

Nahtloses Fügen von FV-Strukturen

Master Thesis

Author(s):

Weiss, Michael

Publication date:

2006

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005198693>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diplomarbeit Nr. 06-003
Vertiefung Strukturen und Leichtbau
WS 05/06

Nahtloses Fügen von FV-Strukturen

Michael Weiss



Betreuer:
Niccolò Pini

Prof. Dr. P. Ermanni
Zentrum für Strukturtechnologien
ETH Zürich

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Analyse der wirtschaftlichen Herstellung von rotationssymmetrischen Ringen mit komplexen Querschnitten aus faserverstärkten Thermoplasten, wird in dieser Arbeit das Schliessen eines solchen Ringes untersucht. Es werden dabei die Stand-der-Technik Möglichkeiten der Verbindung von faserverstärkten Thermoplasten ermittelt und auf ihre Einsetzbarkeit beim genannten Prozess geprüft. Dies beinhaltet die Verbindungsmethode und die geometrische Gestaltung der Verbindung.

Im ersten Teil werden die Ergebnisse einer Literaturrecherche zu den Verbindungsmethoden für Thermoplaste präsentiert und jeweils die Vor- und Nachteile in Bezug auf den Einsatz bei faserverstärkten Thermoplasten allgemeinen und beim oben genannten Prozess im Speziellen. Aussichtsreiche Stand-der-Technik Methoden werden anhand von angefertigten Proben aus unidirektional, durch Glasfasern verstärktem Polypropylen auf ihre Zugfestigkeit hin untersucht.

Parallel dazu werden unterschiedliche, auf den Verwendungszweck angepasste Verbindungsgeometrien in einer Heisspresse gefügt und ebenfalls die Zugfestigkeit getestet. Mit den Erfahrungen aus diesen beiden Untersuchungen werden Konzepte für den angestrebten Prozess entwickelt und zum Schluss dieser Arbeit dokumentiert.

Abstract

In the context of the analysis, of an economical way to manufacture rotationally symmetric rings with complex cross sections out of fiber reinforced thermoplastics, this thesis is focused on closing the ends of an open ring of that type. The state-of-the-art methods of joining thermoplastic composites are investigated upon their usability for this process. This includes the geometry of the joint and the bonding technique.

The results of an extensive literature research of the joining methods are presented in the first part of this thesis, as well as their assets and drawbacks of joining reinforced thermoplastics in general and particularly of their application in the mentioned process. Promising bonding methods are further investigated experimentally. Samples of polypropylene, unidirectionally reinforced by glass fibers, are joined and their tensile strength is tested.

A number of compatible joint geometries are joined in a hot press and tested parallel to the above investigation. In the end two concepts for the mentioned process are developed with the know-how acquired during the conducted studies and documented.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
1 Einführung	1
1.1 Übersicht	1
1.2 Problemstellung.....	1
1.3 Ziel der Arbeit.....	2
2 Literaturrecherche zu Fügemethoden	3
2.1 Mechanische Verbindungselemente.....	3
2.2 Kleben.....	4
2.2.1 Adhäsionskleben - Adhäsion Bonding.....	5
2.2.2 Lösungsmittelkleben - Solvent Bonding.....	6
2.3 Schweißen.....	7
2.4 Thermische Schweißmethoden.....	8
2.4.1 Heizelementschweißen – Hot-Tool Welding.....	8
2.4.2 Extrusionsschweißen und Wärmegasziehschweißen.....	9
2.4.3 Zwischenschichtschmelzverbindung – Interlayerbonding	11
2.4.4 Heisspressen einer Verbindung.....	11
2.5 Elektromagnetische Schweißmethoden.....	13
2.5.1 Infrarotschweißen	13
2.5.2 Laserschweißen.....	14
2.5.3 Widerstandsschweißen.....	16
2.5.4 Induktionsschweißmethoden.....	17
2.5.5 Dielektrisch / Hochfrequenzschweißen	18
2.5.6 Mikrowellenschweißen.....	19
2.6 Reibungsschweißmethoden.....	20
2.6.1 Ultraschall.....	20
2.6.2 Vibrationsschweißen.....	22
2.6.3 Rotationsschweißen / Spin Welding	23
2.6.4 Reib-Rührschweißen – Friction Stir Welding.....	24
2.7 Weitere Methoden.....	25
2.7.1 Nähen.....	25
2.7.2 Insertbeheizung	26
2.8 Bewertung.....	27
2.9 Probenbestimmung für den experimentellen Teil	28
3 Verbindungsgestaltung	29

3.1	Verbindungsgeometrien.....	29
3.2	Bearbeitung der Verbindungsgeometrie.....	31
3.2.1	Wasserstrahlschneiden.....	31
3.2.2	Laserschneiden.....	33
3.2.3	Schneiden mit einer Klinge.....	33
3.2.4	Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden.....	34
3.2.5	Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden.....	34
3.2.6	Eignung der Schneidverfahren.....	35
4	Probenherstellung	36
4.1	Herstellung der Plytron Probenrohlinge.....	36
4.1.1	Zugprobengeometrie.....	37
4.1.2	Heisspressen von Platten.....	38
4.1.3	Zuschneiden der Probenrohlinge und Zugproben.....	41
4.1.4	Fräsen der Verbindungsgeometrie.....	41
4.2	Fügen der Proben.....	42
4.2.1	Kleben mit 3M Scotch-Weld DP 8005.....	42
4.2.2	Elektromagnetisches Widerstandsschweissen.....	43
4.2.3	EMAbond® Schweissverfahren.....	44
4.2.4	Spiegelschweissen.....	45
4.2.5	Heisspressen der Verbindung.....	46
4.2.6	Ultraschallschweissen.....	46
4.3	Herstellung von durchgehenden Referenzproben.....	47
4.4	Weitere Versuche zu Verbindungsmethoden.....	48
4.4.1	Lokale Konvektionsbeheizung.....	48
4.4.2	Warmgasziehschweissen.....	48
4.4.3	Zonenkühleinsatz für das Heisspresswerkzeug.....	49
4.4.4	Lokale Infrarotbeheizung.....	50
5	Prüfung der Proben.....	51
5.1	Zwick Zugmaschine.....	51
5.2	Mikrofotografie.....	52
6	Ergebnisse	53
6.1	Zugtests Fügmethoden.....	53
6.1.1	Zugfestigkeit.....	53
6.1.2	Zugscherfestigkeit.....	54
6.1.3	Bruchdehnung und Steifigkeit.....	57
6.2	Zugtests Verbindungsgeometrie.....	58
6.2.1	Zugfestigkeit.....	58
6.2.2	Bruchdehnung und Steifigkeit.....	59
6.2.3	Steifigkeit.....	59

6.3	<i>Zugtest der Referenzproben</i>	61
6.4	<i>Mikrofotografische Untersuchung</i>	62
6.4.1	Ultraschall-Schweissproben.....	62
6.4.2	Klebeproben mit DP 8005.....	63
6.4.3	EMAbond® Proben	64
6.5	<i>Diskussion</i>	65
6.5.1	Fügemethoden.....	65
6.5.2	Verbindungsgeometrie	67
7	Fügekonzepete	71
7.1	<i>Konzeptfindung</i>	71
7.1.1	Anforderungen	71
7.1.2	Morphologischer Kasten	71
7.2	<i>Konzept 1: Abgewandeltes QUICKTEMP-Pressen einer Zackenverbindung</i>	72
7.2.1	Alternative Teilschritte	74
7.3	<i>Konzept 2: Widerstandsschweissen von elektrisch leitenden Einlagen</i>	75
7.3.1	Alternative Teilschritte	77
7.4	<i>Beurteilung der Konzepte</i>	78
8	Rück- und Ausblick	80
8.1	<i>Rückblick</i>	80
8.2	<i>Ausblick</i>	80
8.2.1	Mögliche zukünftige Arbeiten	81
	Literaturverzeichnis	82
	Danksagung	86
	Anhang	87

1 Einführung

1.1 Übersicht

Thermoplastische faserverstärkte Verbundwerkstoffe (FVW) stellen auch unter den Verbundwerkstoffen eine eher junge Werkstoffgruppe dar. In den 1970er und 1980er Jahren wurden sie für die Verwendung in Luft- und Raumfahrt entwickelt [1]. Die wesentlichen Vorteile von thermoplastischen FVW gegenüber Verbundwerkstoffen mit einer Duroplastmatrix sind generell [2-5]:

- Hohe Schadenstoleranz
- Sehr hohe Bruchdehnung
- Gute Temperaturbeständigkeit
- Kurze Herstellungszyklen
- Thermisches Umformbarkeit
- Thermisches Fügen / Schweissbarkeit
- Zeitlich unbegrenzte Lagerung von Halbzeugen
- Arbeitshygiene unproblematisch
- Grundsätzliche Wiederverwendbarkeit

Mit zunehmender Erschwinglichkeit, durch die Verwendung günstiger Matrix-Werkstoffe sowie einfacher und schneller Verarbeitungsprozesse, drangen sie später in den Automobil- und Sportartikelmarkt vor [5, 6]. Vielerorts ersetzen faserverstärkte Thermoplaste auch in strukturellen Bauteilen Stahl und Aluminium als Werkstoff [4].

Die Herstellung von Thermoplastverbunden beruht meist auf Pressverfahren, wodurch die erreichbare Komplexität der Bauteile eingeschränkt ist [2]. Um diese Grenzen zu sprengen, ist man auf Verbindungsmethoden angewiesen, mit denen einfache Komponenten zu grösseren und komplizierten zusammengefügt werden können [7]. Man spricht hierbei von einer Differentialbauweise [8], im Gegensatz zur Integralbauweise, wo möglichst viele Einzelkomponenten zusammengenommen werden und stattdessen ein einzelnes komplexes Bauteil in einem Schritt gefertigt wird. Schlussendlich strebt man mit beiden Bauweisen eine kostengünstige Herstellung an. Anfang der 1990er Jahre wurde eine ganze Reihe von Schweissmethoden entwickelt, dank welcher die Kosten für gewisse Anwendungen effektiv reduziert werden konnte [9].

1.2 Problemstellung

Das breite Spektrum an unterschiedlichen Methoden hat sich seither nicht wesentlich reduziert. Keine der Verbindungsmethoden hat sich als die beste herauskristallisieren können, insbesondere bei faserverstärkten Thermoplasten [4], da die meisten Verbindungsmethoden ursprünglich nicht dafür entwickelt wurden. Jede Methode hat ihre Vor- und Nachteile und je nach Anwendung eignen sich einige besser als andere.

Im konkreten Fall dieser Diplomarbeit geht es darum, einen aus der Metallverarbeitung bekannten Prozess zur Herstellung von ringförmigen, rotationssymmetrischen Strukturen mit komplexen Querschnitten, bei faserverstärkten Thermoplasten anzuwenden. Aus einem endlosen, ebenen und geraden Halbzeug wird ein offener Profilring hergestellt. Dieser soll geschlossen werden durch eine optisch und mechanisch möglichst nahtlose Verbindung.

Die ersten Abschnitte des Prozesses werden in zwei gleichzeitig durchgeführten Diplomarbeiten von Joel Stampfli [10] und Matteo Scapozza [11] untersucht. Einerseits ist dies das Umformen eines ebenen Halbzeugs zu einem Profil und zweitens das Einbringen der Krümmung des Rings. Das eingesetzte Material wird unidirektional, in Profillängsrichtung, durch Glasfasern verstärktes Polypropylen sein (auch bekannt unter dem Markennamen: Plytron).

1.3 Ziel der Arbeit

Im Laufe dieser Diplomarbeit soll ein Konzept entwickelt werden für das serielle Verbinden zweier Profile mit komplexen Querschnitten. Damit werden die offenen Enden des Profilrings abstrahiert auf den geraden Fall. Das Konzept beinhaltet eine geeignete Fügemethode, sowie eine dazu passende Verbindungsgeometrie und wie diese hergestellt werden kann. In einer ersten Phase werden die unterschiedlichen Fügemethoden recherchiert und verglichen. Viel versprechende Methoden werden anschliessend anhand von gefügten Zugproben experimentell untersucht. Parallel dazu werden verschiedenen Verbindungsgeometrien auf ihre Zugfestigkeit geprüft. Aus den Ergebnissen der Recherche und der Experimente gehen in einer dritten Phase zwei Konzepte hervor, welche in einer abschliessenden Diskussion beurteilt werden.

2 Literaturrecherche zu Fügemethoden

In diesem Kapitel werden die unterschiedliche Methoden vorgestellt, mit denen thermoplastische Verbundwerkstoffe gefügt werden können und welches die Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden sind, bei thermoplastischen FVW allgemein (tabellarisch) und im Bezug auf die gegebene Problemstellung (Kapitel 1.2) jeweils in einer kurzen Diskussion. Die Verbindungsmethoden können unterteilt werden gemäss der folgenden Grafik in Abb. 2.1.

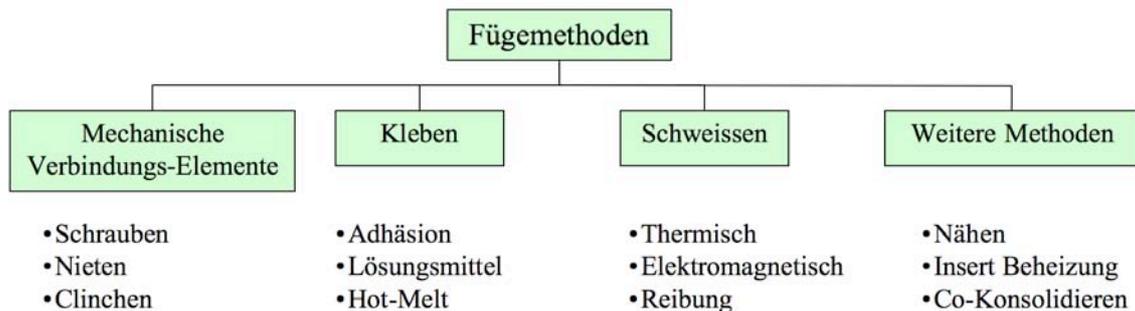


Abb. 2.1 Aufteilung der Fügemethoden für verstärkte und nicht-verstärkte Thermoplasten angelehnt an die Einteilung von Rudolph et al. [12]

Umfassende Beschreibungen aller Methoden würden den Rahmen dieses Berichts sprengen und wurden bereits von einer Vielzahl von Autoren festgehalten. Empfehlenswert als Einstieg sind insbesondere das Handbook of Plastics Joining und das Werk von Stokes [1, 13]. In weiteren Werken [3, 4, 7, 12, 14, 15] wird verstärkt auf Schweißmethoden für Thermoplaste und thermoplastische Verbundwerkstoffe eingegangen. Darunter ist das Werk von Yousefpour et al. [4] hervorzuheben, welches für ein „Review“ recht umfangreich ist und die Schweißmethoden detailliert beschrieben werden.

2.1 Mechanische Verbindungselemente

Die Verwendung von mechanischen Verbindungselementen ist eine sehr einfache und verbreitete Methode mit der Kunststoffe und vor allem Metalle verbunden werden. Die Verbindungselemente sind meist aus Metall oder Kunststoff. Die Verbindung kann wieder lösbar oder nicht lösbar gestaltet werden. Die bekanntesten mechanischen Verbindungselemente sind: Schrauben, Nieten (Vollniet, Hohniet, Blindniet, Schliessringbolzen), Stifte und andere Inserts, aber auch Schnappverbindungen sowie Durchsetzfügungen oder Clinchungen werden zu den mechanischen Verbindungselementen gezählt [16].

Tab. 2.1 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe mit mechanischen Verbindungselementen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Demontage grundsätzlich möglich für Reperatur und Wartung [17] • günstig, bei geringer Anzahl an Verbindungselementen • kombinierbar mit anderen Fügemethoden • Verstärkung in Dickenrichtung • gezielte Vorspannung (teilweise) [18] • verschiedene Materialien können kombiniert werden [18] • Erfahrung 	<ul style="list-style-type: none"> • Löcher oft benötigt, Schwächung des Laminats [7, 17, 19] und zusätzlicher Arbeitsschritt • Kraftflüsse lokal konzentriert • unterschiedlicher thermischer Expansionskoeffizient von Laminat und Verbindungselementen [7] • Wassereinschlüsse zwischen Befestigungselement und Bauteil [7] • Kontaktkorrosion [7] möglich bei Kohlefasern • Auslegung der Verbindung ist weit komplexer als bei isotropen Materialien und muss experimentell verifiziert werden [17] • bei grossen Elementen, grosse Zahl von Verbindungselementen benötigt • metallische Verbindungselemente erhöhen das Gewicht [7] • nur teilweise automatisierbar (Schrauben)

Mechanische Verbindungselemente kommen im Allgemeinen nicht in Frage für die vorgesehene Anwendung, weil sie meist keine nahtlose Verbindung erlauben. Die Lösbarkeit der Verbindung ist nicht gefordert und das Einbringen von metallischen Elementen hätte wegen der höheren Dichte eine Unwucht in einem rotationssymmetrischen Bauteil zur Folge. Ein weiterer gravierender Nachteil ist die Konzentration des Kraftflusses. Einzig die Kombination von Stift-Inserts (Kapitel 2.7.2) mit einer Verschweissung hat ein gewisses Potential für die vorliegende Anwendung.

2.2 Kleben

Das Kleben von gleichen oder unterschiedlichen Materialien ist eine Methode die in neuerer Zeit verbreitet eingesetzt wird für tragende Strukturen [20], insbesondere auch in der Automobilindustrie [1, 18, 21]. Unzählige unterschiedliche Klebstoffe für fast jede erdenkliche Anwendung sind erhältlich. Beim Kleben gibt es verschiedene Varianten die grundsätzlich auf zwei unterschiedlichen Mechanismen beruhen: Adhäsionskleben (chemische Reaktion) einerseits und Lösungsmittelkleben oder Schmelzkleben (physikalische Abbindung) andererseits [16].

2.2.1 Adhäsionskleben - Adhäsion Bonding

Beim Adhäsionskleben wirken die Adhäsionskräfte des Klebstoffs am Substrat sowie die Kohäsionskräfte des Klebstoffs in sich. Je nach Werkstoff und Klebstoff Kombination ist die erreichte Festigkeit unterschiedlich. Eine grosse Rolle spielt auch die Vorbereitung der Klebefläche. Fremdstoffe und eine zu glatte Oberfläche können die Festigkeit der Klebung massiv herabsetzen.

Strukturelles Kleben mit Adhäsionsklebern wurde insbesondere durch die Luft- und Raumfahrtindustrie vorangetrieben. Es wird dort und in der Automobilindustrie verbreitet eingesetzt um Metalle mit Nichtmetallen zu verbinden [1, 18].

Tab. 2.2 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe mit Adhäsionsklebern

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • gute mechanische Dämpfungseigenschaften vieler Klebstoffe • kontinuierliche Verbindung, gleichmässiger Kraftfluss • Gas- und wasserdicht • Verbindung zwischen unterschiedlichen Werkstoffen möglich • funktioniert bei sehr vielen Kunststoffen [13] • einfache Methode, auch für ausgedehnte oder sehr komplexe Fügestellen [13] • automatisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • relativ geringe Festigkeit der Verbindung, max. 24 MPa Zugscherfestigkeit [22] • Endfestigkeit erst nach einer gewissen Aushärtezeit erreicht • Alterung des Klebstoffes • teilweise zeitlich begrenzte Lagerung [13] • oft haben Klebstoffe eine geringe Chemikalienbeständigkeit • Anfälligkeit auf Feuchtigkeit und Beschädigung • keine guten Eigenschaften bei Schäl- und Spaltungsbeanspruchung • meistens ungeeignet für Wechselbeanspruchungen • keine optimale Haftung des Klebers an Thermoplasten [4] • Vorbereitung der Klebeflächen notwendig [7] • zerstörungsfreie Trennung oft nicht möglich • mögliche Gesundheitsgefährdung durch Lösungsmittel • Klebstoffrückstände an Werkzeugen und Verarbeitungsort [13]

Das Kleben einiger Thermoplaste insbesondere der Polyolefine, Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE), ist schwierig. Die erreichbaren Festigkeiten sind gering. Die

Oberflächenvorbereitung ist oft aufwendig und die Aushärtezeit sehr lang. Eine ideale Klebefläche kann bei Prepregs und Duromeren realisiert werden mit Hilfe von „peel ply“ Folien [16]. Beim Zweikomponenten-Strukturklebstoff DP 8005, welcher speziell für die oben genannten Kunststoffe entwickelt wurde, beträgt die Aushärtezeit bei Raumtemperatur 90 min bis die Verbindung handfest ist und 8 bis 24 Stunden für die vollständige Aushärtung [23]. Das bedeutet, dass die Werkstücke über eine gewisse Zeit zusammengehalten werden müssen. Laut Hersteller liegt die Zugscherfestigkeit von DP 8005 für Polypropylen bei 7.2 MPa [23].

Eingesetzt wird das Adhäsionskleben unter anderem in Raumfahrt, Automobilbau und Elektronikindustrie. Es ist aber auch stark vertreten im Sportartikelsektor, bei den Schuhherstellern, in der Verpackungsmittelindustrie oder auch im Bausektor [24].

2.2.2 Lösungsmittelkleben - Solvent Bonding

Beim Lösungsmittelkleben von thermoplastischen Werkstoffen wird das Substrat oberflächlich angelöst, wobei sich die Molekülketten der Substrate freier bewegen können. Die Ketten beider thermoplastischen Fügepartner verschränken sich ineinander durch die erhöhte Beweglichkeit in der Fügezone. Das Lösungsmittel diffundiert mit der Zeit aus der Verbindungsstelle heraus und verdunstet, wobei sich der Kunststoff wieder verfestigt [13]. Diese Methode funktioniert nicht bei allen Werkstoffen gleich gut, insb. können vielfach nur gleichartige Kunststoffe mit einander verbunden werden.

Duroplastische Kunststoffe und Elastomere können auch mit Lösungsmitteln verbunden werden, jedoch ist der wirkende Mechanismus etwas anders. Der Kunststoff quillt oberflächlich an und erweicht. Wenn die beiden Seiten zusammengedrückt werden, kommen die Molekülketten in Kontakt. Van der Waals Kräfte bewirken die gegenseitige Anziehung der Molekülketten und diese verschränken sich [13]. Das Diffundieren und Verdunsten des Lösungsmittels verfestigt auch hier den Kunststoff wieder, kann aber stunden oder sogar Tage dauern [13].

Tab. 2.3 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Lösungsmittelkleben

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> lokales erweichen der Klebestelle kontinuierliche Verbindung, gleichmässiger Kraftfluss nach vollständiger Verflüchtigung des Lösungsmittels ist die Fügestelle frei von Fremdstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> beschränkt auf gleichartige oder ähnliche Fügepartner (Lösungsmittel muss bei beiden ähnliche Reaktionen hervorrufen) Endfestigkeit erst nach einer gewissen Aushärtezeit einige Thermoplaste sind schwer löslichen, insb. teilkristalline mögliche Gesundheitsgefährdung durch Lösungsmittel

Oft wird eine Lösung des Polymers verwendet anstelle eines reinen Lösungsmittels, um Oberflächenirregularitäten auszugleichen. Polyolefine sind äusserst resistent gegenüber Lösungsmittel und können bei Raumtemperatur nicht aufgeweicht werden [13]. Für andere Matrixsysteme kommt daher diese Fügemethode eher in Frage.

2.3 Schweissen

Eine Stärke der thermoplastischen Kunststoffe ist es, dass sie geschweisst werden können. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Schweissmethoden die wiederum selbst jeweils Vor- und Nachteile haben. Die folgenden, in Tab. 2.4 aufgelisteten, gelten für die meisten Schweissmethoden von Thermoplasten.

Tab. 2.4 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Schweissen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Eigenschaften des voll konsolidierten Verbundes können erreicht werden, wird die Nichtkontinuität der Fasern berücksichtigt [4] • kontinuierliche Verbindung, gleichmässiger Kraftfluss • je nach Heizmethode auch lokal möglich • Kurze Prozesszeiten [7] • geringe oder keine Oberflächenvorbereitung nötig [7] 	<ul style="list-style-type: none"> • oxidative Degradation schneller bei hohen Temperaturen [2] • thermische Ausdehnung muss berücksichtigt werden • Eigenspannungen können resultieren bei ungenügender Kontrolle des Schweissvorgangs [7] • bei einigen Heizmethoden verfestigen sich die zu fügenden Oberflächen sehr schnell, was die Verbindungsqualität stark beeinträchtigt • starke Wärmeleitung bei Kohlefasern, kann ungleichmässige Beheizung verursachen [7]

Oberflächenunebenheiten können ausgeglichen werden, wenn eine zusätzliche, dünne Schicht des Matrixmaterials in der Klebestelle angebracht wird [4].

Prozessschritte beim Schweissen von Thermoplasten

Im Allgemeinen sieht der Ablauf des Schweissprozesses nach Benatar [3] wie folgt aus:

1. Oberflächenbearbeitung: reinigen der Oberfläche
2. Heizen: Idealerweise geschieht dies lokal in der Fügezone
3. Pressen: Druck wird auf die Fügezone ausgeübt um eine Dekonsolidierung zu verhindern und Luftblasen aus der Verbindung zu treiben
4. Diffusion: die Molekülketten vermischen sich über die Fügestelle
5. Kühlung: der Thermoplast erstarrt und / oder kristallisiert wieder

Unterteilung der Schweissmethoden

Die Schweissmethoden können weiter unterteilt werden (Abb. 2.2) in thermische Methoden, Methoden die auf Reibung, sowie solche die auf elektromagnetische Effekte und Strahlung beruhen.

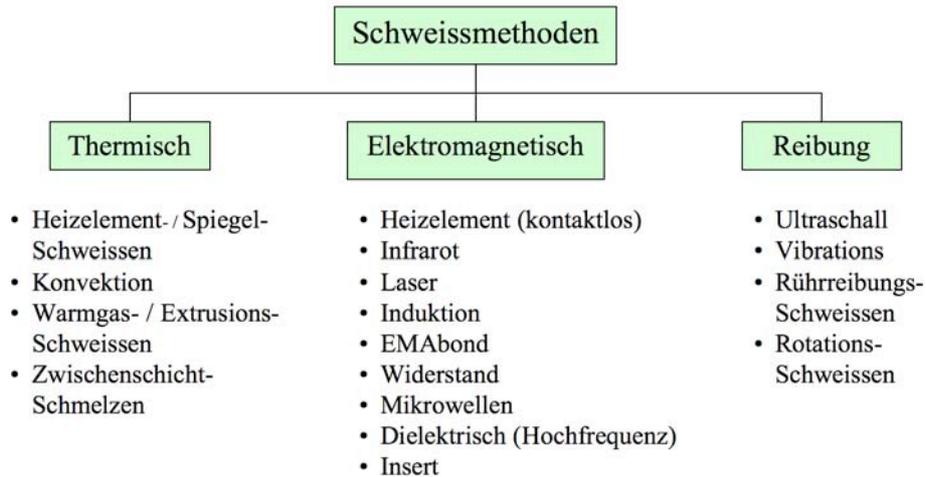


Abb. 2.2 Klassifikation von Schweissmethoden für thermoplastische Kunststoffe

2.4 Thermische Schweissmethoden

Unter thermischen Schweissmethoden versteht man diejenigen, bei denen der Thermoplast durch Zuführung von Wärme in einem ersten Schritt geschmolzen und anschliessend in einem zweiten gepresst und gekühlt wird.

2.4.1 Heizelementschweissen – Hot-Tool Welding

Beim Heizelementschweissen oder auch Spiegelschweissen werden die beiden Fügepartner an ein heisses Werkzeug oder an einen Spiegel (von innen beheizte, flache Scheibe) gehalten bis die Fügezone genügend tief aufgeschmolzen ist. Das Werkzeug wird herausgenommen, die beiden geschmolzenen Flächen zusammengedrückt und passiv oder aktiv gekühlt (siehe Abb. 2.3).

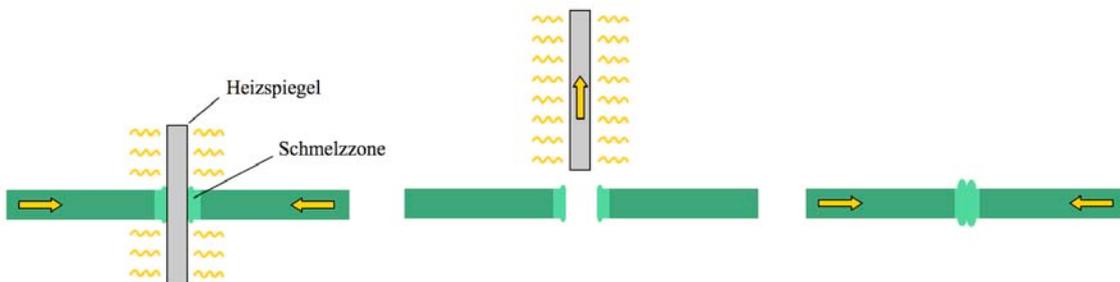


Abb. 2.3 Schematisches Vorgehen beim Spiegelschweissen, Abbildung nach Yousepour [4]

Eine Variante dieser Methode ist das kontaktlose Heizelementschweissen, bei dem der Thermoplast über Wärmestrahlung und Konvektion beheizt wird. Speziell wenn die geschmolzene Matrix stark klebt, wie dies der Fall ist bei PP, ist diese Methode der Variante mit direktem Kontakt vorzuziehen. Der Nachteil dabei ist die verlängerte Heizzeit. Abhilfe schaffen kann auch eine Trennfolie bzw. eine Trennbeschichtung.

Tab. 2.5 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Heizelementschweissen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • schnell für kleine Teile, typischerweise 5-60 s [4] • lokales schmelzen • Oberflächenungenauigkeiten werden ausgeglichen [1] • Fügen unterschiedlicher Materialien möglich [1] • präzise Regelung der Kontakttemperatur / Heizwerkzeugtemperatur [1] • sehr komplexe Geometrien schweisssbar [4, 25] 	<ul style="list-style-type: none"> • lange Heizzeit bei grösseren Teilen und wenn der Werkstoff eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist, bis 30 min [4] • Trennmittel benötigt, da viele Polymere in der Schmelze am Heizwerkzeug kleben trotz Trennschicht [1]

Kontaktbeheizung wird oft zum Verbinden von Wasser- und Abwasserrohren verwendet. Dies ist eine sehr einfache und effektive Methode, auch wenn sie bezüglich Schweissdauer und erforderliche Nachbearbeitung nicht mit anderen Methoden mithalten kann. Problematisch wird die Kontaktbeheizung wenn die Matrix im geschmolzenen Zustand trotz Trennschicht am Spiegel oder Heizwerkzeug kleben bleibt und Fäden zieht [26]. Diese Fügemethode wird auch in der Automobilindustrie eingesetzt für Batteriehüllen, Tanks, Treibstoffzuleitungsrohre [4], sowie Lampen und Blinker-Baugruppen [13].

Für das Heizelementschweissen werden ein Heizwerkzeug und oft auch eine Halterung für die beiden zu verbindenden Teile benötigt, mit welcher die Teile zusammengedrückt werden können.

2.4.2 Extrusionsschweissen und Warmgasziehschweissen

Das Warmgasziehschweissen ist ganz ähnlich wie das Schweissen mit Gasflamme bei Metallen. Hierbei wird ein Heissluftstrom verwendet der die Fügestelle und einen Thermoplastdraht erhitzt, welcher als Füllmaterial bzw. „Lot“ dient (siehe Abb. 2.4). Dieses Lot wird in die ausgesparte Naht gedrückt und nach dem Erstarren wird das überschüssige Material mit einem Stechbeitel entfernt [26]. Im Falle einer Stumpfschweissung werden die beiden Seiten angeschrägt (Abb. 2.4 rechts), um beim Schweissen den Draht in die v-förmige Nut drücken zu können.

Beim Extrusionsschweissen wird eine Thermoplastschmelze direkt in die vorgeheizte Fuge extrudiert. Das Vorheizen wird hierbei ebenfalls mit einem heissen Gas bewerkstelligt. Eine weitere Warmgasschweissvariante kommt ohne den Einsatz von Lot aus. Dabei werden die beiden Teile lokal zum Schmelzen gebracht mit einem Strahl heisser Luft oder Inertgas und können anschliessend zusammengepresst werden, ähnlich wie beim Heizelementschweissen (Kapitel 2.4.1).

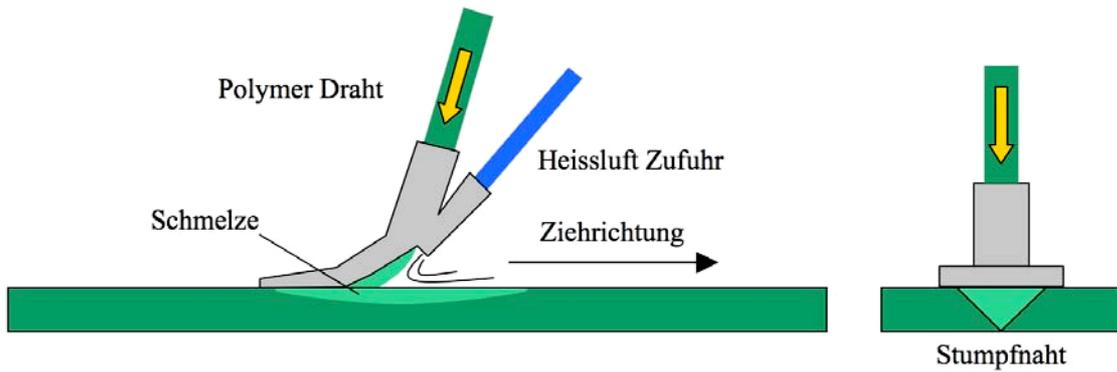


Abb. 2.4 Warmgasziehschweissvorgang, Abbildung nach Yousefpour [4]

Tab. 2.6 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Warmgasziehschweissen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • einfache und portable Werkzeuge [4] • geeignet für grosse und komplexe Bauteile [4] • Einsatz bei Reparaturen 	<ul style="list-style-type: none"> • eher langsam • ungeeignet für hohe Stückzahlen [4] • schwer kontrollierbar [1] • eher schwer oder nur teilweise automatisierbar • viele Verbindungsgeometrien nicht möglich, insb. mit Überlappungen

Diese beiden Methoden werden eingesetzt für grosse und komplexe Strukturen, wie Tanks aus Polyolefinen, Labor- oder Nassprozesseinrichtungen und für die Reparatur von thermoplastischen Behältern. Sie könnten auch eingesetzt werden für Thermoplaste mit Additiven und Kurzfaserverstärkung, der Draht müsste aber entsprechend gewählt werden.

Aufgrund der erforderlichen V-förmigen Nutgeometrie in der Fugestelle bei ebenen Verschweissungen ist Warmgasziehschweissen nicht geeignet um faserverstärkte Profile längs zu verbinden. Das Verfahren kann grundsätzlich automatisiert werden, wird aber in der Praxis meist von Hand durchgeführt [26]. Die Variante ohne Lot wäre eher geeignet, allerdings ist da die Begrenzung der beheizten Fläche nicht sehr präzise und die Beheizungsintensität kann nur beschränkt gleichmässig verteilt werden auf der ganzen Verbindung.

2.4.3 Zwischenschichtschmelzverbindung – Interlayerbonding

Eine Schicht eines amorphen Thermoplasts mit tieferem Schmelzpunkt als demjenigen der Fügepartner dient als Heisskleber (hot-melt adhesive) in den Fügestellen. Der Verbund wird über die Glastemperatur der Zwischenschicht geheizt [14], aber nicht über die Schmelztemperatur der Strukturkomponenten, um eine Verbindung zwischen zwei auf diese Art vorbereiteten Stellen zu erzeugen. Die Verbindung wird in der Regel in einer Heisspresse oder in einem Autoklav hergestellt [27].

Tab. 2.7 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe mittels Interlayerbonding

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • nur die Zwischenschicht in der Klebestelle wird geschmolzen, nicht die Strukturkomponenten • Verarbeitungstemperatur unter der Schmelztemperatur der Strukturkomponente [27] • kontinuierliche Verbindung, gleichmässiger Kraftfluss • Lösbarkeit der Verbindung [27] • kann mit verschiedenen Heizmethoden kombiniert werden 	<ul style="list-style-type: none"> • die Klebestelle hat etwas andere Eigenschaften als die Matrix der Fügepartner • eher hohe Zykluszeiten von etwa 10 min [27] • Autoklav oder Heisspresse benötigt

Idealerweise wird diese amorphe Schicht während dem Konsolidieren der Strukturkomponenten beidseitig mit diesen verschmolzen. Damit befinden sich auch Fasern in der Zwischenschicht. Dieses Verfahren wird „Thermabond“ [14] oder „Dual Polymer Bonding“ genannt [4, 27]. Damit wurde in einer Untersuchung an einfach überlappenden Verbindungen etwa die gleiche Festigkeit erreicht wie durch Co-Konsolidierung der Verbindung. Verwendet wurden quasi-isotrope APC2 Laminate und der amorphe Thermoplast war PEI [27].

2.4.4 Heisspressen einer Verbindung

Bei dieser Methode geht es darum, durch nachträgliches Neuverpressen zweier oder mehrerer vorgeformter Thermoplastteile, ein einzelnes herzustellen. Das Bauteil wird nur lokal im Bereich der Verbindungen beheizt und gepresst. Dies erfordert ein Presswerkzeug, welches heisse und kalte Zonen besitzt (siehe Abb. 2.1). Die kalten Zonen verhindern das Austreten der flüssigen Matrix am Rand des Presswerkzeugs. Dadurch, dass das Werkzeug während des Pressvorgangs auf feste und geschmolzene Bereiche drückt, sollte einseitig mit einem Gummistempel gearbeitet werden, welcher eine quasi-hydrostatische Druckverteilung ermöglicht. Damit kann auch den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen des Verbundmaterials aufgrund der Temperaturunterschiede Rechnung getragen werden.

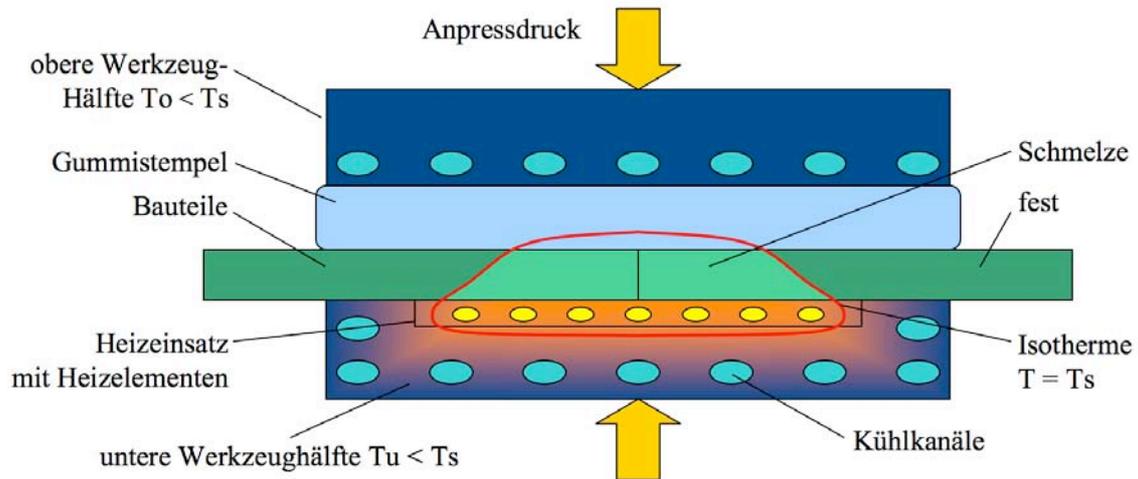


Abb. 2.5 Schematische Darstellung vom Heisspressen der Verbindungszone

Bei dem in Abb. 2.5 dargestellten möglichen Aufbau werden die beiden Presswerkzeughälften auf einer Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix gehalten, während dem die Temperatur des Heizeinsatzes deutlich darüber liegt. Sehr wahrscheinlich müssen die Kühlkanäle am Rand der unteren Werkzeughälfte gesondert gesteuert werden um dort die Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur der Matrix zu halten. Aufgeheizt wird die Verbindungszone beider Bauteile noch ohne Druck über den Heizeinsatz. Nachdem die beiden Teile verschmolzen sind wird der Fügedruck angesetzt und die Kühlung eingeleitet.

Wenn die Konstruktion auf den Kopf gestellt wird, kann der Heizeinsatz von der betreffenden Werkzeughälfte getrennt werden. Die Beheizung geschieht dann im offenen Werkzeug, mit aufliegendem Heizeinsatz. Erst beim ansetzen des Drucks wird das Werkzeug geschlossen und gekühlt. Dies reduziert die thermische Masse welche geheizt und wieder gekühlt wird, was den Energieverbrauch und die Taktzeit reduziert. Ein ähnlicher Aufbau, mit zwei dünnen Trägerplatten, welche den Transfer von einer heißen Presse in eine Kühlpresse ermöglichen, könnte die Energieeffizienz noch weiter steigern. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Anpassung des, in der Composites Technologies Vorlesung vorgestellten, QUICKTEMP-Verfahrens [2]. Dieses Verfahren stammt aus der Umformtechnik.

