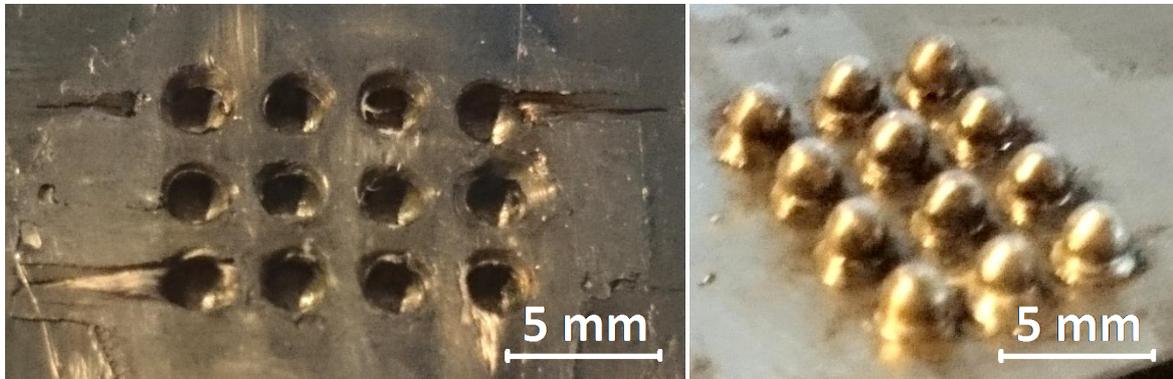


Abbildung 125 Probenversagen Kopfzugversuch mit Stahlpins mit 3 mm Abstand

Bei den Proben mit 4 mm Pinabstand sind ebenfalls die Pins unbeschädigt. Die Pineindrücke sind durch die dünneren Pins auch etwas schmaler und an den Rändern der Eindrücke sind ausgefranste und beschädigte Fasern sowie Faserbündel zu erkennen. Der Kunststoff weist dort auch Deformationen auf.

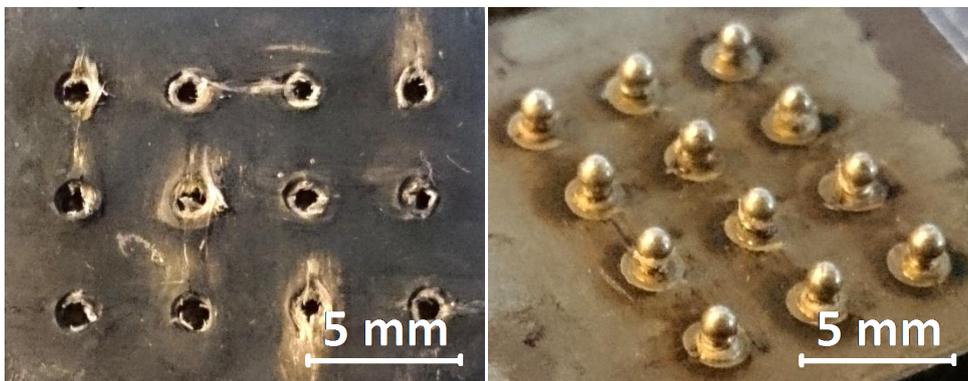


Abbildung 126 Probenversagen Kopfzugversuch mit Stahlpins mit 4 mm Abstand

8 Diskussion der Ergebnisse

Da die finalen Versuche ausschließlich mit dem endlosglasfaserverstärkten Polyamid durchgeführt wurden, liegt der Fokus bei den folgenden Diskussionen auch beim endlosglasfaserverstärkten Polyamid. Das kurzfaserverstärkte Polyamid wird soweit wie sinnvoll in die Diskussionen mit einbezogen.

8.1 Thermische Prüfverfahren

8.1.1 Bestimmung des Faseranteils mittels Pyrolyseverfahren

Für das endlosglasfaserverstärkte Polyamid wurde eine zusätzliche Bestimmung des Faseranteils mittels Pyrolyseverfahren durchgeführt, da die Messergebnisse der maschinellen thermogravimetrischen Analyse stark von den beigelegten Informationen der endlosglasfaserverstärkten Polyamidplatte abwichen.

Laut beigelegten Informationen sollte sich der Glasfaseranteil der endlosglasfaserverstärkten Polyamidplatte auf etwa 45% belaufen. Mittels TGA wurde mehrmals ein Glasfaseranteil von etwa 63% gemessen. Um einen Messfehler auszuschließen, wurde dann zusätzlich eine Bestimmung des Faseranteils mittels Pyrolyseverfahren durchgeführt. Das Ergebnis der Analyse, mit einem gemessenen Glasfaseranteil von 64,2%, bestätigt die Messergebnisse der maschinell durchgeführten Analyse. Die endlosglasfaserverstärkten Polyamidplatte hat somit entgegen ihrer beigelegten Informationen einen Glasfaseranteil von etwa 63%.

8.1.2 Auswahl der Verpresstemperaturen für die Vorversuche

8.1.2.1 Eindringverhalten mit ansteigender Temperatur

Da vom Erweichungs- und Schmelzverhalten des Faserverbundmaterials nichts bekannt war, wurden dynamisch-mechanische Analysen sowie eine dynamische Differenzkalorimetrie mit dem Faserverbundmaterial durchgeführt.

Zuerst wurde die dynamisch-mechanische Analyse mit ansteigender Temperatur durchgeführt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der mit der Prüfkraft beaufschlagte Pin bei 240°C beginnt, oberflächlich in das Faserverbundmaterial einzudringen und erst bei etwa 255°C tiefer ins Material eindringt. Dies trifft sowohl auf das endlos- sowie auf das kurzglasfaserverstärkte Polyamid zu. Bei Temperaturen von 240°C und darunter würden somit abhängig von der Tiefe der Temperatur immer höhere Kräfte benötigt werden, damit der Pin in das Faserverbundmaterial eindringen kann. Der höhere Widerstand des Faserverbundmaterials kommt daher, dass die Matrix des Faserverbundmaterials sich immer mehr verfestigt und eine größere Krafteinwirkung zur Verformung benötigt. Diese benötigte erhöhte Krafteinwirkung wird auch den Glasfasern entgegengesetzt, die vom Pin verdrängt werden. Es kommt daher bei niedrigeren Temperaturen zu einer größeren Beschädigung am Faserverbundmaterial durch das Eindringen der Pins in Form von abgetrennten Fasern und Bildung von Rissen in der Matrix. Ebenfalls ist auch der Formschluss des Matrixmaterials um den Pin herum nicht gegeben, wenn das Matrixmaterial nicht aufschmilzt und den Pin benetzen kann. All dies hat eine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindung.

Die Wahl der Temperaturen für die folgenden dynamisch-mechanischen Untersuchungen bei konstanter Temperatur fielen deshalb auf 255°C, 260°C und 265°C, einen Temperaturbereich, in dem die Matrix mit geringem Kraftaufwand verformbar ist.

8.1.2.2 Eindringverhalten bei konstanter Temperatur

Aus den Ergebnissen der Untersuchung des Eindringverhaltens eines Pins bei konstanter Temperatur geht hervor, dass sich die optimale Heißpresstemperatur vermutlich knapp unterhalb des Schmelzpunktes des Polyamids befindet. Wählt man die Temperatur zu hoch, sprich beim oder über dem Schmelzpunkt, fließt das Polyamid durch den Verpressvorgang zu den Rändern hin weg und beginnt Bläschen zu bilden. Bei zu niedriger Temperatur werden die Glasfasern und das Polyamid beschädigt (siehe Kapitel 8.1.2.1).

Die Wahl für die weiter zu untersuchenden Verpresstemperaturen bei den Vorversuchen, bei denen der Kunststoff und die bepinnten Metallplatten erwärmt werden, fiel deshalb auf 10°C und 5°C unter den Schmelzpunkt des Polyamids (252°C und 257°C).

Für die Heißpressvorversuche, bei denen nur die bepinnte Metallplatte erwärmt wird, muss jedoch beachtet werden, dass das Polyamid mit Raumtemperatur verpresst wird und von den bepinnten Metallplatten noch erweicht bzw. aufgeschmolzen werden muss. Die bepinnten Metallplatten werden durch diesen Vorgang abgekühlt. Dementsprechend müssen die bepinnten Metallplatten eine höhere Temperatur vor dem Heißpressvorgang haben, um den Kunststoff soweit erweichen und aufschmelzen zu können, bis die Pins komplett in den Faserverbundkunststoff eingedrungen sind. Die Wahl für die weiter zu untersuchenden Verpresstemperaturen bei den Vorversuchen, bei denen nur die bepinnten Metallplatten erwärmt werden, fiel deshalb auf 5°C und 10°C über den Schmelzpunkt des Polyamids (267°C und 272°C).

Bei den Heißpressvorversuchen, bei denen nur der Kunststoff erwärmt wird, ist zu beachten, dass die dem Heißpressvorgang mit Raumtemperatur zugeführten bepinnten Metallplatten dem erwärmten Kunststoff Wärme entziehen und sich dieser deshalb zu verfestigen beginnt. Die Temperaturen sollten deshalb nicht zu niedrig gewählt werden, aber jedoch auch nicht viel höher als der Schmelzpunkt des Polyamids, da sich sonst dieses zu verflüssigen beginnt und beim Verpressvorgang oder schon zuvor zerfließt. Die Wahl für die weiter zu untersuchenden Verpresstemperaturen bei den Vorversuchen, bei denen nur der Kunststoff erwärmt wird, fiel deshalb auf den Schmelzpunkt des Polyamids (262°C).

8.2 Heißpressvorversuche

8.2.1 Kunststoff- und metallseitige Erwärmung

8.2.1.1 Endlosglasfaserverstärktes Polyamid

Wie aus Kapitel 7.2.1.1 ersichtlich verliefen die Versuche mit dem endlosglasfaserverstärkten Polyamid problemlos. Der Faserverbundkunststoff schließt bündig mit den bepinnten Metallplatten ab und es sind keinerlei Beschädigungen oder sonstige Veränderungen am Faserverbundkunststoff durch das Heißpressen bei 252°C und 257°C mit freiem Auge zu erkennen.

Aufschluss über die qualitativen Unterschiede der beiden verwendeten Heißpresstemperaturen geben die Bilder des Lichtmikroskops aus Kapitel 7.2.2.1. Wie dort beschrieben, entsteht beim Heißpressverfahren mit einer Temperatur von 257°C ein bündiger Formschluss zwischen bepinnten Metallplatten und endlosglasfaserverstärktem Polyamid. Es kommt zu einer geringen Hohlraum- und Porenbildung im Polyamid (siehe Abbildung 127). Dies trifft sowohl auf die Proben mit bepinnten Metallplatten aus Stahl mit einem Pinabstand von 3 mm sowie 4 mm zu. Bei den bepinnten Metallplatten aus Aluminium wurde nur eine geringfügige Porenbildung an der Fügelinie festgestellt.