Tab. 2.8 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Heisspressen der Verbindungszone

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • volle Konsolidierung der Verbindung • Oberflächenungenauigkeiten könne ausgeglichen werden • hohe Massgenauigkeit • materialunabhängig, auch zwischen unterschiedlichen Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> • teures Werkzeug • Komplexität der Verbindung begrenzt durch das Presswerkzeug und Zugänglichkeit • eher höhere Zykluszeiten • relativ hoher Energieverbrauch • Trennmittel oder Trennfolie benötigt

2.5 Elektromagnetische Schweissmethoden

2.5.1 Infrarotschweissen

Die Beheizung mit Infrarotstrahlern geschieht kontaktlos. Die Werkstücke werden oberflächlich erwärmt, wobei die Verwendung von Pigmenten die Absorptionsrate erhöht und den Vorgang beschleunigt. Durch das Anbringen von spiegelnden Folien oder Abdeckblechen könnte die Erwärmung auf kleine Bereiche beschränkt werden. Im Anschluss werden die geschmolzenen Oberflächen zusammengepresst und passiv oder aktiv gekühlt. Der Ablauf ist demjenigen vom Heizelementschweissen ganz ähnlich.

Eine andere Möglichkeit bietet die fokussierte IR-Bestrahlung, welche eine sehr starke punktförmige oder linienförmige Beheizung bewirkt, ähnlich wie ein Laserstrahl, nur in einem anderen Wellenlängenbereich.

Tab. 2.9 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Infrarotbeheizung mit anschliessendem Pressen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • gut geeignet für dünne, flache oder leicht unebene Strukturen [4] • kontaktlose Erwärmung • schnelle Beheizung [4] • automatisierbar [4, 13] • einfach Regelung des Prozesses mit Pyrometer [13] • grossflächige (IR-Feld) oder sehr lokale (fokussierte IR Beheizung) Beheizung 	<ul style="list-style-type: none"> • mögliche Dekonsolidierung und Wölbung während dem Aufheizen [4] • nicht geeignet für stark konturierte oder ungleich dicke Strukturen • thermische Degradation möglich

Das Vorwärmen mit Infrarotstrahlern wird in erster Linie beim Umformen von dünnen, flächigen Thermoplastcomposites eingesetzt [2]. Wie bei allen zweiphasigen Schweißmethoden, bei denen nur die Oberfläche geschmolzen werden soll, müssen die beiden Fügeiteile nach dem Aufheizen sehr rasch zusammengebracht und unter Druck gefügt werden [13]. Zudem besteht eine Überhitzungsgefahr womit die thermische Degradation an der Oberfläche einhergeht [13].

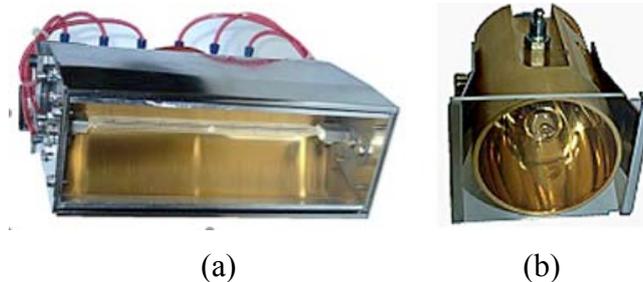


Abb. 2.6 Linienförmig (a) und punktförmig (b) fokussierter IR-Strahler von Orbi-Tech GmbH [28]

Dem Plytron Material ist Kohlenstoff zugegeben um die Infrarotbeheizung zu begünstigen. Bei einer komplexen Geometrie ist es schwierig eine gleichmässige Beheizung zu erreichen. Es könnten dafür mehrere kleinere stabförmige Strahler entsprechend der Schweisskontur angeordnet werden. Diese könnten dann auch separat geregelt werden um möglichst auf der ganzen Fügestelle die gleiche Temperatur zu erreichen. Die Werkzeuge welche benötigt werden sind die IR-Strahler, Pyrometer, eine Presse und ein Transfermechanismus, entweder für die Strahler oder die Bauteile.

2.5.2 Laserschweissen

Es gibt mehrere Varianten um Thermoplaste mit einem Laser zu verschweissen [4, 13, 29, 30]. Für das Durchstrahlschweissen sollten die beiden zu fügenden Teile die Laserenergie unterschiedlich stark absorbieren. Der für den Laser durchsichtige Thermoplast liegt überlappend auf dem absorbierenden Thermoplast (siehe Abb. 2.7). Beim Übergang zum absorbierenden Fügepartner führt der Laserstrahl in diesem zu einer Erwärmung. Die Schweissung geschieht im Inneren der Überlappung und führt so zu einer geringen oxidativen Degradation und Gratbildung.

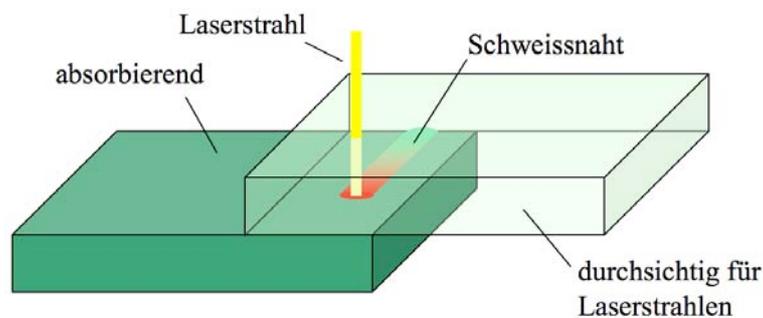


Abb. 2.7 Laser-Durchstrahlschweissen

Beim Laserstumpfschweissen werden zwei Teile stumpf aneinander gepresst und der Laser wird entlang der zu schweisenden Naht geführt [4, 13]. Ein kleiner Teil des Polymers wird verbrannt und es entsteht beidseitig eine dünne Schmelzschicht, welche

hinter dem Laserstrahl mit der gegenüberliegenden zusammenkommt und beim Erstarren die Verbindung verfestigt. Diese Methode wurde insbesondere in früherer Literatur häufig beschrieben, stellt aber nicht die ideale Laserschweisskonfiguration dar [29-31] und hat sich im Gegensatz zum Durchstrahlschweissen nicht verbreitet.

Eine weitere Stumpfschweissvariante wird in [32, 33] beschrieben. Dabei wird ähnlich vorgegangen wie beim kontaktlosen Heizelementschweissen. Spiegel werden zwischen den beiden Fügeflächen platziert über die der Laserstrahl auf die Fügefläche gerichtet wird. Überwacht wird der Prozess mit einem Pyrometer, welcher die Oberflächentemperatur misst. Bei ausreichender Schmelztiefe werden die Spiegel entfernt und die beiden Elemente zusammengepresst.

Die Vor- und Nachteile beziehen sich auf das Durchstrahlschweissen welches als einziges Laserschweissverfahren verbreitet ist.

Tab. 2.10 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe mittels Durchstrahlschweissen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • es kann durch transparente Polymere hindurch geschweisst werden, indem in der Naht Pigmente angebracht werden • sehr schnell [4, 13, 29] • hohe Nahtqualität [31] • on-line Prozesskontrolle [31] • breites Anwendungsspektrum, von sehr kleinen Schweisszonen bis mehrere Meter Schweisslänge [29] • sehr gutes optisches Erscheinungsbild [29, 31] • kontaktfrei • automatisierbarkeit [31] • minimale thermische Belastung • sehr stark lokalisierte Erhitzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Degradation in der Naht möglich • Schweissen auf die überlappende Konfiguration beschränkt • einer der beiden Fügepartner muss für die Laserstrahlen durchdringbar sein • eher teuer [4], Diodenlaser sind aber in letzter Zeit erschwinglicher geworden [31]

Dieses Verfahren wird seit kurzem eingesetzt in der Automobilindustrie für Filterkomponenten und elektronische Schlüssel [31]. Es werden aber auch grosse Teile wie Kunststofffenster und Pumpengehäuse verschweisst. Die benötigten Werkzeuge sind: Laser, Halterung, Roboterarm oder steuerbare Spiegel, Pyrometer und dazugehörige Steuerung.

Die Durchstrahlschweissmethode ist für das vorliegende Problem ungeeignet, da die Matrix beider Fügepartner identisch ist und wegen der Pigmentierung, die Oberfläche und nicht die Verbindungsschicht einer Überlappung erhitzt würde. Dasselbe gilt für Verbundwerkstoffe bei denen die Fasern die Laserstrahlen absorbieren, z.B. Kohlefasern.

2.5.3 Widerstandsschweissen

Ein Widerstandselement wird in der Fugestelle eingebracht, um diese lokal zu beheizen, typischerweise ein metallisches Netz oder ein Kohlefasergewebestreifen [4]. Anschliessend wird eine Gleichspannung angesetzt. Statt mit konstantem Strom kann auch mit kurzen, aber intensiven Intervallen gearbeitet werden. Es wird, durch den geringeren thermischen Verlust der dabei entsteht, die erforderliche Energie reduziert. Das gepulste und das kontinuierliche Widerstandsschweissen wurden durch Marcos Arias in seiner Dissertation an der ETH [34] ausgiebig untersucht.

Tab. 2.11 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Widerstandsschweissen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • gut definierte Heizzonen • kein vorzeitiges auskühlen • komplexe Verbindungsgeometrie möglich • schnell, unter 30 s [1] • einfache Tools • billig • sauber [4] 	<ul style="list-style-type: none"> • Heizelemente müssen kompatibel sein mit den Fügepartnern • Insert kann die Fugestelle schwächen oder korrodieren [4] • Inhomogenitäten über das Heizelement [3] • bisher wenig angewendet in der Industrie

Bei Verwendung von Fasern als Widerstandselement und Kontaktierung mit Klammern, ergibt sich eine nicht uniforme Beheizung [3]. Die Kontaktierung über ein Bad aus flüssigem Metall kann dies verbessern, erhöht aber den Aufwand. Falls die Fasern des Verbundwerkstoffs elektrisch leiten, sollte das Heizelement isoliert werden mit Thermoplastfolien.



Abb. 2.8 Widerstandsgeschweisster Abschnitt aus der J-Nose einer Airbus gefertigt bei Stork Fokker in Holland [9]

Für dieses Verfahren werden eine Presse, Kontaktklappen, eine Spannungsquelle sowie die Widerstandseinlagen benötigt. Eine Anwendung dieser Methode ist die Flügelnase der Airbus A-340 und A-380 [9] (Abb. 2.8). Sie wird von Stork Fokker AESP gefertigt.

2.5.4 Induktionsschweissmethoden

Elektrisch leitende Elemente werden in den Thermoplast eingebracht und mit einem hochfrequenten elektromagnetischen Feld einer Spule über Induktion aufgeheizt. Je nach den magnetischen Eigenschaften des eingebrachten Materials wird Hitze erzeugt über Wirbelströme und Hysterese [35]. Nicht magnetische Materialien werden nur über Wirbelströme erhitzt [35]. Die Frequenzen liegen bei 3 -14 MHz [36].

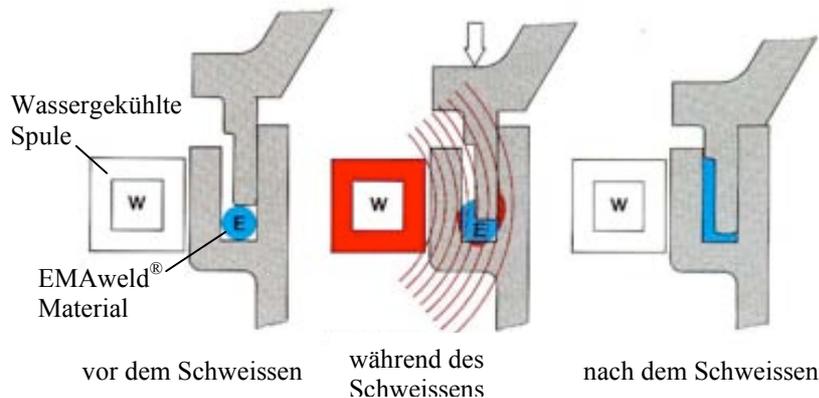


Abb. 2.9 Typische Verschweissung nach dem EMAbond[®] Verfahren [37]

Die eingebrachten Elemente können unterschiedlichste Formen aufweisen. Diese reichen von einem mit ferromagnetischen Partikeln versetzten Thermoplast, wie im EMAbond[®] (Abb. 2.9) Verfahren von Ashland Specialty Chemicals [35, 38, 39] oder einem dünnen, mit Matrixmaterial ummantelten Draht, bis zu Stiften die in der Verbindung eingesetzt werden. Ausgehend von diesen Inserts schmilzt die Matrix im Inneren der Verbindung. Diese kann später auch wieder gelöst werden durch erneutes beheizen der eingebrachten Elemente.

Tab. 2.12 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Induktionsschweissmethoden

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • schnell • keine Verschmutzung des Arbeitsplatzes • lokale Beheizung in der Verbindung • keine Gratbildung [38] • wieder lösbare Verbindung [36] • sehr komplexe Geometrien können verarbeitet werden [1, 36] 	<ul style="list-style-type: none"> • nicht uniforme Magnetfelder verursachen nicht uniforme Beheizung [7] • Kosten der eingelegten Elemente [1, 36] • Einlagen können die mechanischen Eigenschaften beeinflussen [36] • unterschiedliche Fügestellen erfordern unterschiedliche Spulen • Kohlefasern im Verbundwerkstoff können die gezielte Beheizung der Fügezone erschweren

Die verwendete Einlage sollte aus dem gleichen, oder einem kompatiblen, Thermoplast wie die Matrix der Bauteile sein. Die darin enthaltenen Zusätze müssen elektrisch leitend sein und können aus Eisen, Stahl, Ferrit oder Kohlefasern sein. Dabei wird typischerweise eine Wechselstromquelle mit einem Einstellbereich von 3 bis 14 MHz [36] und einer Leistung von 1 bis 5 kW [1] benötigt. Wegen der Überhitzungsgefahr sollten wassergekühlte Kupferspulen verwendet werden [4]. Neben der Spule und der Wechselstromquelle werden eine Pressvorrichtung mit Halterung für die Bauteile und das Einlagenmaterial benötigt.

Zu den Anwendungen welche per Induktionsschweissen verbunden werden zählen: Wasserkessel, Hochdruckwassertanks [36] und weitere geschlossene Behälter, insbesondere auch für die Anwendung in Automobilen [40].

2.5.5 Dielektrisch / Hochfrequenzschweissen

Ein polarisierbares Polymer wird erhitzt durch die hochfrequente Änderung der Polarität in einem elektrischen Feld. Beim Umschalten der Polarität wird ein Teil der Feldenergie in Wärme umgewandelt. Diese Methode funktioniert gut bei Materialien mit hohem dielektrischem Verlustfaktor, wie etwa PVC, PU und PA [4]. PE, PP und PS sind weniger geeignet da sie nur einen geringen dielektrischen Verlustfaktor aufweisen.

$$E = U/d \quad \text{Gl. 2.1}$$

Wie aus Gl. 2.1 ersichtlich, ist die elektrische Feldstärke E grösser bei geringerer Materialstärke d und gleicher Spannung U . Daher ist es erforderlich eine konstante Materialdicke in der Fugestelle zu haben. Die Erwärmung funktioniert zudem besser bei geringeren Abstand der Elektroden aufgrund der grösseren Feldstärke.

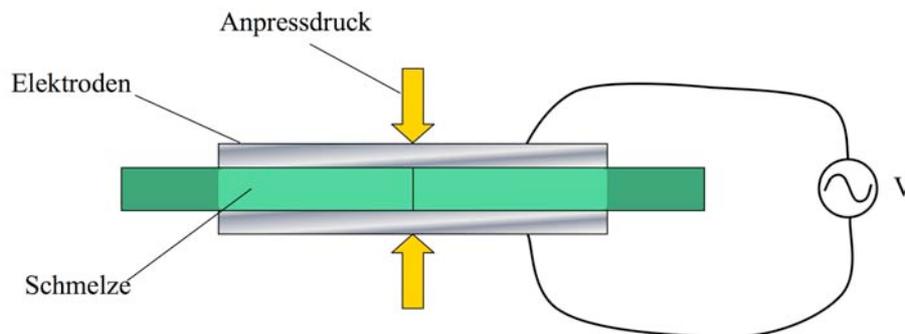


Abb. 2.10 Schematische Darstellung vom dielektrischen Schweißen

Typische Frequenzen liegen im Bereich von 13-120 MHz [1]. Durch Einlegen einer Schicht eines Polymers mit hohem dielektrischen Verlustfaktor (z.B. PAN [13]) in die Fuge kann diese verflüssigt werden bevor die zu fügenden Teile an der Grenze schmelzen [4]. So kann die Beheizung besser auf den Übergang alleine beschränkt werden.

Die benötigten Werkzeuge sind: eine Wechselspannungsquelle eine Presse und das Kontaktierungswerkzeug [13]. Angewendet wird dieses Verfahren vielerorts wo dünne PVC- und Vinylfolien verschweisst werden müssen: Verpackungsbeutel, Blister-Packs, Kleider, aufblasbares Spielzeug, Schwimmwesten, Blutkonservenbeutel usw. [13].

Tab. 2.13 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe mittels Dielektrischem- / HF-Schweissen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • keine Zusatzstoffe und Einlagen • geringe Kontaminierung [13] • automatisierbar • Luftdichte Verschweissungen [13] 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhitzung nicht auf die Grenzschicht beschränkt [4] • nicht für alle Polymere geeignet, hoher dielektrischer Verlustfaktor wird benötigt [1, 4] • auf geringe Materialstärken beschränkt [4] • Schweissen von Karbonfaserverstärkten Thermoplasten problematisch, da nur schwache elektrische Felder eingesetzt werden können [4]

2.5.6 Mikrowellenschweissen

Eine dünne Schicht von polarem, elektrisch leitenden Material wird in die Fuge gelegt [4, 13]. Typischerweise wird Polyanilin dotiert mit HCl verwendet [13, 41]. Die beiden Seiten werden zusammengespreßt und mit Mikrowellenstrahlen wird das eingebrachte Material erhitzt und dadurch angrenzende Thermoplast geschmolzen. Die wirkenden Mechanismen sind Wirbelströme, Hysterese oder dielektrischer Verlust. Die üblichen Frequenzen liegen je nach verwendetem Material zwischen 1 und 100 GHz [2].

Tab. 2.14 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Mikrowellenschweissen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • sauber [4] • schnell, <1 min [4, 41] • gute Nahtqualität • Polymere mit tiefen und mittleren dielektrischen Verlustfaktor können mit fokussierten Mikrowellenstrahlen auch ohne Einlage geschweisst werden [4] • Einlage kann soweit erhitzt werden, dass es sich verflüchtigt • wieder lösbare Verbindung [13] • gleichzeitiges Schweissen mehrerer Stellen [13] 	<ul style="list-style-type: none"> • Kohlefasern schirmen die Mikrowellenstrahlen ab [2], sie absorbieren und reflektieren sie in den äusseren Schichten • Behälter wird benötigt um die Fügezone, der die Mikrowellenstrahlen gegen aussen abschirmt • hoher Energiebedarf [2] • Einlagen Verbrauchsmaterial • Polymere mit polaren Gruppen werden sehr schnell heiss und können degradieren [13]

Dieses Schweißverfahren ist zurzeit noch nicht sehr verbreitet. Eine einfache Konfiguration würde lediglich einen Mikrowellenofen mit einer Schweißfrequenz von 2.45 GHz und einer Leistung von etwa 3 kW benötigen [13], sowie eine Vorrichtung mit der Druck auf die Verbindung ausgeübt werden kann.

2.6 Reibungsschweißmethoden

Bei den Reibungsschweißmethoden wird die Wärme über Reibung in der Verbindungsstelle erzeugt. Diese Methoden sind generell sehr schnell und die Wärme wird lokal in der Berührungsfläche generiert. Oft müssen geometrische Einschränkungen überwunden werden durch die Gestaltung der Verbindungsgeometrien.

2.6.1 Ultraschall

Beim Ultraschallschweißen werden die beiden Teile mit Ultraschallvibrationen senkrecht oder parallel (eher selten) zur Fügeebene Verbunden. Eine mechanische Schwingung wird piezoelektrisch oder magnetostruktiv erzeugt im Konverter (siehe Abb. 2.11). Die Amplitude der Schwingung wird verstärkt und über die Sonotrode im Werkstück eingeleitet. Je nach Material welches verschweisst wird, muss die Sonotrode näher an der Fügefläche angesetzt werden. Einige Thermoplaste Dämpfen die mechanischen Schwingungen über eine grössere Distanz. Man spricht bei einem Abstand von Sonotrode zur Fügefläche unter 6 mm von Nahfeld- und darüber von Fernfeld-Schweißen.

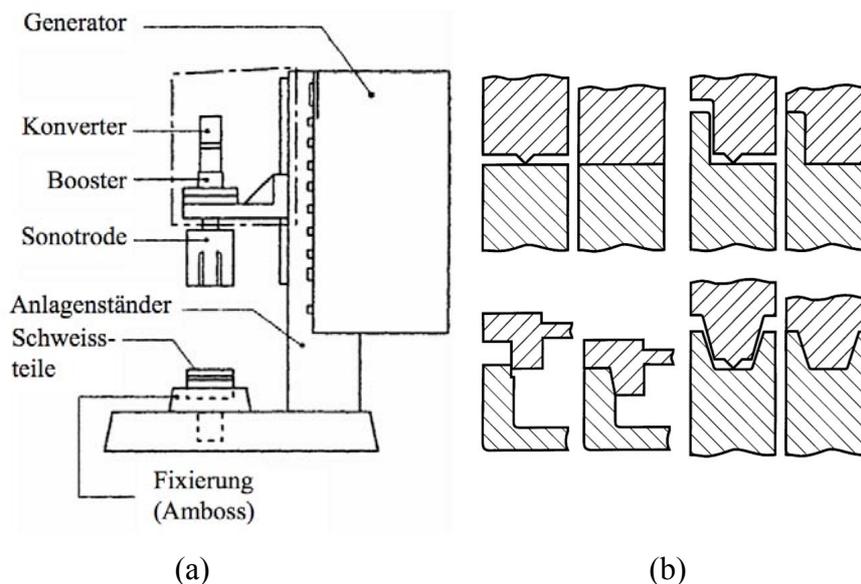


Abb. 2.11 (a) Aufbau einer Ultraschallschweißanlage, angepasst aus dem *Plastics Joining Handbook* [13], (b) Auswahl von Energierichtungsgeberformen [7]

Die beiden Werkstücke werden wie zwischen Hammer und Amboss zusammengedrückt. Eine speziell gestaltete Verbindungsgeometrie wird benötigt um die mechanischen Schwingungen an einigen Stellen zu konzentrieren. Die so genannten

Energierichtungsgeber (Abb. 2.11 (b)) beginnen von der Spitze her zu schmelzen aufgrund von innerer Reibung und verteilen sich in der gesamten Fügefläche. Anstelle von „Energy Directors“ können auch speziell geformte Sonotroden eingesetzt werden um die Vibrationsenergie zu bündeln. Damit werden punktförmige Schweissungen gemacht oder Niete (Thermoplast oder Metall) befestigt.

Der Schweissvorgang kann in vier Phasen eingeteilt werden, dargestellt in Abb. 2.12. Um eine reproduzierbare und gute Nahtqualität zu erreichen ist es wichtig die stationäre Schmelzphase zu erreichen.

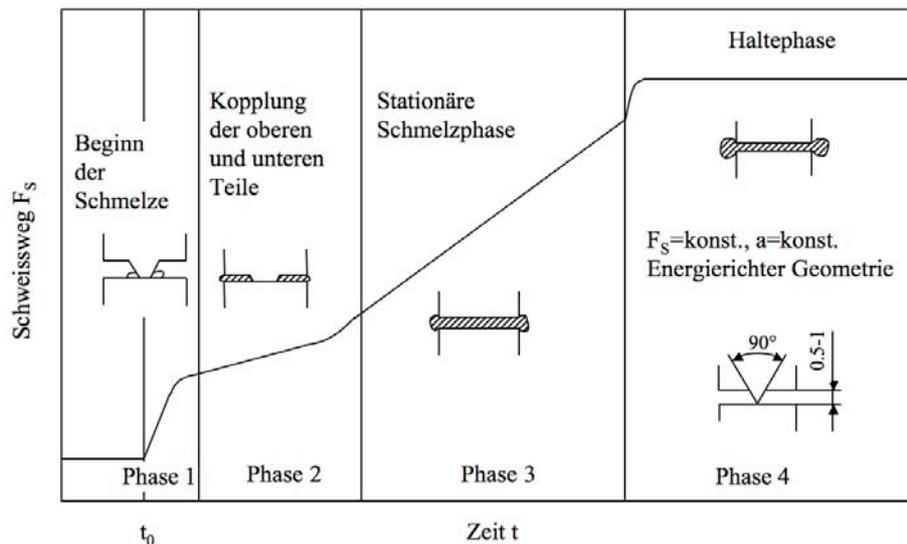


Abb. 2.12 Schweissvorgang beim Ultraschallschweißen, Abbildung nach [13]

Tab. 2.15 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Ultraschallschweißen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • sehr schnell, typischerweise in der Größenordnung einer Sekunde [15, 42] • Hitze wird an der Grenzschicht selbst erzeugt • geringe Verschmutzung des Arbeitsplatzes • geringe Gratbildung [15] • hohe Festigkeit und Dichte [25] • gut geeignet für hohe Stückzahlen, da einfach automatisierbar • kann auch für lange Schweissnähte eingesetzt werden, „sequential US welding“ und screening [4] 	<ul style="list-style-type: none"> • Anbringung von Energierichtungsgebern erschwert bei flächigen Halbzeugen [7] • Schädigung von Verstärkungsfasern und der umgebenden Matrix können auftreten • nicht alle Thermoplaste sind geeignet [42] • Grösse der Fügefläche welche gleichzeitig bearbeitet werden kann, wird durch die Grösse und Leistung der Maschine begrenzt [4] • generell eher für kleine Schweissbereiche geeignet

Ultraschallschweißen ist heute wahrscheinlich die am meisten verbreitete Schweißmethode bei unverstärkten Thermoplasten [15]. Sie wird eingesetzt für kleine Formteile und zum Einbetten von Metallinserts bei Automobilteilen, Floppy-Discs und Batteriegehäuse. Grosses Potential besteht für den Einsatz beim Punktschweißen. Für das Schweißen eines Profils ist diese Methode eher nicht geeignet, da die Fügefläche auf einer Ebene liegen muss, welche parallel zur Sonotrodenkontaktfläche ist.

2.6.2 Vibrationsschweißen

Die zwei zu fügenden Teile werden zusammengedrückt und eines der beiden wird mit kleinen, oszillierenden Bewegungen parallel zur Fügeebene auf dem anderen gerieben. Diese Bewegungen können linear oder auch kreisförmig sein. Die Frequenzen liegen für gewöhnlich im Bereich von 80 - 300 Hz und die Amplituden bei 0.25 – 2.5 mm [43].

Typischerweise besteht der Schweißprozess aus vier Schritten [4, 43] und der Ablauf ist ganz ähnlich wie beim Ultraschallschweißen (siehe Abb. 2.12).

1. Feststoffreibung
2. Instationäre Bildung der Schmelze, viskose Reibung
3. Stationärer Fluss der Schmelze
4. Ausschwingen und Abkühlen

Ausschlaggebend für eine gute und reproduzierbare Nahtqualität ist das Erreichen der stationären Fliessphase.

Tab. 2.16 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Vibrationsschweißen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • sehr schnell, 2 – 15s, bei verstärkten Thermoplasten noch schneller [4] • Hitze wird an der Grenzschicht selbst erzeugt • hohe Festigkeit und Dichte [25] • mehrere Komponenten können gleichzeitig verbunden werden • geeignet für mittlere und kleine Teile • fast für alle Thermoplaste geeignet • einfache Prozessregelung durch Messung des Schweißwegs [4, 13, 42] 	<ul style="list-style-type: none"> • oberflächliche Zerstörung der Fasern möglich [7] • Schweißnähte müssen min. eine lineare Bewegung erlauben (Vibrations-richtung) [1] • Maschinen mit breiten Einstellbereichen für Amplitude, Frequenz und guter Druckregelung sind teuer [4]

Eine Schweissanlage ist in Abb. 2.13 abgebildet und besteht im Wesentlichen aus zwei Halterungen, wovon die obere an Federn aufgehängt ist und in Schwingung versetzt werden kann. Der Tisch wird für das Schweißen nach oben gefahren und die beiden Teile zusammengepresst. Geregelt wird der Prozess über den gemessenen Schweißweg.

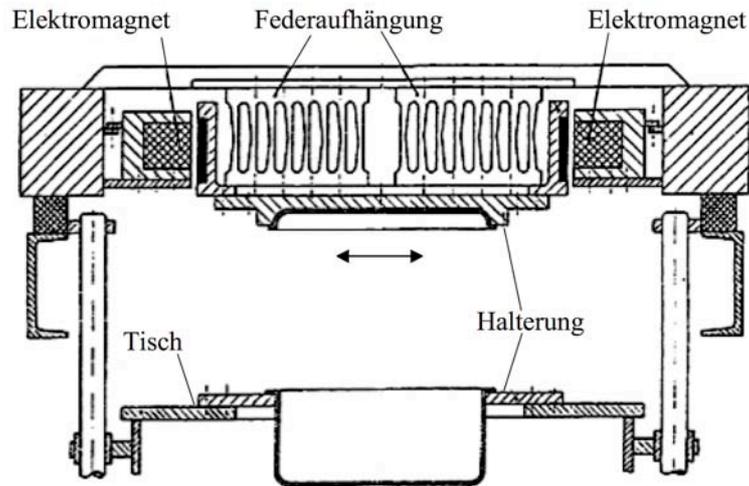


Abb. 2.13 Vibrationsschweißanlage, angepasst aus dem Plastics Joining Handbook [13]

Diese Methode wird in der Automobilindustrie (Scheinwerfer Baugruppen, Stossstangen, Tankklappen, Spoiler, Armaturenbrett...) und bei der Herstellung von Haushaltsgeräten eingesetzt [1, 4, 15, 43].

2.6.3 Rotationsschweissen / Spin Welding

Rotationssymmetrische Verbindungen können gefügt werden, wenn einer der beiden Fügepartner rotiert wird, bei gleichzeitigem Zusammenpressen der beiden Teile.

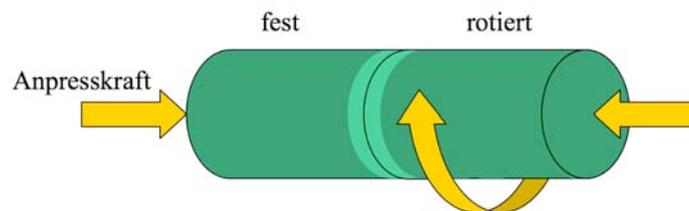


Abb. 2.14 Prinzipskizze Rotationsschweissen

Tab. 2.17 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe mittels Rotationsschweissen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> hohe Schweißqualität werden reproduzierbar [4] einfacher Prozess [1] Erwärmung in Grenzschicht schnell, bei optimaler Einstellung der Parameter (Druck, Zeit und Rotationsgeschwindigkeit) [4] 	<ul style="list-style-type: none"> Einschränkungen bezüglich der Geometrie: annähernd kreisförmige Fügestellen [1] und Rotationsfreiheit nicht uniforme Wärmeverteilung in Vollquerschnitten, woraus Eigenspannungen resultieren [4] Reorganisation der Fasern in der Schweißnaht

Bei nicht kreisförmigen Querschnitten oder wenn die Bewegungsfreiheit eingeschränkt ist kann oszillierend geschweisst werden (siehe Kapitel 2.6.2 Vibrationsschweißen). Die Methode ist geeignet für dünnwandige, kreisförmige Querschnitte aus unverstärkten und durch Zusätze verstärkten Thermoplasten. Diese Methode wird in erster Linie eingesetzt um Rohrstücke zu verbinden. Eine weitere Anwendung beinhaltet das Schliessen von dichten, runden Behältern, z.B. einem wassergefüllten Kompass [4].

2.6.4 Reib-Rührschweißen – Friction Stir Welding

Dieses Verfahren wurde am TWI (The Welding Institute) in Cambridge erfunden und 1991 Patentiert. Es wird erfolgreich eingesetzt beim stumpfen Verschweißen von Aluminium. Andere Metalle und thermoplastische Polymere kamen später dazu [4, 44]. Es wird dabei ein profilierter Stift (HP oder Head-Pin in Abb. 2.15) in der Fugebene rotiert und entlang der Fuge fortbewegt. Das Material wird durch die Reibung erhitzt, erweicht und hinter dem Stift ausgekühlt, was zu einer Verbindung führt.

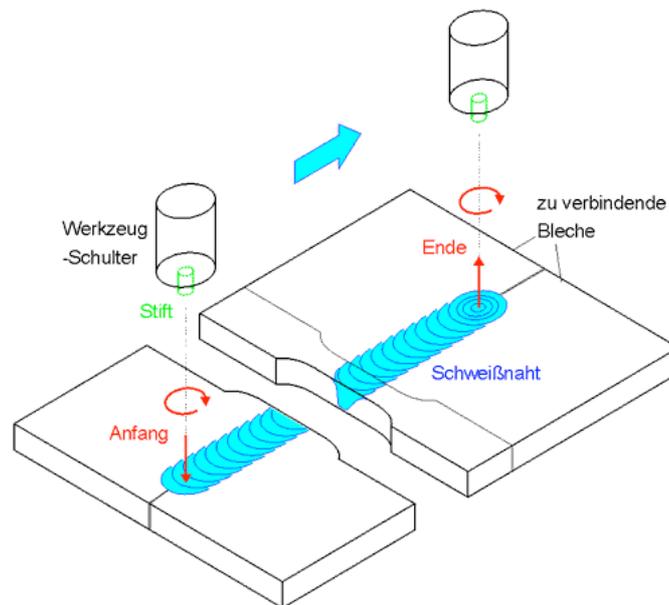


Abb. 2.15 Schematische Darstellung vom Reib-Rührschweißen [45]

Tab. 2.18 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe mittels Reib-Rührschweißen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hitze in der Fuge erzeugt • gleichzeitiges schweißen über die Dicke • geringer Energieverbrauch [45] • einfache Nahtvorbereitung [45] • Bearbeitung unterhalb T_s [46] • automatisierbar [45] 	<ul style="list-style-type: none"> • wenig ausgereifte Technik für verstärkte Thermoplaste • beschränkte Fugengestaltung • eher langsam [46]

Ein Potential besteht für das Schweißen von mit Partikeln und Kurzfasern verstärkten Thermoplasten. Bei Verbunden mit Endlosfasern könnte diese Methode in der Verbindungszone zum Bruch der Fasern und damit in diesem Bereich zu einem kurzfaserverstärkten Verbund führen. Dies müsste aber noch untersucht werden [4]. Die Methode ist geeignet für Stumpf- und L-Verbindungen. Ein grosses Entwicklungspotential wird dieser Schweissmethode zugeschrieben [4].

Eine Reib-Rührmaschine könnte sehr ähnlich aussehen wie eine konventionelle Fräsmaschine. Anstelle eines Fräsers würde ein solcher Rührreibaufsatz zum Einsatz kommen.

2.7 Weitere Methoden

Einige Verbindungsmethoden passen nicht in die oben genannte Einteilung, da sie entweder da sie auf einem anderen Prinzip beruhen oder selbst eine Kombination mehrerer Methoden sind.

2.7.1 Nähen

Das Vernähen von Thermoplast Composite Teilen stellt eine ganz andere Art der Verbindung dar, die am ehesten mit Fügen durch Mechanische Verbindungselemente verwandt ist. Die einzelnen Prepreglagen können genäht werden um die Lagen aneinander zu fixieren. Mit beheizten Nadeln kann auch das konsolidierte Bauteil in Dickenrichtung durch zusätzliche Fasern verstärkt werden.

Tab. 2.19 Vor- und Nachteile beim Fügen thermoplastischer Verbundwerkstoffe durch Nähen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Randdelaminationen können reduziert werden [47] • interlaminare Verstärkung [47, 48] • Rissöffnungswiderstand (Delamination) [47, 49] • Restfestigkeit der Naht nach Delaminationen, vorausgesetzt die Naht ist noch intakt • Preform behält Faserarchitektur bei, erleichterte Handhabung [47] • automatisierbar [47] • kombinierbar mit anderen Fügemethoden 	<ul style="list-style-type: none"> • Verletzung der Fasern insb. bei hoher Stichdichte [47, 49] • Welligkeit der Fasern durch Nadeleinstiche, Ausrichtungsabweichung [47, 49] • matrixreiche Bereiche um die Nähfasern [47, 49] • Knicken der Fasern in Oberflächenschichten durch Oberflächenschleife [47] • zusätzlicher Fertigungsschritt [47]

Nähfasern müssen biegsam sein und geringen Reibungswiderstand aufweisen damit sie beim Nähen nicht brechen [48]. Die Nadel sollte abgerundet sein um die Fasern weniger zu verletzen [47]. Nähen kann bei Thermoplastprepregs problematisch sein wegen der hohen Zähigkeit der Matrix. Der Zusammenhang der Parameter und deren Einfluss auf die Eigenschaften einer vernähten und gefügten Verbindung von überlappenden Teilen, ist noch nicht komplett verstanden [50].

Nähen kommt für das vorliegende Problem als eigenständige Fügemethode nicht in Frage. Kombiniert mit einer Schweissmethode könnte die interlaminaire Verstärkung mit Fasern durchaus Sinn machen.

2.7.2 Insertbeheizung

Dies ist die Kombination aus Fügen mit mechanischen Verbindungselementen und einer Schweissmethode. Stifte oder andere Inserts werden in die Verbindung eingebracht, welche anschliessend über diese Elemente beheizt wird. Dies kann mittels Induktion oder Widerstand geschehen. Denkbar ist auch, dass die Inserts mittels Ultraschall [42, 51] in die Verbindung getrieben werden und die dabei entstehende Wärme zur partiellen Verschweissung führt.

Tab. 2.20 Vor- und Nachteile der Verbindung durch die Beheizung von stiftförmige Inserts

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • zusätzliche Versteifung des Laminats • Kombination von Schweißen und mechanischer Verbindungselemente 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschädigung der Fasern durch die Inserts • Welligkeit der Fasern, Ausrichtungsabweichung • matrixreiche Bereiche um die Inserts • Spannungsüberhöhungen um die Inserts • inhomogene Beheizung um die Inserts, nicht in der Grenzschicht • unterschiedliche Wärme-Ausdehnungskoeffizienten [52] • Verträglichkeit der Materialien erforderlich

Die Verbindung über Stift-Inserts ist aus den in Tab. 2.20 genannten Gründen eher ungeeignet für das Verbinden von faserverstärkten Thermoplastprofilen. Zur Verstärkung einer Verbindung in Dickenrichtung könnten sie aber eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

2.8 Bewertung

Um die ansehnliche Zahl an Fügemethoden für die experimentelle Phase auf eine Handvoll aussichtsreicher Methoden zu reduzieren, wird eine Reihe von Forderungen aufgestellt. Die Festforderungen sind Forderungen die auf jeden Fall zutreffen müssen. Unter den zulässigen Methoden werden anschliessend die besten über die Wunschforderungen ermittelt.

Tab. 2.21 Fest- und Wunschforderungen für die Bewertung der Fügemethoden

Festforderungen	Wunschforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Automatisierbarkeit • Schäftung und einschnittige Überlappung möglich • kurze Prozesszeiten • gute optische Qualität der Naht, eben • mechanische Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe geometrische Einschränkungen (Profile) • günstig bei grosser Stückzahl • wenig Vor- und Nachbearbeitung • geringe Werkstoffeinschränkungen

Bewertet werden die Wunschforderungen von 0 (schlecht) bis 3 (sehr gut). Die Gewichtungen sind abgesehen von den mechanischen Eigenschaften, welche doppelt zählen, jeweils einfach. Die komplette Bewertungstabelle ist in Anhang B zu finden.

Die viel versprechendsten Fügemethoden für das Schliessen eines Profilrings sind:

- Heizelementschweissen (Kap. 2.4.1)
- Vibrationsschweissen (Kap. 2.6.2)
- Widerstandsschweissen (Kap. 2.5.3)
- Induktionsschweissen (Kap. 2.5.4)

Keine der Methoden hebt sich deutlich von den anderen ab. Alle haben gewisse Vor- und Nachteile: Beim Heizelementschweissen oder Spiegelschweissen kann der Thermoplast am Heizelement kleben und es bildet sich ein beträchtlicher Wulst, der nachträglich entfernt werden muss. Vibrationsschweissen erfordert im linearen Fall mindestens einen Freiheitsgrad in der Verbindung für die Vibrationsbewegung. Sowohl beim Widerstandsschweissen wie, auch beim Induktionsschweissen müssen leitenden Elemente in die Verbindung eingebracht werden, die das Verschweissen erst ermöglichen.