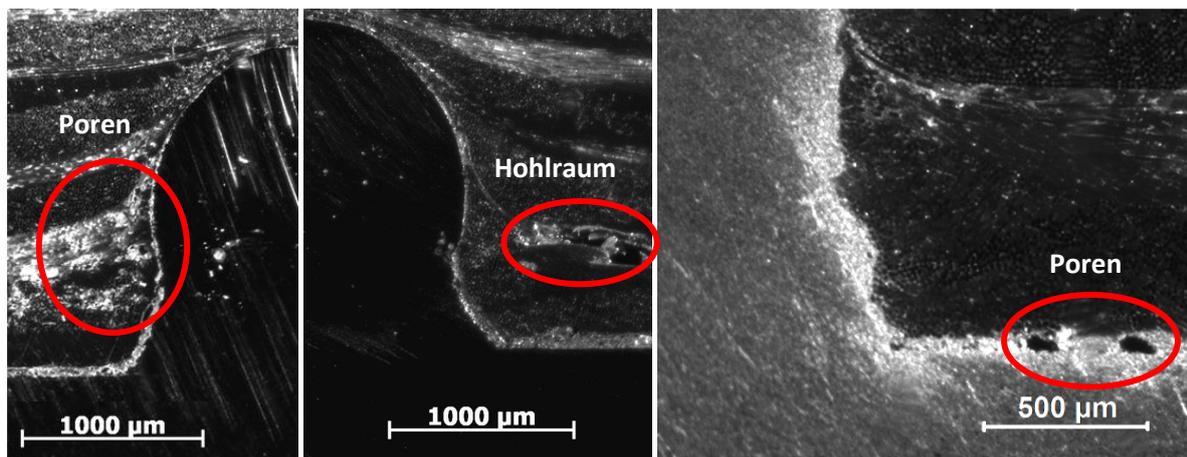


Abbildung 127 linkes Bild Stahlpin 3 mm Pinabstand; mittleres Bild Stahlpin 4 mm Pinabstand, rechtes Bild Aluminiumpin 4 mm Pinabstand

Im Vergleich dazu kam es bei den Heißpressvorversuchen mit einer Heißpresstemperatur von 252°C auch zur Porenbildung, einer wesentlich größeren Hohlrumbildung im Polyamid sowie zu einer geringfügigen Delamination.

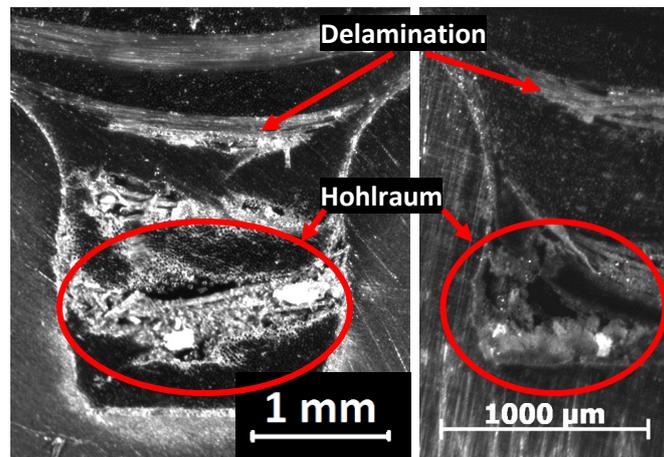


Abbildung 128 links Aluminiumpins mit 3 mm Pinabstand, rechts Stahlpins mit 3 mm Pinabstand

Die Versuche mit einer Heißpresstemperatur von 257°C ergeben somit bei den bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium mit einem Pinabstand von 3 mm und 4 mm eine qualitativ hochwertigere Fügeverbindung. Deshalb wurde sie als Heißpresstemperatur für die finalen Heißpressversuche mit dem endlosfaserverstärkten Polyamid gewählt.

8.2.1.2 Kurzglasfaserverstärktes Polyamid

Bei den Vorversuchen mit dem kurzfaserverstärkten Polyamid wurden die Proben mit bepinnten Metallplatten aus Stahl sowie aus Aluminium bei einer Heißpresstemperatur von 252°C und 257°C mit dem kurzfaserverstärkten Polyamid bündig gefügt. Jedoch kam es bei jeder Probe, bei beiden Heißpresstemperaturen, zu Rissen im Kunststoff, die mit bloßem Auge zu erkennen sind. In Abbildung 129 erkennt man am linken Bild bei der Probe mit Stahlpins, dass auf der oberen rechten Seite im Kunststoff ein etwa 1 cm langer Riss durch das Heißpressen entstanden ist. Auf der rechten Abbildung sind feine Risse im Kunststoff als leicht weiße Linien zu erkennen, die einige Millimeter lang sind.

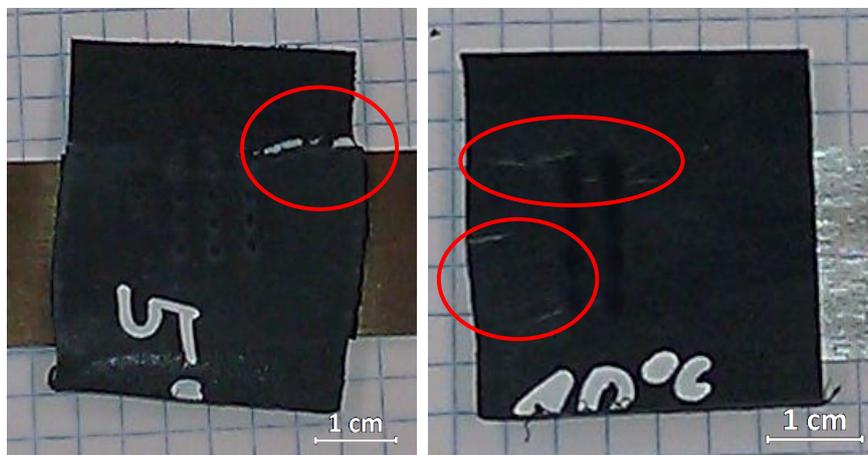


Abbildung 129 links Stahlpins - Riss im Kunststoff, rechts Aluminiumpins - kleine Risse im Kunststoff

Die Bilder vom Auflichtmikroskop in Kapitel 7.2.2.2 zeigen, dass es keinen sichtbaren qualitativen Unterschied zwischen den Proben gibt, die mit einer Heißpresstemperatur von 252°C verpresst wurden, gegenüber denen, die mit 257°C verpresst wurden. In den Bereichen, in denen es nicht zur Rissbildung kam, entstanden auch keine Poren oder Hohlräume und die Pins schließen mit dem Kunststoff bündig ab. Jedoch in den Bereichen, in denen es zur Rissbildung kam, befinden sich massive Hohlräume im Kunststoff. Die folgende Abbildung zeigt den Querschnitt eines Risses der Probe mit Stahlpins mit 3 mm Pinabstand.

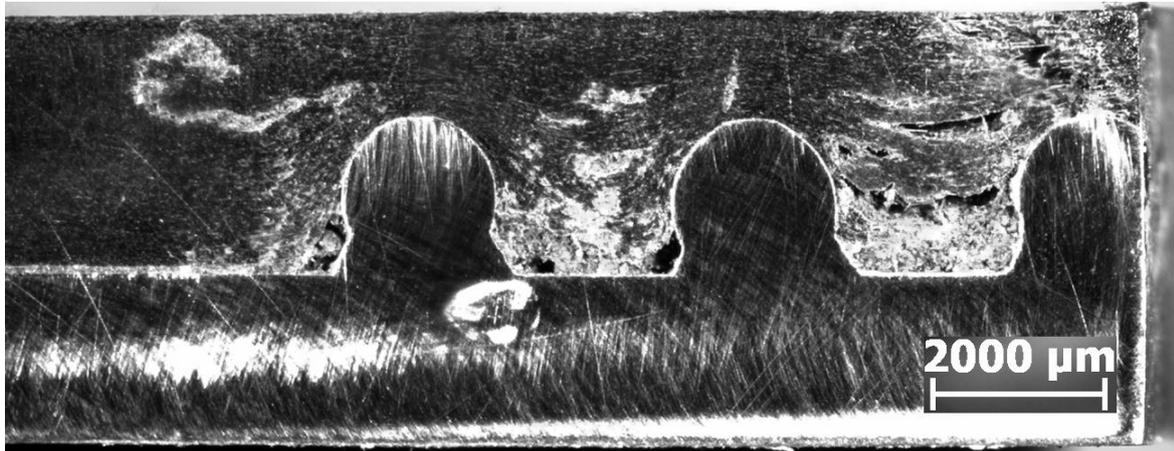


Abbildung 130 Stahlpins mit 3 mm Pinabstand, kurzglasfaserverstärktes Polyamid mit Riss im Querschnitt

Dieses Phänomen der Rissbildung beeinträchtigt die Qualität der Fügeverbindung natürlich massiv. Der Formschluss ist teilweise nicht mehr gegeben und entstandene Hohlräume können bei auftretenden Belastungen wie eine Kerbe wirken und dadurch lokale Spannungsspitzen im Material verursachen.

Die Rissbildung ist vermutlich darauf zurück zu führen, dass das kurzglasfaserverstärkte Polyamid im Gegensatz zum endlosglasfaserverstärkten Polyamid keine durchgehenden hochfesten Glasfasern hat, die auftretende Kräfte auch beim Erweichen der Matrix aufnehmen können. Beim kurzglasfaserverstärkten Polyamid spielt die Matrix in Symbiose mit den Fasern eine besonders wichtige Rolle. Die Kurzglasfasern können durch ihre Länge von weniger als einem Millimeter die auf sie wirkenden Kräfte nur in einem sehr lokalen Bereich weiterleiten. Dabei leiten die Kurzglasfasern die Kräfte zum größten Teil an die Matrix weiter. Wird nun die Festigkeit der Matrix durch Erwärmung reduziert, kann diese die auftretenden Kräfte nur noch unzureichend aufnehmen. Es kommt zur plastischen Verformung, Rissbildung und dergleichen.

Da dieses Phänomen der Rissbildung bei jeder Probe bei beiden Heißpresstemperaturen auftrat, wurde das Heißpressen mit dem kurzglasfaserverstärkten Polyamid nicht weiter verfolgt.

8.2.1.3 Heißpressversuche bei 200°C

Wie aus den Abbildungen in Kapitel 7.2.1.1 ersichtlich und beschrieben, wurde bei den Versuchen mit einem Verpressdruck von 0,625 bar/Pin keine Fügeverbindung zwischen bepinnten Metallplatten und Faserverbundkunststoff hergestellt. Die meisten bepinnten Metallplatten lagen nach dem Heißpressvorgang lose auf dem Faserverbundkunststoff auf.

Bei den Heißpressversuchen mit einem Verpressdruck von 2,083 bar/Pin werden die Pins nahezu komplett im Faserverbundwerkstoff versenkt. Es bleibt aber ein mit bloßem Auge von außen erkennbarer Spalt zwischen Metallplatte und Kunststoff über. Trotz der wesentlich höheren Eindringtiefe lassen sich die bepinnten Metallplatten nach dem Heißpressvorgang mit bloßen Händen aus dem Faserverbundwerkstoff lösen. Dies ist wohl darauf zurück zu führen, dass durch die niedrigen Temperaturen die Matrix nicht aufschmilzt und deshalb keine Benetzung der Pins durch die Matrix stattfindet. Der Vorgang geht dadurch auch vom Heißpressen eher ins Stanzen über. Die Pins verdrängen einfach die Matrix durch plastisches Verformen beim Eindringen und scheren die senkrecht zur Verpressrichtung liegenden Glasfasern ab. Es ist auch zu vermuten, dass durch den Überstand des Pin Kopfes zu seinem Hals die elastische (Rück-)Verformung des Polyamids nicht ausreicht, um den Hals nach Eindringen des Pin Kopfes vollständig zu umschließen. Abbildung 131 zeigt dazu eine schematische Zeichnung, die die Problematik darstellen soll. Es entsteht eine Lücke zwischen Pinhals und Faserverbundkunststoff.