Heizelementschweissen, Vibrationsschweissen und Induktionsschweissen sind recht verbreitete Schweissmethoden. Widerstandsschweissen hingegen wird seltener benutzt um Thermoplaste zu verbinden. Eine Internetrecherche ergab für diese Methode keinen einzigen Hersteller von Schweissanlagen und auch keine Lohnschweissbetriebe, welche dieses Verfahren anwenden. Einzig Stork Fokker AESP fertigt mit dieser Methode die Flügelnasen für den Airbus A340 und A380 [9].

2.9 Probenbestimmung für den experimentellen Teil

Im Experimentellen Teil der Arbeit werden gefügte Proben aus Plytron hergestellt nach den folgenden Methoden:

- Adhensionskleben mit einem Polyolephinkleber
- Adhensionskleben mit einem standard Epoxykleber
- Heisspressen der Verbindung
- Heizelementschweissen (Spiegelschweissen) bei der Firma KMS Schrenk
- Induktionsschweissen nach dem EMABond[®] Verfahren bei KSE Oettle
- Induktionsschweissen mit einem Drahring bei KVT Bielefeld GmbH
- Ultraschall-Grundsatzversuche bei Branson ATG

Die Klebproben dienen in diesem Vergleich mehr der Standortbestimmung bei der Beurteilung der Testergebnisse der anderen Proben und im Falle von PP nicht als ernsthafte Alternative zu den Schweissmethoden. Das Heisspressen einer Verbindung sollte in Bezug auf die Qualität der Verbindung die Referenz sein. Als Verbindungsmethode macht sie nur dann Sinn, wenn ausschliesslich die Verbindungszone gepresst wird, ansonsten könnte man das Endprodukt direkt als ganzes pressen.

Es sind keine Proben mit dem Vibrationsschweissverfahren gemacht worden, da dies ein sehr teures Werkzeug erfordert hätte. Herr Kunz (Branson ATG [42]) zufolge zeigt der Grundsatzversuch zum Ultraschallschweissen auch ob ein Werkstoff über lineare Vibrationen verbunden werden kann. Bei Werkstoffen welche per Ultraschall geschweisst werden können, wird in der Regel auch das Vibrationsschweissen funktionieren.

Verglichen werden die Proben aufgrund der erreichten Zugfestigkeit bei einschnittig überlappenden und geschäfteten Proben. Der Schäftwinkel beträgt dabei 10°. Die unidirektionale Ausrichtung der Fasern in den verwendeten Platten dient in erster Linie der besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Verbindungsgeometrien. Hinzu kommt, dass man bei der unidirektionalen Ausrichtung der Fasern die grössten Festigkeiten und Steifigkeiten in Faserrichtung hat. Die Eigenschaften der verbundenen Proben werden aus diesem Grund auch mit denen von durchgehenden UD-Proben verglichen.

Bei den einschnittig überlappenden Proben wird ebenfalls die Zugscherfestigkeit untersucht, bezogen auf die effektiv verbundene Fläche. Die Ergebnisse dienen der Einschätzung der potentiellen Festigkeit der jeweiligen Verbindungsmethode.

Die Herstellung der Proben wird in Kapitel 4 beschrieben. Die Ergebnisse der Zugprüfungen und der mikrofotografischen Untersuchung sind in Kapitel 7 zu finden.

3 Verbindungsgestaltung

3.1 Verbindungsgeometrien

Die Gestaltung der Verbindungsgeometrie hat wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung. Daher werden neben den Fügemethoden auch unterschiedliche Verbindungsgeometrien miteinander verglichen in Bezug auf ihre Zugfestigkeit und wie gut diese an einem Profil umgesetzt werden können.

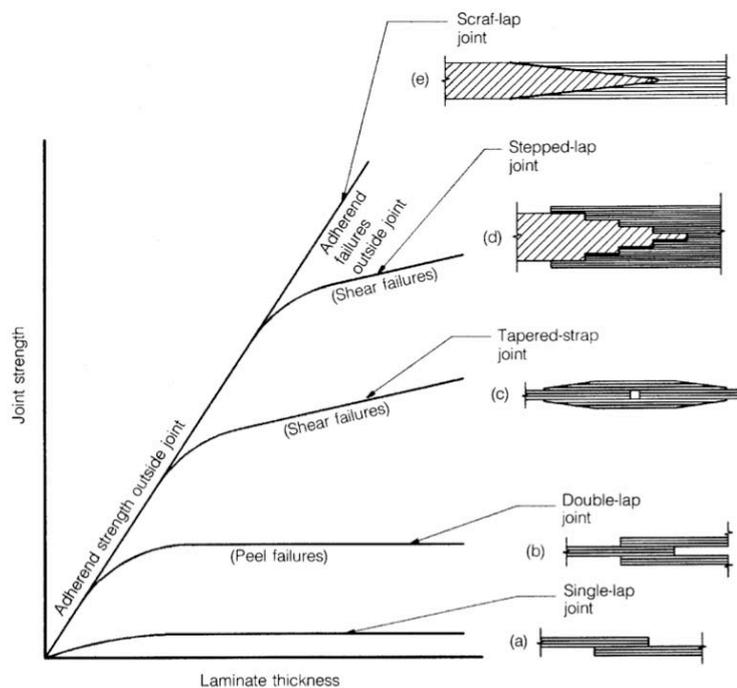


Abb. 3.1 Festigkeiten unterschiedlicher Verbindungsgeometrien für Klebeverbindungen [53]

Bei ebenen Klebeverbindungen erzielen zweiseitig geschäftete und zweiseitig mehrfach gestufte Verbindungen die höchsten Festigkeiten, insbesondere bei dickeren Materialien (siehe Abb. 3.1). Ziel hierbei ist es, eine genügend grosse Klebefläche zu erreichen und bei der Gestaltung Spannungsspitzen möglichst zu vermeiden.

Gegenüber den angesprochenen Gestaltungen der Verbindungszone über die Dicke des Laminats bietet die Verbindungsgestaltung senkrecht zur Materialebene (Abb. 3.2) gewisse Vorteile für die Bearbeitung nach einem Press- oder Umformschritt. Dies gilt insbesondere, wenn es darum geht ein komplexes Profil zu bearbeiten. In Frage kommen dafür: Stanzen, Sägen, Laser- oder Wasserstrahlschneiden (Kap. 3.2). Solche Gestaltungen von Verbindungen sind in der Holzverarbeitung weit verbreitet, insbesondere bei Eckverbindungen, können aber grundsätzlich auch für Längsverbindungen eingesetzt werden (Anhang C).

Bei Verschweissungen von Faserverbundwerkstoffen hängt die Festigkeit nicht direkt von der Verbindungsfläche ab [54]. Wichtig ist insbesondere auch die Lage der Fasern bezüglich der Verbindung. Eine gute Festigkeit wird erreicht wenn möglichst viele Fasern der beiden Teile überlappen. So können die Zugkräfte der Fasern des einen

Bauteils über die Matrix in gleich ausgerichtete Fasern des anderen Bauteils am direktesten über eine Schubbelastung der Matrix übertragen werden. Sollbruchstellen sollten vermieden werden, welche dadurch entstehen können, dass ein grosser Teil der Fasern an derselben Stelle endet. Dies ist der Fall, wenn in der Verbindung zum Beispiel gleichmässige, ineinander greifende Finger benutzt werden (vergleiche schmale Finger und breite Finger Abb. 3.3). Bei UD Proben wo die Fasern in Längsrichtung ausgerichtet sind, enden jeweils die Hälfte aller Fasern zusammen an den Enden der Finger. Dies ist allerdings auch bei einer einfach gestuften Verbindung der Fall.

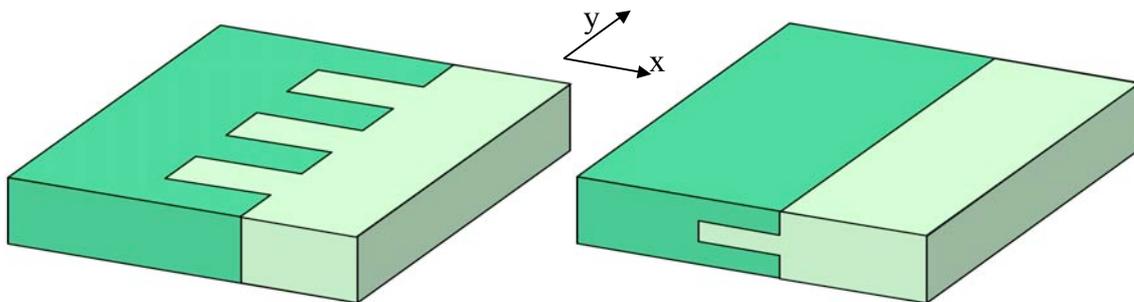


Abb. 3.2 Gestaltung der Verbindungsgeometrie in der Ebene (links) und über die Dicke (rechts)

Dem entgegenwirken kann man durch das Versetzen der Finger oder mit Zacken (Abb. 3.3, für genaue Geometrie siehe Anhang F). Bei der Zackengeometrie sind die Faserenden gleichmässige über die Verbindungslänge verteilt, ebenso wie bei einer geschäfteten Verbindung. Dafür liegen hier die Fasern nicht mehr parallel zur Verbindung. Je nach Winkel der Schäftung bzw. der Zackenflanken ist die Überlappungslänge von benachbarten Fasern und die gesamte Fügefläche unterschiedlich gross. Ein flacher Winkel bewirkt eine stärkere Überlappung, womit die Scherbelastung der Matrix auf einen grösseren Bereich verteilt wird.

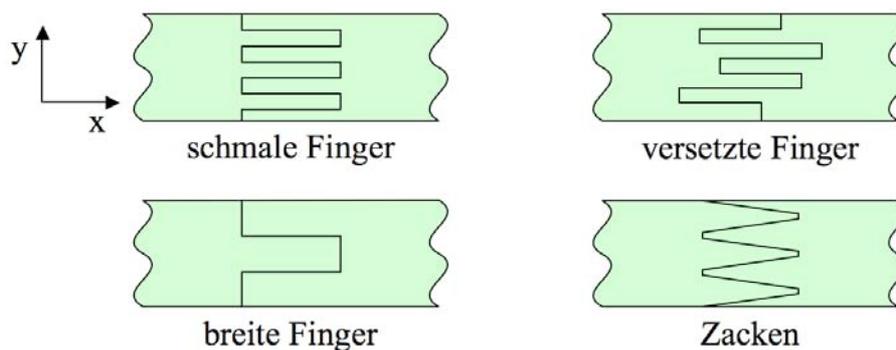


Abb. 3.3 Zur Laminebene senkrechte Verbindungsgeometrien welche im Vergleich der Verbindungsgeometrien untersucht wurden

Um noch mehr Faserüberschneidungen zu erreichen könnte man jede Lage des Laminats überlappen lassen. Im vorliegenden Fall, wo ein kontinuierlicher Strang konsolidiert werden soll, müssten diese Lagen lokal wieder aufgetrennt werden können. Am ehesten geht dies, indem entfernbare Einlagen zwischen den Prepreglagen platziert werden vor der Konsolidierung und Umformung (Kap. 7.3). Grafiken möglicher Geometrien sind in Anhang C zu finden. Ein Beispiel wie dies bewerkstelligt werden könnte ist in Kap. 7.3 beschrieben.

Um unterschiedliche Verbindungsgeometrien am ehesten vergleichen zu können, sollten die Fügeflächen und die Länge der Verbindungszone möglichst gleich gross sein. Durch die Variation der Seitenverhältnisse (etwa Länge zu Breite der Zacken) oder Grösse einer Geometrie könnte diese optimiert werden jeweils. Das wird aber aus Zeitgründen in dieser Diplomarbeit nicht untersucht.

Die Verbindungen, die im Rahmen dieser Diplomarbeit experimentell verglichen werden sind die vier in Abb. 3.3 gezeigten sowie eine stumpfe, eine einschnittig überlappende und eine geschäftete Verbindung. Mit Ausnahme der Stumpfschweissung und der Verbindung mit breiteren Fingern sind die Fügeflächen gleich gross gewählt. Die Verwendeten Proben sind, ebenso wie beim Vergleich der Fügemethoden, 20 mm breite UD-Balken aus Plytron. Diese werden alle in der Heisspresse verbunden.

3.2 Bearbeitung der Verbindungsgeometrie

Wesentliche Punkte bei der Wahl der Verbindungsgeometrie sind die damit erreichbaren mechanischen Eigenschaften, die Kompatibilität mit der Fügemethode und wie diese Geometrie hergestellt werden kann. Die verbreiteten Methoden mit denen Thermoplastverbunde bearbeitet werden sind in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Dieser Teilschritt könnte auch eingespart werden, wenn die Verbindungsgeometrie direkt beim Pressen geformt werden kann. Im vorliegenden Prozess ist dies allerdings problematisch, da ein kontinuierlicher Strang geformt wird und die Zerteilung erst nach der Umformung vorgesehen ist.

3.2.1 Wasserstrahlschneiden

Beim Wasserstrahlschneiden wird Wasser, mit oder ohne Abrasivmittelzusätzen, unter hohem Druck (bis 4000 Bar [55, 56]) durch eine sehr kleine Saphirdüse, mit einer Geschwindigkeiten von etwa 1000 m/s, auf das zu schneidende Material geschossen. Es können damit fast alle Materialien bis zu einer gewissen Dicke geschnitten werden. Mit steigender Schnitttiefe wird die Präzision geringer wegen der Störung des Strahls durch das geschnittene Material. Es gibt CNC gesteuerte 3D Schneideroboter (Abb. 3.4) mit denen sehr vielfältige Formen geschnitten werden können [57].



Abb. 3.4 Wasserstrahlroboter mit 3 Freiheitsgraden für die computergesteuerte Durchführung von komplexen Schnitten [55]

Tab. 3.1 Vor- und Nachteile vom Wasserstrahlschneiden, Vorteile nach [55, 57, 58]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• keine Dämpfe, keine Staub oder Rauchentwicklung• kein Nachschärfen des Werkzeugs• hohe Schnittgeschwindigkeiten• hohe Schneidgenauigkeit• hohe Oberflächenqualität• optimale Materialausnutzung• geringe Schnittkräfte• keine thermische Belastung• keine Gefügeveränderungen• geringe Schnittfugenbreite• geringer Grat an der Schnittkanten• kaum Nachbearbeitung• omnidirektional, daher hohe Flexibilität• umweltschonend (Wasserkreislauf)	<ul style="list-style-type: none">• hohe Geräusentwicklung• Feuchtigkeit und Nässe

3.2.2 Laserschneiden

Beim Laserschneiden wird mit einem hochenergetischen Laser das Material in der Schnittfuge über die Zersetzungstemperatur erhitzt und verdampft. Das Ergebnis ist umso besser je geringer die Differenz zwischen Schmelztemperatur und Zersetzungstemperatur des zu schneidenden Materials ist [59].

Tab. 3.2 Vor- und Nachteile beim Laserschneiden von thermoplastischen Verbundwerkstoffen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • kein Nachschärfen des Werkzeugs • hohe Schnittgeschwindigkeiten • hohe Schneidgenauigkeit • optimale Materialausnutzung • geringe Schnittkräfte • geringe Schnittfugenbreite • geringer Grat an der Schnittkanten • kaum Nachbearbeitung • hohe Flexibilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Dämpfe und Rauchentwicklung • eher weniger geeignet bei Kohlenstofffasern [59] • geringer Wirkungsgrad (CO₂-Laser 10%) [58] • keine senkrechte Schnittkante [52]

3.2.3 Schneiden mit einer Klinge

Das Schneiden mit einer oder mehrerer Klingen wird in erster Linie eingesetzt beim zuschneiden dünner Halbzeuge. Dabei kann die Klinge auf unterschiedliche Weise benutzt werden um das Material zu trennen: Scherschneiden (Schere, Stanzen) und Messerschneiden [56].

Tab. 3.3 Vor- und Nachteile beim Schneiden von thermoplastischen Verbundwerkstoffen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • hohe Schnittgeschwindigkeiten • optimale Materialausnutzung • geringe Schnittfugenbreite 	<ul style="list-style-type: none"> • Abnutzung der Werkzeuge • hohe Schnittkräfte • begrenzte Materialstärke

3.2.4 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden

Zu den spanenden Bearbeitungsformen mit geometrisch bestimmten Schneiden zählen Sägen, Fräsen, Bohren, Drehen, Räumen, Schleifen usw. [56]. Für die Bearbeitung der Verbindungsgeometrien kommen Sägen und Fräsen in Frage. Einfache Schnitte, z.B. um Stangenmaterial abzulängen, können mit einer Säge durchgeführt werden. Die Komplexität der Verbindung ist dabei eingeschränkt und die resultierende Bearbeitungskante nicht sehr sauber. Zudem wird das Sägeblatt abgenutzt und es entsteht Staub und Wärme. Durch Fräsen können sehr viel komplexere Geometrien realisiert werden.

Tab. 3.4 Vor- und Nachteile beim Fräsen von thermoplastischen Verbundwerkstoffen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • hohe Genauigkeiten • komplexe Geometrien 	<ul style="list-style-type: none"> • Abnutzung der Werkzeuge • spezielle Fräser notwendig bei FWV • thermische Belastung • mässige Schnittgeschwindigkeiten • keine optimale Materialausnutzung • hohe Schnittkräfte • Schnittfugenbreite eher grösser und abhängig vom Werkzeug

3.2.5 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden

Verfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden sind: Schleifen, Läppen, Honen, Schmirgeln usw. [56]. Bei Thermoplasten ist die teilweise sehr starke Wärmeentwicklung und das damit verbundene Schmelzen des Werkstoffs ein grosser Nachteil.

Tab. 3.5 Vor- und Nachteile beim schleifen von thermoplastischen Verbundwerkstoffe

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • komplexe Geometrien 	<ul style="list-style-type: none"> • Abnutzung der Werkzeuge • Thermoplaste schmelzen • thermische Belastung • mässige Bearbeitungs-Geschwindigkeiten • Schnittfugenbreite eher grösser und abhängig vom Werkzeug

3.2.6 Eignung der Schneidverfahren

Für das Schneiden von sehr präzisen Verbindungsgeometrien in der Ebene kommen von diesen Verfahren nur das Laser- und Wasserstrahlschneiden in Frage. Falls eine Finger- oder Zackengeometrie nicht so präzise geschnitten werden muss oder die Geometrien relativ gross sind, kann auch eine Reihe von parallelen Sägeblättern verwendet werden.

Das Fräsen könnte eingesetzt werden für das Bearbeiten von flachen Schäftungen und gestuften Verbindungsgeometrien. Eine dünnwandige Struktur müsste wegen der relativ hohen Schnittkräfte von der anderen Seite her gestützt werden, um eine präzise Schnittführung zu ermöglichen.

Das Schleifen ist bei Thermoplasten aufgrund der Wärmeentwicklung allgemeinen nicht sehr geeignet, ausser der Werkstoff wird ausreichend stark abgekühlt.

4 Probenherstellung

4.1 Herstellung der Plytron Probenrohlinge

Die Plytron Probenrohlinge werden am Zentrum für Strukturtechnologien und in der MAVT-Profi Werkstatt angefertigt. Ausgangsmaterial ist Plytron ein Prepreg mit einer pigmentierten PP Matrix und unidirektional eingelagerten Glasfasern. Die Form der Rohmaterialien ist in Tab. 4.1 aufgelistet und das bandförmige Halbzeug ist in Abb. 4.1 abgebildet.

Tab. 4.1 Verwendete Plytron Prepreg Formen

Material	Dicke	Breite	Länge
Plytron Band 50 mm	ca. 0.5 mm	50 mm	Endlosrolle
Plytron Blätter	0.27 mm	250 mm	300 mm

Die Prepregs werden in einer Heisspresse zu UD-Platten verpresst und an einer Nasskreissäge in drei Stücke geteilt. Diese werden anschliessend spanend bearbeitet um die gewünschte Verbindungsgeometrie der Probenrohlinge zu erhalten. Ein Teil der Rohlinge kann intern gefügt werden, der andere Teil wird extern gemacht. Die gefügten Probenrohlinge werden vor deren Prüfung wiederum an der Nasskreissäge in schmalere Stücke zerteilt. Für die Mikrographie werden ebenfalls relevante Proben entnommen.



Abb. 4.1 Bandförmiges Plytron Halbzeug und Schere

4.1.1 Zugprobengeometrie

Die Grösse welche am Ende interessant ist, ist die Zugfestigkeit der gefügten Proben. Mit diesem Wert kann die Leistung der Verbindung, bezogen auf diejenige des durchgehenden Materials beurteilt werden. Da die Belastung der Verbindung zwischen den Fasern der beiden Fügepartner im Wesentlichen eine Scherbelastung ist, werden die Fügemethoden untereinander aufgrund ihrer Zugscherfestigkeit verglichen.

Bei der Zugscherprüfung werden einschnittig überlappende Proben getestet (Abb. 4.2). Die Klebe- bzw. Schweissfläche wird dabei einer reinen Scherbelastung unterworfen und die gemessene Zugscherfestigkeit entspricht der Bruchkraft pro Fügeflächeneinheit. Um die Geometrie der Proben zu bestimmen wurden entsprechende Normen gesucht. Es stellte sich heraus, dass dies gar nicht so einfach ist. Es gibt eine Vielzahl von Normen für ähnliche Problemstellungen.

ISO-Norm 527-5 (Tab. 4.2) beschreibt ein Vorgehen zur Ermittlung der Zugseigenschaften von unidirektional faserverstärkten Kunststoffen. DIN EN 2243 beschreibt das Vorgehen beim Testen von strukturellen Klebstoffen bei Aluminiumlegierungen. Ebenfalls für hochfeste Klebungen an Aluminium und Werkstoffen mit höheren E-Modulen ist DIN EN 1465. DIN EN 6060 ist ein Entwurf einer Norm aus dem Jahr 1996 für ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittigen überlappenden Klebungen und Zugversuche bei Faserverstärkten Kunststoffen. Die letztgenannte Norm entspricht der Problemstellung dieser Diplomarbeit am besten.

Tab. 4.2 Aufstellung von Probengeometrien in ausgewählten Normen

Norm	Breite	Proben- dicke	Gesamt- länge	Überlap- länge	Spaltbreite
ISO 527-5	15 ±0.5	1 ±0.2	250	-	-
DIN EN 2243	25 ±0.5	6 ±0.1	170	5 ±0.1	1.75 ±0.25
DIN EN 1465	25 ±0.25	1.6 ±0.1	187.5	12.5 ±0.25	-
DIN EN 6060 (Entwurf)	25 ±0.5	≅2	≅200	12.5 ±0.25	1.6 ±0.1

Die Masse der Proben in den entsprechenden Normen sind oft ähnlich. Es sollten jeweils pro Serie mindestens 5 Proben getestet werden. Dabei muss die ursprüngliche Lage der Probe in der Platte aus der sie geschnitten wurden ersichtlich sein. Aufgrund der Abmessungen des Presswerkzeugs (320 x 130) wurde die in Abb. 4.2 gezeigte Probengeometrie für die einschnittig überlappenden Proben gewählt. Das Nummerierungssystem ist in Abb. 4.3 schematisch dargestellt.

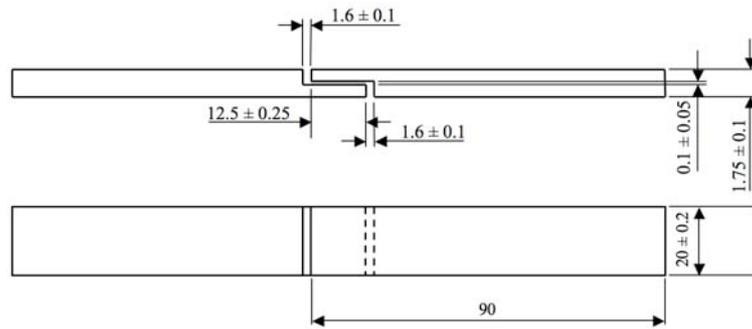


Abb. 4.2 Probenmasse einschnittige Verbindung

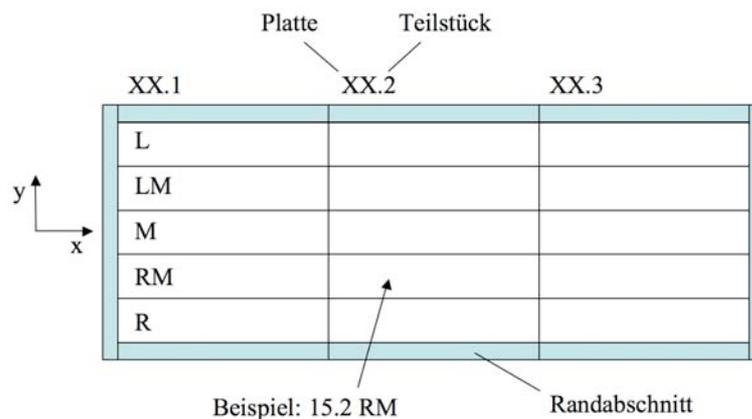


Abb. 4.3 Nummerierungsschema für Proben

Neben den einschnittigen Proben werden auch geschäftete Proben angefertigt, da diese Geometrie zumindest bei Klebungen gute Festigkeiten aufweist. Die Belastung ist aber keine reine Schubbelastung, sondern eine Kombination aus Schub und Zug, weshalb hier möglicherweise andere Fügmethoden besser abschneiden als bei den überlappenden Proben. Es wurde ein Schäftwinkel von 10° gewählt und um eine genügend grosse Fügefläche zu erhalten, wird die doppelte Dicke der einschnittigen Proben genommen.

4.1.2 Heisspressen von Platten

Die Plytron Prepregs werden in der Fontijne Heisspresse (Abb. 4.4) im Composites Labor zu Platten gepresst. Mit dieser Presse können Temperaturen bis 450°C erreicht werden und eine Anpresskraft bis 400kN. Bei Bedarf kann ein Vakuum oder eine Stickstoffatmosphäre erzeugt werden. Die Kühlung erfolgt über ein offenes Wasserkühlsystem und wird manuell eingeleitet.



Abb. 4.4 Fontijne Heisspresse mit eingelegtem Presswerkzeug

Das Werkzeug welches verwendet wird (Abb. 4.5) stammt von der Dissertation von Urs Thomann [60]. Damit lassen sich Platten der Grösse 320 x 130 mm und einer Dicke bis 8 mm anfertigen. Die kurzen Seiten sind offen, daher sollten die Fasern möglichst nicht parallel zu diesen liegen, da sie sonst leicht aus der Form fließen, wenn sie nicht auf eine andere Weise daran gehindert werden. Die beiden Werkzeughälften sind teflonbeschichtet, jedoch hilft eine Trennfolie beim Herauslösen. Ein weiterer, sehr positiver Effekt der Trennfolie ist das seitliche Abdichten der Pressform. Dafür sollten insgesamt drei Lagen der dünnen blauen Trennfolie (Wrightlon blue 5200) verwendet werden. Zwei Lagen sollten unter den Prepregs und eine darüber platziert werden. Bei vier Lagen klemmt das Werkzeug und bei insgesamt nur zwei fließt ein Teil des Materials seitlich aus der Form.



Abb. 4.5 Presswerkzeug mit fertig gepresster Platte in der unteren Formhälfte (r)

Bei Verwendung des Rohmaterials in Bandform werden pro Lage zwei ganze und ein halber Bandstreifen eingelegt, wobei der schmale Streifen jeweils einmal links und in der nächsten Lage rechts platziert wird (Abb. 4.6). Auf diese Weise werden die Spalten einer Lage durch die nächste überlappt. Für die einschnittigen Proben werden 4 Lagen verwendet und für die geschäfteten 8. Die Bandstreifen sind länger als das Werkzeug abzuschneiden. Falls die Streifenenden im Inneren des Werkzeugs zu liegen kommen,

fließt die geschmolzene Masse aufgrund der ungleichmässigen Druckverteilung beim Pressen aus dem Werkzeug. Es hat sich herausgestellt, dass die vorstehenden Enden unter Druck, Zug auf die Fasern im Werkzeug ausüben (Abb. 4.7). Dieser Effekt kommt zustande aufgrund der Druckdifferenz innerhalb und ausserhalb des Werkzeugs.

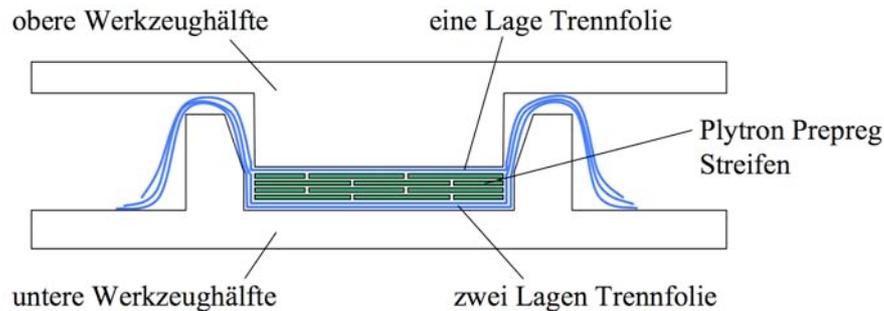


Abb. 4.6 Aufbau zum Pressen von Plytron Platten aus 50mm breitem Prepregband im Presswerkzeug von Urs Thomann

Für das Pressen von Platten aus den Plytron Blättern werden zusätzlich zwei 2.5 mm dicke, 130 mm breite und 260 mm lange Stahlbleche in das Werkzeug gelegt (Abb. 4.7). Eines unter der ersten Trennfolie das andere oberhalb, um den zuvor beschriebenen Effekt auch hier zu erzeugen, denn die Blätter sind mit 30 cm Länge kürzer als das Werkzeug. Die 250 mm breiten Blätter können leicht durch zerreißen auf 125 mm halbiert werden, da die Fasern in dieser Richtung verlaufen. Für die Platten aus Plytron Blättern werden 8 Blätter, bzw. 16 Lagen verwendet.

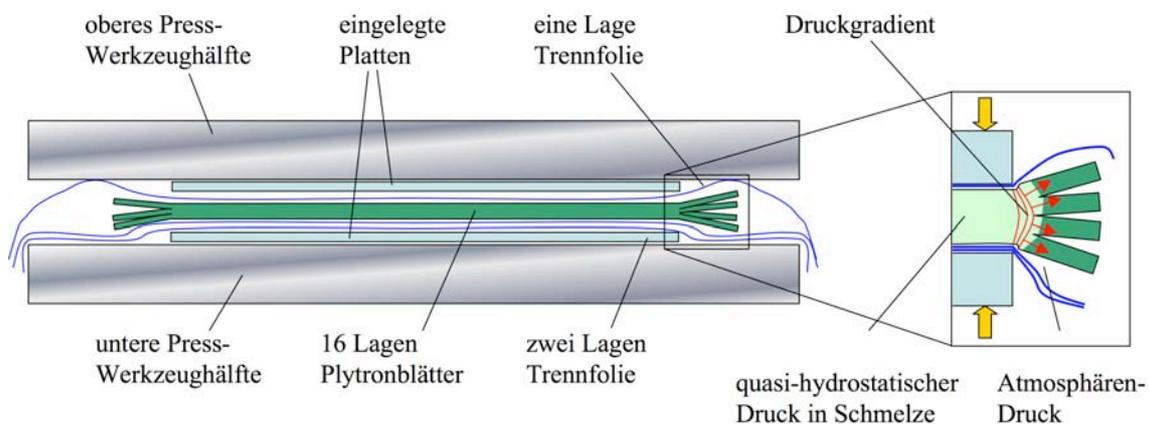


Abb. 4.7 Pressaufbau für das Pressen der Plytron Blätter

Die Prepregs werden unter geringem Druck im geschlossenen Werkzeug auf 200°C erwärmt. Dann wird die Heizung ausgeschaltet und die Presse leicht geöffnet, um anschliessen mit vollem Anpressdruck das Werkzeug wieder zu schliessen. Die Wasserkühlung wird manuell eingeleitet unter Beibehaltung des Anpressdrucks. Falls das kalte Werkzeug in die auf 150°C vorgeheizte Presse gelegt wird, können die 200°C in etwa 10 min erreicht werden, was einer gemittelten Heizrate von knapp 18°C/min entspricht. Die Kühlung ist ähnlich schnell mit gemittelten 20°C/min. Die so erreichte Taktzeit beträgt 35 min pro Platte, wovon etwa die Hälfte der Zeit benötigt wird um die Pressplatten aufzuheizen.

Der Anpressdruck liegt für die Platten aus Plytron Band bei ca. 2.4 Mpa, bzw. 100 kN Presskraft. Bei den Platten aus Plytron Blättern wurde die gleiche Anpresskraft eingestellt, was einem Anpressdruck von etwa 3 MPa entspricht. Unterhalb 40°C

Heizplattentemperatur kann das Werkzeug, welches noch heisser ist als die Heizplatten, aus der Presse genommen und die gepresste Plytron Platte entformt werden. Am besten geht das Entformen indem mit einem Plastikhammer auf die angehobene untere Werkzeughälfte geschlagen wird. Das seitlich herausgeflossene Plytron kann mit einer gebogenen Schere abgeschnitten werden. Weitere Angaben und eine kurze sowie eine ausführliche Anleitung sind im Anhang D zu finden.

4.1.3 Zuschneiden der Probenrohlinge und Zugproben

Aus den gepressten Platten werden mit einer Nasskreissäge zwei bis drei Plattenstücke zugeschnitten und anschliessend mit einem Dreikantschaber entgratet. Das Zerteilen der gefügten Plattenabschnitte in fünf 20 mm breiten Zugproben wird wiederum mit der Nasskreissäge durchgeführt. Sie eignet sich gut für diese Aufgabe, da die Schnittzone gekühlt wird und gleichzeitig die Entwicklung von Schnittstaub verhindert wird. Beim Schneiden entstehen an der Unterkante der Platten jedoch beträchtliche Grate, welche das präzise Zuschneiden erschweren, falls sie nicht laufend entfernt werden, da sie beim Anlegen an die Anschläge zwischen Platte und Anschlag zu liegen kommen können. Das Entgraten sollte möglichst mit dem Strich der Fasern erfolgen.

4.1.4 Fräsen der Verbindungsgeometrie

Die einschnittigen und geschäfteten Verbindungsgeometrien werden in der MAVT-Profi Werkstatt gefräst. Für die 10° Schäftung wird der Frästisch um eben diesen Winkel geneigt und die Plytronplatten werden zwischen zwei geschliffenen Holzplatten eingespannt, um einen möglichst sauberen Schnitt zu erzielen, siehe Abb. 4.8. Der Fräser dreht sich beim Passieren der Platte so, dass die Schneide die Fasern seitlich anschneidet. Die untere Platte dient als Stütze für die flach auslaufende Endkante, damit diese nicht einfach vom Fräser weggedrückt werden kann. Der Fräskopf wird zusätzlich um ein Grad in die Passierichtung gekippt um zu verhindern, dass die Schneiden nicht die frisch geschnittene Kante anritzen und ausfransen.

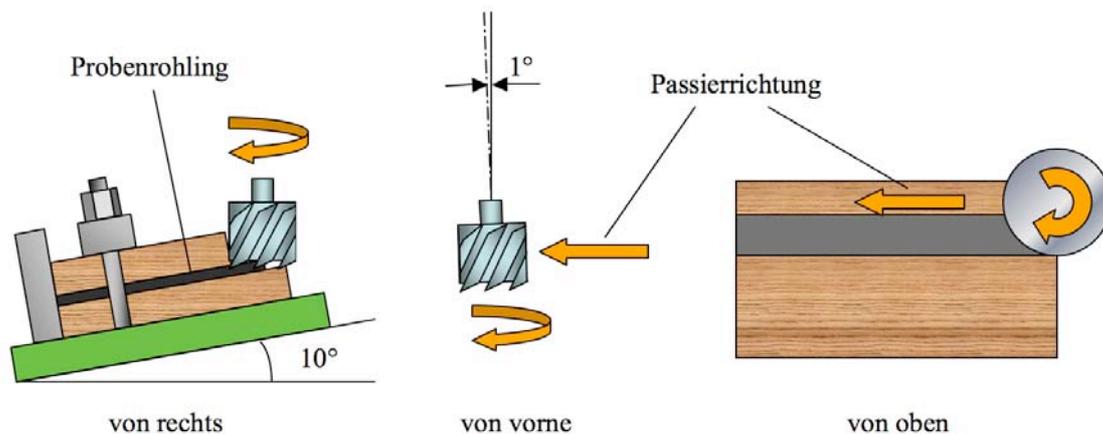


Abb. 4.8 Fräsen der geschäfteten Probenrohlinge

In die einschnittigen Proben wird auf die gleiche Weise eine Stufe hinein gefräst. Hierbei steht der Frästisch waagrecht. Die Grate welche entstehen werden wiederum mit einem Dreikantschaber entfernt.

Die Geometrievergleichs-Proben wurden aus Zeit- und Kostengründen von Hand zugesägt und nicht wasserstrahlgeschnitten. Die Geometrien wurden hierfür zuerst am Computer gezeichnet und auf Etikettaufkleber gedruckt. Diese wurden anschliessend auf die Proben geklebt und den Linien nach mit einer Eisensäge zugeschnitten. Mit einer Feile wurden die gegenüberliegenden Platten zum passen gebracht. Die Proben sind aus diesem Grund auch nicht genau so geworden wie sie geplant waren. Idealerweise hätten alle im Geometrievergleich dieselbe Fügefläche gehabt, natürlich abgesehen von den Proben mit breiten Fingern und die stumpf verbundenen Proben (Kapitel 3.1, Anhang F und H.2).

4.2 Fügen der Proben

4.2.1 Kleben mit 3M Scotch-Weld DP 8005

Für die saubere Positionierung und die Einhaltung des Klebespalts ist insbesondere beim Kleben der geschäfteten Proben ein spezieller Aufbau notwendig. Abb. 4.9 zeigt eine mögliche Konstruktion hierfür. Es wird eine ebene Unterlage benötigt, bestenfalls mit einer Aussparung versehen, dass der überschüssige Kleber unten austreten kann. Die Trennfolien sorgen dafür, dass der Aufbau nicht auch noch verbunden wird und sie minimieren den Reinigungsaufwand. Die Anschläge werden so auf die Grundplatte montiert, dass die Fügeiteile nicht weiter auseinander gedrückt werden können durch das Gewicht. Wie unten ist auch oben an der Klebestelle eine Aussparung vorzusehen. Das Gewicht ist so zu wählen, dass der Anpressdruck den vom Hersteller empfohlenen Wert erreicht.

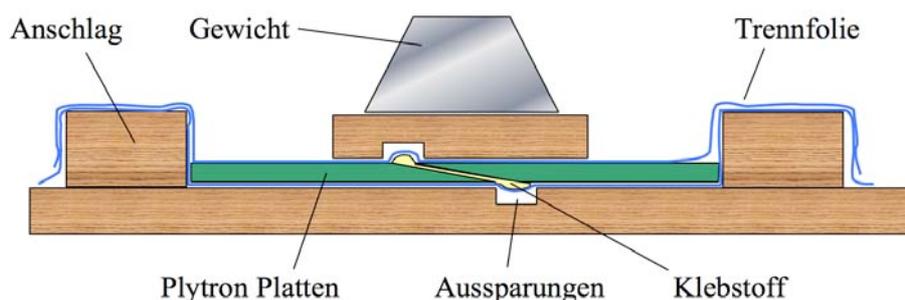


Abb. 4.9 Klebeaufbau für eine genaue Positionierung von geschäfteten Proben

Eine Vorbereitung der Klebefläche ist nach den Angaben des Herstellers (3M Scotch-Weld) im Falle von DP 8005 nicht notwendig [23], sie wurde aber vorgängig mit Aceton gereinigt um Öl und Fett zu entfernen. Der Aufbau sollte so vorbereitet werden, dass die angegebene Verarbeitungszeit eingehalten werden kann (DP 8500: 2.5 – 3 min [23]). Nach Ablauf der Weiterverarbeitungszeit (DP 8005: 2 – 3 h) kann die verbundene Platte heraus genommen und der vorstehende Klebstoffwulst mit einem Messer oder Stechbeitel sorgfältig entfernt werden. Vollständig ausgehärtet ist der DP 8005 Acrylatklebstoff nach 8 bis 24 h, je nach Umgebungstemperatur.

4.2.2 Elektromagnetisches Widerstandsschweissen

Die Firma KVT-Bielefeld GmbH verkauft Maschinen für das elektromagnetische Widerstandsschweissen (EWS). Das ist eine Induktionsschweisvariante, bei der eine dünne, geschlossene Drahtschleife in die zu fügende Stelle eingelegt wird und mit einem so genannten EWS-Wandler unter Druck über Induktion erhitzt wird [61]. Die Schweißqualität hängt von den folgenden Parametern ab: Art des EWS-Wandlers, Abstand des Wandlers vom Drahttring, Schweißdruck, Schweißzeit.

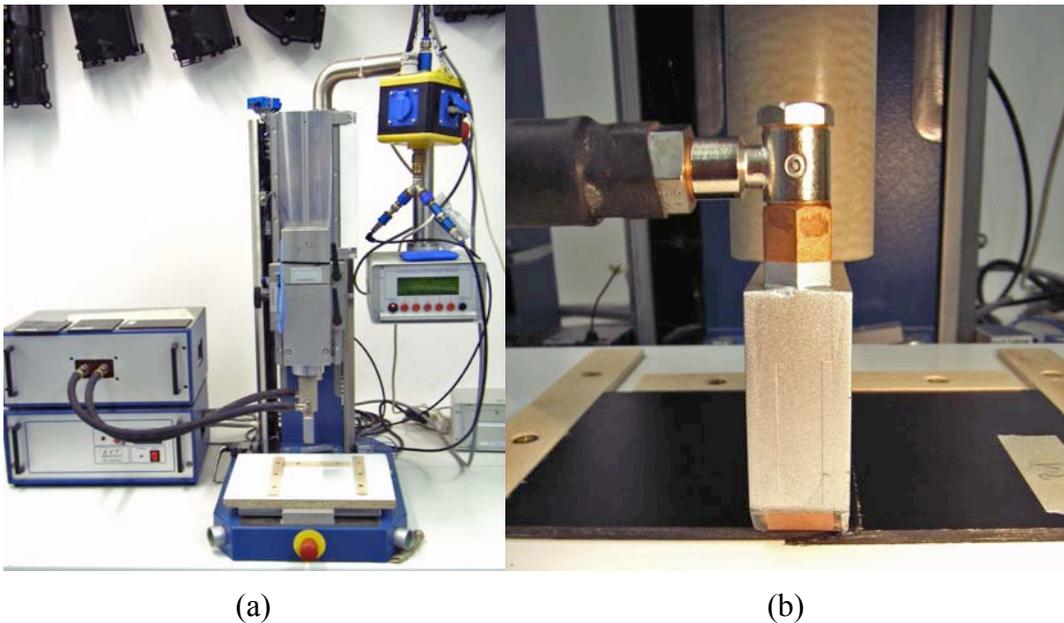


Abb. 4.10 Labormaschine der KVT-Bielefeld GmbH mit EWS-Generator (a) EWS-Wandler aufgesetzt auf einem geschäfteten Probenpaar (b), Fotos von Ralf Grabbe KVT-Bielefeld

Für die Verschweissung der vier zugeschickten Probenpaare wurden geschlossene Schleifen aus 0.5 mm Draht in die Verbindung gelegt. Die Anpresskraft des EWS-Wandlers betrug ca. 1500 N und die Schweißzeit 3 - 5 s. Der Vorgang wurde von Hand gestoppt [61]. Um die Proben positionieren zu können wurden hier Anschläge eingesetzt.

4.2.3 EMABond[®] Schweissverfahren

Die Firma KSE-Oettle in Schorndorf (D) ist ein Dienstleister im Bereich Kunststoffschweissen. Sie machen Beratung, entwickeln Maschinen und Schweissen in Lohnfertigung nach verschiedenen Verfahren. Eines davon ist das EMABond[®] Verfahren. Ein Stück EMAweld[®] Material wird in die Fugestelle gelegt und über eine Induktionsspule erhitzt.

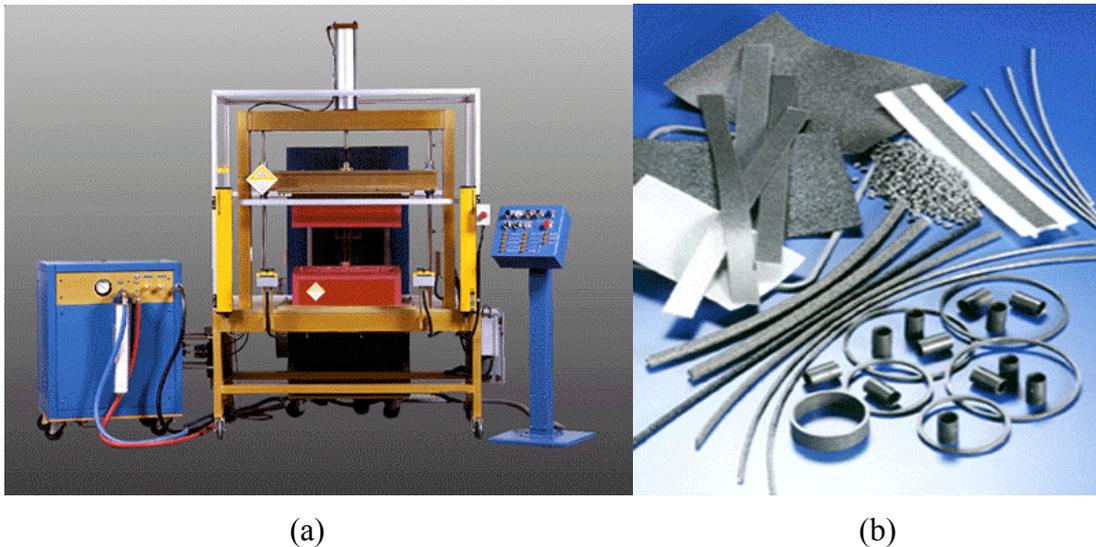


Abb. 4.11 EMABond[®] Schweissanlage (a) und EMAweld[®] Material (b) [39]

Die Proben wurden auf einer Anlage der Firma EMABond[®] verarbeitet. Das verwendete EMAweld[®] Material bestand aus einer PP Matrix versetzt mit ferromagnetischen Partikeln. Es hatte die Form eines flachen Bandes mit 1 mm Dicke und 5 mm Breite. Der Generator der verwendet wurde leistet 2 kW. Die Schweisszeit betrug 12 s und die Frequenz 5 MHz [62].



Abb. 4.12 Geschäftete Probe verschweisst mit dem EMABond[®] Verfahren

Die resultierenden Verschweissungen waren nicht sehr zufriedenstellend. Das EMAweld[®] Material hat nicht wie erwünscht in der ganzen Fuge verteilt (siehe Abb. 4.12). Das verwendete EMAweld[®] Material ist entwickelt worden für die Verwendung mit reinem PP. Um die bestmögliche strukturelle Verbindung zu erhalten, müsste dieses Material möglicherweise noch auf das Plytron, welches diverse Zusätze enthält, abgestimmt werden. Zudem müsste die Grösse der darin enthaltenen ferromagnetischen Partikel wahrscheinlich verringert werden, um die Fasern beider Teile nach der Verschweissung näher zusammenzubringen. An den durchgesägten Seiten sind die Partikel sichtbar, welche offen liegen, zu rosten begonnen haben.

4.2.4 Spiegelschweissen

Die Spiegelschweissversuche wurden bei der Firma KMS Schrenk in Hilzingen (D) durchgeführt. In dieser Firma wird vor allem das Warmgasziehschweissen bei der Herstellung von Möbelstücken aus PP, PE und PVC für Reinraumanwendungen eingesetzt. Sie haben auch einen Handschweiss Spiegel für das Verbinden von kleineren Teilen. Zuerst wurde versucht damit zwei Plytronplatten stumpf zu verschweissen. Die Spiegeltemperatur wurde dafür auf 220°C eingestellt. Parallel zur Faserrichtung funktionierte dies gut, allerdings entstand dabei ein beträchtlicher Grat. Senkrecht zur Faserrichtung kam keine richtige Verbindung zustande. Die Matrix zog sich beim erwärmen am Spiegel etwas zurück, so dass der Faseranteil am Ende grösser wurden. Beim Zusammendrücken der beiden Teile verhinderten die Fasern ein vollständiges Schliessen der Fuge.

Der Versuch eine Plytronplatte mit einem Stück reinem PP zu verbinden gelang. Das geschmolzene PP konnte zwischen die Fasern der Plytronplatte hinein fließen und so eine lunkerfreie Verbindung bilden. Anschliessend wurde die reine PP-Seite abgetrennt bis auf etwa die letzten 2 mm. Dieses Stück mit zusätzlichem PP an einem Ende wurde dann mit einem weiteren Stück einer Plytronplatte verschweisst und der entstandene Wulst mit einem Stechbeitel entfernt. Die Verbindung hat eine Schicht reines PP von etwa 1.2 mm Breite zwischen den beiden faserverstärkten Platten (Abb. 4.13 (a)).

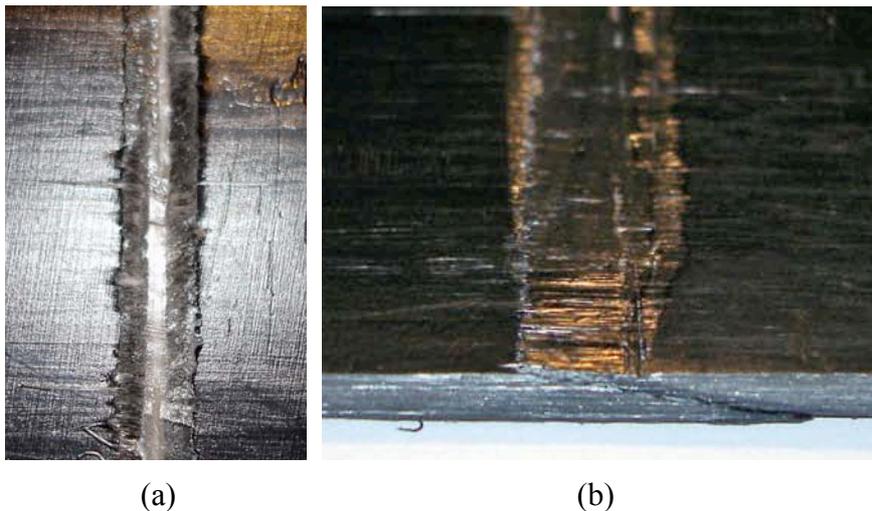


Abb. 4.13 Spiegelschweisste Probe mit zusätzlichem PP in der Verbindung (a),
Geschäftete Probe spiegelschweisst (a)

Geschäftete Probenrohlinge wurden ebenfalls miteinander verbunden. Dabei muss beachtet werden, dass die Enden wegen der geringeren Materialstärke schneller schmelzen, wenn sie einfach mit der Fügefläche auf den Heizspiegel gehalten werden. Daher sollte die dickere Seite der Schäftung zuerst aufgeheizt werden und erst zum Schluss das dünne Ende. Wie bereits bei den stumpfen Verschweissungen konnte hier ein Zurückziehen der Matrix beobachtet werden (Abb. 4.13). Beim Fügen wurde mit Anschlägen gearbeitet, um die beiden Teile sauber positionieren zu können. Ein senkrechter Fügedruck wurde von Hand eingebracht über einen Klotz aus PP. Eine Trennfolie wurde nicht benötigt.

4.2.5 Heisspressen der Verbindung

Mit der Fontijne Heisspresse und dem dazugehörigen Presswerkzeug lassen sich neben Platten aus Prepregs, auch zwei Plattenstücke zu einem verbinden. Damit die Platten, die immer noch die volle Breite des Werkzeugs besitzen, nicht einfach aus der Form fließen muss in die Längsrichtung der Fluss behindert werden. Erste Versuche mit Silikonstreifen, die im Presswerkzeug platziert wurden als Endanschlag, hatten nicht das gewünschte Ergebnis zur Folge. Die Streifen waren nur wenig dicker als die Proben selbst, um beim Pressen das Werkzeug rundum zu schliessen und gleichzeitig einen hydrostatischen Druck im geschmolzenen Plytron zu ermöglichen. Sie wurden weggedrückt und durch den Anpressdruck zerstört.

Besser funktionierte die zweite Methode. Die beiden Plattenstücke wurden mit einer starken Trennfolie (gelbe Captonfolie von Airtech am besten geeignet) derselben Breite einmal längs umwickelt und mit Klebeband fixiert. Zwei Lagen der blauen Trennfolie (Wrightlon blue 5200 von Airtech) unten und eine Lage oben werden benötigt um den seitlichen Fluss zu minimieren. In dieser Konfiguration fließt nur an den vier Ecken wenig Plytron heraus. Der Pressvorgang ist derselbe wie beim Heisspressen der Platten selbst (Anhang D), es muss aber die Anpresskraft der kleineren Plattenfläche angepasst werden. Diese lag bei den bearbeiteten Proben bei 40 bis 50 kN, um damit einen Anpressdruck von 2.5 MPa zu erzielen in der Platte.

4.2.6 Ultraschallschweissen

Für die Ultraschallversuche mit Plytron bei der Firma Branson SA in Urdorf konnten weder die einschnittigen noch die geschäfteten Proben verwendet werden. Die einschnittige wegen der geringen Materialstärke in der Fügezone und die geschäftete weil der Abstand der Fuge zur Oberfläche nicht gleich ist über die gesamte Fuge [42]. Zudem sind beim Ultraschallschweissen Energierichtungsgeber notwendig, an denen die Energie aus den Schwingungen konzentriert wird.

Um die Schweissbarkeit von Plytron zu überprüfen, werden kleine Proben angefertigt mit Energierichtungsgebern (20 x 30 mm Abb. 4.14, Zeichnung siehe Anhang F). Ein Werkzeug wird ebenfalls benötigt um die Proben unter der Sonotrode festzuhalten. Eine Stahlplatte mit zwei 1 mm tiefen Spitzfugen (Winkel 90°) im Abstand von 10 mm wird in das Presswerkzeug eingelegt, um damit Platten mit Energierichtungsgebern pressen zu können (Abb. 4.15). Da die Fugen im rechten Winkel zur Faserrichtung verlaufen, ist gewährleistet, dass die Energierichtungsgeber fast ausschliesslich aus Matrixmaterial bestehen. Diese Tatsache hat einen sehr positiven Effekt auf das Fließverhalten der Energierichtungsgeber beim Schweissen.

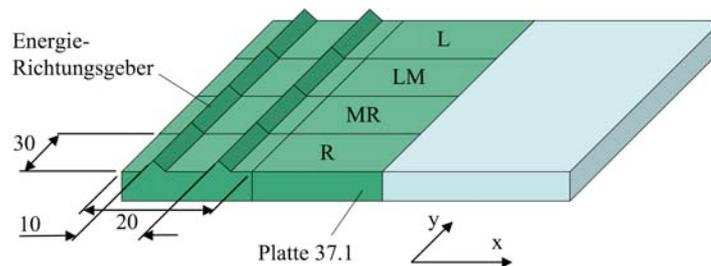


Abb. 4.14 Entnahmestellen der vier US-Proben aus Platte 37, jeweils ein Probenstück mit und eines ohne Energierichtungsgeber

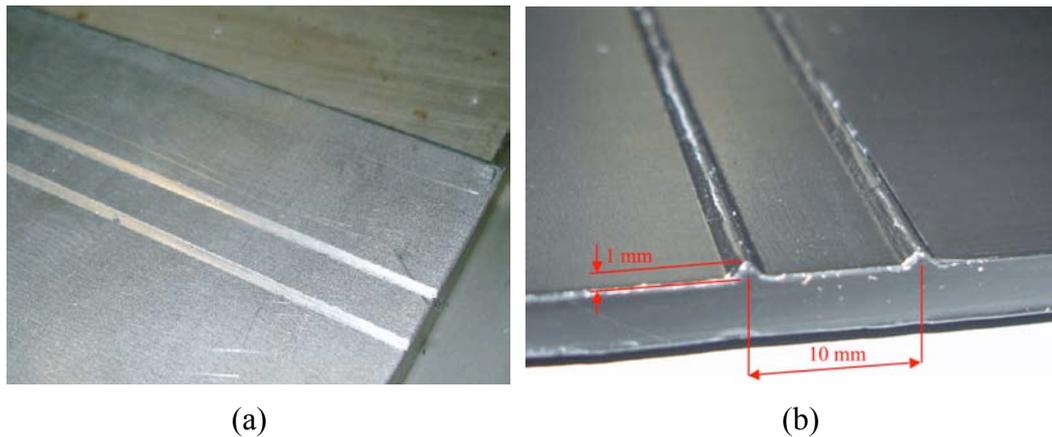


Abb. 4.15 Einlageblech mit Rillen für Presswerkzeug (a), gepresste Platte mit Energierichtungsgebern (b)

Auf den Mikrofotografien (Kapitel 6.3) ist gut zu sehen, dass sich die Energierichtungsgeber bei der Probe ML und MR bereits auf die ganze Fügefläche verteilt haben und die Glasfasern ähnlich dicht liegen wie im umgebenden Verbundmaterial. Diese Proben wurden in 0.3 bzw. 0.4 s geschweisst bei 30 kHz und einer Amplitude von 80 μm . Die Schweissanlage leistet 2.2 kW und bei diesen beiden Proben wurden 90% bzw. 100% der maximalen Leistung benötigt.

4.3 Herstellung von durchgehenden Referenzproben

Um eine durchgehende Probe zu testen werden eine knochenförmige Zugprobe oder dickere Enden benötigt um zu verhindern, dass aufgrund von Spannungsspitzen Risse an der Einspannung entstehen und die Probe dadurch verfrüht reißt. Zuerst wurde versucht Endplatten aufzukleben, wie es sonst bei duroplastischen Verbunden gemacht wird. Dies funktionierte nicht, da die Endplatten in der Zugmaschine abgezogen wurden. Die Verwendung vom Polyolefinkleber DP 8005 anstelle von Araldite 2011 half auch nicht weiter. Um knochenförmige Proben herzustellen, würde man diese aus einer ebenen Platte durch Wasserstrahlschneiden heraustrennen. Da dies extern in Auftrag gegeben hätte werden müssen, wurde beschlossen die Proben mit dickeren Enden in der Heisspresse herzustellen.

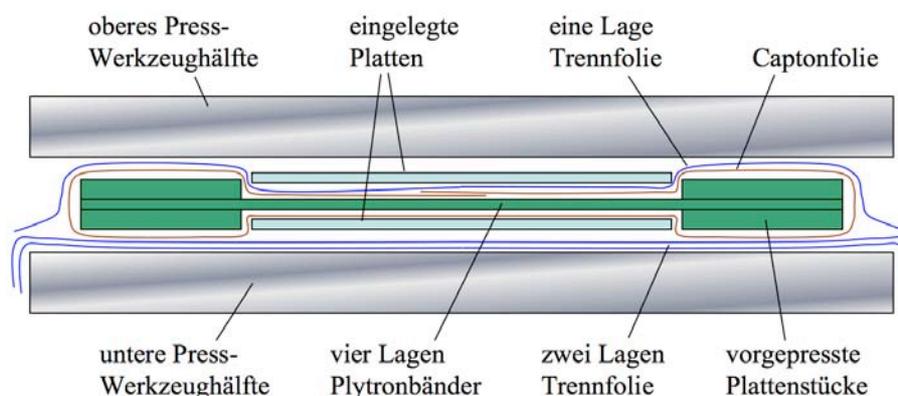


Abb. 4.16 Schematischer Pressaufbau für die Herstellung von UD-Proben mit dickeren Enden in der Heisspresse

Um dies zu bewerkstelligen, werden zwei kurze Platten (130 x 130 mm) eingesetzt, ähnlich wie beim Pressen der Platten aus Plytron-Blättern (Kap. 4.1.2 und Anhang D). Eine wird unter und die andere über den Plytron Prepreg Bändern in das Presswerkzeug eingelegt (Abb. 4.16). Die dickeren Enden entstehen aus vorgepressten Plytron Plattenstücken, welche etwas dicker sind als die eingelegten Stahlplatten. Das Fließen in Plattenlängsrichtung wird verhindert durch eine Captonfolie, welche der Länge nach das Plytron Material umschliesst. Dieser Methode wurde bereits zum Verbinden zweier Plattenstücke in der Heisspresse verwendet (Kap. 4.2.5). Das Ergebnis konnte sich optisch zufrieden stellend, trotz leichtem, seitlichem Fluss auf einer Seite in der Mitte der Form.

4.4 Weitere Versuche zu Verbindungsmethoden

4.4.1 Lokale Konvektionsbeheizung

Um die Möglichkeiten der Konvektionsbeheizung mit erzwungener Konvektion zu veranschaulichen wurden Versuche mit einem Industrieföhn durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass zwar die Oberfläche relativ rasch zum Schmelzen gebracht werden kann, aber die Fasern beginnen sehr schnell sich aus ihrer ursprünglichen Lage in der Ebene zu erheben. Falls nur die Fügezone beheizt wird und die umliegenden Bereiche abgeschirmt werden, kann diese Methode durchaus auch zum Ziel führen. Für das gleichmässige Beheizen eines Profils sollte eine speziell gestaltete Düse eingesetzt werden, mit welcher alle Bereiche der Verbindung gleichzeitig geschmolzen werden.

4.4.2 Warmgasziehschweissen

Mit dem Warmgasziehschweissen, können weder einschnittig überlappende und geschäftete Verbindungen, noch irgendwelche komplizierten senkrechten Verbindungen hergestellt werden können. Es wird lediglich eingesetzt um stumpfe Verbindungen mit Hilfe einer keilförmigen Aussparung (Kap. 2.4) sowie T-Verbindungen herzustellen.

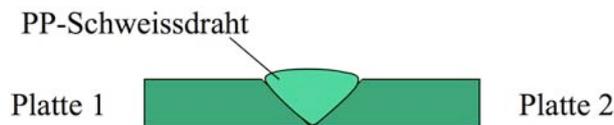
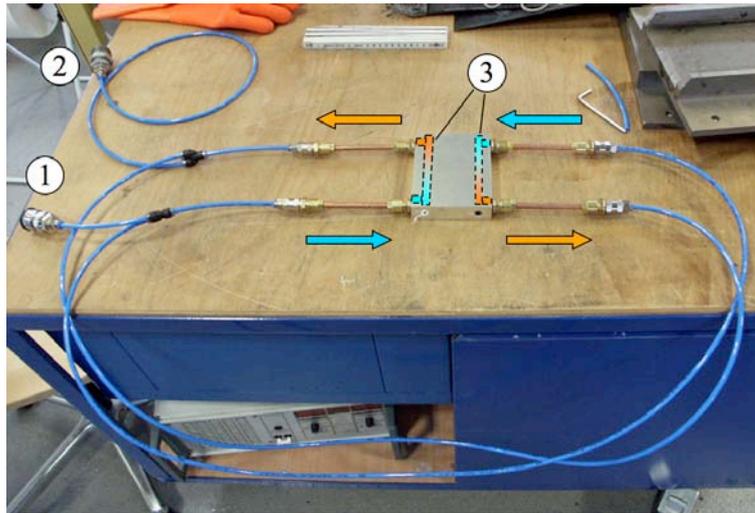


Abb. 4.17 Stumpfverbindung durch Warmgasziehschweissen

Der Versuch zwei 45° abgeschrägte Plytron Platten aneinander zu schweissen gelang zwar, aber die Verbindung konnte von Hand leicht gebrochen werden (Abb. 4.17). Der Bruch ereignete sich am Übergang zwischen dem eingeschweissten PP-Draht und der Plytron Platte. Anschliessend wurde versucht einen Draht reinen Polypropylens auf eine Plytron Platte zu schweissen. Die Verbindung zwischen Draht und Platte war wiederum sehr schwach. Kleine Resten von Plytron und einige Fasern hafteten am Draht nachdem er abgerissen wurde. Dies würde darauf hindeuten, dass die Schwachstelle auf der Seite des Plytrons war. Herr Schrenk vermutet, dass die Zusätze im Plytron das Verbinden erschwert [26].

4.4.3 Zonenkühleinsatz für das Heisspresswerkzeug

Um das in Kapitel 2.4.4 beschriebene Verbindungsverfahren zu testen wurde ein Kühleinsatz für das Presswerkzeug gefertigt, welcher durch zwei Kanäle an den Enden mit Wasser gekühlt wird (Abb. 4.18). Da die verwendeten Festo Schläuche (PUN-6x1-BL) den Kontakt mit dem heissen Werkzeug nicht überstehen würden, sind Kupferrohre montiert worden. Die Schläuche werden erst ausserhalb des Werkzeugs angeschlossen. Die Zuleitung und der Abfluss werden an den gleichen offenen Kühlwasserkreislauf angeschlossen, mit dem auch die Heizplatten der Presse gekühlt werden. Eine Zusammenstellungszeichnung und Teileliste sind im Anhang G zu finden.



- 1: Anschluss für Kühlwasserspeisung
- 2: Anschluss für Rücklauf
- 3: Kühlkanäle im Werkzeug

Abb. 4.18 Kühleinsatz für das selektive Schmelzen eines kleinen Bereichs in der Heisspresse

Die obere Heizplatte wurde auf 220°C eingestellt und die untere auf 160°C. Damit lag diese nur leicht unterhalb der Schmelztemperatur von Plytron. Beim ersten Test ohne Thermoelement wurde klar, dass die Kühlleistung des Wassers massiv zu hoch ist. Selbst bei der kleinstmöglichen Öffnung des Zuleitungshahns und beim Kühlen in Intervallen, wurde das eingelegte Plytronband nicht geschmolzen. Die Kühlung konnte nicht ganz ausgesetzt werden, da die Rücklaufschläuche bei längeren Kühlpausen ziemlich warm geworden sind unmittelbar nachdem die Kühlung wieder eingesetzt wurde. Eine Luftkühlung würde hier möglicherweise wegen der geringeren Kühlleistung Abhilfe schaffen. Man könnte auch versuchen den Kühleinsatz in drei Abschnitte aufzuteilen und dazwischen thermisch zu isolieren, um den Wärmeübergang zwischen Heiz- und Kühlzone des Einsatzes zu verkleinern.

4.4.4 Lokale Infrarotbeheizung

Die Versuche mit Stangenförmigen Infrarotstrahlern¹ haben gezeigt, dass mit diesen in etwa einer Minute eine 3.5 mm dicke Platte auf einer Breite von 18 mm geschmolzen werden kann (Anhang H.5). Wenn von beiden Seiten her geheizt wird, geschieht dies noch etwas schneller (etwa 45 s) und über die Dicke gleichmässiger. Wenn mit zu hoher Leistung der Strahler und in zu geringem Abstand geheizt wurde, entwickelte sich Rauch an der, am direktesten bestrahlten Stelle. Dieser Bereich ist auch noch gut auszumachen nachdem die Matrix erstarrt ist (Abb. 4.19). Daraus kann geschlossen werden, dass dort eine Degradation des Materials aufgetreten ist.

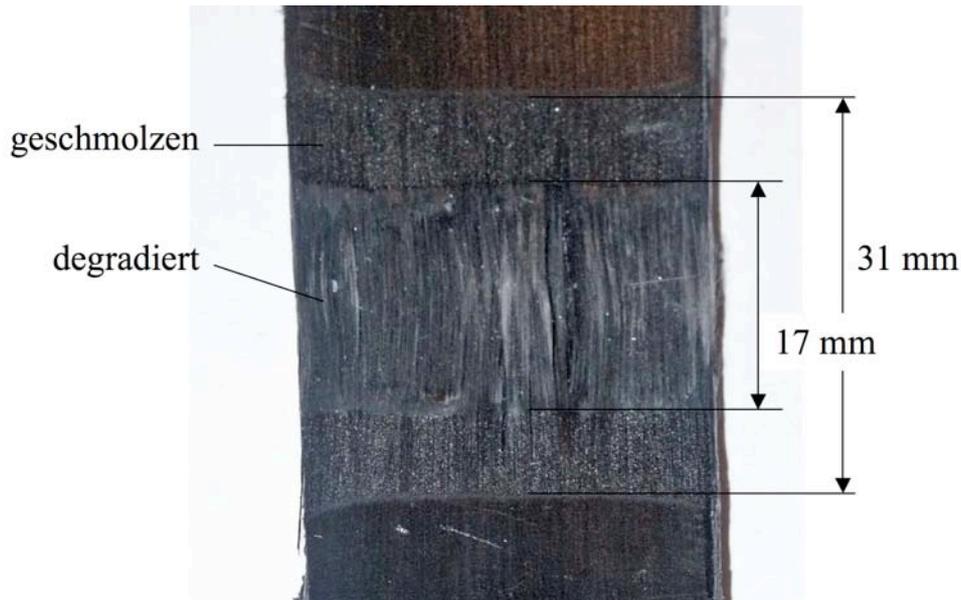


Abb. 4.19 Plytron Probe welche durch die Infrarotbestrahlung im mittleren Bereich degradiert wurde

Bei anschliessendem Pressen einer solchen Stelle sind die Fasern, soweit von Auge sichtbar, wieder von Plytron umschlossen worden. Der Meinung des Autors zufolge hätten die degradierte Oberfläche und der lokal erhöhte Faservolumengehalt mit grosser Wahrscheinlichkeit einen schlechten Einfluss auf die Qualität einer Verschweissung. Durch eine geringere Leistung der Strahler oder durch einen grösseren Abstand zu den Strahlern kann die sichtbare Degradation verhindert werden. Dies geschieht aber auf Kosten der Heizzeit.

¹ Kurzwelliger Zwillingsrohr-Strahler der Firma Heraeus Bauform B mit einer Leistung von 1200W

5 Prüfung der Proben

Die Proben werden in einer Zugmaschine auf ihre Zugfestigkeit getestet und die Verbindungszone mikrofotografisch untersucht.

5.1 Zwick Zugmaschine

Mit Hilfe der Zwick Zugmaschine² des Instituts kann man verschiedene Materialparameter ermitteln. Diejenigen die von Interesse sind für diese Arbeit sind in erster Linie die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung sowie die Steifigkeit. Die Proben werden mit einer konstanten Dehngeschwindigkeit von 2 mm/min bis zum Bruch gezogen. Dieser Wert wird in ISO-Norm 527-5 angegeben für Zugtests an UD-Laminaten in Faserrichtung.

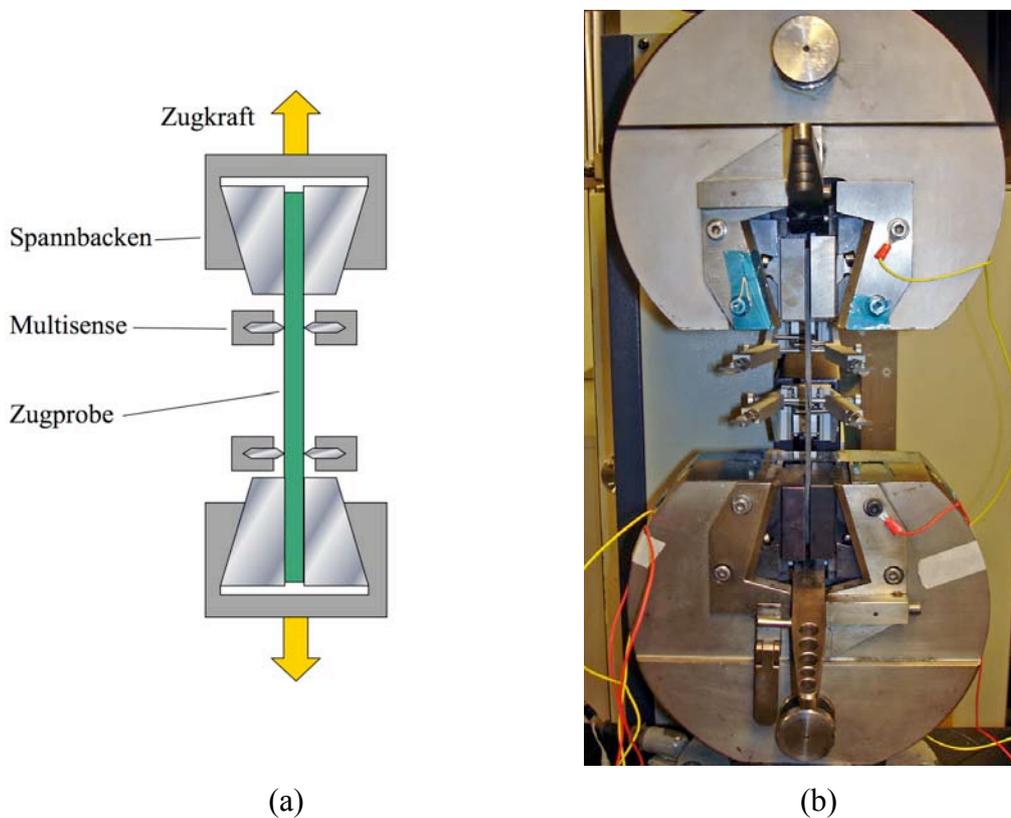


Abb. 5.1 Zugprüfungsaufbau an der Zwick Zugmaschine, schematisch (a) und an der realen Maschine (b)

Die verbundenen Plytron Balken werden oben und unten in die Spannbacken eingesetzt (Abb. 5.1). Die Kraft wird vor jedem Test auf null gesetzt. Die ausgeübte Kraft wird über die Spannbacken gemessen. Die Dehnung wird aus der Position der Backen (Traverse) und über die zwei so genannten Multisense ermittelt. Das sind Dehnmessfühler, welche in einem festgelegten Abstand beidseitig auf die Probe gefahren werden.

² Zwick Materialprüfung 1474, Nennlast von 100 kN, TestXpert[®] Software

5.2 Mikrofotografie

Bei der mikrofotografischen Untersuchung geht es darum optische die Verbindungsqualität zu prüfen. Die Lage und Verteilung von Fasern und Matrix, sowie die Anwesenheit von Fehlstellen und Lunker werden untersucht.

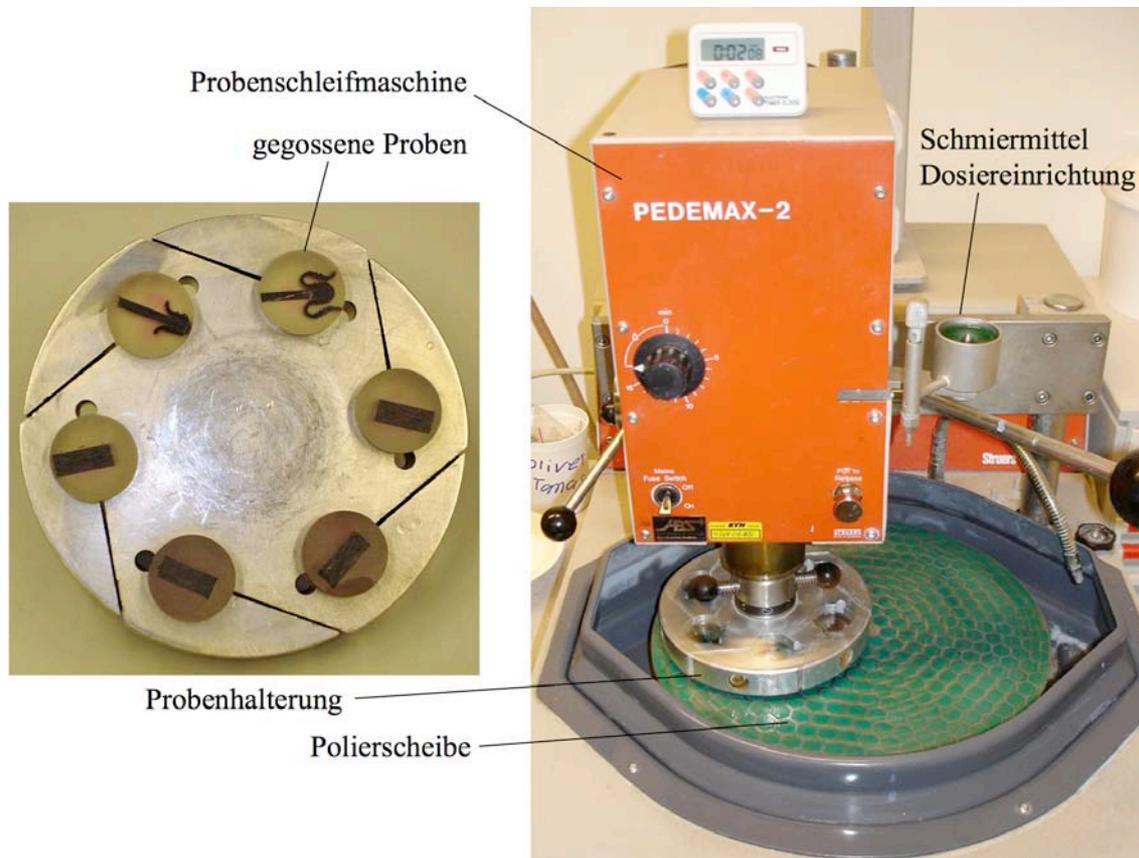


Abb. 5.2 Probenhalterung und Struers PEDEMAX-2 Probenschleifmaschine

Die Proben für die mikrofotografische Untersuchung der Verbindungsstellen werden beim Zuschneiden der Zugproben ebenfalls aus den verschweissten Platten geschnitten. Die Proben müssen nicht besonders groß sein, insbesondere reichen sehr schmale Stücke bereits aus, da lediglich die geschliffene Oberfläche betrachtet wird. Die Stücke werden in Zylinder eingegossen mit Epoxydharz. Nach dem Aushärten können sechs Stück gleichzeitig geschliffen und poliert werden auf der PEDEMAX-2 Probenschleifmaschine im Labor (Abb. 5.2).

Die fertig gestellten Proben werden auf einem Träger unter das Mikroskop gelegt und sowohl optisch, wie auch über die zugehörige Kamera, in digitaler Form betrachtet. Die gespeicherten Bilder können am Computer noch nachbearbeitet werden, um die optimalen Kontrast und Helligkeitswerte einzustellen. Dadurch werden die Fasern, die Matrix sowie Fehlstellen noch etwas besser unterscheidbar. Voraussetzung für ein gutes Bild ist aber immer noch ein scharfes Rohbild mit genügend Licht. Über- oder unterbelichtete Aufnahmen können nur beschränkt wieder korrigiert werden.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Zugtests und der Mikroskopischen Untersuchung beschrieben.

6.1 Zugtests Fügemethoden

6.1.1 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit gibt Auskunft über die Bruchkraft einer Probe, bezogen auf die Querschnittsfläche und wird gemäss Gl. 6.1 berechnet.

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_Q} \quad \text{Gl. 6.1}$$

Zugfestigkeit	:	$\sigma_B [MPa]$
Bruchkraft	:	$F_B [N]$
Querschnittsfläche	:	$A_Q [mm^2]$

Als Referenz dient die Zugfestigkeit einer durchgehenden Probe aus Plytron 0°. Diese beträgt 660 MPa. Den höchsten Durchschnittswert erreicht hierbei die einschnittig überlappende Probe aus den 4-lagigen Rohlingen, welche in der Heisspresse gefügt wurde, mit 136.1 MPa (Tab. 6.1). Der Spitzenwert einer einzelnen Zugprobe stammt aus der gleichen Serie und beträgt 150.9 MPa, was knapp 23% der durchgehenden Probe entspricht.

Tab. 6.1 Zugfestigkeiten ermittelt an Plytron 0° Proben verbunden nach ausgewählten Fügemethoden

Fügemethode	Zugfestigkeit einschnittig überlappenden	Zugfestigkeit 10° geschäftet
Geklebt Araldite 2011	25.6 ± 6.6 MPa	-
Geklebt 3M DP 8005	36.6 ± 8.8 MPa	31.3 ± 3.3 MPa
Induktionsschweissen EWS mit Heizdraht	19.2 ± 1.4 MPa	9.0 ± 2.9 MPa
Induktionsschweissen EMAbond®	21.5 ± 5.3 MPa	22.4 ± 7.3 MPa
Heizelement- / Spiegelschweissen	-	76.5 ± 8.9 MPa
Heisspressen	136.1 ± 16.7 MPa	101.6 ± 16.3 MPa
Referenzproben	660.2 ± 44.3 MPa	

Die Werte sind insgesamt sehr niedrig verglichen mit der Referenz, was auf die gewählten Geometrien und den Lastfall zurückzuführen ist. Eine kurze Rechnung zeigt, dass die Überlappungslänge zu kurz gewählt wurde, um ähnliche Kräfte übertragen zu können wie die durchgehenden Proben (Kap. 6.5.2). Die Probengeometrie wurde, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, nach den Normen für Zugscherproben ausgewählt.

Insbesondere die Proben, verbunden nach den beiden Induktionsschweissverfahren erzielten sehr geringe Festigkeiten. Bei diesen Proben war jeweils nur ein kleiner Teil der verfügbaren Verbindungsfläche verschweisst (siehe Anhang H.1), was auf die geringe Zahl an Proben zurückzuführen ist (Kap. 6.5.1). Die schwächsten aller Proben, waren die geschäfteten Proben, verschweisst mit einem Heizdraht. Diese erreichten eine Zugfestigkeit von lediglich 1.36 % der durchgehenden Proben.

Die geklebten Proben konnten erwartungsgemäss mit den ordentlich verschweissten Proben, welche in der Heisspresse und mit dem Schweisspiegel gefertigt wurden, nicht mithalten. Die erreichten Zugscherfestigkeiten der Klebproben, bezogen auf die Angaben des Herstellers, deuten an, dass die maximal erzielbaren Festigkeiten für diese Proben nicht viel höher liegen (Kap. 6.1.2). Die Proben, welche bei der Firma KMS Schrenk, mit dem Schweisspiegel gefügt wurden, erreichten den zweitbesten Durchschnittswert unter den geschäfteten Proben im Fügemethodenvergleich. Der Wert von 76.5 MPa entspricht 11.6 % der Festigkeit der durchgehenden Proben.