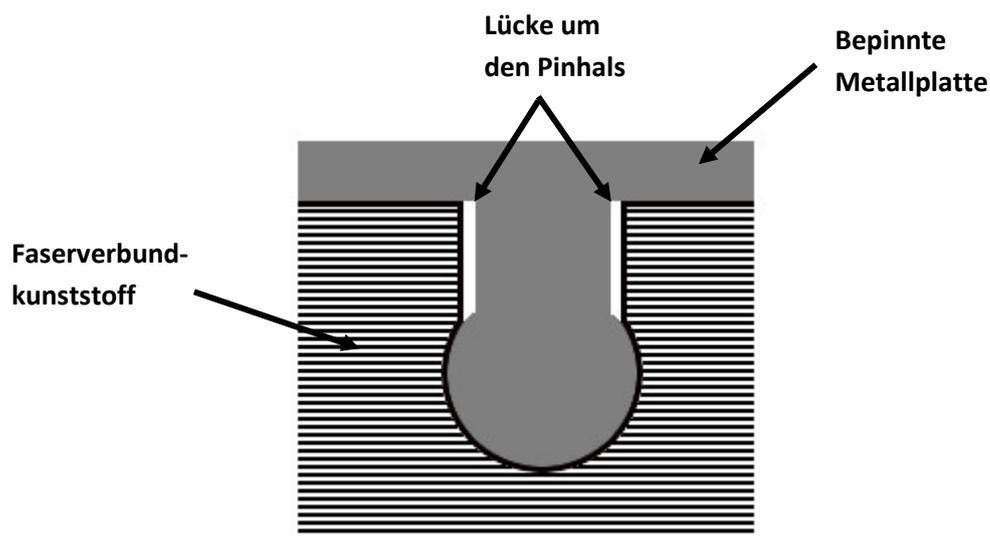


Abbildung 131 Schematische Zeichnung der Lücke zwischen Pinhals und Faserverbundkunststoff

Aufgrund der mehr als unzureichenden Festigkeit der Fügeverbindung unter diesen Bedingungen wurde dieses Verfahren nicht weiter verfolgt.

8.2.2 Kunststoffseitige Erwärmung

Bei den Versuchen mit ausschließlich kunststoffseitiger Erwärmung entstand bei keiner Probe durch das Heißpressen eine Fügeverbindung zwischen bepinnter Metallplatte und Faserverbundkunststoff. Bei den ersten Versuchen setzte man die Heißpresstemperatur 3°C über der Schmelztemperatur des Polyamids an. Wie aus den Bildern in Abbildung 77 und Abbildung 78 ersichtlich, verflüssigte sich das Polyamid und quoll an den Rändern hervor. Von diesem Gesichtspunkt aus war die Heißpresstemperatur zu hoch angesetzt. Jedoch kühlte die bepinnte Metallplatte, die mit Zimmertemperatur dem Heißpressvorgang zugeführt wurde, bei Kontakt die Oberflächentemperatur des Faserverbundkunststoffs so weit ab, dass er sich an der Oberfläche zu verfestigen begann und beim Verpressen den noch viskosen, darunter liegenden Kunststoff einfach verdrängte und senkte dadurch eine Fläche, die in etwa der Fläche der Pins auf der Metallplatte entspricht, ab. Dies könnte man nun wieder so interpretieren, dass die Heißpresstemperatur zu niedrig angesetzt war. Da man aber nicht verhindern kann, dass der Kunststoff im geschmolzenen Zustand wegfleießt und bei den Rändern hinausquillt, wurde für die nächsten Versuche eine niedrigere Verpresstemperatur gewählt.

Bei den Versuchen mit einer um 3°C niedrigeren Verpresstemperatur von 262°C kam es dazu, dass ebenfalls die Matrix aus dem Kunststoff hervorquoll, wenn auch in stark vermindertem Ausmaß. Die Verfestigung der Oberfläche des Kunststoffs ging nun noch schneller voran. Die Pins konnten nur einen Bruchteil eines Millimeters in den Kunststoff eindringen.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass bei nur kunststoffseitiger Erwärmung eine Verpresstemperatur am Schmelzpunkt der Matrix oder darüber nicht optimal ist, da sich die Matrix verflüssigt und durch den aufgebrachten Verpressdruck, wenn sie die Möglichkeit hat, zu den Rändern hin wegfleießt. Jedoch reicht diese hohe Temperatur nicht aus, damit die Pins mit Raumtemperatur in den Faserverbundkunststoff eindringen können, da sie dem Kunststoff zu viel Wärme entziehen. Die einseitige Erwärmungsvariante, bei der nur das Polyamid erwärmt wird, eignet sich somit nicht für das Fügen des Polyamids mit den bepinnten Metallplatten und wird nicht weiter verfolgt.

8.2.3 Metallseitige Erwärmung

Bei der metallseitigen Erwärmung ist eine noch höhere Verpresstemperatur notwendig, damit die Pins in den faserverstärkten Kunststoff eindringen können. Wird den Pins beim Eindringen zu viel Wärme entzogen, dass sie nicht mehr die Matrix beim Eindringen weiter aufschmelzen können, dringen die Pins nur sehr oberflächlich in den Faserverbundkunststoff ein (siehe Versuch metallseitige Erwärmung bei 267°C und 0,208 bar/Pin Verpressdruck kurz- und endlosglasfaserverstärktes Polyamid). Wählt man jedoch eine noch höhere Verpresstemperatur, wie bei den Versuchen mit 272°C 0,208 bar/Pin Verpressdruck, dann wird so viel Wärme in den Faserverbundkunststoff eingebracht, dass sich beim endlosfaserverstärkten Polyamid die Matrix soweit verflüssigt, dass sie durch den Verpressdruck an den Rändern hervorquillt und auf der Rückseite des Bereiches, in dem die Pins eindringen, sich Matrix und Fasern durch die Verflüssigung der Matrix separieren und die blanken Fasern zum Vorschein kommen. Beim kurzglasfaserverstärkten Polyamid quillt der gesamte Faserverbundkunststoff an allen Rändern in starkem Ausmaß hervor. Die Vermutung lag darauf, dass der Verpressdruck zu hoch sei und deshalb der Faserverbundkunststoff so in Mitleidenschaft gezogen wird. Jedoch lieferten die Versuche mit reduziertem Verpressdruck (0,313 bar/Pin beim endlosglasfaserverstärkten und 0,146 bar/Pin beim kurzglasfaserverstärkten Polyamid) simultane Ergebnisse nur in leicht reduziertem Ausmaß. Schlussendlich wurden noch die Versuche mit einer verringerten Verpresstemperatur von 262°C und 267°C, dafür aber mit erhöhtem Verpressdruck von 0,625 bar/Pin durchgeführt. Bei 262°C dringen zwar die Pins weiter in den Faserverbundkunststoff ein, lassen sich jedoch mit geringem Kraftaufwand aus der Fügeverbindung lösen. Mit 267°C dringen die Pins so tief in den Faserverbundkunststoff ein, dass die Metallplatte in direkten Kontakt mit dem Faserverbundkunststoff kommt. Dies hat wie aus den Abbildungen ersichtlich zur Folge, dass der Faserverbundkunststoff oberflächlich aufschmilzt und durch den Verpressdruck an den Rändern hervorquillt. Folglich liefert auch diese Verpressvariante kein brauchbares Ergebnis.

Die metallseitige Erwärmung wurde aufgrund dieser Ergebnisse der Vorversuche nicht weiter verfolgt.

8.3 Mechanische Eigenschaften

Zuerst werden die Ergebnisse der Versuche grafisch dargestellt, verglichen und überblicksartig die möglichen Einflüsse auf deren mechanische Festigkeit aufgezeigt. Da für diese Art der Fügeverbindung keine Norm existiert und die Fügefläche durch die Pins eine relativ komplexe Form aufweist, wurden die auftretenden Kräfte direkt miteinander verglichen und nicht in Spannungen umgerechnet. Danach werden die zuvor aufgezeigten Versagensarten der Proben und die möglichen Einflüsse auf die Festigkeit der Fügeverbindung genauer diskutiert.

8.3.1 Ergebnisse der Scherzugversuche und deren Versagensarten

Abbildung 132 zeigt ein Diagramm, in dem alle Mittelwerte und Standardabweichungen der Proben der Scherzugversuche abgebildet sind. Die eingefärbten Balken repräsentieren den Mittelwert und die darauf eingezeichneten Bereiche deren Standardabweichungen. Es ist grafisch gut erkennbar, dass die Mittelwerte der Proben mit den Pins aus Aluminium im Schnitt unter denen mit den Pins aus Stahl liegen. Der Unterschied ist allerdings vergleichsweise gering. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Proben mit 3 mm und denen mit 4 mm Pinabstand ist nicht zu erkennen. Ob die Proben mit den Pins aus Aluminium mit 3 mm Pinabstand eine größere Kraft aufnehmen können als die mit 4 mm Pinabstand, lässt sich aufgrund der großen Standardabweichung und des geringen Probenumfangs nicht eindeutig sagen. In der Tabelle unterhalb des Diagramms sind nochmal alle Zahlenwerte zu den Mittelwerten und Standardabweichungen aufgelistet.

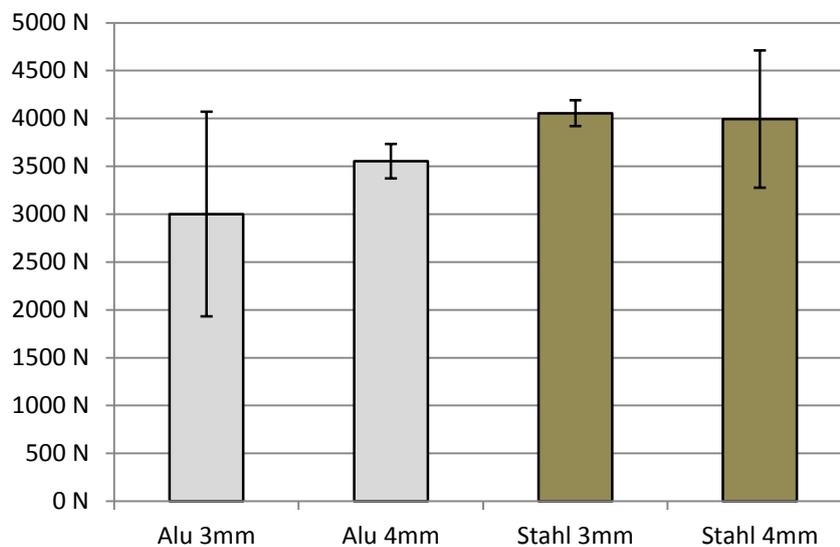


Abbildung 132 Pins aus Stahl und Aluminium der Scherzugversuche im Vergleich

Tabelle 35 Mittelwerte und Standardabweichungen der Scherzugversuche

	Alu 3 mm	Alu 4 mm	Stahl 3 mm	Stahl 4 mm
Mittelwert	3000 N	3554 N	4056 N	3995 N
Standardabweichung	± 1069 N	± 181 N	± 136 N	± 717 N

Bei den Proben mit den Pins aus Stahl trat das Versagen ausschließlich kunststoffseitig auf.