6.1.2 Zugscherfestigkeit

Um die Fügemethoden untereinander besser vergleichen zu können und um das Potential einer Methode aus diesen nicht optimal verschweissten Proben abschätzen zu können, wird zusätzlich die Zugscherfestigkeit ermittelt. Diese errechnet sich wie in Gl. 6.2 angegeben. Bei den geschäfteten Proben wird ebenfalls die Bruchkraft durch die Verbindungsfläche geteilt. Wegen dem Schäftwinkel von 10° wird die Fügefläche der Proben aber nicht wie bei den einschnittig überlappenden Proben einer reinen Scherbelastung ausgesetzt, sondern einer zusammengesetzten Belastung aus Zug- und Scherbelastung.

$$\tau_B = \frac{F_B}{A_{Lapp}} \quad \text{Gl. 6.2}$$

Zugscherfestigkeit : $\tau_B [MPa]$

Bruchkraft : $F_B [N]$

Querschnittsfläche : $A_{Lapp} [mm^2]$

Da die Proben der beiden Induktionsschweissverfahren nur auf einem Teil der Überlappungsfläche verbunden sind schneiden diese dadurch besser ab, als wenn die erreichte Zugfestigkeit betrachtet wird. Begründen kann man dieses Vorgehen dadurch, dass wenn die Schweissparameter optimal eingestellt sind, die Verbindung auf der gesamten verfügbaren Fläche hergestellt werden kann. Es wird dabei von einem linearen Zusammenhang zwischen dem Anteil der verbundenen Fläche und der erreichten Bruchkraft ausgegangen. Andere Einflüsse als diejenigen der Fügefläche können hier nicht quantifiziert werden. Es ist aber davon auszugehen, dass bei allen angewendeten Verbindungsmethoden noch ein gewisses Verbesserungspotential besteht.

Einschnittig überlappende Proben

In Abb. 6.1 sind die durchschnittlichen Zugscherfestigkeiten der einzelnen Testserien angegeben. Mit den Balken reichen jeweils vom tiefsten zum höchsten gemessenen Wert.

Die Referenz für die Zugscherfestigkeiten ist die Isopescu-Scherfestigkeit von Plytron in Faserrichtung. Diese liegt laut dem technischen Datenblatt für Plytron von Gurit Suprem [63] bei 19 MPa. Die Zugscherfestigkeiten der beiden Klebungen entsprechen ungefähr den erwarteten Werten. Der Polyolefinkleber DP 8005 von 3M Scotch-Weld sollte laut technischem Datenblatt [23] auf extrudiertem Polypropylen eine Zugscherfestigkeit von 7.2 MPa erzielen. Der höchste gemessene Wert bei den einschnittig überlappenden Proben beträgt 7.1 MPa und im Durchschnitt sind 5.3 MPa erreicht worden (Abb. 6.1). Damit hat dieser Kleber deutlich besser abgeschnitten als der Araldite 2011 Epoxidklebstoff mit durchschnittlich 3.5 MPa.

Die induktionsgeschweißten Proben erreichten eine etwas bessere Zugscherfestigkeit als die Klebungen. Ohne die oben erwähnte Berücksichtigung der kleineren Verbindungsfläche wäre das nicht so gewesen, denn die durchschnittliche Bruchkraft liegt bei den EWS Proben und den EMAbond[®] Proben tiefer, als diejenige beider Klebstoffe (Kap. 6.1.1, Anhang H.1).

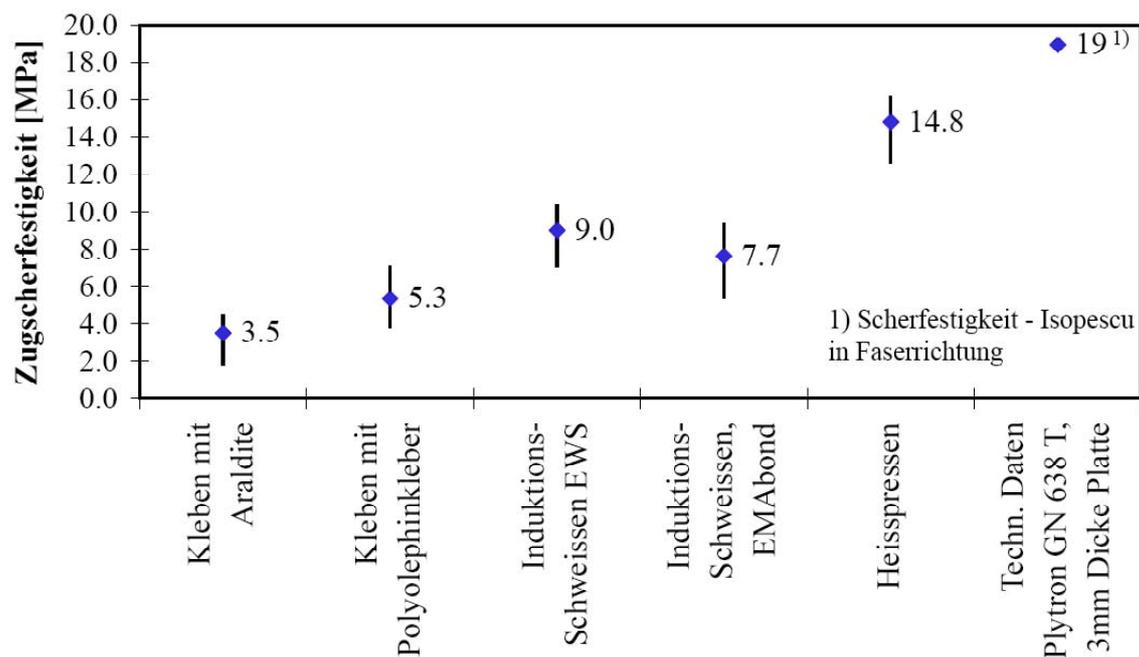


Abb. 6.1 Zugscherfestigkeit ermittelt an einschnittig überlappenden Fügeproben aus Plytron 0°

Die Proben, welche in der Heisspresse gefügt worden sind, erreichten mit der Überlappungslänge von 13.75 mm (nach der Zugprüfung gemessen) 78% der Scherfestigkeit der Referenz. Die Isopescu - Scherfestigkeit wird nicht auf die gleiche Weise ermittelt wie die Zugscherfestigkeiten dieser Testreihen, sondern mit einem Doppel V-Kerben Schubtest nach ASTM D5379. Es wird eine Probe mit einem dafür vorgesehenen Werkzeug auf Schub belastet. Dies könnte die Abweichung teilweise erklären. Eine andere Ursache könnte sein, dass der Matrixfluss während dem Pressen die Faserausrichtung gestört hat. Dies ist bei den vorliegenden Proben aber nur in geringem Masse der Fall (Anhang H.1, Protokoll zu: Heisspressen einschnittig überlappende Proben 12.2/13.2). Ein anderer möglicher Grund könnte sein, dass das

Plytron aus dem Bandförmigen Halbzeug, mit den verwendeten Parametern beim Heisspressen, nicht vollständig konsolidiert ist (Kap. 6.4.3 und Anhang H.1).

Einseitig geschäftete Proben

Die geschäfteten Proben bestätigen die Verhältnisse der Resultate der einschnittigen überlappenden Proben (Abb. 6.2). Die Bruchkraft pro Verbindungsflächeneinheit ist durchwegs leicht höher als bei den einschnittig überlappenden Proben, was aber nicht weiter verwunderlich ist aufgrund der etwas anderen Belastung der Fügefläche. Zudem ist bei dieser Gestaltung die Belastung gleichmässiger über die Fläche verteilt als bei der einschnittig überlappenden Variante, wo die Enden Spannungsspitzen aufweisen [18].

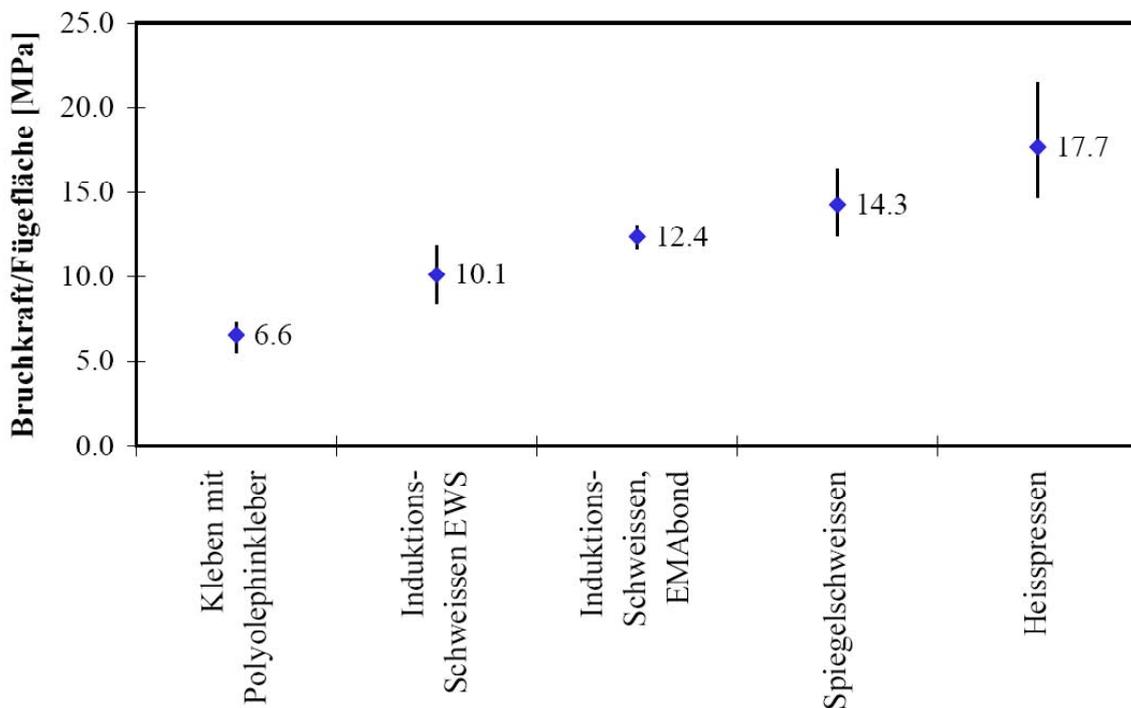


Abb. 6.2 Bruchkraft / Fügefläche ermittelt an einseitig geschäfteten Fügeproben aus Plytron 0°

Mit einem herkömmlichen Schweissspiegel können einschnittig überlappende Proben nicht gefügt werden (Kapitel 4.2.4). Unter den geschäfteten Proben erreichten diese eine Bruchkraft pro Fläche, die zwischen derjenigen der gepressten Proben und den EMAbond® Proben liegt.

6.1.3 Bruchdehnung und Steifigkeit

Der grösste Teil der eingespannten Zugprobe besteht aus dem steifen Grundmaterial und die Verbindungszone macht nur einen kleinen Teil der Einspannlänge aus. Es ist davon auszugehen, dass sich die Verbindungszone und das durchgehende Material unterschiedlich stark ausdehnen. Daher wird die gemessene Bruchdehnung je nach Messabstand der Multisense-Messfühler anders ausfallen. Wenn die Dehnung über die Traverse gemessen wird, erhält man je nach Einspannlänge ebenfalls unterschiedliche Werte.

Die Einspannlänge und Messabstand sind nicht bei allen Testserien gleich gewählt worden aufgrund der unterschiedlichen Längen der Proben. Geschickter wäre gewesen die Proben im vornherein so zu gestalten, dass alle am Ende die gleiche Länge gehabt hätten oder diese vor dem Zugtest auf die gleiche Länge zu kürzen. Die Messfühler wurden auch nicht direkt um die Verbindungszone platziert, sondern in einem gewissen Messabstand. Es wurde dadurch also nicht die Dehnung der Verbindungszone selbst gemessen. Aus diesem Grund sind die Werte der Bruchdehnung sowie der Steifigkeit, welche aus der Dehnung und der Zugspannung berechnet wird, nicht sehr aussagekräftig.

Die einzige Bemerkung die an dieser Stelle gemacht werden kann, ist dass die EMAbond[®] Proben eine sehr niedrige Steifigkeit aufwiesen. Sehr wahrscheinlich aufgrund der relativ dicken Schicht EMAweld[®] Material in der Fuge (Anhang H.1 und Kap. 6.4.3).

6.2 Zugtests Verbindungsgeometrie

6.2.1 Zugfestigkeit

Die Geometrieproben werden aufgrund der erzielten Zugfestigkeit (Gl. 6.1, Abb. 6.3) der Proben verglichen. Die zackenförmige Verbindung, sowie die Verbindung mit den gleichlangen, schmalen Fingern und die geschäftete Verbindung schneiden in dieser Gegenüberstellung von Proben am besten ab. Die dünnere einschnittige Probe aus dem Fügemethodenvergleich weist allerdings einen noch höheren Wert für die Zugfestigkeit auf. Bei dieser Probe ist aber die Querschnittsfläche halb so gross wie bei den Proben die hier verglichen werden. Die Fügefläche ist aber nur wenig kleiner als von den hier getesteten Proben und deshalb fällt dort die Zugfestigkeit auch höher aus (Anhang H.3).

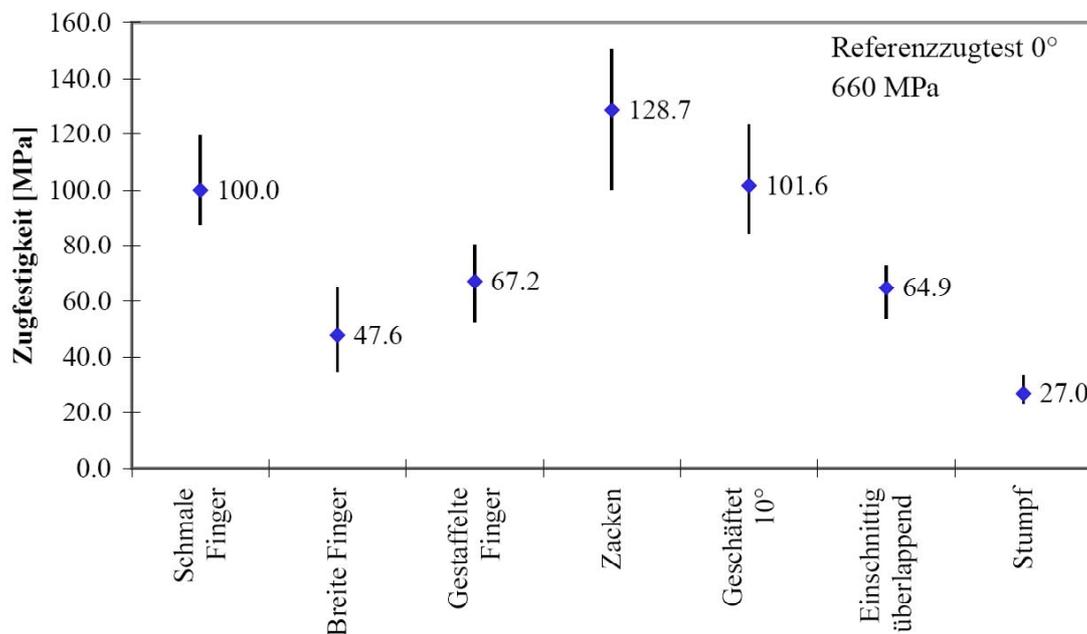


Abb. 6.3 Zugfestigkeit bei unterschiedlichen Verbindungsgeometrien, ermittelt anhand von Balken aus Plytron 0°, in Faserrichtung verbunden

Die Proben mit den versetzten (gestaffelten) Fingern haben früher gerissen als erwartet. Das ist darauf zurückzuführen, dass beim zuschneiden der 20 mm breiten Zugproben die Schnitte nicht mehr genau an den vorgesehenen Stellen platziert werden konnten (Anhang H.2). Die tiefste Festigkeit erreichte die stumpfe Verbindung mit 27.0 ± 4.6 MPa. Dies ist tiefer als die Zugfestigkeit von reinem Polypropylen mit 33 MPa [64].

Bei der 10 mm überlappenden Probe, die ohne das Anfertigen einer Stufe gefügt wurde, ist die Zugfestigkeit nicht wesentlich höher. Die Fasern der überlappenden Platten wurden beim Pressen nicht wie erhofft ineinander gedrückt, sondern eine der beiden Platten wurde im geschmolzenen Zustand gestaucht und zur Seite geschoben. Damit überlappten schlussendlich nur wenige Fasern auf einer kurzen Strecke (Anhang H.2).

Diese einschnittig überlappende Probe wurde im Gegensatz zu derjenigen im Fügemethodenvergleich aus dickeren (3.6 mm) Platten hergestellt und die Länge der Stufe ist mit 17 mm ebenfalls grösser. Die Bruchkraft liegt zwar höher, aber aufgrund

des mehr als doppelt so grossen Querschnitts ergibt sich eine geringere Zugfestigkeit. Die Zugscherfestigkeit der dickeren Proben ist etwas geringer als die der dünnen Proben. Dies ist vermutlich auf die stärker ausgeprägten Spannungsspitzen zurückzuführen, welche durch die grössere Stufenhöhe [8] und Überlappungslänge verursacht werden. Der Effekt der Überlappungslänge ist aus der Klebetechnik bekannt [18] und hat bei Fasern und Matrix sehr wahrscheinlich eine ähnliche Wirkung. Durch ausgeprägtere Spannungsspitzen wird die Erhöhung der Festigkeit, aufgrund der grösseren Verbindungsfläche, verringert.

6.2.2 Bruchdehnung und Steifigkeit

Bei der Untersuchung der Geometrieproben wurde im Gegensatz zu den Fügemethodenproben, mit Ausnahme stumpf verbundenen Probe, die gleiche Einspann- und Messlänge beibehalten. Die Messlänge von 40 mm ist bei den Proben in diesem Vergleich ebenfalls grösser als die Länge des Verbindungsbereichs.

Die meisten Proben wiesen recht kleine Bruchdehnungen auf, einzig die geschäftete Probe erzielte einen etwas höheren Wert mit 2.5%, allerdings ist die Streuung dabei sehr gross. Das liegt in erster Linie an der, mit vier Proben, sehr geringen Anzahl an Proben und daran, dass eine davon einen sehr viel tieferen Wert aufwies als die anderen drei. Wird dieser nicht berücksichtigt, liegt der Durchschnitt bei etwa 3.4%. Eine weitere Serie geschäfteter Proben ergab nochmals andere Resultate, da bei diesen Proben die Fasern sehr stark aus ihrer ursprünglichen Lage verschoben wurden beim Pressen (Anhang H.2). Aus diesem Grund wird diese Serie (Proben 5.2/5.1) im Vergleich nicht berücksichtigt.

6.2.3 Steifigkeit

Die Steifigkeiten sind durchwegs tiefer als die Steifigkeit von Plytron 0°. Hierbei kann gesagt werden, dass die Zackengeometrie in diesem Vergleich (Abb. 6.5) die steifste Verbindung darstellt und die einseitig geschäftete sowie die einschnittig überlappende Verbindung die elastischsten. Diese geringe Steifigkeit kommt wahrscheinlich zustande durch die Asymmetrie in Dickenricht.

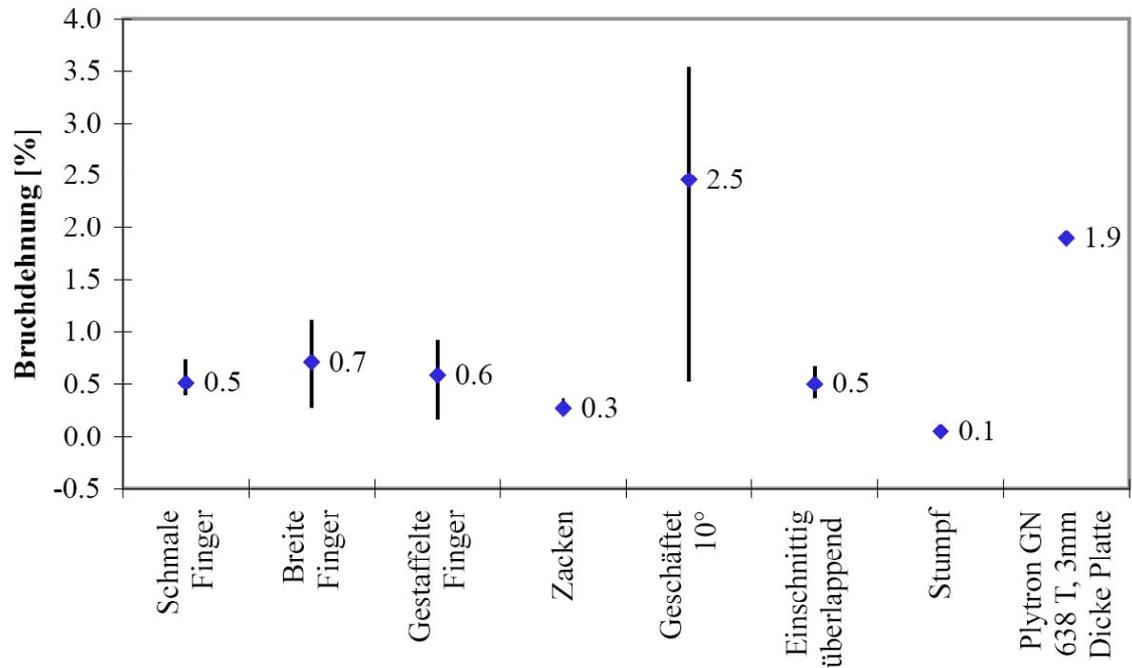


Abb. 6.4 Bruchdehnungen bei unterschiedlichen Verbindungsgeometrien, ermittelt an Balken aus Plytron 0°

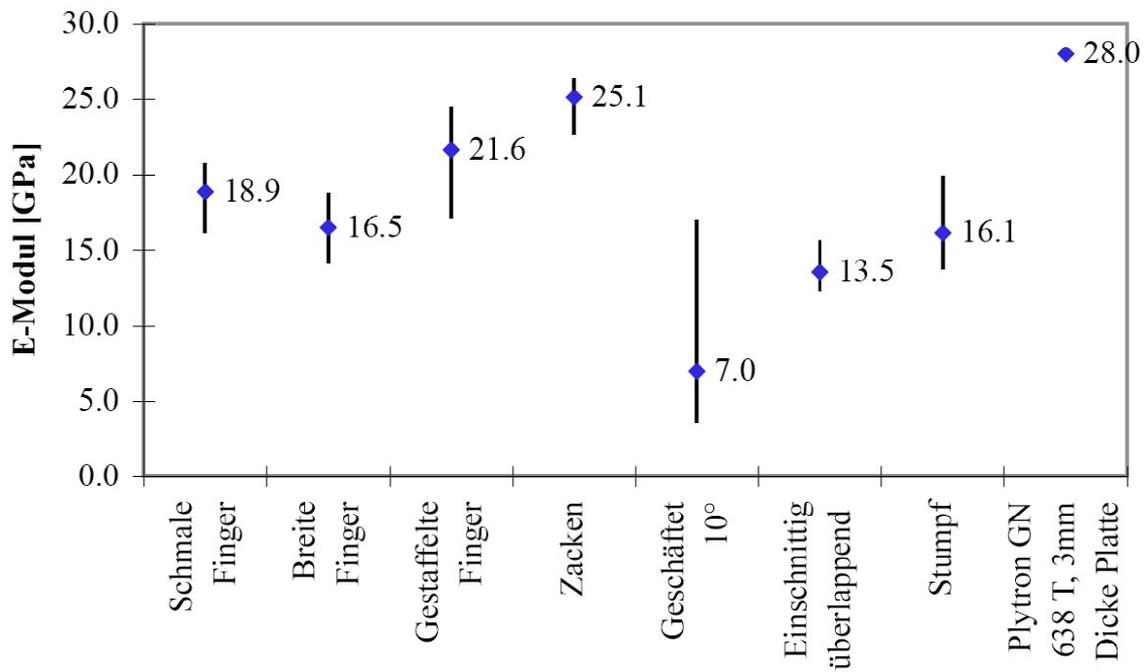


Abb. 6.5 E-Module bei unterschiedlichen Verbindungsgeometrien, ermittelt anhand von Balken aus Plytron 0°

6.3 Zugtest der Referenzproben

Die ersten Referenzproben welche auf der Zugmaschine getestet wurden, waren einfache gerade Balken aus vier Lagen Plytron Band mit einer Dicke von 1.6 mm und einer Breite von 20 mm. Diese erreichten im Zugversuch eine mittlere Zugfestigkeit von 660 MPa. Die stärkste Probe riss sogar erst bei 692 MPa. Im technischen Datenblatt für Plytron [63] wird die Zugfestigkeit von 3 mm dicken Platten aus unidirektionalem Plytron 0° mit 720 MPa angegeben. Es wurde beobachtet, dass im Einspannbereich dieser Proben Kerben entstanden durch die Spannbacken und die Querrisse sowie die Längsrisse wahrscheinlich aufgrund von Spannungsüberhöhungen dort ihren Ursprung hatten (Abb. 6.6 (a)).



Abb. 6.6 Durchgehende Plytron 0° Probe, ohne Endplatten (a) und Referenzprobe mit dickeren Enden (b), jeweils nach Zugtest, im Übergang zum Einspannbereich

Die in Kapitel 4.3 erwähnten Proben mit dickeren Enden erreichten im Zugtest im Schnitt 609 MPa (Anhang H.3), also weniger als die geraden Proben. Alle Proben weisen neben den Matrixrissen entlang der Probe auch Abrisse an den dickeren Enden auf (Abb. 6.6 (b)). In der Mikrofotografie ist in diesem Bereich eine Dekonsolidierung in der Mitte des Laminats festzustellen (Anhang H.3). Ferner sind diese Platten lediglich 1.2 mm dick, obwohl sie wie die durchgehenden Platten aus vier Lagen des Plytron Halbzeugs in Bandform gefertigt wurden. Diese (Platte 17), wie auch alle anderen Platten aus vier Lagen Plytron Band, sind zwischen 1.5 und 1.8 mm dick. Da beim Pressen nicht besonders viel Material seitlich ausgetreten ist, könnte dies darauf hinweisen, dass ein Teil des Matrixmaterials in die Enden gepresst wurde. Somit ist der Faservolumengehalt in diesen Proben höher. Dies erklärt aber die geringere Zugfestigkeit nicht direkt, da der Faservolumengehalt des Halbzeugs lediglich 35% beträgt und damit vergleichsweise niedrig ist. Eine Möglichkeit ist, dass die geringere Plattendicke, 1.2 mm gegenüber 3 mm für die angegebenen technischen Daten, mit ein Grund ist für die geringere Zugfestigkeit.

6.4 Mikrofotografische Untersuchung

6.4.1 Ultraschall-Schweissproben

Vier Proben, welche unterschiedlich lange geschweisst wurden, sind gefertigt worden. In Probe MR (0.4 s Schweisszeit) sind die Energierichtungsgeber vollständig abgeschmolzen und in der Fuge verteilt. Die beiden Platten liegen so dicht beieinander, dass die Grenze zwischen oberer und unterer Platte nicht mehr zu erkennen ist. Bei Probe ML (Abb. 6.8 (b)) ist diese noch zu sehen, aber das Matrixmaterial der beiden Energierichtungsgeber ist nach 0.3 s Schweisszeit bereits bis zum Rand der Probe verteilt worden und damit die Probe voll verschweisst.

Proben L (0.1 s, Abb. 6.8 (a)) und R (0.2 s) sind nur teilweise verschweisst. Bei der ersten Probe ist der Energierichtungsgeber noch gut zu erkennen und wie erhofft besteht er ausschliesslich aus Matrixmaterial. Die beiden tropfenförmigen Wülste (Abb. 6.8 (a)) an den Flanken des Energierichtungsgebers stammen von der abgeschmolzenen Spitze und bilden die Fließfront beim Ausfüllen des Spalts zwischen den beiden Plattenstücken.

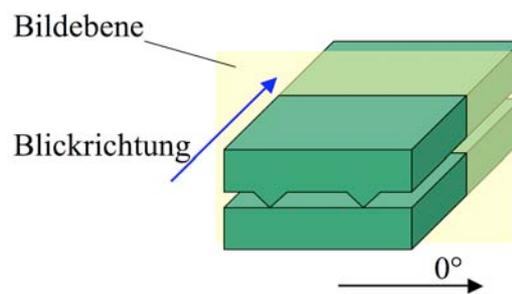


Abb. 6.7 Bildebene und Blickrichtung bei den Mikrofotografien der US-Proben

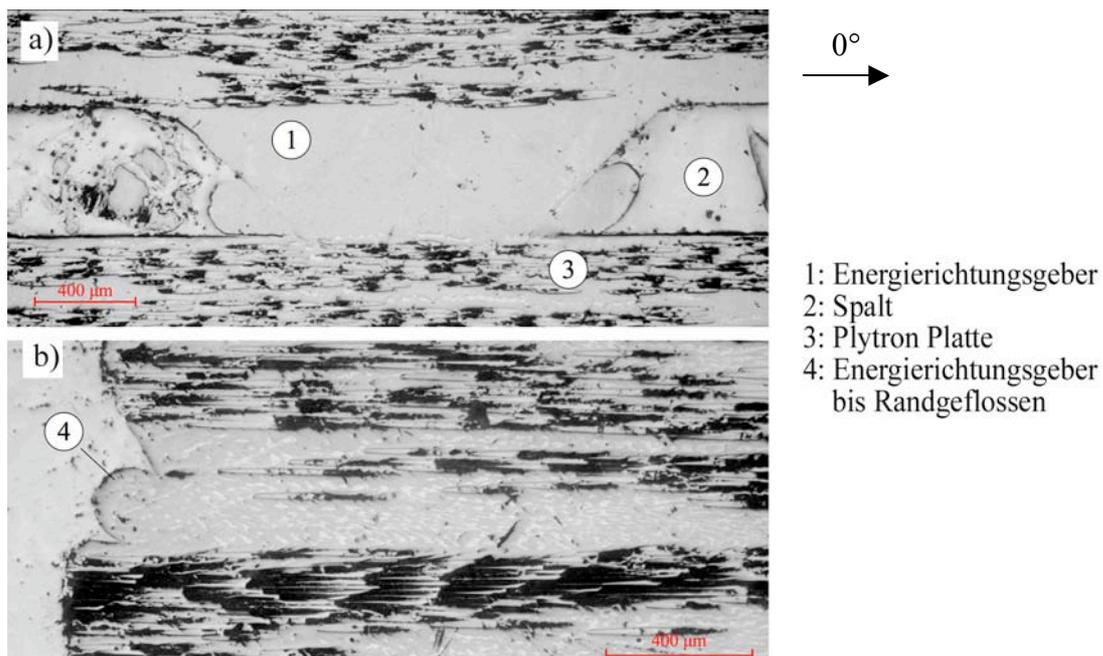


Abb. 6.8 Mikrofotografie von Ultraschall-Schweissproben aus Plytron, nach 0.1 s (Probe L (a)) und 0.3 s Schweisszeit (Probe ML (b)).

Bei allen vier Proben ist festzuhalten, dass sich im Plytron ausgehend von den Glasfasern Lunker und Risse durch den Schweissvorgang gebildet haben (Abb. 6.9), die vor der Verschweissung nicht zu finden waren. Es ist die Meinung des Autors, dass diese durch die mechanischen Schwingungen zustande kommen, denen das Material beim Fügen ausgesetzt ist. Möglicherweise bewirken die unterschiedlichen Elastizitätseigenschaften der Glasfasern und der Matrix sowie eine schlechte Faser / Matrix-Haftung eine Trennung beider Komponenten des Verbundes. Anschliessend bewirken die andauernden mechanischen Schwingungen, von dieser Stelle ausgehend, eine Zerstörung des Bauteils.

Eine andere Ursache könnte sein, dass die Fasern wie Energierichtungsgeber wirken. Beim Schweißen würde dann nicht nur die Spitze des Energierichtungsgebers, sondern auch die Matrix um die Fasern herum beginnen zu schmelzen oder durch weitere Erwärmung sogar thermisch degradieren.

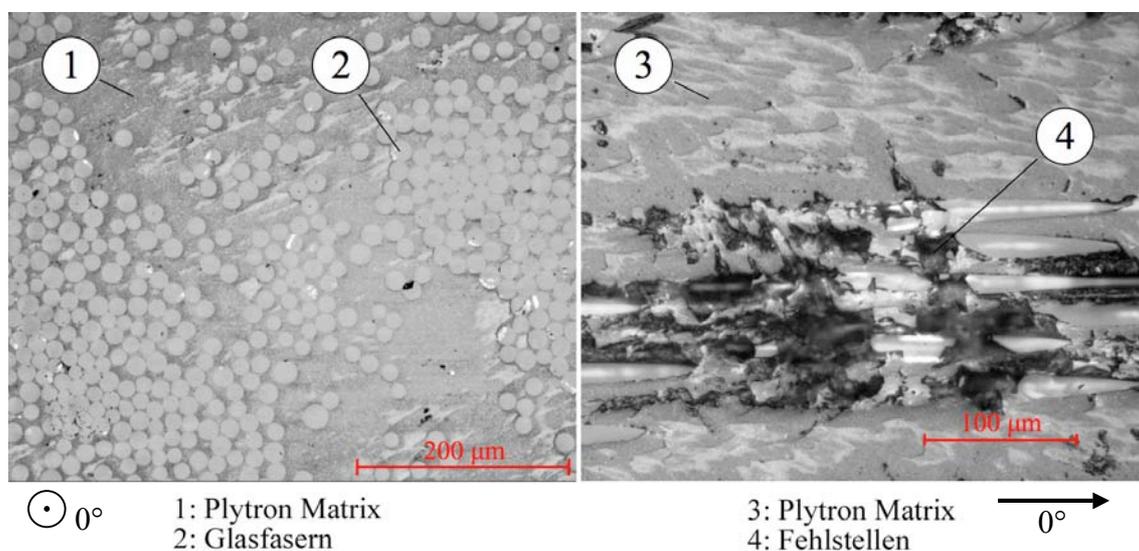
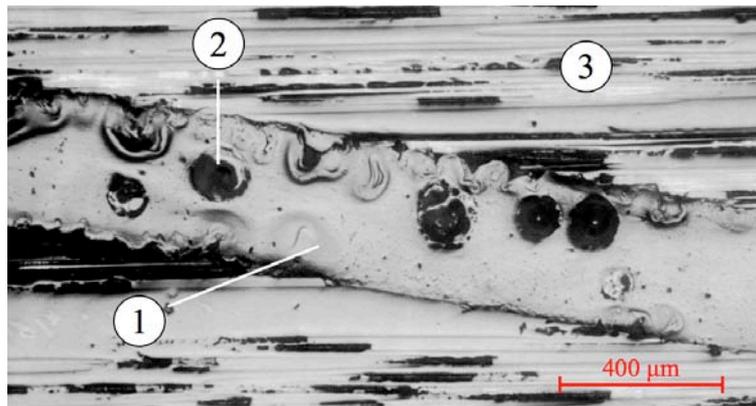


Abb. 6.9 Plytron Proben vor (links) und nach dem Ultraschall-Schweissvorgang mit einer Schweisszeit von 0.3 s (Probe ML rechts)

Es ist denkbar, dass durch die Variation der Schweissparameter, etwa durch eine Reduktion des Anpressdrucks, die Bildung von Fehlstellen verhindert werden kann. Dies müsste aber weiter untersucht werden.

6.4.2 Klebproben mit DP 8005

Bei der Applikation des Klebstoffs konnte die Verarbeitungszeit von 3 min jeweils um etwa 10 bis 15 s überschritten (Kap. 4.2.1). In der Mikrofotografie (Abb. 6.10) ist zu sehen, dass der Kleber nicht überall perfekt an der Plytron Platte anliegt. Die dunklen Flecken im Klebspalt sind Glaskugeln, die im DP 8005 enthalten sind, damit die minimale Klebschichtdicke nicht unterschritten wird. Die empfohlene Schichtdicke von 0.1 bis 0.2 mm, wurde mit 0.35 mm klar überschritten. Es wurden aber keine neuen Proben angefertigt, aus Mangel an Zeit und gering eingeschätztem, zusätzlichen Nutzen.

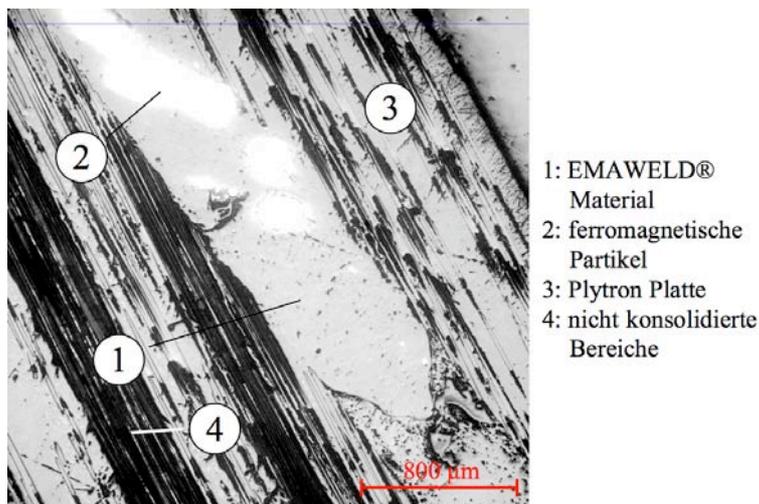


- 1: Polyolephinkleber
- 2: Glaskugeln
- 3: Plytron Platte

Abb. 6.10 Mikrofotografie von geschäfteten Plytronplatten, mit dem Polyolephinkleber DP 8005 verbunden

6.4.3 EMABond[®] Proben

Bei den EMABond[®] Proben war schon vor der Mikroskopie (Abb. 6.11) zu sehen, dass das EMAWeld[®] Material nicht richtig in der Fuge verteilt worden ist. Man kann auch erkennen, dass die ferromagnetischen Partikel, mit bis zu 1 mm Länge und 0.4 mm Breite relativ gross sind. Die Verbindung zwischen dem EMAWeld[®] Thermoplast und der Matrix im Plytron scheint, dort wo das Material wirklich geschmolzen ist relativ gut zu sein. Die Grenze ist zwar Aufgrund der Zusatzstoffe im Plytron auszumachen, ist aber zumindest Bereichsweise verschwommen, was auf eine Durchmischung hindeutet. An anderen Stellen hingegen ist die Grenze klar auszumachen.



- 1: EMAWELD[®] Material
- 2: ferromagnetische Partikel
- 3: Plytron Platte
- 4: nicht konsolidierte Bereiche

Abb. 6.11 Mikrofotografie einer Verbindung nach dem EMABond[®] Verfahren

In diesem Bild ist aber auch zu sehen, dass die Platte unten links nicht perfekt konsolidiert ist. An den beiden dunklen Stellen liegen nur Fasern ohne umschliessende Matrix. Dies wurde auch bei anderen Proben aus dem dickeren bandförmigen Halbzeug festgestellt (Anhang H.1). Bei den gefrästen Proben waren in der freigelegten Fläche auch einige Glasfaserbündel lose.

6.5 Diskussion

6.5.1 Fügemethoden

Kleben mit Polyolephinkleber

Diese Fügemethode kommt definitiv nicht in Frage für die vorliegende Anwendung. Sie ist sehr langsam bei einer Aushärtezeit von 8 bis 24 h [23]. Die Festigkeiten sind ein gutes Stück tiefer als bei den Schweißmethoden und eignen sich deshalb nicht für eine strukturelle Verbindung wie sie angestrebt wird.

Heisspressen

Die Proben welche in der Heisspresse gefertigt wurden, schnitten in den Zugtests eindeutig am besten ab. Die Verbindungsgeometrie kann relativ frei gestaltet werden, sie muss aber zugänglich bleiben für das Presswerkzeug. Ihr Nachteil ist die lange Verarbeitungszeit. So wie sie für diese Versuche durchgeführt wurden dauerte das Verbinden eines Probenpaares über eine halbe Stunde, da der Thermoplast in der Presse geheizt und anschliessend gekühlt werden musste. Natürlich würde man bei einer solchen Anwendung schlussendlich nur die Verbindungszone heizen und pressen. Um die Zykluszeiten auf ein akzeptables Niveau zu bringen müsste ausserhalb der Presse geheizt werden mit einer der vielen anderen Heizmethoden. Ein verwandtes Verfahren welches kürzere Taktzeiten erlaubt ist das QUICKTEMP-Verfahren [2], welches sonst beim Umformen eingesetzt wird. Dabei muss aber dem Übergang zu den nicht verpressten Bauteilabschnitten besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ansonsten würde dort beim Pressen die geschmolzene Matrix mitsamt den Fasern austreten. Es ist die Meinung des Autors, dass ein solches abgewandeltes QUICKTEMP-Verfahren durchaus für die strukturelle Verbindung von faserverstärkten Thermoplastprofilen geeignet wäre.