Der etwas niedriger liegende Mittelwert der Pins aus Aluminium ist wohl darauf zurückzuführen, dass das Versagen der Proben sowohl metallseitig als auch kunststoffseitig auftrat. Bei den Pins aus Stahl konnte der Faserverbundkunststoff sein volles Potential entfalten und die ihm maximal mögliche Kraft aufnehmen. Bei den Proben mit Pins aus Aluminium hingegen versagten die Pins, bevor der Faserverbundkunststoff sein maximales Potential erreichte.

Bei den Proben mit Pins aus Aluminium mit 3 mm Pinabstand wurde immer ein sehr großer Teil der Pins abgeschert, in manchen Fällen auch alle. Wo hingegen bei den Pins mit 4 mm Pinabstand nur in manchen Fällen einzelne abgeschert wurden, dafür aber der Faserverbundkunststoff eine stärkere Beschädigung aufweist. Das deutet wiederum darauf hin, dass die Pins mit 4 mm Pinabstand höhere Kräfte auf den Faserverbundkunststoff übertragen konnten und generell erst bei höheren Kräften versagen. Jedoch, wie vorher erwähnt, kann wegen der hohen Standardabweichung der Pins mit 3 mm Pinabstand nicht explizit davon ausgegangen werden, dass die Proben mit 4 mm Pinabstand tatsächlich größere Kräfte aufnehmen können.

8.3.2 Ergebnisse der Schälzugversuche und deren Versagensarten

In der folgenden Abbildung sind die Mittelwerte und deren Standardabweichungen der Schälzugversuche grafisch dargestellt. Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, wiesen die Proben mit den Pins aus Stahl mit 4 mm Pinabstand einen geringeren Durchmesser auf als die Pins aus Stahl mit 3 mm Pinabstand. Es lassen sich dadurch nicht direkt Rückschlüsse ausschließlich auf den Pinabstand ziehen. Wie in der Grafik zu erkennen ist, können die Proben mit Pins aus Aluminium mit 3 mm Pinabstand wesentlich größere Kräfte aufnehmen als die mit 4 mm Pinabstand. Genau umgekehrt verhält es sich jedoch bei den Proben mit den Pins aus Stahl. Hier können die Proben mit 4 mm Pinabstand wesentlich höhere Kräfte aufnehmen als jene mit 3 mm Pinabstand. Die Tabelle nach der Abbildung listet noch einmal alle in der Abbildung eingezeichneten Zahlenwerte auf.

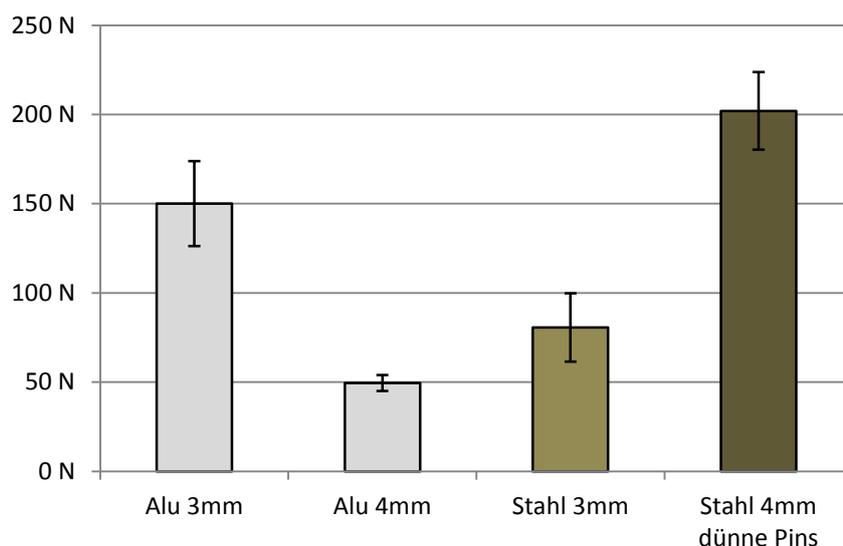


Abbildung 133 Pins aus Stahl und Aluminium der Schälzugversuche im Vergleich

Tabelle 36 Mittelwerte und Standardabweichungen der Schälzugversuche

	Alu 3 mm	Alu 4 mm	Stahl 3 mm	Stahl 4 mm dünne Pins
Mittelwert	150,1 N	49,5 N	80,6 N	202,0 N
Standardabweichung	± 23,8 N	± 4,5 N	± 19,1 N	± 21,8 N

Betrachtet man die Bilder aus Kapitel 7.3.2 der geprüften Proben mit Pins aus Aluminium, weist hier, wie beim Scherzugversuch, der Faserverbundkunststoff eine stärkere Beschädigung bei den Proben mit einem Pinabstand von 3 mm auf als bei jenen, die einen Pinabstand von 4 mm haben. Ebenso kam es bei den Proben mit 3 mm Pinabstand zum Ausreißen einzelner Pins. Dies sind Indizien dafür, dass in der Fügeverbindung mehr Kraft in plastische Verformung umgesetzt werden konnte. Die Pins der Proben mit 3 mm Pinabstand sind somit durch das Heißpressverfahren besser im Kunststoff verankert als jene Pins mit 4 mm Abstand. Mögliche Ursachen dafür werden in Kapitel 8.4 genauer diskutiert.

Bei den Proben mit Pins aus Stahl weisen wiederum die Proben mit 4 mm Pinabstand eine wesentlich höhere Festigkeit auf als jene mit 3 mm Pinabstand. Simultan dazu weist auch der Faserverbundkunststoff nach der Prüfung bei den Proben mit 4 mm Pinabstand stärkere Beschädigungen auf als jener bei den Proben mit 3 mm Pinabstand. Dieses konträre Ergebnis ist wohl auf den geringeren Durchmesser der Pins und deren ausgeprägteren Kugelkopf zurückzuführen, wie in Kapitel 6.2.2.1 gezeigt wird. Die größere Überlappung des ausgeprägteren Kugelkopfes und der daraus resultierende bessere Formschluss ist wohl für die höhere Kraftaufnahme verantwortlich. Es lässt sich somit nichts über den Einfluss des Pinabstandes auf die Festigkeit der Fügeverbindung mit Pins aus Stahl beim Schälzugversuch sagen.

8.3.3 Ergebnisse der Kopfzugversuche und deren Versagensarten

Abbildung 134 zeigt die grafische Aufbereitung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Kopfzugversuche. Das tendenzielle Verhalten ist vergleichbar mit den Ergebnissen der Schälzugversuche, was durchaus erwartet werden konnte. Auch hier ist wie bei den Schälzugversuchen zu beachten, dass es sich bei den Proben mit Pins aus Stahl mit 4 mm Pinabstand um die dünneren Pins handelt. Bei den Proben mit Aluminiumpins nehmen auch hier jene mit 3 mm Pinabstand eine deutlich höhere Maximalkraft auf, weisen kunststoffseitig eine höhere Beschädigung vor und es rissen einzelne Pins aus den Metallplatten aus (siehe Kapitel 7.3.3).

Bei den Proben mit Pins aus Stahl verhält es sich auch sehr ähnlich den Proben mit Stahlpins beim Schälzugversuch. Die dünnen Stahlpins mit 4 mm Abstand nehmen deutlich höhere Kräfte auf als die normalen mit 3 mm Abstand. Auch hier liegt die Vermutung auf dem besseren Formschluss durch den ausgeprägteren Kugelkopf der dünnen Pins.

Die Tabelle nach der Abbildung listet noch einmal alle in der Abbildung eingezeichneten Zahlenwerte auf.

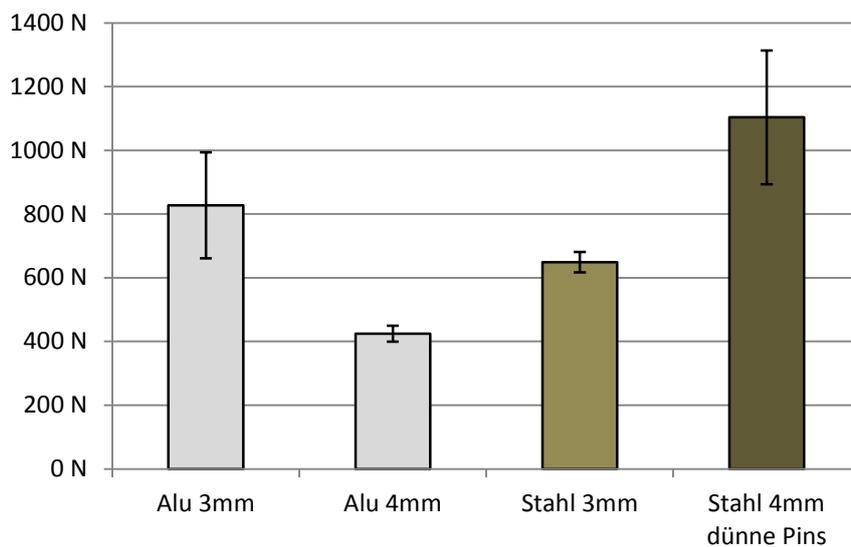


Abbildung 134 Pins aus Stahl und Aluminium der Kopfzugversuche im Vergleich

Tabelle 37 Mittelwerte und Standardabweichungen der Kopfzugversuche

	Alu 3mm	Alu 4mm	Stahl 3mm	Stahl 4mm dünne Pins
Mittelwert	827,3 N	424,6 N	648,9 N	1104 N
Standardabweichung	± 166,4 N	± 24,9 N	± 32,2 N	± 210,1 N

8.3.4 Überblick und Vergleich der auftretenden Kräfte

Im Anschluss noch eine Grafik, die alle Ergebnisse der durchgeführten Versuche grafisch im direkten Vergleich zeigt und ein besseres Gefühl vermitteln soll, wie die Verhältnisse der Kräfte sind, die die Fügeverbindung bei den verschiedenen Belastungsarten aufnehmen kann. Es ist zu erkennen, dass diese Fügeverbindung ähnlich wie eine Klebefügeverbindung nur geringe Kräfte bei Schälzugbelastungen im Vergleich zu Scherzugbelastungen aufnehmen kann.

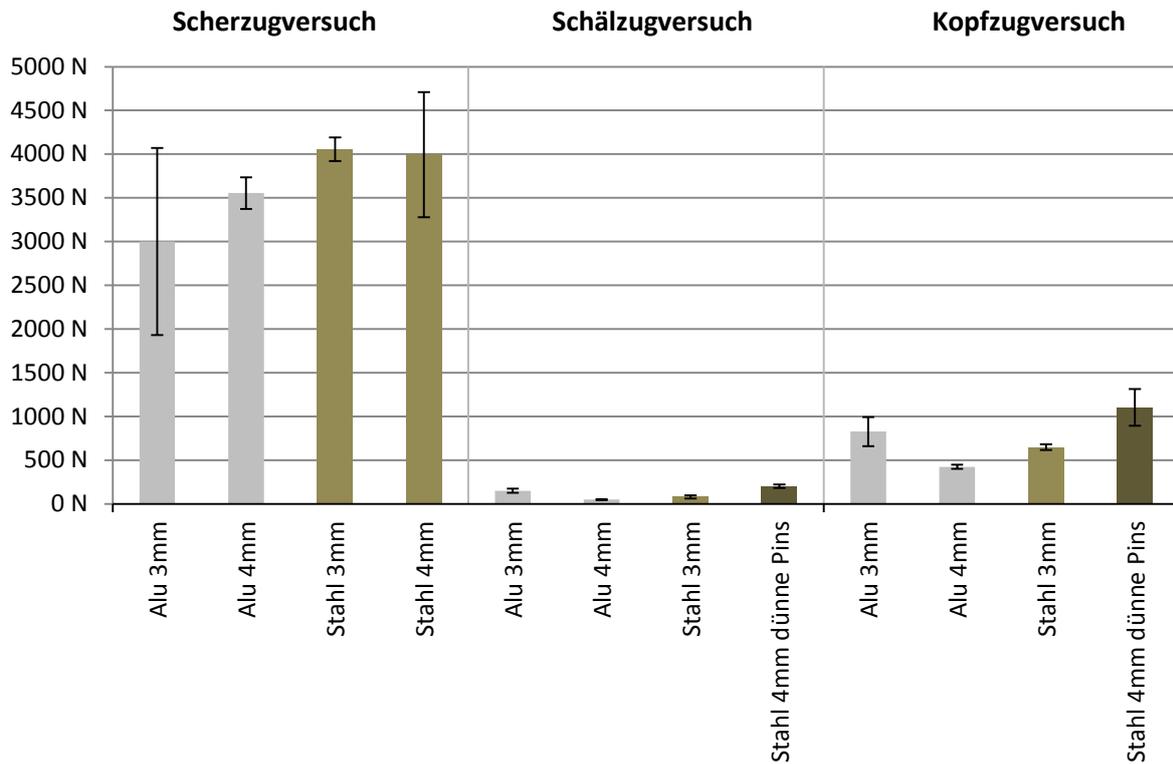


Abbildung 135 Kräfte von Scher- Schäl und Kopfzugversuch gegenüber gestellt

8.4 Diskussion der Einflüsse auf die mechanische Festigkeit

8.4.1.1 Heißpresstemperatur und Verpressdruck

Zwei sehr wichtige Faktoren beim Heißpressen sind, wie schon der Name des Verfahrens verdeutlicht, die Temperatur und der Druck mit denen die Proben heißgepresst werden. Ziel dieses Verfahrens ist es, eine möglichst feste Fügeverbindung zwischen bepinnter Metallplatte und dem Faserverbundkunststoff herzustellen. Dabei ist es wichtig, einen möglichst guten Formschluss der Matrix um die Pins zu gewährleisten, damit eine möglichst großflächige Kraftübertragung zwischen Pins und Faserverbundkunststoff bei Belastung stattfinden kann. Dieser Formschluss wird vor allem dann erreicht, wenn die Pins von der Matrix benetzt werden können, also der Kunststoff in niedrigviskosem Zustand vorliegt. Die hohe Oberflächenspannung von Metallen und die niedrige Oberflächenspannung von Kunststoffen begünstigen diese Benetzung durch einen daraus resultierenden niedrigen Benetzungswinkel. Eine Heißpresstemperatur einige Kelvin unterhalb des Schmelzpunktes des Kunststoffs liefert somit die optimalen Ergebnisse. Geht man mit der Verpresstemperatur zu nahe an den Schmelzpunkt heran oder übersteigt diesen, wirkt sich das auch wieder negativ aus, da der Kunststoff zu flüssig wird und zerrinnt. Neben dem guten Formschluss reduziert sich auch die Hohlrumbildung bei Temperaturen knapp unterhalb des Schmelzpunktes. Die Pins üben solange Druck auf eine Laminatschicht aus, bis die Fasern entweder abgeschert oder zur Seite gewichen sind. Ist nun eine Laminatschicht durchdrungen und wird auf die darunter liegende vom Pin Druck ausgeübt, kommt es zu einer Schälbeanspruchung zwischen den beiden Laminatschichten. Ist die Matrix nicht ausreichend niedrig-viskos, kommt es zur Delamination und Hohlrumbildung zwischen den Laminatschichten. Abbildung 136 zeigt dieses Phänomen schematisch wie es auch in Kapitel 7.2.2.1 auf den Abbildungen der Ergebnisse der Heißpressvorversuche zu sehen ist.

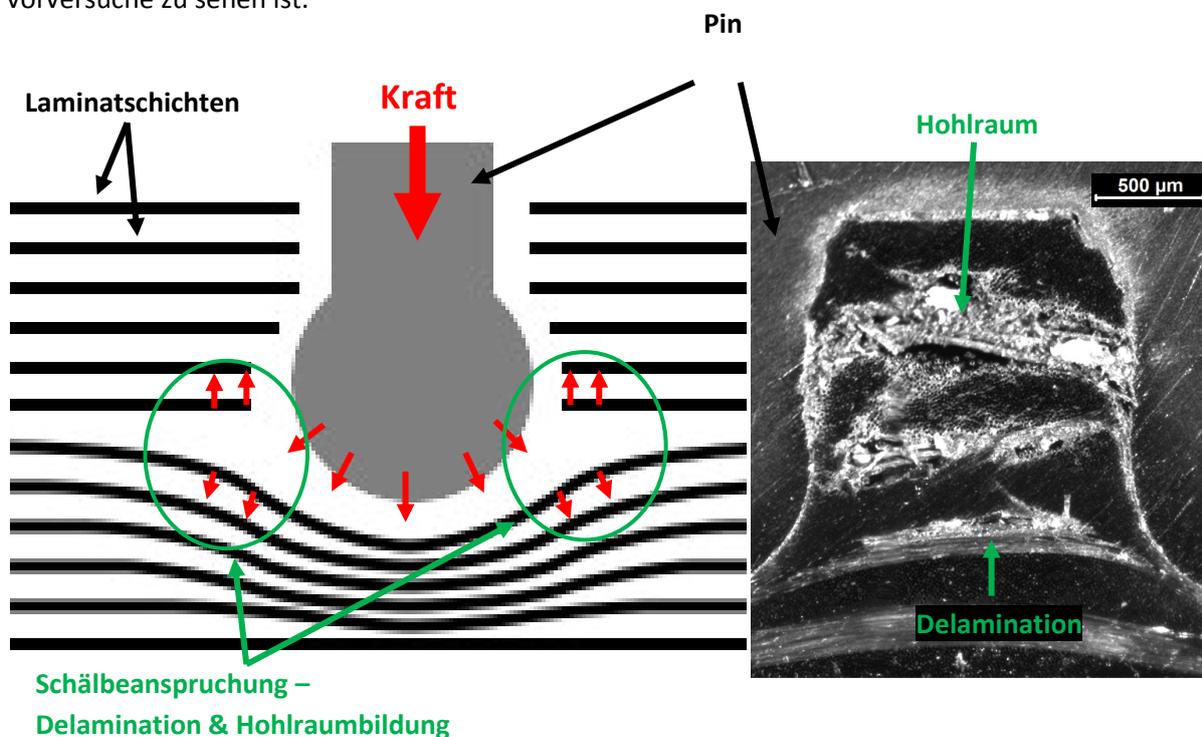


Abbildung 136 schematische Darstellung eines eindringenden Pins (links), Mikroskopische Aufnahme der Heißpressvorversuche Kapitel 7.2.2.1 (rechts).

Zu beachten ist, dass dies nur eine schematische Darstellung ist und die tatsächliche Lage der bereits perforierten Laminatschichten von den schematisch gezeigten Laminatschichten abweicht.

Bei hohen Temperaturen wird ein niedriger Verpressdruck benötigt, damit die Pins in den Faserverbundkunststoff eindringen können. Durch die niedrigere Krafteinwirkung beim Verpressen bleibt auch die Struktur des Faserverbundkunststoffes besser erhalten. Mehr Fasern oder Faserbündel können den eindringenden Pins in der niedrigviskosen Matrix zur Seite ausweichen, anstelle abgeschert zu werden.

Umso höher der Druck und umso niedriger die Verpresstemperatur gewählt wird, umso mehr wird aus dem Heißpressen ein Stanzen. Durch den hohen Druck können zwar die Pins in den Faserverbundkunststoff eindringen, es werden jedoch alle Laminatschichten durch den Pin perforiert, die Fasern abgetrennt und die Pins nicht durch die Matrix benetzt. Dadurch, dass die Matrix beim Eindringen der Pins plastisch und auch elastisch verformt wird, entsteht aber zusätzlich zum Formschluss ein Kraftschluss in der Fügeverbindung. Jedoch ist die zusätzliche Festigkeit, die der Fügeverbindung durch den Kraftschluss verliehen wird, vernachlässigbar, wie aus den Ergebnissen der Heißpressvorversuche mit 200°C hervorgeht.

8.4.1.2 Abstände und Durchmesser der Pins

Zwei weitere wichtige Faktoren, die vor allem Einfluss auf die Homogenität und Struktur des Faserverbundwerkstoffes nehmen, sind Abstand und Durchmesser der Pins. In beiden Fällen beeinflusst man bei der Variation dieser Parameter das Volumen, das beim Heißpressen in den Faserverbundkunststoff eingepresst wird. Ein geringerer Pinabstand und ein größerer Pindurchmesser bedeuten mehr Volumen vom Faserverbundkunststoff das verdrängt wird. Dieses verdrängte Volumen teilt sich in den umliegenden Bereichen um den Pin herum auf, verändert die Struktur und erzeugt Spannungen im Faserverbundkunststoff. Wegen der erhöhten Temperatur weist die niedrig viskose Matrix eine stark verringerte Festigkeit auf. Die verstärkenden Fasern tragen nun einen deutlich größeren Teil dazu bei, dass der Faserverbundwerkstoff seine Form und Struktur beim Heißpressen beibehält. Dies hat bei den Versuchen mit dem kurzglasfaserverstärkten Polyamid dazu geführt, dass die verstärkenden Kurzglasfasern die Form des Faserverbundkunststoffes nicht mehr aufrechterhalten konnten und es bildeten sich Risse mit einem Ausmaß von Millimetern bis hin zu wenigen Zentimetern. Die Fasern des endlos faserverstärkten Faserverbundkunststoffes waren hingegen in der Lage, die Form trotz der auftretenden Spannungen aufrechtzuerhalten.