Spiegelschweissen mit anschliessendem Pressen

Das Spiegelschweissen schneidet hinter dem Heisspressen am besten ab was die Festigkeit angeht, ist mit Plytron aber eine etwas schmutzige Angelegenheit. Punkto Geschwindigkeit ist das Spiegelschweissen im Mittelfeld anzusiedeln, es wird aber ein zur Verbindungsgeometrie passendes Heizwerkzeug und eine Presse mit entsprechendem Werkzeug benötigt. Die Verbindungsgeometrie kann recht ausgefallen sein, muss aber für ein Heizwerkzeug zugänglich sein, welches auch von der geschmolzenen Fügezone entfernt werden kann ohne diese zu deformieren. Diese Methode gehört eher nicht zu den Spitzenkandidaten, könnte aber bei Thermoplasten, die weniger am Werkzeug kleben bleiben als Plytron, eine Option sein.

Infrarotbeheizung und Pressen

Die Festigkeit für eine mit Infrarot geheizte und gepresste Verbindung wurde nicht getestet, aber würde schätzungsweise im Bereich der Spiegelschweissung liegen. Das Beheizen mit Infrarot kann lokal eingesetzt werden. Ist das Profil stark konturiert, etwa bei einem U- oder Hut-Profil, müssen dafür speziell geformte oder mehrere kurze Strahler eingesetzt werden, um eine gleichmässige Beheizung zu gewährleisten. Die Geometrie der Verbindung muss für die Strahler zugänglich sein und in einem

Presswerkzeug gepresst werden können. Sie darf auch nicht allzu stark deformieren wenn sie im geschmolzenen Zustand nicht gestützt wird, ansonsten müsste dieses Problem noch behoben werden. Es besteht hierbei auch die Gefahr der oberflächlichen Degradation der Werkstoffe durch Überhitzung. Diese Gefahr ist umso grösser je tiefer das Bauteil in der Verbindungszone geschmolzen werden muss, da dann die benötigte Heizzeit stark ansteigt. Man ist dabei auf die Wärmeleitung im Material angewiesen, welche die Wärme von der Oberfläche ins Innere leitet, da die Heizleistung der Infrarotstrahlen an der Oberfläche bei Plytron deutlich stärker ist als in der Tiefe.

Beheizung mit erzwungener Konvektion

Für die lokale Beheizung der Verbindungszone mit erzwungener Konvektion sollte eine speziell dafür ausgelegte Richtdüse verwendet werden, welche die ganze Verbindungszone gleichmässig beheizt. Für die Verbindungszonengestaltung gilt Ähnliches wie bei den Infrarotstrahlern. Ebenso ist die Degradation ein Problem, vor allem wenn mit Luft geheizt wird.

Von diesen beiden Methoden ist nach der Meinung des Autors die IR-Variante vorzuziehen, da dort die Beheizung gezielter ausgeführt werden kann. Falls die Fügeflächen gleichmässig beheizt werden können ohne lokal zu überhitzen, stellt die Infrarotbeheizung eine saubere und relativ schnelle Methode dar, mit welcher die Profile vor dem Pressen beheizt werden können. Nach der Ansicht des Autors kann dieses Verfahren durchaus für den vorliegenden Prozess verwendet werden.

Induktionsschweissen mit Heizdraht

Die Beheizung geschieht hierbei sehr lokal um die Drähte, daher sollten entsprechend der Grösse der Schweissfläche mehrere Drähte eingesetzt werden. Ob eine hohe Drahtdichte sich nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt, ist nicht ganz klar. Diese hängen aber umso stärker von der Verträglichkeit des Drahtes mit dem Verbundwerkstoff und deren Haftung ab, je mehr davon eingesetzt werden. Auch in diesem Fall müssen die beiden Teile bei der Verschweissung zusammengepresst werden, um eine Dekonsolidierung zu verhindern.

Induktionsschweissen mit dem EMABond[®] Verfahren

Die Proben haben gezeigt, dass es grundsätzlich zu einer Verschweissung kommt, aber die Parameter noch eingestellt werden müssten. Das EMAweld[®] Material selbst müsste um das Optimum herauszuholen, wie in Kapitel 4.2.3 erwähnt, in Zusammenarbeit mit dem Hersteller auf das Plytron oder das entsprechende Verbundmaterial abgestimmt werden. Die Verbindungsgeometrie ist dadurch eingeschränkt, dass das EMAweld[®] Material nach der Verschweissung im innern der Verbindung zu liegen kommen sollte. Damit wird die Nachbearbeitung überflüssig und die Naht sieht optisch gut aus. Die Verbindung sollte für die Induktionsspule möglichst zugänglich sein.

Nach dem Erachten des Schreibers sind beide Induktionsschweissmethoden grundsätzlich geeignet, allerdings wegen der Grösse der eingebrachten Fremdelemente eher bei grösseren Wandstärken. Zweckmässiger wäre da das Induktions- oder Widerstandsschweissen wenn Kohlefaserlagen für die Beheizung eingesetzt würden.

Ultraschallschweissen

Wie in Kapitel 4.2.6 erwähnt, ist das Ultraschallschweissen bei stark konturierten Profilen nicht zweckmässig, da der Schweissbereich eben und parallel zur Ansatzstelle der Sonotrode sein muss. In der Verbindung sind zudem Energierichtungsgeber einzuplanen, die optimalerweise gepresst würden und möglichst senkrecht zur Faserrichtung der obersten Schicht verlaufen, um zu erreichen, dass sie hauptsächlich aus Matrixmaterial bestehen. Für die Verwendung mit Plytron müsste noch geklärt werden, ob die Schädigung der Matrix (Kap. 6.4.1) durch die Anpassung der Verarbeitungsparameter verhindert werden kann.

Vibrationsschweissen

Aufgrund des teuren Werkzeugs das benötigt würde, wurden keine Proben mit Vibrationsschweissen hergestellt. Den Angaben von Hr. Kunz (Branson ATG [42]) zufolge ist das Ultraschallschweissen das heiklere der beiden Verfahren und wenn mit Ultraschall eine Verschweissung zustande kommt, funktioniert das Vibrationsschweissen normalerweise auch. Es werden in der Regel ebenfalls Schweissgeometrien benötigt, welche die Energie konzentrieren und im Verlauf des Vorgangs in der Fuge verteilt werden. Die Verbindungsgeometrien sind eingeschränkt. Beim linearen Vibrationsschweissen muss die Verbindung einen Freiheitsgrad aufweisen in welche, die Vibrationsbewegung ausgeführt werden kann und es muss senkrecht zur Verbindungsfläche ein Druck ausgeübt werden können.

Für das Ultraschallschweissen und Vibrationsschweissen sind es die geometrischen Einschränkungen, welche sie für das Verbinden der komplexen Profilquerschnitte nach der Ansicht des Autors ausscheiden lässt.

6.5.2 Verbindungsgeometrie

Die Ergebnisse aus dem Vergleich dieser Verbindungsgeometrien sind nicht ganz einfach zu interpretieren. Das eigentliche Problem ist, dass man nicht einfach zwei Verbindungen miteinander vergleichen kann. Hier wurde bestimmt, dass die Verbindungen dieselbe Fügefläche in Faserrichtung aufweisen sollen, um die unterschiedlichen Gestaltungsvarianten (Zacken, Finger, Schäftung, einschnittige Überlappung) der Verbindungsgeometrien beurteilen zu können. Lediglich beim Vergleich der schmalen und breiten Finger wurde der Einfluss der Seiten- oder Längenverhältnisse innerhalb einer Gestaltungsvariante untersucht. Der Grösseneinfluss (Scaling) wird hier nicht analysiert.

Die Proben mit schmalen Fingern und die Zacken, sowie die geschäfteten Proben und die lange einschnittig überlappende Probe sind noch am ehesten vergleichbar über die Zugfestigkeit. Allerdings haben sich auch hier Abweichung in der Geometrie ergeben einerseits beim Zuschneiden, andererseits aber auch durch die unterschiedliche Plattendicken und die Verschiebungen der Fasern, die sich beim Pressen ergeben haben. Die beiden letztgenannten (geschäftete und einschnittig überlappende Proben im Geometrievergleich) sind zudem aus den Plytron Blättern, welche die halbe Dicke der bandförmigen Prepregs haben. Dieser Vergleich der Geometrien muss deshalb etwas anders angegangen werden.

Vergleicht man die schmalen Finger mit den Zacken, welche ziemlich genau die gleiche Länge der Fügefläche in Faserrichtung, sowie Dicke und Breite haben, kommt man zum Schluss, dass die gezackte Verbindung die höhere Zugfestigkeit aufweist. Beim Vergleich der geschäftete Probe mit der einschnittig überlappenden Probe kommt man ebenfalls zum Ergebnis, dass die Probe mit auslaufenden Enden besser abschneidet. Es ist daher anzunehmen, dass Spannungsüberhöhungen an den Enden der Finger sowie am Ende der Überlappung auftreten. Diese könnten ähnlich zustande kommen wie die interlaminaeren Spannungen bei Dickenänderungen. In der Vorlesung Leichtbau 3 wird bei Dickenänderungen empfohlen, die Lagen eines Laminats einzeln auslaufen zu lassen und nicht „en Block“ [8].

Abschätzung der optimalen Seitenverhältnisse

Aus diesem Grund sollte die Festigkeit bei geringerer Breite der Finger verbessert werden können. Wird die Fingerlänge beibehalten, steigert sich dadurch auch die totale Überlappungsfläche. Vorausgesetzt, dass die Spannungsspitzen abgebaut werden können und die gesamte Zugkraft alleine durch die Scherbelastung der Matrix in der Verbindungszone von den Fasern auf die Fasern der anderen Seite übertragen werden, wird durch die Vergrößerung der Überlappungsfläche der Fasern die Festigkeit der Verbindung proportional gesteigert. Liegen die Zugfestigkeit und die Scherfestigkeit in Faserrichtung vor und kann die Scherspannungen über die Länge der Überlappung als konstant angenommen werden, lässt sich das benötigte Länge-Breite Verhältnis errechnen, mit dem die Bruchkraft des durchgehenden Materials an der Basis des Fingers über eine Scherbelastung übertragen werden kann (Abb. 6.12, Gl. 6.3). Die Bruchkraft einer durchgehenden Platte wird auf diese Weise aber nicht übertragen, denn die Fingerenden, wo die Fasern der beiden UD-Platten stumpf zusammenlaufen, müssten ebenfalls die Hälfte der Zugkraft tragen. Ähnlich lässt sich dies auch für die Zackengeometrie errechnen, wenn angenommen wird, dass die Zacken sehr flache Flankenwinkel aufweisen und die Belastung der Verbindungsfläche als reine Schubbelastung idealisiert wird (Gl. 6.3). Die Herleitung ist im Anhang E zu finden.

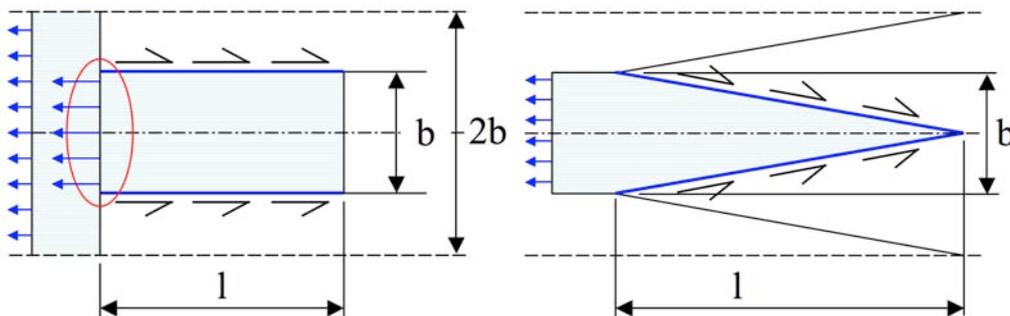


Abb. 6.12 Gleichgewichte an einer allgemeinen Finger- und Zackenverbindung

Zackengeometrie:
$$\frac{l}{b} > \frac{\sigma_B}{2\tau_B} = \frac{720}{2 \cdot 19} \approx 19 \quad \text{Gl. 6.3}$$

Zugfestigkeit	: $\sigma_B = 720 \text{ MPa}$
Scherfestigkeit	: $\tau_B = 19 \text{ MPa}$
Länge	: $l [\text{mm}]$
Breite	: $b [\text{mm}]$

Diese idealisierte Rechnung ergibt, im Falle einer UD-Zugprobe aus Plytron, ein optimales Verhältnis von Länge zu Breite von etwa 19:1 für die Zacken. Ab diesem Seitenverhältnis sollte nach der Modellierung ein Bruch aufgrund einer Zugbelastung nicht mehr notwendigerweise in der Verbindung stattfinden. Zum Vergleich, die getesteten Zacken wiesen ein Länge zu Breite Verhältnis von 5:2 auf und erreichten im Zugtest im Schnitt nicht einmal 20% der Zugfestigkeit vom durchgehenden Material

Bei der geschäfteten Verbindung kann ähnlich vorgegangen werden. Für eine zweiseitige Schäftung würde entsprechendes gelten wie für die Zacken. Das nach dem Modell optimale Verhältnis von Laminatdicke zu Schäftlänge wäre ebenfalls 19:1, was einem Schäftwinkel von etwa 1.5° entspricht.

Machbarkeit

Ein solches Seitenverhältnis ist aus der Sicht der Fertigung etwas problematisch. Bei einer Zackenbreite von 2 mm müssten sie 38 mm lang sein. Eine solch feine Struktur könnte mit einem Wasser- oder Laserstrahl heraus geschnitten werden. Bei der Verwendung eines Lasers wäre es möglich, dass das Material an der Spitze geschmolzen würde. Um die Struktur mit Sägeblättern bearbeiten zu können müssten diese selbst sehr schmal sein und geringe Schnittkräfte aufweisen um die Zacken nicht abzurechen. Das Zusammenführen zweier solcher Geometrien dürfte auch mit gewissen Komplikationen verbunden sein, da die beiden Teile sehr genau Positioniert werden müssen vor dem Zusammenfahren.

Nach der Ansicht des Verfassers sollte es möglich sein, durch die Optimierung der Zackengeometrie oder der zweiseitigen Schäftung bei einer verschweissten UD-Zugprobe, in die Nähe der Materialfestigkeit zu kommen. Bei einer Fingergeometrie hingegen verhindert dies wahrscheinlich die Verteilung der Faserenden. Werden die Finger nicht versetzt, enden je die Hälfte aller Fasern einer UD-Probe an zwei Stellen entlang der Länge einer solchen Zugprobe. Der Autor ist der Meinung, dass dieser Einfluss jedoch bei einem anderen Lagenaufbau weniger gravierend ist Um mehr sagen zu können müsste dies durch Simulationen und Experimente gründlich untersucht werden.

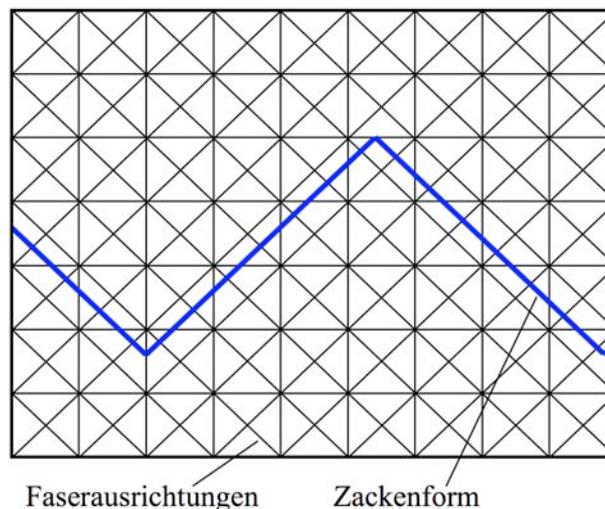


Abb. 6.13 Schematische Darstellung eines Multiaxialgeleges mit Zackenverbindung

Bei einem allgemeinen Laminataufbau, beispielsweise bei einem Multiaxialgelege und anderen Lastfällen als der Zugbelastung, ist wahrscheinlich eine Zackengeometrie nicht

optimal (Abb. 6.13). Die Fasern einzelner Ausrichtungen würden mehrfach getrennt durch die Zacken und der grösste Teil der Fasern würde in einem relativ grossen Winkel auf die Trennfläche treffen. Da könnte sich eine Gestaltung in Dickenrichtung eher als nützlich erweisen, wo grössere Bereiche gleicher Faserausrichtung oder in einem Winkel bis 45° sich überlappen können. Um bei einem solchen Laminat und Lastfall die Festigkeit des durchgehenden Materials zu erreichen, kommt man wahrscheinlich nicht um eine Verdoppelung der Lagen (Abb. 6.14 und Abb. 6.15) und damit verbundenen Verdickung oder Erhöhung des Faservolumengehalts an der Stelle der Verbindung herum.

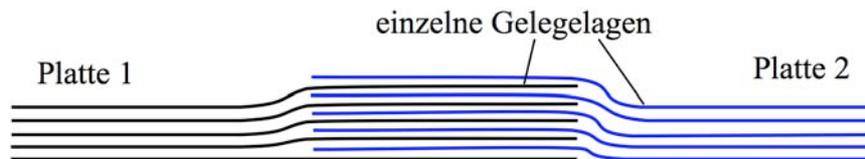


Abb. 6.14 Schematische Darstellung einer lagenweisen Überlappung

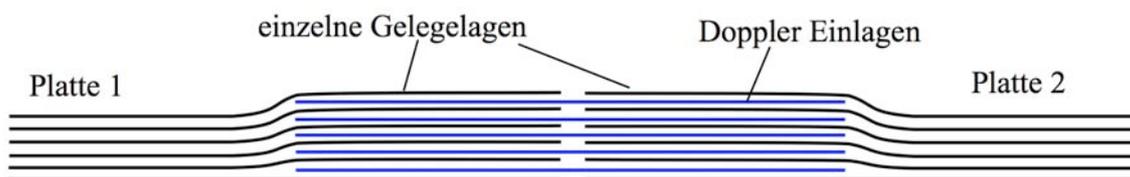


Abb. 6.15 Schematische Darstellung der lagenweisen Verbindung mit Doppler Einlagen

Es ist die Meinung des Verfassers, dass die optimale Geometrie einer Verbindung von den folgenden Faktoren abhängt: Laminataufbau, Lastfall, Fügemethode, Mechanische Eigenschaften der Faser und der Matrix. Es ist denkbar, dass für bestimmte Kombinationen dieser Faktoren optimale, nahtlose Verbindungsvarianten gefunden werden können und dass es andererseits Kombinationen gibt, für die keine nahtlose Verbindung in Frage kommen kann aufgrund von zu schlechten mechanischen Eigenschaften.

7 Fügekonzepte

In diesem Kapitel wird zuerst die Findung der Konzepte erläutert. Anschliessen werden zwei viel versprechende Konzepte präsentiert und in abschliessenden diskutiert.

7.1 Konzeptfindung

7.1.1 Anforderungen

In der in Kapitel 1.2 beschriebenen Ausgangssituation wird vorausgesetzt, dass am Ende des vorangehenden Prozessabschnittes ein Profilring entstanden ist. Der Endlosstrang ist noch nicht in einzelne Stücke zerteilt. Der Strang wird kontinuierlich vorgeschoben, wodurch eine Profilschnecke entsteht. Diese wird ab einer gewissen Länge, welche einen oder auch mehrere volle Ringe umfassen kann, abgetrennt und steht bereit zur weiteren Bearbeitung.

Nachfolgend müssen die Enden bearbeitet werden, so dass sie zusammengebracht und verbunden werden können. Die entstandene Verbindung soll möglichst die gleichen mechanischen Eigenschaften aufweisen wie der Rest des Ringes. Sie soll ebenso eine gute optische Qualität aufweisen. Dies bedeutet, dass an der Verbindungsstelle der Profilschnitt beibehalten wird und eine glatte Oberfläche entsteht.

Zudem muss dieser Teilprozess zu den vorgelagerten Prozessen kompatibel sein und bei hohen Stückzahlen möglichst wenig kosten, da eine preiswertere Alternative zur direkten Herstellung von geschlossenen Profilringen aus thermo- oder duroplastischen Faserverbundwerkstoffen angestrebt wird.

7.1.2 Morphologischer Kasten

Im Wesentlichen besteht dieser Teilprozess aus drei Komponenten, welche gut aufeinander abgestimmt werden müssen: die Fügemethode, die Verbindungsgeometrie sowie die Methode wie die Geometrie bearbeitet wird.

Die fünf aussichtsreichsten Kandidaten jeder Komponente für das Gesamtkonzept sind im morphologischen Kasten (Abb. 7.1) dargestellt. Von den möglichen Kombinationen machen nur wenige wirklich Sinn. Die zwei nach der Ansicht des Autors sinnvollsten Varianten und verwandte Alternativen dieser Konzepte sind durch Linien verbunden und werden in den folgenden Kapiteln ausführlich beschrieben.

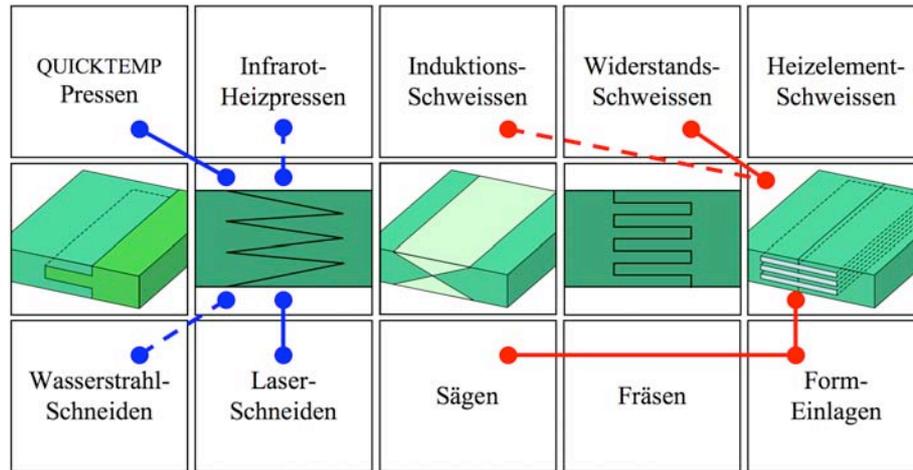


Abb. 7.1 Morphologischer Kasten zu Konzepten für das nahtlose Verbinden von thermoplastischen Verbundwerkstoffen mit komplexen, aus ebenen Halbzeugen umgeformten, Profilquerschnitten

7.2 Konzept 1: Abgewandeltes QUICKTEMP-Pressen einer Zackenverbindung

Bei diesem Konzept werden die Enden der Profilringe durch Laserschneiden mit einem Schneidroboter, in eine gezackte Form gebracht (Abb. 7.2). Dieser müsste je nach Komplexität der Profile 2 bis 5 Freiheitsgrade aufweisen. Die beiden Enden werden zusammen gebracht und in der Presse gefügt. Nach dem Entformen folgt die Nachbearbeitung der Verbindungszone welche in einem Schritt gemacht werden kann, zusammen mit der Nachbearbeitung für den Rest des Profilrings.

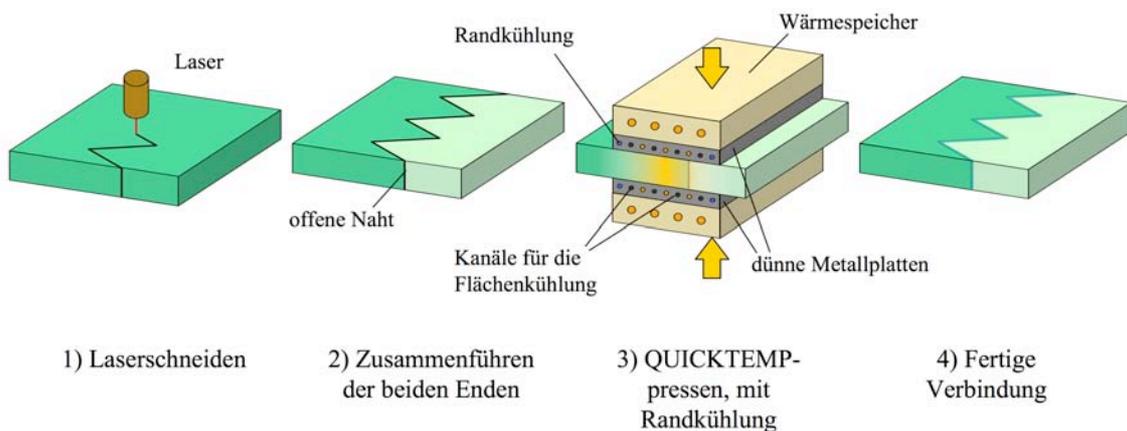


Abb. 7.2 Schematischer Ablauf des abgewandelten QUICKTEMP-Verfahrens, um Profile aus thermoplastische Verbundwerkstoffe längs zu verbinden

Laserschneiden der Zackenform

Es hat sich im Verlauf dieser Arbeit gezeigt, dass die Zackenform welche senkrecht zur Laminebene herausgeschnitten wird, gegenüber den anderen getesteten Verbindungsgeometrien gewisse Vorteile hat. Sie ist bei ebenen Proben vergleichsweise einfach herzustellen. Dies ist aber auch bei einigermassen komplexen Profilen noch machbar. Die Verteilung der Faserenden ist gleichmässig über die Länge der Verbindung, wodurch eine weniger ausgeprägte Sollbruchstelle entsteht (Kap. 3.1).

Das Laserschneiden eignet sich besonders gut für diese Geometrie, da damit sehr schmale Schnittfugen gemacht werden können, die Schnittgeschwindigkeit schnell ist und es gut mit einem Schneidroboter kombiniert werden kann. Dieser ist notwendig um bei den Profilen perfekt passende Enden zuschneiden zu können. Falls Kohlefasern verwendet würden, müsste auf ein anderes Schneidverfahren ausgewichen werden.

QUICKTEMP-Pressen mit Randkühlung

Das Ziel dieses Verfahrens ist es durch die Reduktion der thermischen Masse, welche geheizt und gekühlt werden muss, energieeffizienter, schneller und damit kostengünstiger pressen zu können. Anders als beim QUICKTEMP-Verfahren wird hier nicht das ganze Bauteil, sondern nur die Verbindungszone gepresst (Abb. 7.3). Am Rand der dünnen Metallplatten, wo das thermoplastische Bauteil aus dem Werkzeug ragt, darf dieses die Schmelztemperatur nicht überschreiten, sonst quillt an der Stelle die Schmelze beim Pressen aus der Form. Dieser Bereich muss also sehr lokal gekühlt werden, ähnlich wie in Kapitel 2.4.4 angesprochen und später versucht wurde (Kapitel 4.4.3).

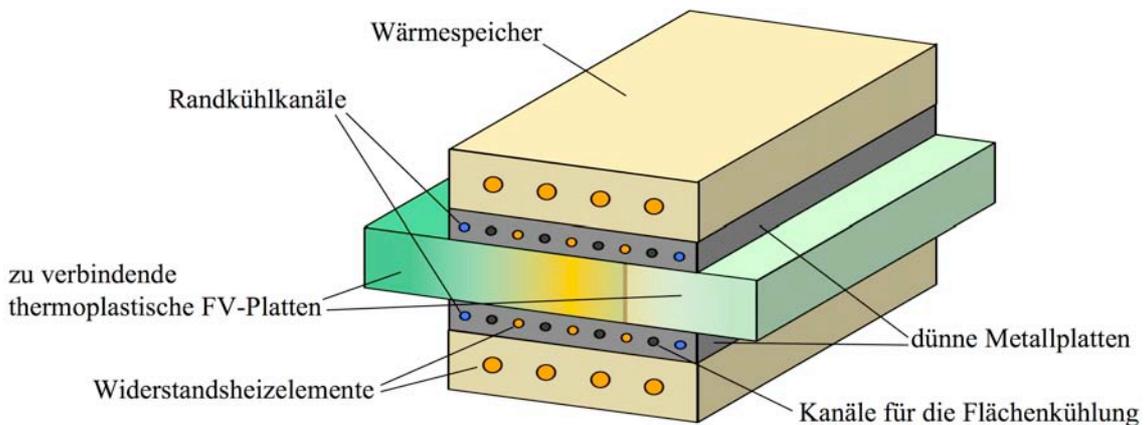


Abb. 7.3 QUICKTEMP-Pressen mit Randkühlung

Die Druckverteilung im Werkzeug könnte durch die unterschiedlichen Temperaturen und wegen der Anwesenheit von geschmolzenen und festen Abschnitten im Pressbereich variieren. Diese Problematik müsste jedenfalls genauer untersucht werden.

7.2.1 Alternative Teilschritte

Lokale Infrarotbeheizung

Anstelle des abgewandelten QUICKTEMP-Verfahrens könnte die Verbindungszone auch lokal beheizt werden mit Infrarotstrahlern und anschliessend in einer kalten Presse wie beim Stempelumformen [2] rasch wieder erstarrt werden.

Da die Zacken in geschmolzener Form zumindest an den Enden eine geringe Eigenstabilität aufweisen, muss die Verbindungszone einseitig gestützt werden. Dies kann durch eine dünne Form bewerkstelligt werden, damit dadurch nicht allzu viel Wärme werkzeugseitig abgeleitet wird. Dicht über der offenen Seite wird ein Infrarotstrahler platziert. Für eine gleichmässige Beheizung sollte dieser entweder speziell für das Profil ausgelegt sein oder aus mehreren kleineren Elementen bestehen, damit diese der Form des Profils entsprechend platziert werden können.

Um die Beheizung der Verbindungsfläche zu begünstigen kann ein zweiteiliges Stützwerkzeug verwendet werden, womit die beiden Seiten für das Aufheizen leicht auseinander gefahren werden. Anschliessend wird das Stützwerkzeug zusammen geschoben, der Infrarotstrahler entfernt und die noch geschmolzene Verbindung gepresst. Damit das Bauteil nicht noch transferiert werden muss, kann die IR-Beheizung in der Presse geschehen. Andererseits sind höhere Zykluszeiten möglich wenn Aufheizung und Kühlung parallel betrieben werden.

Wasserstrahlschneiden

Anstelle von einem Laser könnte auch eine Wasserstrahlschneidmaschine zum Einsatz kommen. Insbesondere bei Bauteilen mit Kohlefasern müsste man auf diese Schneidtechnik zurückgreifen. Wasserstrahlschneiden bietet weitgehend ähnliche Vorteile wie das Laserschneiden, zudem besteht hierbei keine Gefahr der thermischen Degradation und keine Belastung der Umgebung durch Dämpfe. Eine Solche Anlage ist allerdings relativ laut und feucht.

Sägen bei relativ flachen Profilen

Wenn die Profile mehr oder weniger eben sind, könnte eine Reihe von parallelen Sägeblättern eingesetzt werden, um in zwei Schritten die beiden Flanken der Zacken zu zuschneiden.

7.3 Konzept 2: Widerstandsschweissen von elektrisch leitenden Einlagen

Bei diesem Konzept wird vorausgesetzt, dass im Lagenaufbau der Halbzeuge, noch vor der Umformung und Konsolidierung des Profils, Platzhalter platziert werden können. Diese werden nach dem Auftrennen entfernt und durch gleichgrosse Verbindungselemente ersetzt. Diese Verbindungselemente sind zugleich die Heizelemente für die anschliessende Widerstandsverschweissung. Zum Abschluss werden die vorstehenden Kontaktierungen der Heizelemente entfernt bei der Nachbearbeitung.

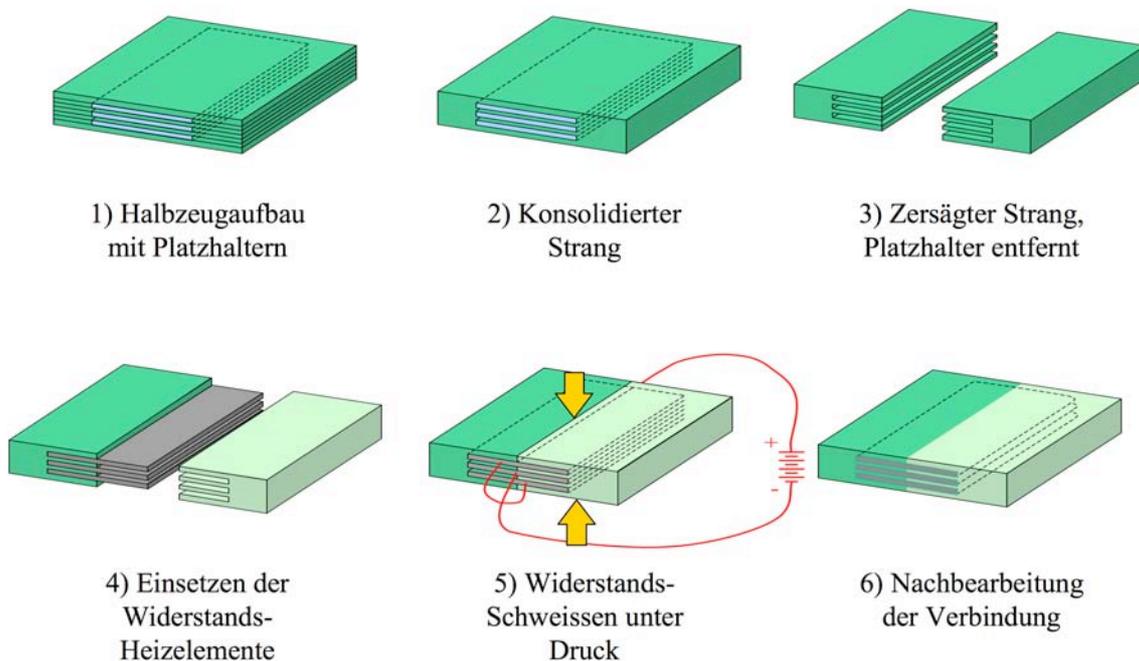


Abb. 7.4 Schematischer Ablauf eines Widerstandsschweissverfahrens um Profile aus thermoplastische Verbundwerkstoffe längs zu verbinden

Einlage von Platzhaltern

Die Position der Platzhalter wird durch die Länge, welche spätere zugeschnitten wird, bestimmt. Im Falle von ringförmigen Strukturen ist dies der Umfang des Rings. Ist das Profil stark konturiert, bzw. ist der Umfang an unterschiedlichen Stellen des Profils stark verschieden, können die Einlagen entsprechend gestaltet werden (Abb. 7.5). An den Stellen wo der Umfang geringer ist, werden die Platzhalter breiter sein. Unter Umständen kann es notwendig sein, dass einige Lagen des Laminats durchgehend sind bei der Umformung und Konsolidierung, um den Strang zusammenzuhalten.

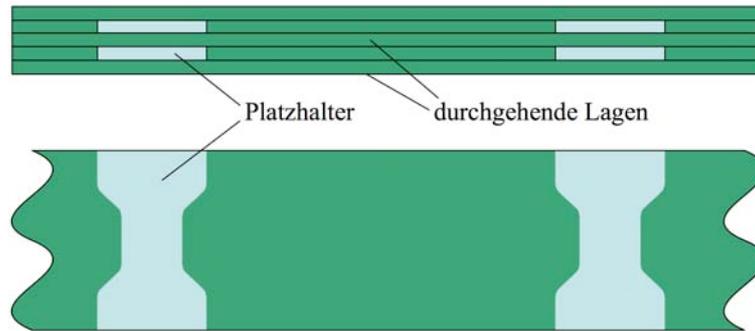


Abb. 7.5 Mögliche Gestaltungsvariante für Platzhalter

Auftrennung und Entfernung der Platzhalter

Der umgeformte Strang wird mit einer Säge oder auch einer anderen Methode an den Stellen der Platzhalter aufgetrennt. Falls ein gerader Schnitt gemacht werden kann, ist das Sägen wahrscheinlich die einfachste Variante. Die Platzhalter sollten von dem konsolidierten Thermoplast gut trennbar sein, damit sie einfach entfernt werden können. Man könnte sie auch aus einem Material fertigen, welches mit Wasser oder einer anderen Flüssigkeit, etwa einer Säure oder Base, welche die Matrix nicht angreift, herausgespült werden kann.

Einsetzen der Verbindungselemente

Die Verbindungselemente werden in die entstandenen Schlitze geschoben. Es könnte, insbesondere wenn viele dieser Einlagen eingesetzt werden müssen, eine Schablone oder eine Halterung für die erleichterte Platzierung verwendet werden. Im Falle einer Widerstandsschweißung könnte die Einlage ein Kohlefasergewebe sein, mit derselben thermoplastischen Matrix wie das Bauteil selbst.

Widerstandsschweißung

Die Enden eines solchen Gewebes sollten, für eine verbesserte Kontaktierung bei der Verschweißung, freigelegt werden und aus der Verbindung seitlich heraus ragen [34]. Falls das Bauteil selbst aus Kohlefasern ist, können die Widerstandsheizelemente, wie durch Marcos Arias in seiner Dissertation[34] vorgeschlagen, mit einer weiteren Lage Thermoplastfolie umschlossen werden, um sie elektrisch vom Bauteil zu trennen.

Nachbearbeitung

Die Enden der Einlagen, welche für die Kontaktierung benötigt wurden, müssen zum Schluss noch abgetrennt werden.

7.3.1 Alternative Teilschritte

Dopplereinlagen

Hierbei werden die Halbzeuge nicht bereits vor der Umformung und Konsolidierung aufgetrennt. Die Platzhalter werden einfach zwischen die einzelnen Lagen gelegt. Dies könnte bei der Umformung allerdings problematisch sein, da an gewissen Stellen der Strang aufgrund der Platzhalter dicker wäre als an anderen. Nach dem Einsetzen der Verbindungselemente und dem Pressen, wird die Verbindungsstelle dicker sein als der Rest des Bauteils.

Wahrscheinlich ist es, aufgrund der hohen Viskosität der thermoplastischen Matrix, nicht möglich diese aus der Verbindung zu pressen, wie es bei Duroplasten gemacht werden kann bei der Verwendung von Dopplern. Zudem müsste der Faservolumengehalt des Bauteils relativ gering sein, damit dieser in der Verbindung verdoppelt werden könnte. Die unterschiedlichen Dichten von Faser und Matrix hätten eine Unwucht im rotationssymmetrischen Bauteil zufolge, ebenso wie dies bei einer Aufdickung der Verbindung der Fall wäre.

Es geht hier darum zu verhindern, dass die Hälfte aller Fasern an einer Stelle zusammen endet. Dies ist dasselbe Problem wie bei der Fingergeometrie (Kapitel 3.1 und 6.5.2).

Versetzte Einlagen oder unterschiedliche Längen

Das zuvor angesprochene Problem könnte auch angegangen werden durch das Versetzen der Einlagen oder durch den Einsatz von unterschiedlichen Einlagelängen. Dem liegt dieselbe Überlegung zugrunde wie bei der versetzten Fingergeometrie.

Induktionsschweissen

Anstelle vom Widerstandsschweissen könnte bei geringen Materialstärken und Zugänglichkeit der gesamten Verbindung, auch Induktionsschweissen eingesetzt werden. Wenn viele Lagen verwendet werden und dementsprechend viele Verbindungselemente tief im Inneren des Materials liegen, könnte es sein, dass die Verbindungselemente nicht gleichmässig erwärmt werden. Auch in diesem Fall könnten Kohlefasereinlagen verwendet werden.

Abgewandeltes QUICKTEMP-Verfahren

Anstelle der beiden oben genannten Schweißmethoden kann auch hier ein abgewandeltes QUICKTEMP-Verfahren mit Randkühlung eingesetzt werden wie in Kapitel 7.2 beschrieben. In diesem Fall könnten Einlagen aus demselben faserverstärkten Halbzeug verwendet werden, aus welchem das übrige Bauteil hergestellt wurde. Damit wäre die Verträglichkeit des Einlagematerials und des Bauteils sichergestellt.

7.4 Beurteilung der Konzepte

Nahtqualität

Die Nahtqualität der gepressten Zackenverbindung aus Konzept 1 ist eher besser einzustufen als diejenige der Widerstandsschweissung. Mit der Verteilung der Faserenden auf den gesamten Verbindungsbereich bei der Zackenverbindung sind die auch die höheren Zugfestigkeiten zu erwarten, als bei den Einlagen wo sie an einzelnen Stellen zusammen enden. Ist jedoch der Lastfall komplexer und wird kein UD Laminat verwendet, würde wahrscheinlich die Variante mit den Einlagen höher Festigkeiten aufweisen.

Beim QUICKTEMP-Pressen wird der ganze Verbindungsbereich durchgeschmolzen und Oberflächenunregelmässigkeiten können dadurch ausgeglichen werden. Es können dabei allerdings auch Verschiebungen der Fasern auftreten. Beim Widerstandsschweissen hingegen werden die Bauteile im Idealfall nur in der unmittelbaren Umgebung der Einlagen geschmolzen, um Energie zu sparen und das Fasergefüge durch Matrixfluss möglichst nicht mehr zu stören. Die Frage, ob die Platzhalter beim Umformen auf das Laminat in ihrer näheren Umgebung einen negativen Einfluss haben, bleibt an dieser Stelle offen. Dies ist aber ein Faktor der beachtet werden muss.