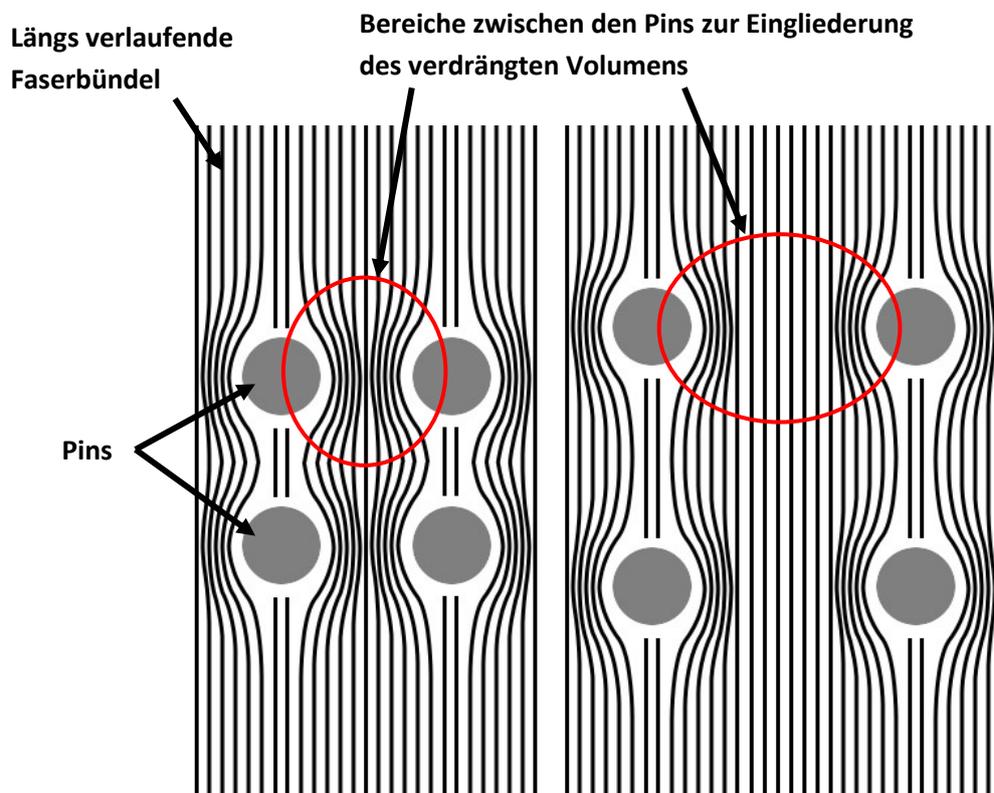


Abbildung 137 Schematische Darstellung des Einflusses des Pinabstands auf die Struktur des endlosglasfaserverstärkten Kunststoffs

Abbildung 137 stellt schematisch dar, welchen Einfluss die eingepressten Pins auf die Struktur des endlosglasfaserverstärkten Kunststoffes haben und den Einfluss des Pinabstands auf den Bereich um die Pins, in dem der verdrängte Faserverbundkunststoff sich möglichst homogen eingliedert. Auf den Abbildungen ist auch gut zu erkennen, dass jeder Pin einen Stetigkeitssprung in der Struktur der sonst theoretisch endlos linear verlaufenden Endlosglasfasern und natürlich auch der Matrix darstellt. In der Abbildung werden für die Übersichtlichkeit nur eine Laminatschicht in der Aufsicht und daraus nur die längs verlaufenden Faserbündel schematisch dargestellt. Simultan gilt diese

Darstellung natürlich auch für die querverlaufenden Faserbündel sowie für die darunterliegenden Laminatschichten.

Diese Beeinflussung existiert natürlich nicht nur in der ebenen Laminatschicht, sondern schichtübergreifend in die Tiefe. Abbildung 138 zeigt schematisch den Einfluss des Pinabstandes auf die Laminatschichten im Querschnitt. Auch hier ist zu beachten, dass dies nur eine schematische Darstellung ist und die tatsächliche Lage der bereits perforierten Laminatschichten von den schematisch gezeigten Laminatschichten abweicht. Der geringere Pinabstand lässt den Laminatschichten weniger Spielraum. Im direkten Vergleich dazu vom Lichtmikroskop aufgenommene Bilder von zwei Proben mit Stahlpins. Eine mit einem Pinabstand von 3 mm die andere mit 4 mm.

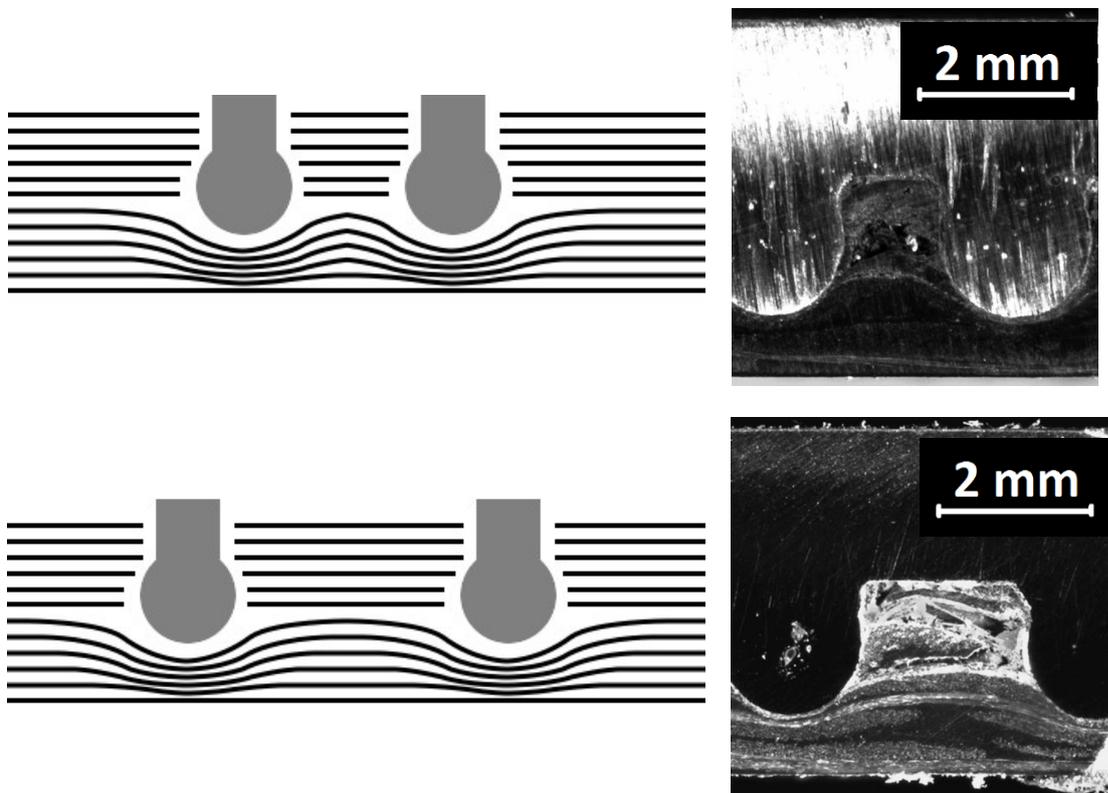


Abbildung 138 Schematischer Darstellung von Querschnitten von zwei Proben mit unterschiedlichem Pinabstand, dazu im direkten Vergleich zwei Proben mit Stahlpins aufgenommen mit dem Lichtmikroskop (obere Abbildung 3 mm Pinabstand, untere 4 mm Pinabstand)

Dieser geringere Spielraum, den die Laminatschicht zur Verfügung hat, um dem auf sie kraftausübenden Pin mit plastischer und elastischer Verformung entgegenzuwirken, bis der Pin die Laminatschicht perforiert oder seine endgültige Position eingenommen hat, könnte zu höheren Spannungsspitzen zwischen den Laminatschichten führen und somit eine Delamination oder Hohlrumbildung begünstigen.

Konträr zur Reduzierung der Festigkeit des Faserverbundkunststoffs durch begünstigte Delamination und Hohlrumbildung bei einem geringen Pinabstand kann dieser jedoch auch durch den geringeren Bereich, der zur Eingliederung des verdrängten Faserverbundkunststoffes zur Verfügung steht, zur

Verdichtung von jenem führen, sowie zu einer höheren Dichte an Faserbündeln nahe oder direkt am Pin und dadurch zu einer erhöhten Festigkeit der Fügeverbindung. Dies würde auch die Ergebnisse der höheren Festigkeit und stärkeren Beschädigung des Faserverbundkunststoffs der Proben mit Pins aus Aluminium mit 3 mm Pinabstand beim Schäl- und Kopfzugversuch erklären.

Simultan zur Vergrößerung des Eingliederungsbereichs des verdrängten Faserverbundkunststoffvolumens durch Erhöhung des Pinabstands wird eine Erhöhung auch durch eine Reduzierung des Pindurchmessers erreicht. Ein niedrigerer Pindurchmesser bedeutet weniger Volumen, das verdrängt werden muss und somit einen kleineren Bereich der zur Eingliederung benötigt wird. Ebenso bedeutet ein kleinerer Pindurchmesser bei gleichbleibendem Pinabstand (gemessen von Pinmittelpunkt zu Pinmittelpunkt) einen größeren Abstand zwischen den Pins. Abbildung 139 zeigt diesen Einfluss auf die Struktur des Faserverbundkunststoffs schematisch.

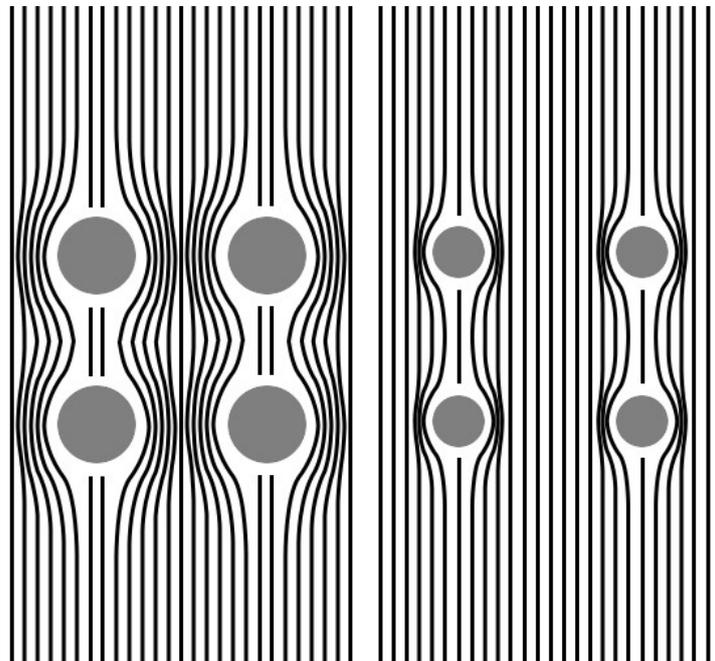


Abbildung 139 Schematische Darstellung des Einflusses des Pindurchmessers auf die Struktur des Faserverbundkunststoffes

Die Vermutung liegt nahe, dass sich dünnere Pins auch besser zum Heißpressen mit kurzfaserverstärktem Kunststoff eignen, denn durch das geringere Ausmaß des verdrängten Volumens könnte eine Rissbildung vermieden werden.

Bei geringeren Pindurchmessern ist jedoch zu beachten, dass die auf die Fügeverbindung wirkenden Kräfte auf eine geringere Pinoberfläche und somit kraftübertragungswirksame Fügefläche aufgeteilt werden. Dies kann zu erhöhten Spannungsspitzen und einem früheren Versagen der Fügeverbindung führen.

8.4.1.3 Einflüsse des Materials der bepinnten Metallplatten auf die Fügeverbindung

So wie die Wahl des Kunststoffes hat auch die Wahl des Metalls für die Fügeverbindung Einfluss auf ihre Festigkeit.

Bei den Proben mit Pins aus Stahl tritt das Versagen ausschließlich kunststoffseitig auf oder durch Auflösen der Fügeverbindung selbst. Beim Versagen der Probe wird ein geringer Teil der auftretenden Kräfte in elastische Verformungsenergie im Stahl umgesetzt. Der Großteil der Kräfte wird in plastische Verformungsenergie im Faserverbundkunststoff umgewandelt.

Im Gegensatz dazu tritt das Versagen bei den Proben mit Pins aus Aluminium sowohl kunststoffseitig als auch metallseitig auf und auch durch Auflösen der Fügeverbindung. Es kommt zur plastischen Deformation und dadurch besseren Verteilung der Umwandlung der auftretenden Kräfte im Faserverbundkunststoff und den Pins. Wie in den Abbildungen in Kapitel 7.3.1.2 ersichtlich werden bei den Proben mit Aluminiumpins mit 3 mm Pinabstand die Pins größtenteils abgeschert. Die Pins, die nicht abgeschert wurden, haben sich plastisch verformt und sich in Richtung der Prüfkraft geneigt. Bei den Proben mit 4 mm Pinabstand trat das Versagen der Pins durch Abscherung nur an einzelnen Pins auf, jedoch haben sich alle verbliebenen Pins auch in Richtung der Prüfkraft geneigt. Auffällig ist, dass die abgescherten Pins alle eine ähnlich aussehende aufgewölbte Abscherungsfläche vorweisen. Betrachtet man den Querschnitt eines Pins (siehe Abbildung 140), so entspricht die aufgewölbte Abscherungsfläche an den Pins exakt dem unteren Rand der Schweißnaht, die in der Abbildung durch die Punkte r_{plate} und d_{plate} markiert ist. Die Schwachstelle, an der das Versagen metallseitig auftritt, ist also die untere Randfläche der Pinschweißnaht.

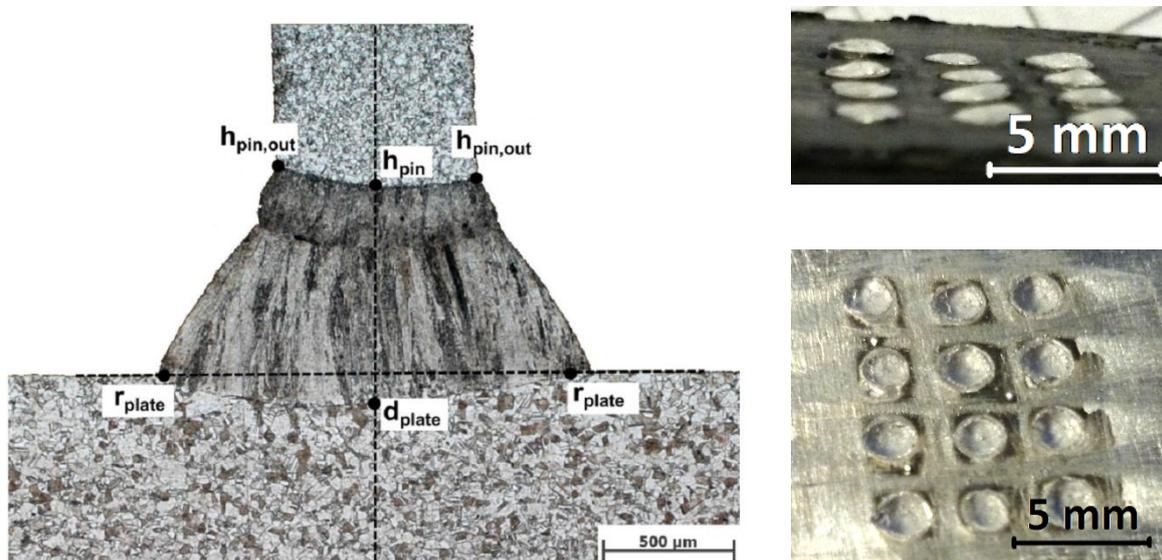


Abbildung 140 Querschnitt der Schweißnaht eines Pins (links) [18], Aufnahmen einer geprüften Probe mit Aluminiumpins (rechts)

Ein weiterer Einfluss durch die Materialwahl ist metallseitig mit der spezifischen Wärmeleitfähigkeit des Materials gegeben, wobei sie beim final gewählten Verfahren mit beidseitiger Erwärmung vermutlich nur eine untergeordnete Rolle spielt. Einen höheren Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Metalls ist beim Verfahren mit nur einseitiger Erwärmung gegeben. Von ihr hängt ab, wie schnell entweder dem Faserverbundkunststoff Wärme entzogen wird oder ihm über die Pins zum Aufschmelzen zugeführt wird. Dieses Phänomen wurde in dieser Arbeit allerdings nicht genauer

untersucht. Der Einfluss könnte aber als Gegenstand für weitere Untersuchungen herangezogen werden.

8.4.1.4 Weitere Einflüsse

Ein weiterer Einfluss stellt die Form des Pins dar. Eigentlich sollte in dieser Arbeit nur eine Pinform untersucht werden und zwar der zylindrische Pin mit Kugelkopf, jedoch wie in vorhergehenden Kapiteln beschrieben, unterschied sich eine Charge der Pins aus Stahl mit 4 mm Pinabstand von den anderen. Sie waren zwar auch zylindrische Pins mit Kugelkopf, aber etwas dünner und die Kugelkopfform ausgeprägter (siehe Kapitel 6.2.2.1). Auffällig in den Ergebnissen war, dass die Proben mit diesen Pins deutlich mehr Kraft aufnehmen konnten als die Proben mit den weniger ausgeprägten Pins. Dies ist vermutlich auf den besseren Formschluss durch den ausgeprägteren Kugelkopf zurückzuführen. Da sie allerdings auch einen anderen Pinabstand hatten, kann man die Ergebnisse nicht direkt vergleichen und genaue Schlüsse daraus ziehen. Man kann nur pauschal sagen, dass diese Form vermutlich einen größeren positiven Einfluss auf die Festigkeit der Fügeverbindung hat.

Negativ auf die Festigkeit, besonders beim Kopf- und Schälzugversuch, wirken sich die Bereiche im Faserverbundkunststoff mit höheren Matrixkonzentrationen aus, die nicht durch Fasern verstärkt werden. Wie zum Beispiel die mit Matrix aufgefüllten Bereiche zwischen Faserbündeln oder den Laminatschichten. Hier weisen Faserverbundkunststoffe auch generell gehäuft Poren auf, die dann unter Belastung vermutlich den Bruch des Materials initiieren können. Diese Bereiche stellen somit oft eine Schwachstelle im Material dar, wobei aber darauf verwiesen werden muss, dass typische kritische Fehler eigentlich größer sind. [19, 20] Abbildung 141 zeigt eine mikroskopische Aufnahme eines Querschnitts eines Faserverbundkunststoffs, auf der die Bereiche mit erhöhter Matrixkonzentration und Poren zu erkennen sind.

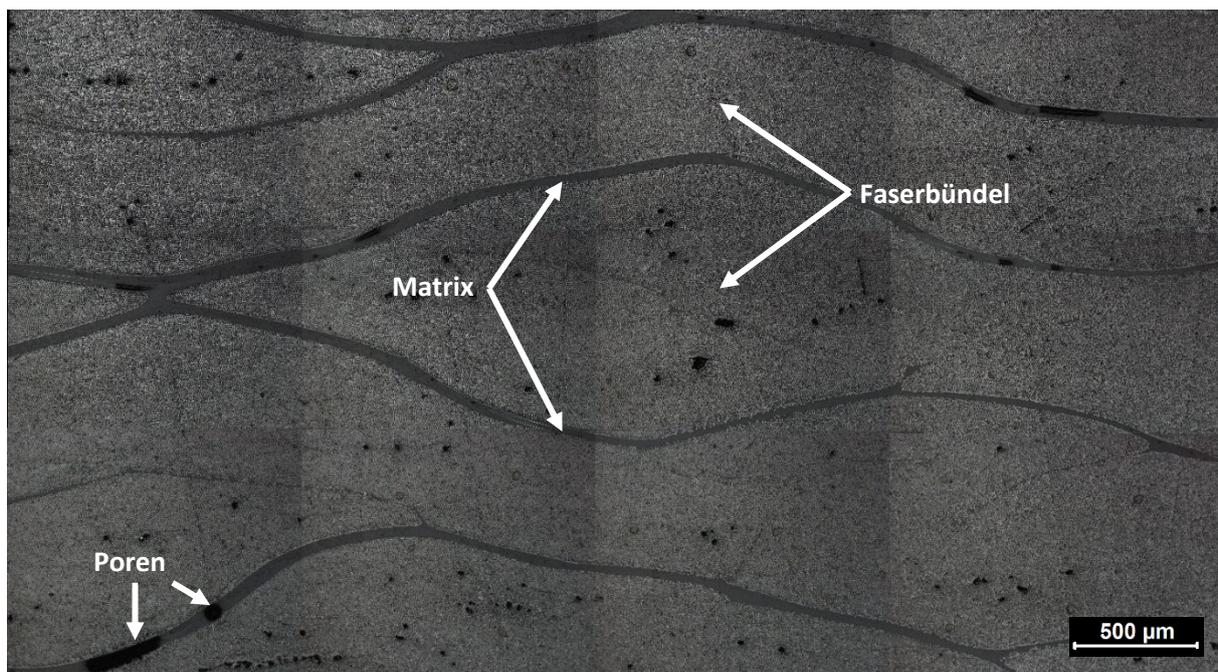


Abbildung 141 Mikroskopische Aufnahme eines Querschnitts eines Faserverbundkunststoffs [19]

9 Erreichte Ziele

Die Machbarkeitsstudie konnte mit allen Materialkombinationen durchgeführt werden und es konnte mit den verwendeten Methoden festgestellt und beschrieben werden, welche Kombinationen sich für das angewendete Verfahren und diese Form der Fügeverbindung eignen und welche nicht. Es wurden geeignete Probengeometrien für die ausgewählten Prüfverfahren gefunden, die einen guten Vergleich der Proben untereinander und generell eine gute Reproduzierbarkeit aufweisen. Es konnten auftretende Problematiken bei der Erzeugung der Fügeverbindung identifiziert und beschrieben werden. Als Resultat der empirischen Vorversuche und der Methoden der Analyse wurden die bestmöglichen Heißpressparameter ermittelt, um die Fügeverbindung mit den verschiedenen Materialkombinationen zu erzeugen. Die Ermittlung und der Vergleich der Festigkeit der Proben gegenüber verschiedenen, in der Realität auftretenden Belastungssituationen, war mit dem Scher- Schäl- und Kopfzugversuch sehr gut möglich.

Als Ergebnis mit der Fügmaterialkombination von kurzglasfaserverstärktem Polyamid mit den bepinnten Metallplatten aus Stahl und Aluminium konnten keine geeigneten Bedingungen gefunden werden, unter denen das Fügen von jenen mit dem Heißpressverfahren ein ausreichendes Ergebnis liefert. Es wurde dabei festgestellt, dass die kurzen Fasern den Faserverbundkunststoff beim Heißpressverfahren nur unzureichend verstärken können und er deshalb dabei zur Rissbildung neigt.