Taktzeit

Es ist anzunehmen, dass das QUICKTEMP-Pressen bei der Taktzeit in Konzept 1 begrenzend sein wird, jedoch ist diese relativ kurz [2].

Beim Widerstandsschweissen sind Taktzeiten von unter 30 s möglich. Die anderen Arbeitsschritte sind für sich genommen wahrscheinlich alle unter dieser Zeit zu erledigen.

Machbarkeit

Das Konzept 1 ist in fast allen Punkten Stand der Technik, ausser der Anwendung des QUICKTEMP-Verfahrens als Verbindungsmethode. Die Randkühlung und das Einleiten eines gleichmässigen Drucks sollten aber beherrschbar sein.

Konzept 2 ist etwas fraglicher, einige Punkte müssten noch abgeklärt werden. Einerseits ist nicht klar ob solche Platzhalter in einem ausgewählten Umformprozess verwendet werden können und inwiefern der Lagenaufbau durch diese gestört wird. Wie gut solche Platzhalter entfernt werden können, müsste ebenfalls überprüft werden. Das Widerstandsschweissen mit metallischen Drähten ist bei unverstärkten Thermoplasten recht verbreitet, z.B. wenn Rohre durch Muffenschweissen verbunden werden. Das Widerstandsschweissen von verstärkten Thermoplasten über Kohlefasern hingegen wird in der Industrie sehr wenig eingesetzt. Marcos Arias hat in seiner Dissertation [34] an der ETH dieses Thema ausgiebig bearbeitet und hat gezeigt, dass damit strukturelle Verbindungen hergestellt werden können.

Kosten

Die Investitionskosten bei Konzept 1 sind sehr hoch. Es wird ein präziser Industrieroboter mit 3 bis 5 Freiheitsgraden oder eine steuerbares Spiegelsystem, ein Schneidlaser, eine aufwendige Pressform sowie die Steuergeräte aller Komponenten werden benötigt. Bei den Betriebskosten sind die Energiekosten mit dem Laser und der gleichzeitig gekühlt und beheizten Pressform nicht ganz gering. Die Unterhaltskosten sind aufgrund der aufwendigen Anlage ebenfalls relativ hoch einzuschätzen.

Konzept 2 ist hinsichtlich der Investitionskosten im Vorteil. Es wird ebenfalls eine Pressform gebraucht, diese muss aber unter Umständen nicht einmal aktive gekühlt werden, wenn im Werkzeug durch Wärmeleitung und passive Kühlung eine relativ tiefe Temperatur gehalten werden kann. Eine Schneidvorrichtung wird ebenfalls benötigt, jedoch kann diese viel einfacher und damit günstiger sein als bei Konzept 1. Für einige Arbeitsschritte ist zu diesem Zeitpunkt noch unklar ob Investitionskosten, bei deren Automatisierung, oder Arbeitsaufwand anfallen: Platzhalter einsetzen, Platzhalter entfernen, Einlage einsetzen und Kontaktieren. Bei den Betriebskosten fallen die Platzhalter und Einlagen als Verbrauchsmaterial ins Gewicht.

Patente

Zum QUICKTEMP-Verfahren sind keine Patente gefunden worden, es ist aber denkbar, dass welche existieren.

Vor- und Nachteile

Tab. 7.1 Vor- und Nachteile von Konzept: Abgewandeltes QUICKTEMP-Verfahren

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • gute Spannungsverteilung bei der Zackenverbindung • Machbarkeit weitgehend sichergestellt • Automatisierbar • relativ kurze Taktzeit 	<ul style="list-style-type: none"> • mögliche Umordnung von Fasern beim Pressen • hohe Anschaffungskosten • mittlere bis hohe Betriebs- und Unterhaltskosten

Tab. 7.2 Vor- und Nachteile von Konzept: Widerstandsschweissen von Einlagen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • viele überlappende Fasern • lokales schmelzen um die Einlagen • geringe Investitionskosten und Unterhaltskosten • kurze Taktzeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Sollbruchstellen an den Enden der Einlagen und in der Trennebene • Machbarkeit fraglich in mehreren Punkten • eingeschränkte Automatisierbarkeit • Arbeitsaufwand • mittlere Betriebskosten

8 Rück- und Ausblick

8.1 Rückblick

In dieser Diplomarbeit wurden nahtlose Längsverbindungen bei thermoplastischen Verbundwerkstoffen untersucht. Die vorgesehene Anwendung ist das Schliessen eines rotationssymmetrischen Profilrings.

In einer ausführlichen Literaturrecherche sind die möglichen Verbindungsmethoden für verstärkte und unverstärkte Thermoplaste ermittelt worden mit Fokus auf die verschiedenen Schweissverfahren. Ausgewählte Verbindungsmethoden wurden anschliessend anhand von Zugproben aus unidirektional, glasfaserverstärktem Polypropylen (Markenname: Plytron) experimentell verglichen. Dabei schnitten die Proben, welche in der Heisspresse gefügt wurden am besten ab. Die Festigkeit dieser einschnittig überlappenden Proben war dabei in Relation zu den durchgehenden Proben sehr bescheiden, mit 136 ± 17 MPa gegenüber 660 ± 45 MPa.

In einem zweiten Schritt wurden unterschiedliche Gestaltungen der Verbindungszone mit gleicher Fügefläche in der Heisspresse gefügt und wiederum an einer Zugmaschine auf ihre Zugfestigkeit getestet. In diesem Vergleich erzielten Proben mit einer zackenförmigen Verbindungsgeometrie die höchsten Werte mit 129 ± 15 MPa. Eine Berechnung, an einem stark vereinfachten Modell, ergab für diese Zugproben mit Zackengeometrie ein optimales Länge-Breite Verhältnis der Zacken von 19:1. Die geprüfte Zackengeometrie wies ein Verhältnis der Länge zur Breite von 5:2 auf. Dies erlaubt die Vermutung, dass durch Optimierung dieser Geometrien, zumindest bei Zugtests an unidirektional verstärkten Plytron Proben, weit höhere Festigkeiten erreicht werden können. Eine solche Optimierung konnte aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden.

Zum Schluss wurden zwei Konzepte entwickelt, wie ein solcher Fügeprozess, aus der Sicht des Verfassers dieser Arbeit am ehesten realisiert werden könnte. Es ist aber eher unwahrscheinlich, dass diese eingesetzt werden können für das nahtlose Schliessen eines, durch Endlosfasern verstärkten, thermoplastischen Profilrings. Die Verbindungsstelle wird sehr wahrscheinlich auch durch Optimierung nicht die gleichen mechanischen Eigenschaften aufweisen können wie der Rest des Ringes.

8.2 Ausblick

Eine solche Technik könnte bei Thermoplasten, welche durch Kurzfasern oder nicht orientierte Endlosfasern verstärkt wurden, eine Verbindungsmöglichkeit darstellen. Bei speziellem Lastfall und Laminataufbau wären diese Konzepte auch für orientierte Endlosfasern denkbar. Die Auslegung der Verbindungsgeometrie ist dabei ebenso wichtig wie die Wahl der Fügemethode. Zudem hängen beide stark voneinander ab. Bei der Auslegung einer solchen Verbindung spielen sehr viele Faktoren eine Rolle, deren Zusammenhang noch nicht untersucht wurde: Laminataufbau, Lastfall, mechanische Eigenschaften von Faser und Matrix und die Geometrie der zu verbindenden Stelle. Deshalb muss vorerst jeder Fall ausführlich untersucht werden bevor die mögliche Qualität einer nahtlos gefügten Längsverbindung beurteilt werden kann.

8.2.1 Mögliche zukünftige Arbeiten

Untersuchung weiterer mechanischer Eigenschaften einer Zackengeometrie

Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von nahtlosen, über eine Zackengeometrie verbundenen Platten aus faserverstärkten Thermoplasten.

FEM Geometrieoptimierung für voll konsolidierte, nahtlose Längsverbindungen an ausgewählten Laminaten und Lastfällen

Die Wahl der Geometrie hängt wesentlich auch vom Laminataufbau ab, weshalb die Untersuchung dieses Zusammenhangs neue Erkenntnisse liefern könnte, bei welchen Laminattypen solche Verbindungstechniken in Frage kommen.

Vertiefte Untersuchung der Ultraschall-Schweisbarkeit von Plytron

Die Versuche in dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Matrix von Plytron grundsätzlich schweisbar ist. Es sind jedoch um die Fasern Fehlstellen entstanden über die ganzen Proben hinweg. Eine Untersuchung dieser Fehlstellen und die Optimierung der Schweißparameter könnten in Zusammenarbeit mit dem KATZ oder einer interessierten Firma bearbeitet werden.

Induktionsschweißen von thermoplastischen GFK mit Kohlefasereinlagen

Das Induktionsschweißen einer Verbindung von thermoplastischen GFK mit Dopplereinlagen aus kohlefaserverstärkten Halbzeugen würde interessante Möglichkeiten bieten. Einerseits für die Verwendung in einer nahtlosen Verbindung und andererseits könnten solche Elemente bereits beim Pressen von Einzelteilen eingebaut werden, um anschliessend als integrierte Heizelemente zu dienen.

Entwicklung einer alternativen Schweisstechnik für den Anlagenbau

Herr Schrenk von der gleichnamigen Firma hat erwähnt, dass er seit einiger Zeit erfolglos auf der Suche sei nach einer Alternative zum Warmgasziehschweißen, was bei ihnen hauptsächlich angewendet wird. Sie bauen damit in erster Linie Arbeitsmöbel aus unverstärktem PE, PP und PVC für den Gebrauch in Reinräumen und feuchter Umgebung.

Es sollte ein handliches Gerät sein für Einzelanfertigungen und es würden hauptsächlich T- und Stumpfverbindungen geschweisst. Für ihn wäre es auch interessant in Zusammenarbeit mit einer Hochschule ein solches Verfahren und Gerät zu entwickeln.

Literaturverzeichnis

1. Stokes, V.K., *Joining Methods for Plastics and Plastic Composites, An Overview*. Polymer Engineering and Science, 1989. **29**(19): p. 1310-1324.
2. Ermanni, P., *Skript zur Vorlesung: Composites Technologies*. Version 3.0 ed. 2004, Zürich.
3. Benatar, A. and T. Gutowski, *A Review of Methods for Fusion Bonding Thermoplastic Composites*. SAMPE Journal, 1987: p. 33-39.
4. Yousefpour, A., M. Hojjati, and J.-P. Immarigeon, *Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2004. **17**: p. 303-341.
5. Harper, R.C., *Thermoforming of Thermoplastic Matrix Composites - Part I*. SAMPE Journal, 1992. **28**(2): p. 9-17.
6. Harper, R.C., *Thermoforming of Thermoplastic Matrix Composites - Part II*. SAMPE Journal, 1992. **28**(3): p. 9-17.
7. Ageorges, C., L. Ye, and M. Hou, *Advances in Fusion Bonding Techniques for joining Thermoplastic Matrix Composites: a Review*. Composites, 2000. **32**: p. 839-857.
8. Ermanni, P. and G. Kress, *Skript zur Vorlesung: Leichtbau 3, Faserverbundstrukturen*. 2004, Zürich. 168.
9. Offringa, A., *Thermoplastics in Aerospace, New Products Through Innovative Technology*. SAMPE Journal, 2005. **41**(7): p. 19-27.
10. Stampfli, J., *06-011: Herstellung von FV-Thermoplast-Profilen mit geometrisch komplexen Querschnitten*, in *Zentrum für Strukturtechnologien*. 2006, Eidgenössisch Technische Hochschule: Zürich.
11. Scapozza, M., *06-012: Herstellung von ringförmigen Strukturen aus FV-Thermoplasten*, in *Zentrum für Strukturtechnologien*. 2006, Eidgenössisch Technische Hochschule: Zürich.
12. Rudolph, R., et al., *Welding of High Performance Thermoplastic Composites*. Polymer and Polymer Composites, 1999. **7**(5): p. 309-315.
13. Plastics Design Library, p.b., *Handbook of Plastics Joining: a practical guide*. 1997, Norwich, NY: William Andrew Publishing/Plastics Design Library. 586.
14. Cogswell, F.N., *Thermoplastic Aromatic Polymer Composites*. 1992, Oxford: Butterworthe-Heinemann. 277.
15. Grimm, R.A., *Fusion Welding Techniques for Plastics*. Welding Journal, 1990. **69**: p. 23-28.

16. Niedermann, M., *Leichtbau 3, Vorlesungsunterlagen 12: Mechanische Verbindungen und Klebungen*. 2004: Zürich.
17. Vinson, J.R., *Mechanical Fastening of Polymer Composites*. Polymer Engineering and Science, 1989. **29**(19): p. 8.
18. Niedermeier, M., *Leichtbau 3, Vorlesungsunterlagen 12: Mechanische Verbindungen und Klebungen*. 2004: Zürich.
19. Rijn, L.P.V.M.v., *Towards the fastenerless composite design*. Composites Part A, 1996. **27**(A): p. 915-920.
20. Vinson, J.R., *Adhesive Bonding of Polymer Composites*. Polymer Engineering and Science, 1989. **29**(19): p. 7.
21. Flegel, H.A., *Fest gefügt, gut gefahren - Was das Auto in Zukunft verbindet*. MP Materialprüfung, 2002. **44**(7-8): p. 280-286.
22. Chant, D. *Joining technology for thermoplastic composite structures in aerospace applications*. in *Advances in joining plastics and composites*. 1991. Yorkshire.
23. 3M Deutschland GmbH, *3M Scotch-Weld™ DP 8005: Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff auf Acrylbasis für das EPX-System*. 2005, 3M Deutschland GmbH: Neuss.
24. Fourche, G., *An Overview of the Basic Aspects of Polymer Adhesion. Part 1: Fundamentals*. Polymer Engineering and Science, 1995. **35**(12): p. 957-967.
25. Luithle, O., *Kunststoffschweissen*. 2005, Haug & Luithle Kunststofftechnik GmbH.
26. Schrenk, *Versuche zum Warmgaszeihschweissen und Spiegelschweissen bei KMS-Schrenk*. 2005: Hilzingen.
27. Smiley, A.J., A. Halbritter, and F.N. Cogswell, *Dual Polymer Bonding of Thermoplastic Composite Structures*. Polymer Engineering and Science, 1991. **31**(7): p. 526-532.
28. www.orbi-tech.de, *Infrarot-Lichtschweissen von Thermoplasten*. 2005.
29. Engen, P.v., et al., *New advances in polymer laser welding* 1998. p. 21.
30. Kraus, J., *Starke Verbindung*. MaschinenMarkt Plastics, 2002.
31. Bachmann, F. and U. Russek. *Laser Welding of Polymers Using High Power Diode Lasers*. in *Photonics West*. 2002. San Jose: Proc. SPIE.
32. Ou, B.S., A. Benatar, and C.W. Albright. *Laser Welding of Polyethylene and Polypropylene Plates*. in *Proceedings, 50th ANTEC of SPE*. 1992. Detroit.
33. Potente, H. and J. Korte, *laser Butt Welding of Semi-Crystalline Thermoplastics*, in *Polymer Engineering*. 1996, University of Paderborn: Paderborn. p. 6.

-
34. Arias, M., *Experimentelle Untersuchung des kontinuierlichen und gepulsten Widerstandsschweissen als Fügeverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen mit thermoplastischer Matrix*, in *Institut für Konstruktion und Bauweisen*. 1998, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Zürich. p. 210.
 35. Nichols, R.J., *Advances in the Emabond™ Induction Welding Process for High-Performance Assembly of Demanding Thermoplastics*. 2005, Ashland Specialty Chemicals Co. p. 10.
 36. Stokes, V.K., *Experiments on the Induction Welding of Thermoplastics*. *Polymer Engineering and Science*, 2003. **43**(9): p. 1523-1541.
 37. Oettle, L., *EMAWELD, Broschüre der Firma KSE Öttle*. 2005.
 38. Ashland Specialty Chemicals Company, *EMAbond®: Formulated Resins for Thermoplastic Assembly*. 2005.
 39. Chookazian, S., *Part Design and Assembly using the Emabond® Process*. 1997, Product Assembly Group Specialty Polymers & Adhesives Division of Ashland Chemical.
 40. Nichols, R.J., *Recent Advances and Challenges in Induction Welding of Reinforced Nylon in Automotive Applications*, in *SAE Technical Paper Series*. 2004, Ashland Specialty Chemical Company: Norwood. p. 8.
 41. Staicovici, S., C.-Y. Wu, and A. Benatar, *Welding and Disassembly of Microwave Welded HDPE Bars*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1999. **18**(1): p. 35-43.
 42. Kunz, H., *Meeting bei der Firma Branson SA in Urdorf*. 2005: Urdorf.
 43. Vetter, J. and J. Paessler, *Vibrationschweissen von Thermoplasten*.
 44. Contreras, F., E.A. Trillo, and L.E. Murr, *Friction-stir welding of a beryllium-aluminum powder metallurgy alloy* *Journal of Materials Science*, 2002. **37**(1): p. 89-99.
 45. www.dlr.de, *Reibrührschweissen*. 2006, DLR Institut für Werkstoff-Forschung.
 46. Kästner, R. and R. Boywitt, *Rührreibschweissen - Friction Stir Welding - Ein innovatives Fügeverfahren*. 2006, SLV Berlin Brandenburg.
 47. Dransfield, K., C. Baillie, and Y.-W. Min, *Improving the Delamination Resistance of CFRP by Stitching - A Review*. *Composites Science and Technology*, 1993. **50**: p. 305-317.
 48. Dransfield, K., L.K. Jain, and Y.-W. Mai, *On the Effects of Stitching in CFRPs - I. Mode I Delamination Toughness*. *Composites Science and Technology*, 1997. **58**: p. 815-827.

-
49. Mouritz, A.P., K.H. Leong, and I. Herszberg, *A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites*. Composites Part A, 1997. **28A**: p. 979-988.
 50. Aymerich, F., R. Onnis, and P. Priolo, *Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint*. Composites: Part A, 2004. **36**: p. 12.
 51. Allied Signal Plastics, *Modulus - Empfehlungen für den Konstrukteur*. 2005.
 52. Meier, M., *Vorlesungsunterlagen - Produkte Entwicklung - Fertigungsverfahren*. 2000, Zürich: ETH Zürich.
 53. Niu, M.C.Y., *Composite Airframe Structures, Practical Design Information and Data*. 1992, Hong Kong: Conmilit Press Ltd.
 54. Shin, K.C., J.J. Lee, and D.G. Lee, *A study on the lap shear strength of a co-cured single lap joint*. Joint Adhesion Science Technology, 1999. **14**(1): p. 123-139.
 55. www.cutcenter.at, *Wasserstrahlschneiden - Technologie*. 2005, Cut Center Schneidetechnik GmbH.
 56. Meier, M., *Vorlesungsunterlagen - Produkte Entwicklung - Trennen*. 2000, Zürich: ETH Zürich.
 57. www.waterjet.ch, *Wasserstrahlschneiden Technologie*. 2005, WATERjet AG.
 58. www.hsm-modal.com, *Wasserstrahlschneiden //Vergleich*. 2005, EEW Maschinenbau GmbH.
 59. Hansmann, H., *Verbundwerkstoffe - Modul "Kunststofftechnik" - Unterrichtsunterlagen*, Wismar.
 60. Thomann, U.I., *Direct stamp forming of non-consolidated carbon/thermoplastic fibre commingled yarns*. 2003, ETH: Zürich.
 61. Grabbe, R., *Begleitbrief zu Schweissproben von KVT Bielefeld GmbH*, M. Weiss, Editor. 2005: Bielefeld.
 62. Oettle, L., *Begleitbrief zu Schweissproben*, M. Weiss, Editor. 2005: Schorndorf (D).
 63. Gurit Suprem, *Plytron® Technical Data Sheet*. 2005: Flurlingen. p. 3.
 64. RIWETA 4.0 Datenbank, *Eigenschaften Polypropylen Homopolymer (PP-H)*. 2002, Kern GmbH.
 65. www.baumarkt.de, *Holz-Längsverbindungen mit Schlitz und Zapfen*. 2005.

Danksagung

Als erstes möchte ich mich herzlich bei Professor P. Ermanni bedanken, dafür dass ich diese Diplomarbeit am Zentrum für Strukturtechnologien bearbeiten durfte. Ich möchte insbesondere auch Niccolò Pini danken für die sehr kompetente Betreuung, die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen beim Lösen von Problemen.

Für die konstruktiven Ratschläge, sowie der Unterstützung beim Herstellen von Bauteilen, Werkzeugen und Proben danke ich Gerhard Kuhn, Hansruedi Nef, Hanspeter Eigenmann vom Institut, sowie Freddy Bürki und seinem Team von der MAVT-Profi Werkstatt.

Meinen Dank aussprechen möchte ich auch den Vertretern der Firmen, welche mich unentgeltlich beraten und Proben verschweisst haben. Dies sind namentlich: Hr. Kunz von Branson ATG East Switzerland, Herr Schrenk von KMS Schrenk Kunststoffverarbeitung, die Herren Kortmann und Grabbe von KVT Bielefeld GmbH und Hr. Oettle von KSE Öttle.

Zum Schluss möchte ich Nicole und meiner Familie aufrichtig danken für ihre Unterstützung während meinem Diplomsemester.

Anhang

- A Firmenkontakte
- B Bewertung der Fügemethoden
- C Verbindungsgeometrien
- D Anleitung: Pressen von Plytron Platten
- E Berechnung zur Optimierung der Finger und Zackengeometrie
- F Zeichnungen
- G Zusammenstellung Kühleinsatz
- H Versuchsprotokolle

A Firmenkontakte

Firma	Branson ATG East Switzerland
Internet	www.branson.ch
Adresse	In der Luberzen 19 CH - 8902 Urdorf
Ansprechpartner	Herr Heinz Kunz
Tel.	+41 (0) 44 / 734 19 21
Fax	+41 (0) 44 / 734 25 29
e-mail	heinz.kunz@branson.ch
Bezug	Ultraschallschweissen – Schweissversuche durchgeführt Vibrationsschweissen Heizelementschweissen
Bemerkungen	In Urdorf haben sie einige kleine Ultraschallschweissanlagen, für erste Versuche reicht das aus. Falls ausgedehnte Versuche durchgeführt werden müssten mit einem Techniker, würde das 180 CHF/h kosten. Dafür wäre das KATZ in Aarau evtl. besser geeignet.
Firma	Kunststoffschweissequipment Öttle
Internet	www.kse-oettle.de
Adresse	Liebermannstraße 41 D - 73614 Schorndorf
Ansprechpartner	Herr Lothar Öttle
Tel.	+49 (0) 7181 / 72742
Fax	+49 (0) 7181 / 75581
e-mail	kse.oettle@t-online.de
Bezug	Induktionsschweissen EMAbond [®] / EMAweld [®] Vier Proben geschweisst
Bemerkungen	Sehr rasch ausgeführt und zurück. Die Proben waren aber nicht sehr zufrieden stellend, kann aber mit der geringen Anzahl Proben begründet werden.

Anhang

Firma	KMS Schrenk Kunststoffverarbeitung
Internet	www.kms-schrenk.de
Adresse	Breiter Wasmen 5 D - 78247 Hilzingen
Ansprechpartner	Herr Schrenk
Tel.	+49 (0) 7731 / 13767
Fax	+49 (0) 7731 / 985305
e-mail	info@kms-schrenk.de
Bezug	Spiegelschweißen / Warmgasziehschweißen mit Versuchen vor Ort
Bemerkungen	Sehr zuvorkommend Interesse an einer handlichen Alternative zum Warmgasziehschweißen

Firma	KVT Bielefeld GmbH
Internet	www.kvt-bielefeld.de
Adresse	Werkering 6 D - 33609 Bielefeld
Ansprechpartner	Herr Dirk Kortmann Herr Grabbe (Schweissversuche)
Tel.	+49 (0) 521 / 932070
direkt	+49 (0) 521 / 932072 8
Fax	+49 (0) 521 / 932071 1
e-mail	d.kortmann@kvt-bielefeld.de
Bezug	Induktionsschweißen EWS (Elektromagnetisches Widerstandsschweißen) Proben geschweisst auf Laboranlage
Bemerkungen	Es hat etwas länger gedauert bis die Proben retourniert worden sind, aber die Schweissversuche wurden mit viel Sorgfalt durchgeführt und dokumentiert.

Firma	Haug & Luithle Kunststofftechnik GmbH
Internet	www.kunststoff-schweisstechnik.de
Adresse	Reutwiesenstraße 38/1 71665 Vaihingen-Enz/Gündelbach
Ansprechpartner	Oliver Luithle
Tel.	+49 (0) 7042 810073
Fax	+49 (0) 7042 810074
e-mail	kontakt@kunststoff-schweisstechnik.de
Bezug	Kunststoffschweisstechnik
Bemerkungen	Keine Antwort auf ein Kontaktmail

Firma	TECOplast GmbH
Internet	www.tecoplast.de
Adresse	Herbert Frank Str. 20b 72178 Waldachtal Deutschland
Ansprechpartner	Jens Kohler
Tel.	+49 7486 9790 35
Fax	+49 7486 9790 59
e-mail	jens.kohler@tecoplast.de
Bezug	Anfrage bezüglich der Schweißverfahren welche bei ihnen durchgeführt werden. Spiegelschweißen, Warmgasschweißen, Muffenschweißen
Bemerkungen	

Anhang

Firma	ATensys Welding Systems GmbH
Internet	www.atensys.de
Adresse	Postfach 1310 32293 Lübbecke Deutschland
Ansprechpartner	Bernd Koch
Tel.	+49 (0) 5741 40943
Fax	+49 (0) 5741 298816
e-mail	info@atensys.de Koch.Industrie@t-online.de
Bezug	Anfrage zum Widerstandsschweissen von Thermoplasten Widerstandsschweissen setzen sie nur bei Metallen ein.
Bemerkungen	

Firma	SONOTRONIC Nagel GmbH Kunststoffverarbeitungstechnologie
Internet	www.sonotronic.de
Adresse	Becker-Göring-Strasse 17 76307 Karlsbad-Ittersbach Deutschland
Ansprechpartner	Manfred Schindele
Tel.	+49 (0) 72 48 / 91 66 0
Fax	+49 (0) 72 48 / 91 66 144
e-mail	m.schindele@sonotronic.de
Bezug	Elektromagnetisches Schweissen von Kunststoffen, befindet sich bei ihnen nicht mehr im Produktprogramm. Kerngeschäft: Ultraschallschweissanlagen
Bemerkungen	

Firma	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Verarbeitungstechnik
Internet	www.ivw.uni-kl.de
Adresse	Erwin-Schroedinger-Strasse Gebaeude 58 67663 Kaiserslautern
Ansprechpartner	Dipl. Ing. Rudi Velthuis
Tel.	+49 631 2017-441
Fax	+49 631 2017-197
e-mail	rudi.velthuis@ivw.uni-kl.de
Bezug	Induktionsschweissen von Faserverbundwerkstoffen Sie haben eine eigene Anlage in Labor
Bemerkungen	

Firma	Georg Fischer Rohrleitungssysteme AG
Internet	www.piping.georgfischer.com
Adresse	Postfach 8201 Schaffhausen
Ansprechpartner	Hr. Werner
Tel.	052 631 31 70
Fax	
e-mail	=
Bezug	Schweissverfahren innerhalb GF <ul style="list-style-type: none">• IR- und Muffenschweissen, Schrauben, Klemmen, Kleben
Bemerkungen	

B Bewertung der Fügemethoden

Fügemethoden	Festforderungen					Wunschforderungen				Total	Rang
	automatisierbar	Gestaltung über Dickenrichtung möglich	Kurze Prozesszeiten	optische Qualität (ebene Verbindung)	Nahtqualität, mechanische Eig.	keine geometrischen Einschränkungen	günstig, bei grosser Stückzahl	wenig Vor- und Nachbearbeitung	geringe Werkstoffeinschränkung		
Gewichtung						1	2	1	1	5	
Mechanisch											
Mechanische Verbindungselemente				N							
Klebmethoden											
Adhäsionskleben			N								
Lösungsmittelkleben			N								
Schweissen / Fusion Bonding											
Kontakt						2	1	2	3	9	4
Konvektion						1	1	2	3	8	9
Heisspressen			N								
Infrarot						1	2	2	2	9	4
Laser			N								
Extrusionsschweissen			N								
Rotationsschweissen			N								
Ultraschallschweissen			(N) a)			0	3	1	2	9	4
Vibrationsschweissen						1	3	1	3	11	1
Rührreibungsschweissen			N								
Widerstandsschweissen						2	2	1	3	10	2
Induktionsschweissen						2	2	2	2	10	2
Dielektrisches Schweissen						2	2	2	1	9	4
Mikrowellenschweissen						2	2	2	1	9	4
Zwischenschichtschmelzverbindung						3	1	1	2	8	9
Andere Methoden											
Insertbeheizung						2	1	1	2	7	11
Nähen, nur komplementär					b)						

Bewertung

- 0 - schlecht
 1 - genügend
 2 - gut
 3 - sehr gut

a) nur die einschnittige Verbindung ist möglich

b) kommt auf die Methode an mit der es Kombiniert wird

C Verbindungsgeometrien

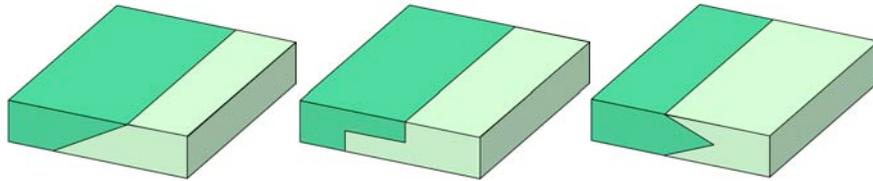


Abb. 0.1 Verbindungsgeometrien (v.l.n.r.) einseitig Schäftung, einseitige Stufe und zweiseitige Schäftung

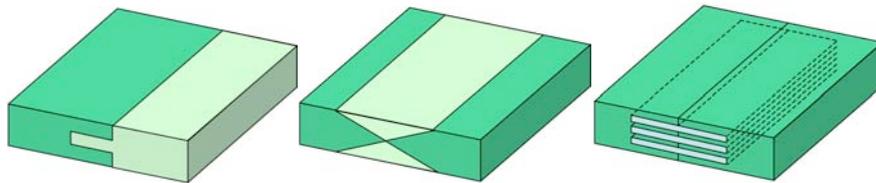


Abb. 0.2 Verbindungsgeometrien (v.l.n.r.) zweiseitige Stufe, zweiseitiger Schäfteinsatz und gerade Einlagen

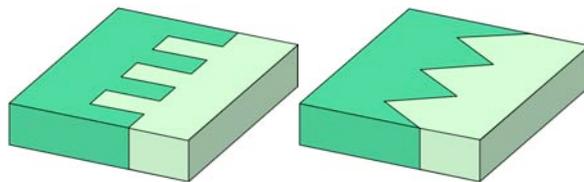


Abb. 0.3 Verbindungsgeometrien (v.l.n.r.) Finger und Zacken

Verbindungsgeometrien aus der Holzverarbeitung

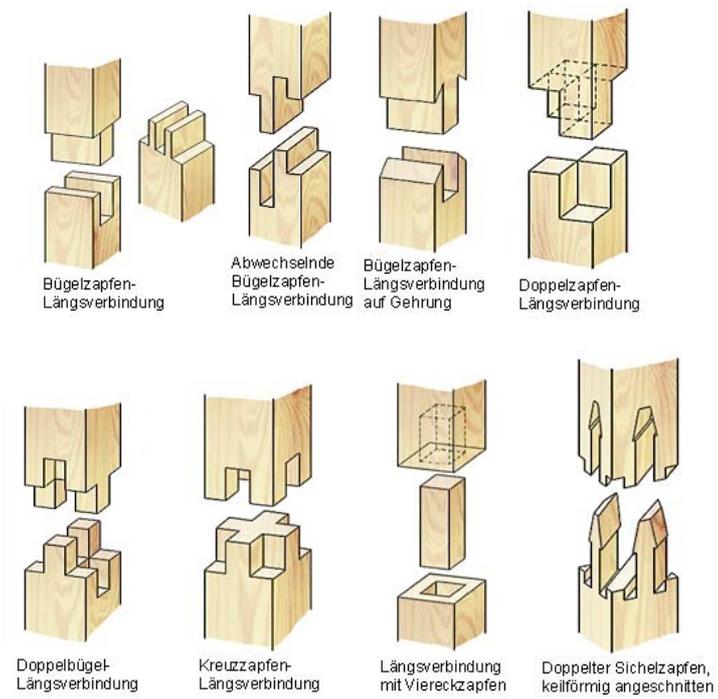


Abb. 0.4 Längsverbindungen in der Holzverarbeitung, Bilder von [65]

D Anleitung: Pressen von Plytron Platten

D.1 Herstellung aus Plytron Endlosband 50 mm breit

Benötigte Materialien:

- 2.5 n Plytron Zuschnitte mindestens 34 cm lang, 2 ganze und ein halb so breites Stücke für jede der n Lagen
- 3 Trennfolie blau, Wrightlon 5200 Blue nicht perforiert, 25 x 40 cm

Utensilien:

- Presswerkzeug
- Prepresschere und gekrümmte Schere
- Kunststoffhammer
- Hitzebeständige Handschuhe

Kurzanleitung: Fontijne Presse

Zieltemperatur auf 210°C stellen und heizen

Anpresskraft um 100kN begrenzen

Trennfolien und Plytron Streifen gemäss Abb. 0.5 in Werkzeug einlegen

Bei ca. 150°C Werkzeug in Presse legen und Presse schliessen bei geringem Druck

Haben beide Heizplatten 200°C erreicht, werden die Platten ein Stück weit geöffnet und zusammen mit der Heizung gestoppt

Die Platten können anschliessend wieder zusammengefahren werden, jetzt mit dem eingestellten Pressdruck (100kN Anpresskraft)

Wasserkühlung einleiten

Bei einer Heizplattentemperatur unter 40°C kann das Werkzeug aus der Presse genommen werden (Werkzeug ist noch deutlich wärmer)

Zum Entformen geschlossenes Werkzeug an einem Ende anheben und auf die untere Werkzeughälfte schlagen mit dem Kunststoffhammer, bis sich die Form öffnet

Platte herausnehmen und Trennfolie entfernen

Seitlich ausgeflossenes Plytron kann mit der gebogenen Schere abgeschnitten oder mit einem Dreikantschaber weggeschabt werden

Ausführliche Anleitung: Pressen von Plytron Bändern in Fontijne

Fontijne Heisspresse in Betrieb nehmen, Heizplattentemperatur auf 210°C einstellen, Presskraft um 100 kN (entspricht 2.4 MPa im Werkzeug) begrenzen, Platten zusammenfahren und die Heizung einschalten. Falls die Zuschnitte des Plytron Bandes und der Trennfolie nicht vorgängig gemacht wurden kann dies jetzt gemacht werden.

In die untere Formhälfte können 2 Lagen Trennfolie gelegt werden. Hier werden 2 benutzt, da damit das Werkzeug seitlich abgedichtet werden kann. Darüber kommen in jeder Lage 2 breite und ein schmaler Streifen Plytron Prepreg (Abb. A.5). Es sollte abwechselnd einmal der schmale Streifen links und in der nächsten Lage rechts aussen platziert werden, so dass die übereinander liegenden Streifen jeweils versetzt sind. Vor der oberen Werkzeughälfte wird nochmals eine Lage der Trennfolien eingelegt.

Die Plytron Streifen, die von der Rolle geschnitten werden weisen in der Regel eine recht starke Krümmung über die Länge auf. Das Einlegen geht leichter wenn die Streifen mit dem Bauch gegen oben positioniert werden, da damit der Stapel stabiler liegt. Um das verrutschen der Lagen zu verhindern sollte der bereits abgelegte Teil des Stapels von Hand angedrückt werden während dem man mit der anderen Hand die weiteren Streifen platziert. Beim Schliessen des Werkzeugs kann z.B. der Kunststoffhammer als Gewicht auf die Streifen gelegt werden um sie zu beschweren. Am besten geht es wenn das obere Werkzeug an einem Ende angesetzt wird und mit dem Herausziehen des Hammers gesenkt wird.

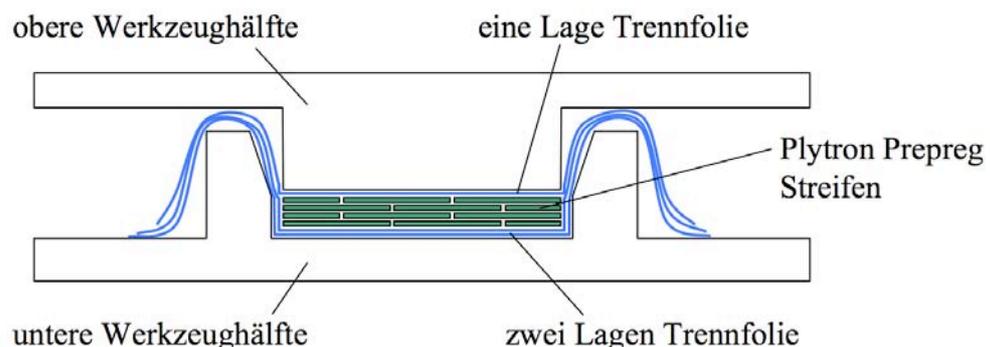


Abb. 0.5 Aufbau beim Pressen von Platten aus 50 mm breiten Plytron Prepregstreifen

Wenn die Heizplattentemperatur bei ca. 150°C ist können die Platten auseinander gefahren und das Werkzeug hineingelegt werden. Für eine bessere Wärmeübertragung werden die Pressplatten wieder zusammengefahren, bis das Werkzeug die obere Platte berührt. Haben beide Heizplatten nach etwa 10 min 200°C erreicht, können die Platten nochmals leicht auseinander gefahren werden. Durch drücken des Stop-Knopfes wird die Heizung ausgeschaltet und die Bewegung der Platten gestoppt. Anschliessen werden die Platten mit dem vorgegebenen Druck zusammengefahren und die Wasserkühlung eingeleitet.

Das Magnetventil, mit welchem die Kühlung von der Presse automatisch gesteuert werden könnte, wurde ausgebaut und ein durchgehendes Rohrstück eingesetzt, da die Kühlung nicht richtig funktionierte. Nach diesem Umbau konnte die Kühlung durch öffnen des Kühlwasserhahns von hand eingeleitet werden.

Mit dem Lösen des Anpressdrucks und dem Herausnehmen des Werkzeugs sollte gewartet werden, bis die Heizplattentemperatur beider Platten unter 40°C gesunken ist. Das Werkzeug und die Plytron Platte ist zu diesem Zeitpunkt noch ein gutes Stück

wärmer als die Heizplatte der Presse, daher sollte mit den Wärmeschutzhandschuhen gearbeitet werden.

Das Werkzeug kann geöffnet werden indem es an einem Ende angehoben wird und man mit einem Kunststoffhammer auf die untere Werkzeughälfte schlägt. Nach etwa 5-6 Schlägen geht das Werkzeug auf und die frisch gepresste Platte sowie die Trennfolien können herausgenommen werden. Sind die Folien noch ganz können sie gut nochmals gebraucht werden. Seitlich tritt fast immer etwas Plytron Material aus der Form, welches mit einer Schere oder einem Dreikantschaber schnell entfernt ist. Ist die Menge grösser, kann auch mit noch einer Lage Trennfolie gearbeitet werden, 3 sollten in der Regel mit diesem Werkzeug genügen.

D.2 Herstellung aus Plytron Blättern 300 x 125 mm

Benötigte Materialien:

n	Plytron Zuschnitte 300 x 125 mm
3	Trennfolie blau, Wrightlon 5200 Blue nicht perforiert, 25 x 40 cm
2	Blecheinlagen 130 x 260 mm

Utensilien:

Presswerkzeug
gekrümmte Schere
Kunststoffhammer
Stechbeitel
Hitzebeständige Handschuhe

Kurzanleitung:

Zieltemperatur auf 210°C stellen und heizen
Anpresskraft um 80 kN für ca. 2.4 MPa Anpressdruck wie oben
Erste Blecheinlage mittig in das Werkzeug einlegen
Trennfolien und Plytron Blätter analog Abb. 0.5 einlegen
Zweite Blecheinlage kommt zwischen die oberste Trennfolie und die obere Werkzeughälfte
Pressen wie oben in D.1
Zum Entformen geschlossenes Werkzeug an einem Ende anheben und auf die untere Werkzeughälfte schlagen mit dem Kunststoffhammer, bis sich die Form öffnet
Einlegebleche klemmen meist im Werkzeug und können mit Hilfe eines Stechbeitels heraus gehoben werden
Seitlich ausgeflossenes Plytron kann mit der gebogenen Schere abgeschnitten oder mit einem Dreikantschaber weggeschabt werden

Für weitere Informationen kann auch die ausführliche Anleitung unter D.1 konsultiert werden.