Für das endlosglasfaserverstärkte Polyamid konnten geeignete Heißpressparameter gefunden werden, mit denen eine zufriedenstellende Fügeverbindung erzeugt werden konnte. Als geeignete und empirisch als beste ermittelte Heißpressbedingungen haben sich dabei beidseitige Erwärmung mit einer Heißpresstemperatur von 257°C und einem Verpressdruck von 0,208 bar/Pin ergeben. Unter diesen Bedingungen wurden mit den verwendeten Untersuchungsmethoden die besten Ergebnisse beobachtet.

Die Frage, ob es möglich ist, das Heißpressverfahren mit den verwendeten Faserverbundkunststoffen auch bei 200°C oder darunter durchzuführen, konnte ebenfalls beantwortet werden. Es lassen sich zwar Faserverbundkunststoff und bepinnte Metallplatte miteinander verpressen, aber es kommt in allen Fällen zu einer Fügeverbindung mit einer sehr niedrigen Festigkeit. Sie lassen sich mit bloßen Händen wieder lösen.

Durch die Untersuchungen an den Proben der Vorversuche, sowie der finalen Versuche, konnten viele Einflüsse auf die Festigkeit der Fügeverbindung identifiziert und beschrieben werden. Es konnte ein Einfluss des Pinabstandes auf die Festigkeit der Probe festgestellt werden. Jedoch konnte nur bei den Proben mit Pins aus Aluminium und den Proben mit Pins aus Stahl für die Scherzugversuche eine genauere Aussage gemacht werden, da die Pins aus Stahl mit 4 mm Pinabstand, für die Schäl- und Kopfzugversuche, eine andere Ausprägung in ihrer Geometrie aufwiesen und deshalb nicht direkt mit den Schäl- und Kopfzugversuchen mit 3 mm Pinabstand verglichen werden konnten.

10 Ideen und Alternativen für zukünftige Untersuchungen

Versetzte Pinanordnung, Pindichte und Pinform

Untersuchung über den Einfluss einer versetzten Pinanordnung (siehe Abbildung 142) im Vergleich zur geprüften linienartigen Pinanordnung auf die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindungen.



Abbildung 142 links linienartige Pinanordnung, rechts versetzte Pinanordnung

Man überlege den Einfluss anderer Pindichten, eine geringere oder größere Anzahl von Pins, auf derselben Fläche der Fügeverbindung verteilt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausschließlich zylindrische Pins mit aufgesetztem Kugelkopf verwendet. Für zukünftige Versuche könnten Pins mit anderen Geometrien geprüft und verglichen werden wie einfache zylindrische Pins, zylindrische Pins mit Spitz oder Ähnliches.

Vergleich normale zu dünnen Pins

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, konnten nur Vermutungen über den Einfluss der dünneren Pins aus Stahl mit ausgeprägterem Kugelkopf auf die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindungen aufgestellt werden. Für genaue Aussagen und um einen direkten Vergleich des Einflusses der Pinbreite und des Abstands machen zu können, wären ergänzende Kopf- und Schälzugversuche mit dünnen Pins aus Stahl mit 3 mm Pinabstand und mit normalen Pins mit 4 mm Pinabstand sinnvoll, die unter denselben Bedingungen heißverpresst werden könnten. Die Ergebnisse dieser Versuche könnten dann direkt mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen und konkrete Rückschlüsse gezogen werden. Ergänzend könnten auch die Scherzugversuche mit dünneren Pins durchgeführt und verglichen werden.

Doppelseitige Pinausführung

Es wurden hier nur einseitig bepinnte Metallplatten geprüft. Diese eignen sich gut für die Fügung dünnwandiger Bauteile. Als Alternative könnte, wie in [23] durchgeführt, eine doppelseitige Pinausführung für dickere Fügebauteile mit dem endlosglasfaserverstärkten Polyamid geprüft werden. Zur besseren Veranschaulichung zeigt Abbildung 143 eine geprüfte Probe mit doppelseitiger Pinausführung.

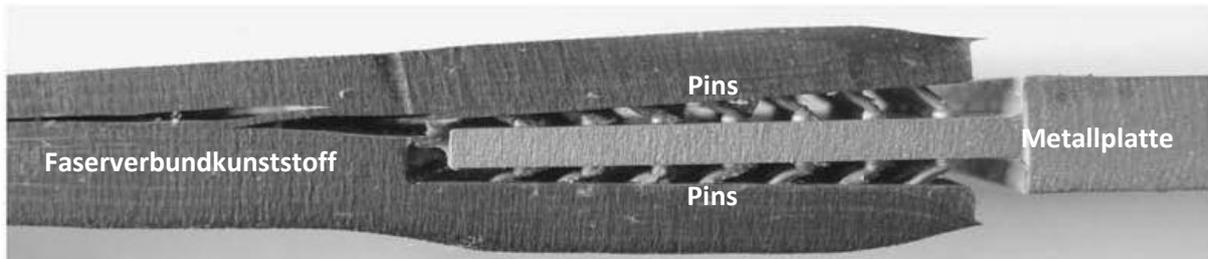


Abbildung 143 geprüfte Probe mit doppelseitiger Pinausführung [23]

Der kunststoffseitige Teil besteht aus drei Sektionen. Sektion T und B (Top und bottom) sind zwei faserverstärkte Kunststoffe die über die Region III hinaus gehen und bis zum Anfang der Region II, in der die Pins auf den metallischen Fügebauteil angeschweißt sind, reichen. In Region III wird der Mittelteil zwischen Sektion T und B mit der Sektion M (middle) die aus mehreren Laminatschichten besteht gefüllt.

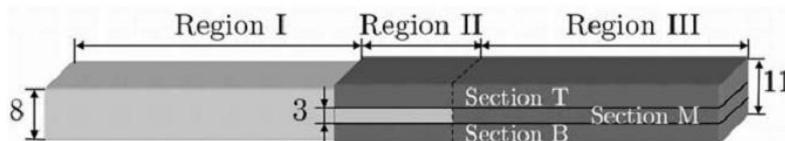


Abbildung 144 Schematische Darstellung einer Probe mit doppelseitiger Pinausführung

Alternativen für kurzfaserverstärkten Kunststoff

Da die Versuche mit dem kurzglasfaserverstärkten Polyamid gescheitert sind, sie aber ausschließlich mit den Pins normaler Breite durchgeführt wurden, könnte untersucht werden, ob die Rissbildung bei den dünnen Pins eventuell geringer ausfällt oder gar nicht auftritt. Alternativ könnte auch eine geringere Pindichte verwendet werden.

Da es sich bei dem kurzglasfaserverstärkten Polyamid um einen Spritzguss handelt, könnte die Fügeverbindung direkt bei der Herstellung des Spritzgussbauteils erstellt werden, indem der Bauteil direkt auf die bepinnte Metallplatte gespritzt wird.

Oberflächenbehandlung

Untersuchungen, ob spezielle Oberflächenbehandlungen wie Beschichten, Ätzen, chemische Reinigung, Aufrauen oder Glätten durch Strahlen mit Sand oder Granulat und Ähnliches oder auch die Fertigungsvorgeschichte Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindung haben.

Verbunde mit 3D - Gewebe

Vor allem bei Kopf- und Schälzugversuchen könnte durch die Verwendung von 3D verwobenen Faserverbundkunststoffen eine höhere Festigkeit erzielt werden und dem auftretenden Phänomen der Delamination und Poren- bzw. Hohlraumbildung beim Heißpressprozess entgegengewirkt werden. Delamination stellt den häufigsten Defekt bei Faserverbundkunststoffen dar. [22] Nachteilig dazu könnte sich aber das Einpressen der Pins in den Faserverbundkunststoff auswirken.

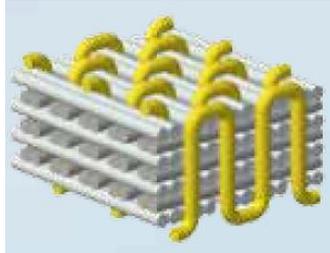


Abbildung 145 Schematische Darstellung eines 3D verwobenen Faserverbundkunststoffs [22]

11 Literaturverzeichnis

- [1] Frick A., Stern C. (2011) *Praktische Kunststoffprüfung*, Carl Hanser Verlag, München
- [2] Domininghaus H., Elsner P., Eyerer P., Hirth T. (2004, 2008) *Kunststoffe*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [3] Degischer P., Lüftl S. (2009) *Leichtbau*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [4] Schürmann H., (2005) *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [5] Archodoulaki V. (2012) *Skriptum Nichtmetallische Werkstoffe*, Technische Universität Wien
- [6] Herrmann M. (19.2.2013) *The Plastics Portal*, <http://www.plasticseurope.de>
- [7] Hellerich W., Harsch G., Baur E. (2010) *Werkstoffführer Kunststoffe*, Carl Hanser Verlag, München
- [8] Rath M. (2011) *Skriptum Fügetechnik Teil A: Grundlagen*, Technische Universität Wien
- [9] rose plastic AG (11.10.2013) *rose plastic*, <http://www.rose-plastic.de/>
- [10] Hofbauer G. (15.12.2013) *hofbauer*, <http://www.hofbauer.de/>
- [11] Greiner Extrusion GmbH (20.2.2013) *greiner EXTRUSION*, <http://www.greiner-extrusion.com/>
- [12] Weyrich M. (20.2.2013) *Fertigungsautomatisierung und Montage*, <http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Hauptseite>
- [13] EN 2243-1:2005, Luft- und Raumfahrt – Nichtmetallische Werkstoffe – Strukturelle Klebstoffsysteme – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen im Zugversuch
- [14] EN 2243-2:2005, Luft- und Raumfahrt – Nichtmetallische Werkstoffe - Strukturelle Klebstoffsysteme - Prüfverfahren – Teil 2: Rollen-Schälversuch Metall-Metall
- [15] EN ISO 14272:2001, Probenmaße und Verfahren für die Kopfbzugprüfung an Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln
- [16] Martin Koschmieder (2000) *Verarbeitung und Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen mit Elastomermatrix*, Dissertation, Rheinisch- Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
- [17] Wittwer L., Enzinger N. (2011) *Simulating the welding process of pin structures*, SYSWELD Forum, Weimar, 25.-26.10.2011, S. 46-55
- [18] Wittwer L., Enzinger N. (2012) *Optimization of a heat source using ABC algorithm*, Int. Seminar on the Numerical Analysis of Weldability, Seggau, 24.-26.9.2012
- [19] Dworak S., Kodras R. (2012) *Light optical tomography (LOT) mit Hilfe von Serial Sectioning eines unidirektionalen CFK-Verbundwerkstoffes*, Projektarbeit, Technische Universität Wien

- [20] Hatzmann J. (2011) *Identifizierung von Fehlstellen in Karbonfasern-Epoxidharz-Laminaten und Vergleich zweier Harzsysteme, sowie deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften*, Diplomarbeit, Technische Universität Wien
- [21] Graham D.P., Rezai A., Baker D., Smith P.A., Watts J.F. (2014) *The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite–metal structures*, Composites: Part A 64, 11–24
- [22] SAERTEX GmbH & Co. KG (10.10.2014)
http://www.saertex.com/de/produkt_technik/produkte/3d_fabrics/
- [23] Ucsnik S., Scheerer M., Zarembo S., Pahr D.H. (2010) *Experimental investigation of a novel hybrid metal–composite joining technology*, Composites: Part A 41, 369–374
- [24] Fibrolux GmbH (5.12.2014) <http://fibrolux.com/de/main/wissenswertes/pultrusion/>