E Berechnung zur Optimierung der Finger und Zackengeometrie

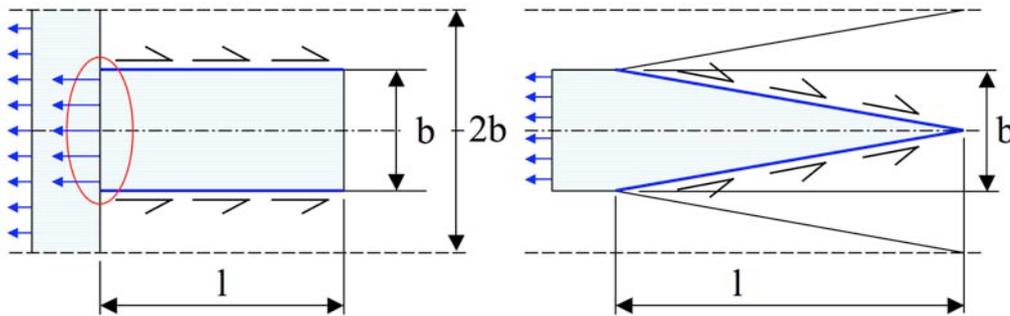


Abb. 0.6 Gleichgewichte an einer allgemeinen Finger- und Zackenverbindung

Gleichgewicht:
$$\sigma \cdot t \cdot b_F = 2 \cdot \tau \cdot t \cdot l_F \quad \text{Gl. A.1}$$

$$\frac{l}{b} = \frac{\sigma}{2\tau} \quad \text{Gl. A.2}$$

Versagen im Material an der Basis des Fingers etwa bei der halben Materialfestigkeit:

$$\frac{l}{b} > \frac{\sigma_B}{2\tau_B} = \frac{720}{2 \cdot 19} \approx 19 \quad \text{Gl. A.3}$$

Für den Zacken gilt dasselbe Gleichgewicht und dieselbe Ungleichung Gl. A.3. Versagen kann aber irgendwo im Material auftreten.

Zugfestigkeit	: $\sigma_B = 720 \text{ MPa}$
Scherfestigkeit	: $\tau_B = 19 \text{ MPa}$
Länge der Finger	: $l_F [\text{mm}]$
Länge der Zacken	: $l_Z [\text{mm}]$
Breite der Finger	: $b_F [\text{mm}]$
Breite der Zacken	: $b_Z [\text{mm}]$
Laminatdicke	: $t [\text{mm}]$

F Zeichnungen

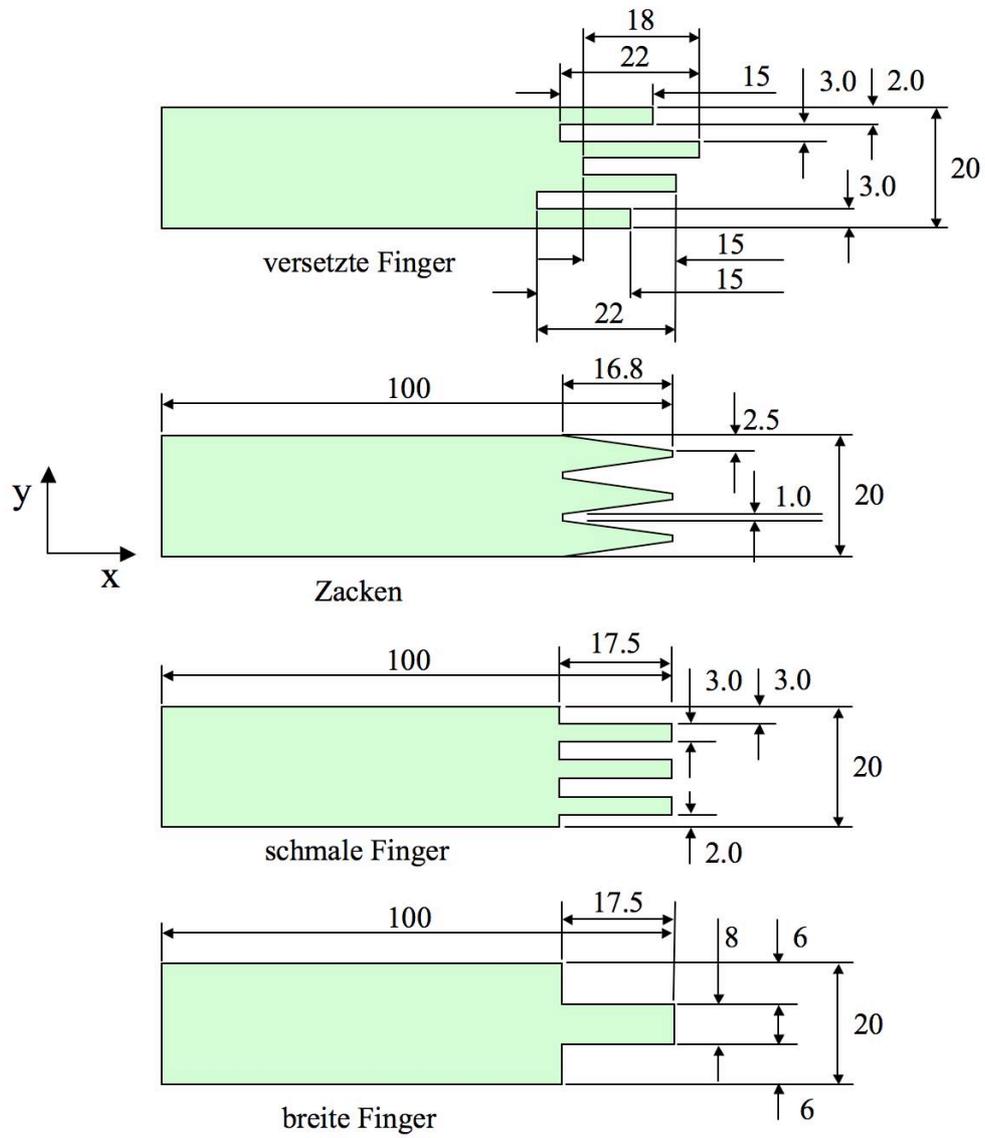


Abb. 0.7 Geometrievergleichsproben mit Massen

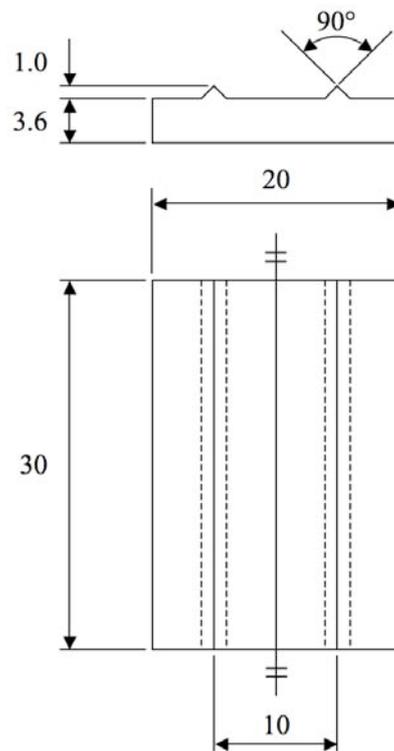


Abb. 0.8 Zeichnung Ultraschallproben mit Energierichtungsgebern

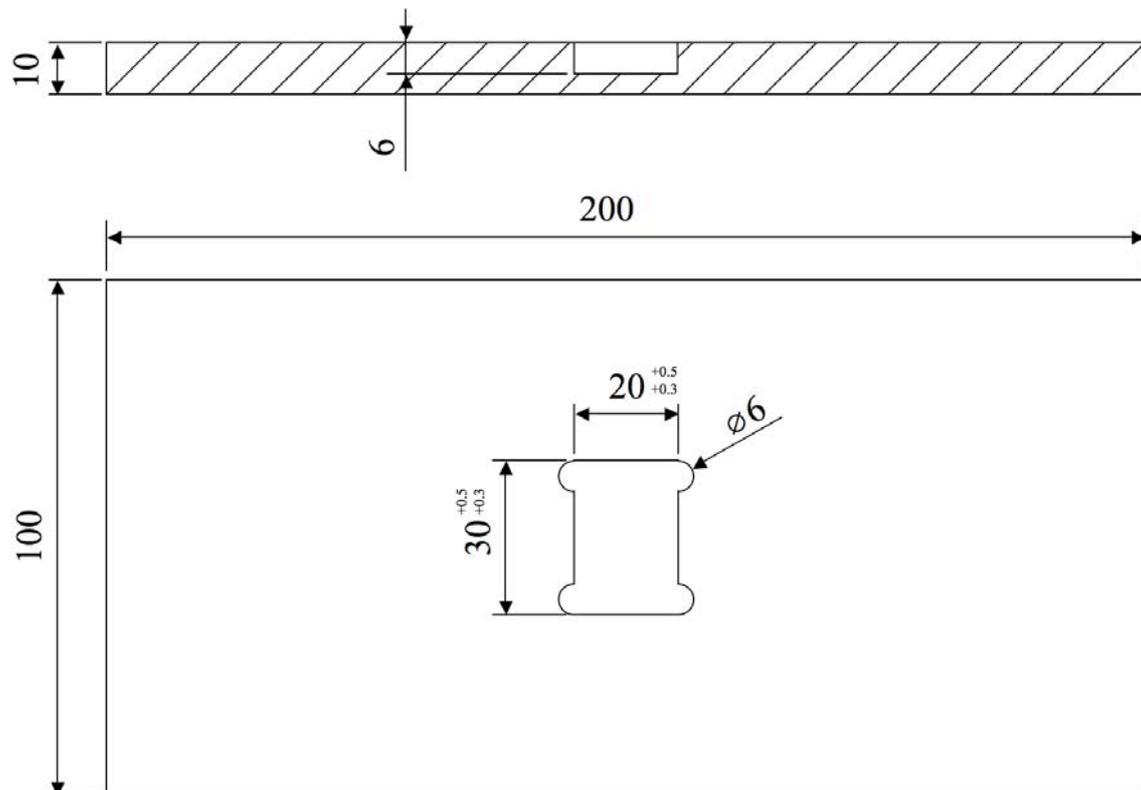


Abb. 0.9 Zeichnung Ultraschallprobenhalterung

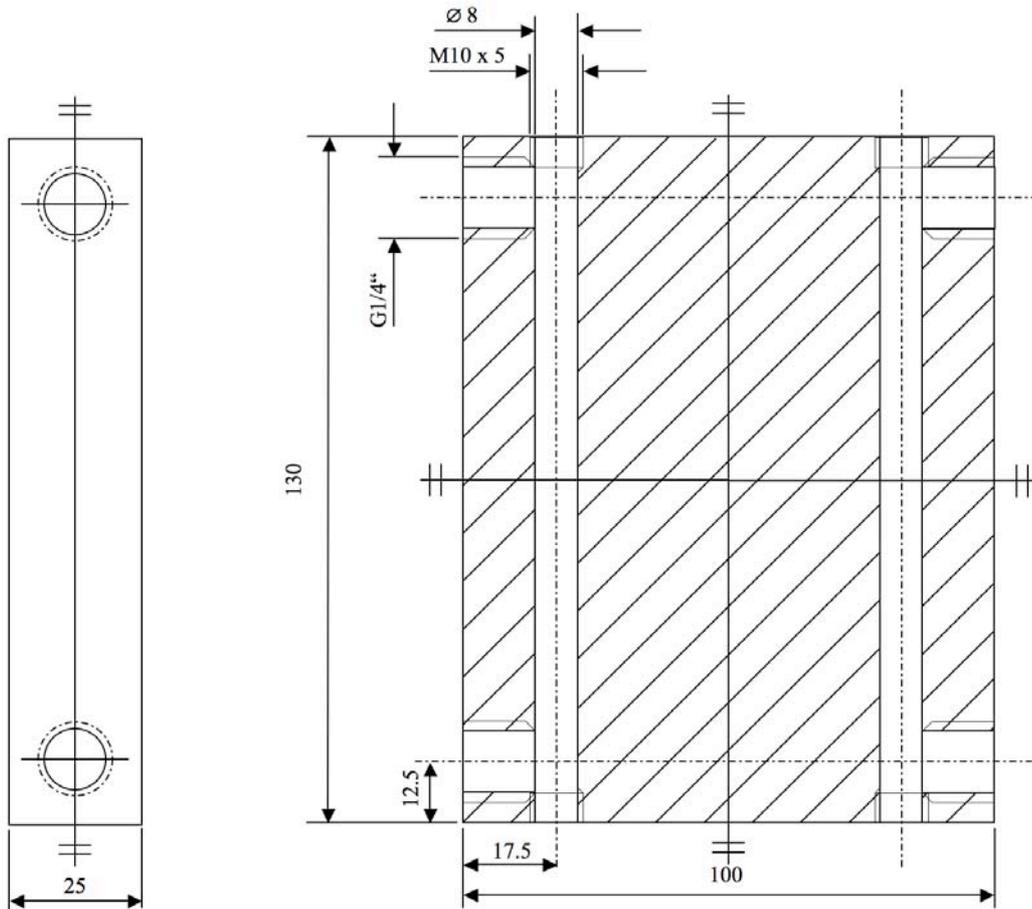


Abb. 0.10 Platte zu Zonenkühleinsatz für das Presswerkzeug

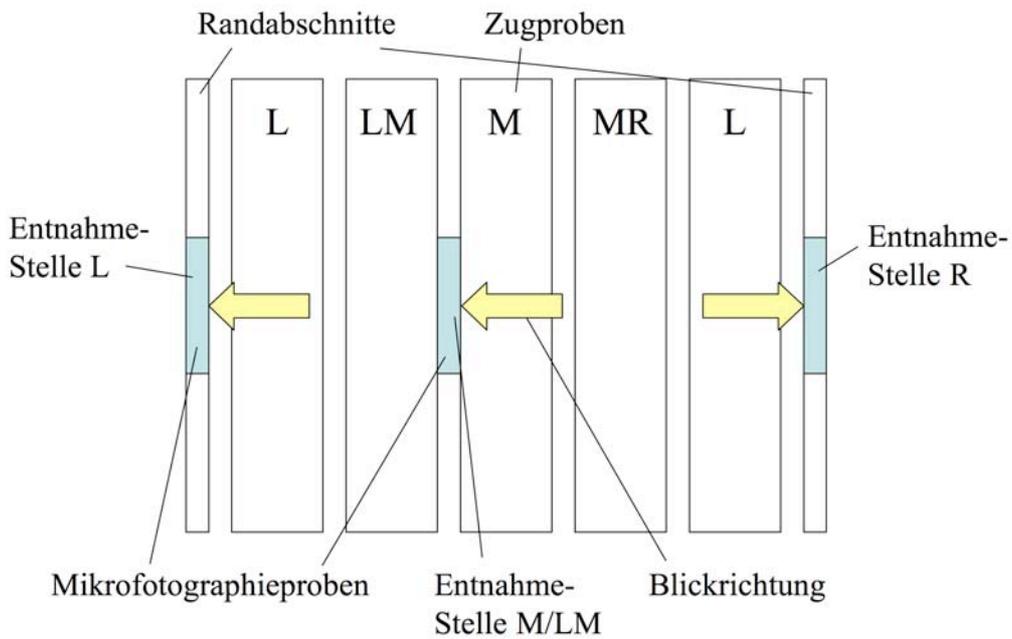


Abb. 11 Benennung der Mikrofotographieproben mit Entnahmestelle

Die Mikrofotografieprobe welche zwischen Zugproben LM und M entnommen wurde und von Zugprobe M her angeschaut wird, heisst M/LM. Sie wird von der erstgenannten Seite her betrachtet.

G Zusammenstellung Kühleinsatz

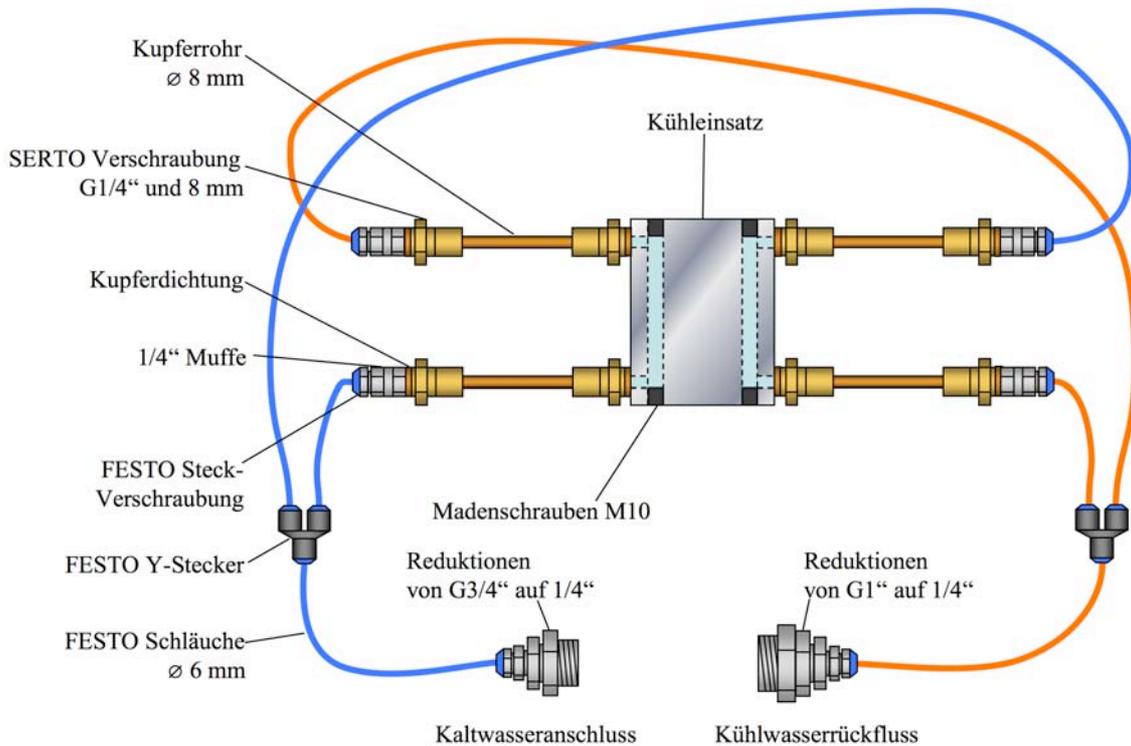


Abb. 0.12 Zusammenstellung Zonenkühleinsatz

Verwendete Komponenten für den Zonenkühleinsatz

SERTO bestellte Teile

Anzahl	Länge in cm	Bestell-Nr.	Artikel
8		SO 01124-8-1/4	Gerade Einschraubverschraubung Messing zylindrisches Gewinde 1/4 Zoll für 8 mm Rohr

Festo Komponenten aus Lager bezogen

6		153421	QSK-1/4-6 Sperr-Steckverschraubung
2		130787	QSMY-6-100, Y-Steckverbindung
2	15	159664	PUN-6x1-BL Schlauch 6mm
2	150	159664	PUN-6x1-BL Schlauch 6mm
2	100	159664	PUN-6x1-BL Schlauch 6mm

Komponenten bezogen bei Baumgartner und JUMBO

8			Dichtringe für Einschraubverschraubungen 1/4 Zoll
4			Muffen 1/4 Zoll
4	10		Kupferrohr Aussendurchmesser 8
2			Reduktion 1/4 Zoll – 3/8 Zoll
2			Reduktion 3/8 Zoll – 1/2 Zoll
2			Reduktion 1/2 Zoll – 3/4 Zoll
1			Reduktion 3/4 Zoll – 1 Zoll
1			Alu Platte 130 x 100 x 25
4			Madenschrauben M10x20

H Versuchsprotokolle Zugtests

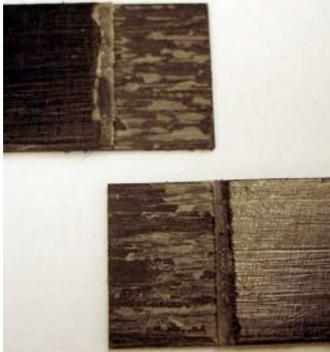
Bemerkungen

Benennung der Entnahmestelle der Mikrofotografie, siehe Anhang F

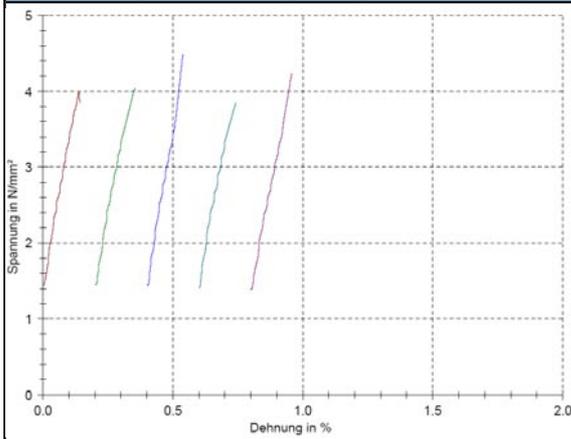
Kurven in den SD-Diagrammen jeweils von links nach rechts: L, LM, M, MR, R

H.1 Proben Fügemethodenvergleich

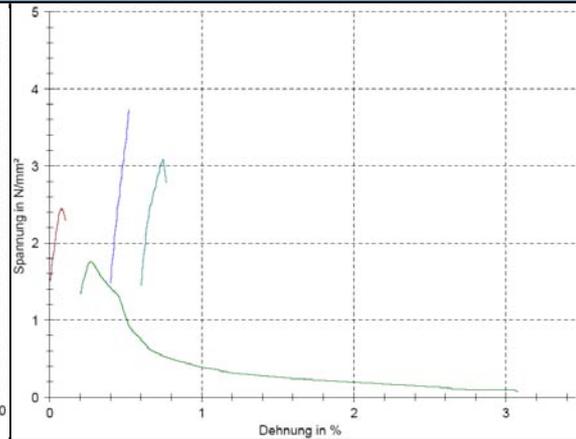
- Kleben mit Araldite 2011, einschnittig überlappend
- Kleben mit DP 8005 von 3M Scotch-Weld, einschnittig überlappend
- Kleben mit DP 8005 von 3M Scotch-Weld, geschäftet
- EMAbond[®] Verschweissung bei KSE Oettle, einschnittig überlappend
- EMAbond[®] Verschweissung bei KSE Oettle, geschäftet
- EWS bei KVT Bielefeld, einschnittig überlappend
- EWS bei KVT Bielefeld, geschäftet
- Spiegelschweissen bei KMS Schrenk, geschäftet
- Spiegelschweissen bei KMS Schrenk, stumpf extra PP
- Heisspresse, einschnittig überlappend
- Heisspresse, geschäftet

Fügemethode	Kleben mit Araldite 2011		
Geometrie	Einschnittig überlappend		
Prepreg Material	4 Lagen Plytron Band 50 mm		
Plattenrohlingpaare	9.3/9.1 und 15.3/13.3		
Anzahl Zugproben	9		
Einspannlänge [mm]	75		
			
Probe 15.3/11.3 M vor Zugtest	Probe 15.3/11.3 MR Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	869.5	435.4	1108.8
Standardabweichung [N]	223.9		
Fügefläche [mm ²]	247.7	241.0	253.0
Zugscherfestigkeit [MPa]	3.5	1.8	4.5
Standardabweichung [MPa]	0.9		
Querschnittsfläche [mm ²]	34.0	33.6	34.2
Zugfestigkeit [MPa]	25.6	12.8	32.5
Standardabweichung [MPa]	6.6		
Bruchdehnung [mm]	0.05	0.05	0.05
ε-Bruch [%]	0.07	0.07	0.07
E-Modul [GPa]			
Standardabweichung [GPa]			
keine Mikrofotografie			

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugscherspannung)



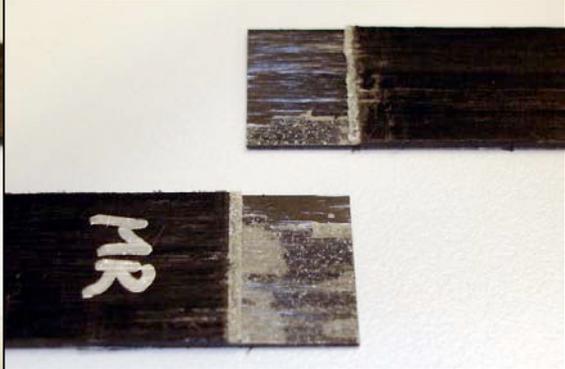
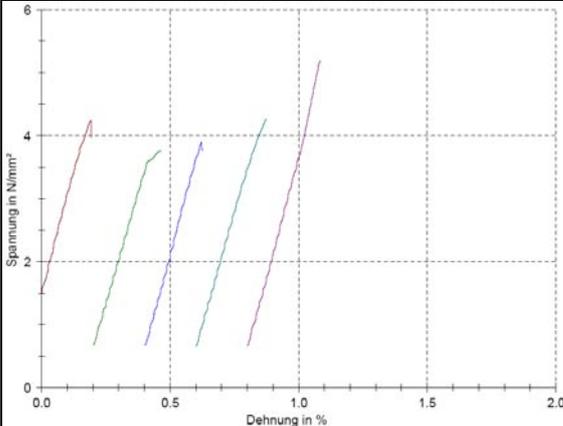
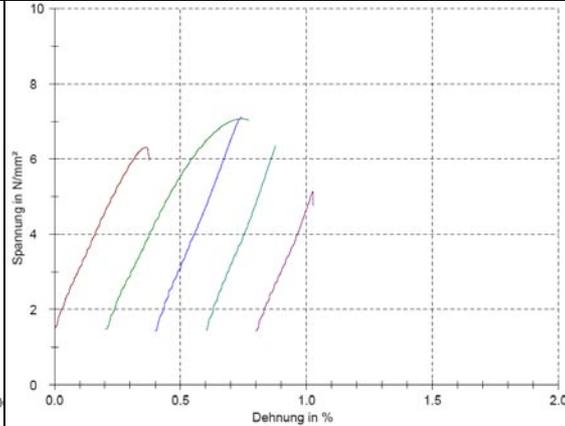
SD-Diagramm 9.3/9.1



SD-Diagramm 15.3/13.3

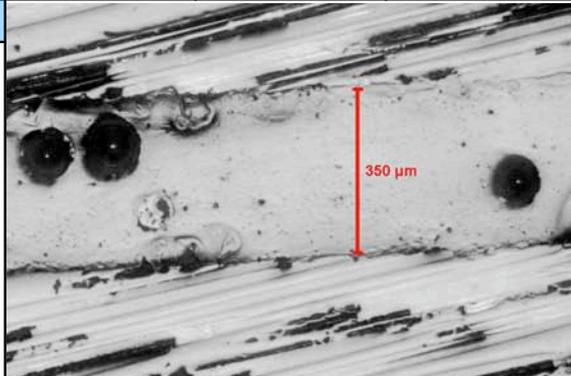
Bemerkungen

Die Klebefläche wurde spanabhebend bearbeitet und mit Aceton gereinigt vor dem Kleben. Der Bruch trat zwischen Kleber und Substrat auf, wobei auf beiden Seiten Kleberreste haften blieben. Die Proben L, LM und R der Serie 15.3/13.3 nicht richtig klebten und vorzeitig abscheren beim Zugtest.

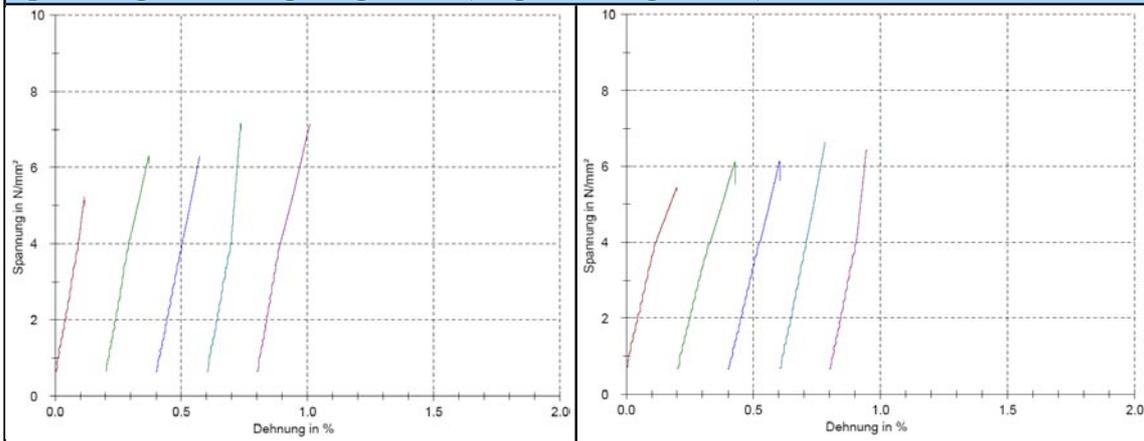
Fügemethode	Kleben mit DP 8005 von 3M Scotch-Weld		
Geometrie	Einschnittig überlappend		
Prepreg Material	4 Lagen Plytron Band 50 mm		
Plattenrohlingpaare	11.3/11.2 und 15.1/11.1		
Anzahl Zugproben	10		
Einspannlänge [mm]	40		
			
Probe 11.3/11.2 MR nach Zugtest		Probe 15.1/11.1 MR nach Zugtest	
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	1356.7	960.6	1810.5
Standardabweichung [N]	317.1		
Fügefläche [mm ²]	254.9	245.0	258.7
Zugscherfestigkeit [MPa]	5.3	3.8	7.1
Standardabweichung [MPa]	1.3		
Querschnittsfläche [mm ²]	37.1	36.3	38.1
Zugfestigkeit [MPa]	36.6	26.0	49.1
Standardabweichung [MPa]	8.8		
Bruchdehnung [mm]			
ε-Bruch [%]			
E-Modul [GPa]			
Standardabweichung [GPa]			
keine Mikrofotografie			
Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugscherspannung)			
			
SD-Diagramm 11.3/11.2		SD-Diagramm 15.1/11.1	

Bemerkungen

Die Klebefläche wurde spanabhebend bearbeitet und mit Aceton gereinigt vor dem Kleben. Die Klebspalt beträgt 0.1 bis 0.2 mm und der Anpressdruck beim Kleben 4.3 Psi. Der Bruch trat zwischen Kleber und Substrat auf.

Fügemethode		Kleben mit DP 8005 von 3M Scotch-Weld		
Geometrie	10° geschäftet			
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare	6.1/1.2 und 6.3/6.2			
Anzahl Zugproben	10			
Einspannlänge [mm]	50			
				
Probe 6.1/1.2 L vor, LM nach Zugtest		Probe 6.3/6.2 LM vor, MR nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	2146.7	1800.7	2418.2	
Standardabweichung [N]	207.4			
Fügefläche [mm ²]	327.2	320.4	334.3	
Bruchkraft/Fügefläche [MPa]	6.6	5.5	7.3	
Standardabweichung [MPa]	0.6			
Querschnittsfläche [mm ²]	68.8	66.8	70.6	
Zugfestigkeit [MPa]	31.3	26.1	36.2	
Standardabweichung [MPa]	3.3			
Bruchdehnung [mm]	0.07	0.05	0.08	
ε-Bruch [%]	0.13	0.10	0.16	
E-Modul [GPa]	3.78	3.73	3.83	
Standardabweichung [GPa]	0.07			
Mikrofotografie von 6.1/1.2 LM/M				
Auf der Mikrofotografie ist ein Ausschnitt vom Klebspalt zu sehen. Er beträgt hier 0.35 mm. Die dunklen Flecken sind eingelagerte Glaskugeln, welche die unterschreitung des minimalen Klebspalts verhindern.				

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugkraft/Fügefläche)

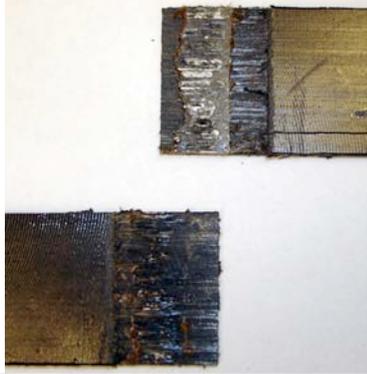


SD-Diagramm 6.1/1.2

SD-Diagramm von 6.3/6.2

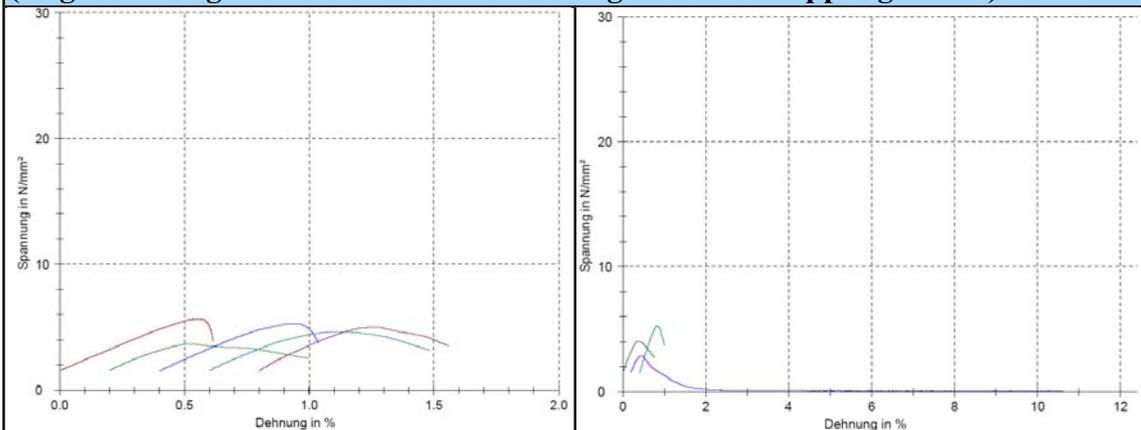
Bemerkungen

Die Klebefläche wurde spanabhebend bearbeitet und mit Aceton gereinigt vor dem Kleben. Die Klebspalt beträgt ca. 0.35 mm und der Anpressdruck beim Kleben 4.3 Psi. Der Bruch trat zwischen Kleber und Substrat auf, wobei jeweils ca. 3/4 des Klebers am auslaufenden Ende einer Seite haftet, (siehe Bilder).

Verbindungsmethode	EMAbond Verschweissung bei KSE Oettle		
Geometrie	Einschnittig überlappend		
Prepreg Material	4 Lagen Plytron Band 50 mm		
Plattenrohlingpaare	14.3/8.1 und 15.2/8.2		
Anzahl Zugproben	9		
Einspannlänge [mm]	60		
			
Probe 14.3/8.1 nach Zugtest		Probe 15.2/8.2 LM vor und L nach Zugtest	
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	725.9	487.0	1014.1
Standardabweichung [N]	178.8		
Fügefläche [mm ²]	94.3	87.8	108.0
Zugscherfestigkeit [MPa]	7.7	5.3	9.4
Standardabweichung [MPa]	1.6		
Querschnittsfläche [mm ²]	33.8	32.9	34.9
Zugfestigkeit [MPa]	21.5	14.4	29.8
Standardabweichung [MPa]	5.3		
Bruchdehnung [mm]	0.30	0.27	0.35
ε-Bruch [%]	0.50	0.45	0.58
E-Modul [GPa]	0.82	0.74	0.95
Standardabweichung [GPa]	0.10		
keine Mikrofotografie			

Spannungs-Dehnungsdiagramm

(Zugscherfestigkeit berechnet mit der verfügbaren Überlappungsfläche)

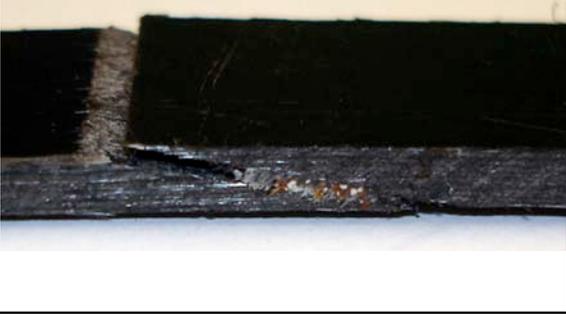
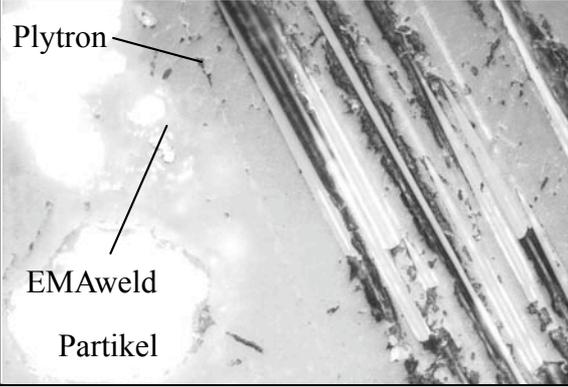


SD-Diagramm, Probe 14.3/8.1

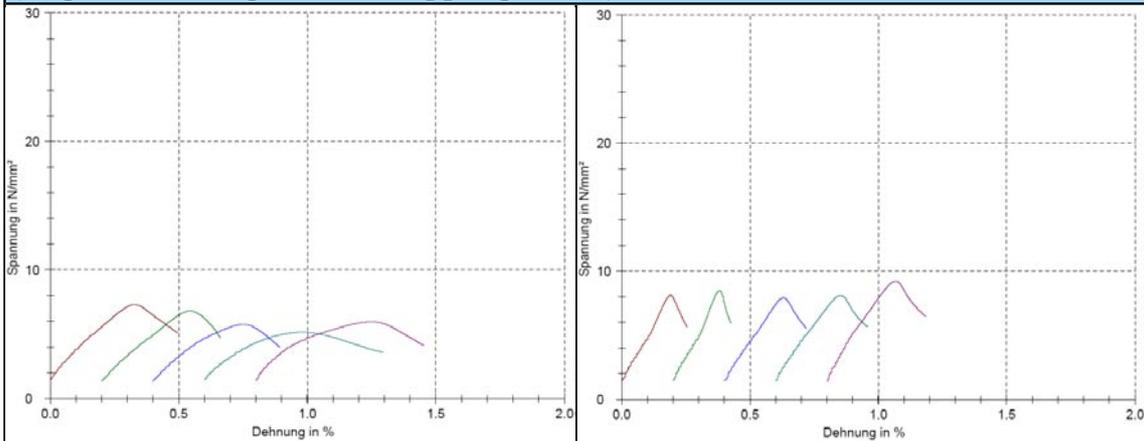
SD-Diagramm, Probe 15.2/8.2

Bemerkungen

Das EMAweld Material hat mindestens einseitig schlecht mit dem Plytron verbunden. Die Zugfestigkeit liegt etwa im Bereich der geklebten Proben oder sogar noch darunter. Das Material hat sich auch nicht sehr gut verteilt im Überlappungsbereich. Die verschweisste Fläche wurde nach dem Zugtest gemessen und für die Berechnung der Zugscherfestigkeit verwendet. Die Kurven im SD-Diagramm beziehen sich auf die verfügbare Überlappungsfläche. Auf einer Seite sind an der Oberfläche Schmelzspuren sichtbar, was darauf hindeutet, dass die Temperatur zumindest auf einer Seite das Plytron während des Schweissvorgangs geschmolzen war. Auf den Proben von den Rohlingen 14.3 und 8.1 sind Spuren von Rost sichtbar.

Fügemethode		EMAbond Verschweissung bei KSE Oettle		
Geometrie	geschäftet			
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare	3.2/3.3 und 4.3/4.1			
Anzahl Zugproben	10			
Einspannlänge [mm]	60			
				
Probe 3.2/3.3 vor Zugtest		Probe 4.3/4.1 vor Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	1496.1	966.8	1971.4	
Standardabweichung [N]	453.6			
Fügefläche [mm ²]	120.9	79.0	160.0	
Bruchkraft/Fügefläche [MPa]	12.4	11.6	13.0	
Standardabweichung [MPa]	0.4			
Querschnittsfläche [mm ²]	67.3	64.8	70.3	
Zugfestigkeit [MPa]	22.4	14.0	30.2	
Standardabweichung [MPa]	7.3			
Bruchdehnung [mm]	0.17	0.11	0.30	
ε-Bruch [%]	0.29	0.18	0.50	
E-Modul [GPa]	1.52	1.06	2.05	
Standardabweichung [GPa]	0.38			
Mikrofotografie 4.3/4.1 L				
Das metallische Partikel unten links im Bild hat einen Durchmesser von ca. 0.20 mm. Im Übergang zwischen Plytron und EMAweld Material ist kein klarer Übergang zu erkennen.	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="margin-bottom: 10px;">Plytron</div> <div style="margin-bottom: 10px;">EMAweld</div> <div>Partikel</div> </div>			

**Spannungs-Dehnungsdiagramm
(Zugkraft / verfügbare Überlappungsfläche)**

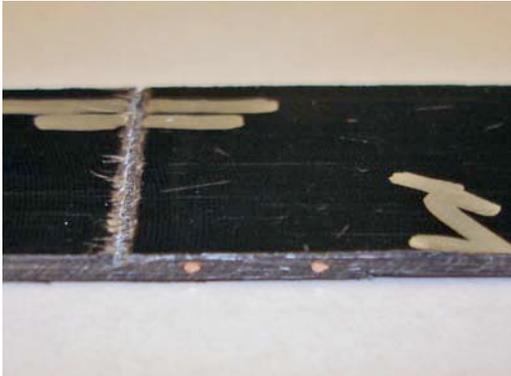
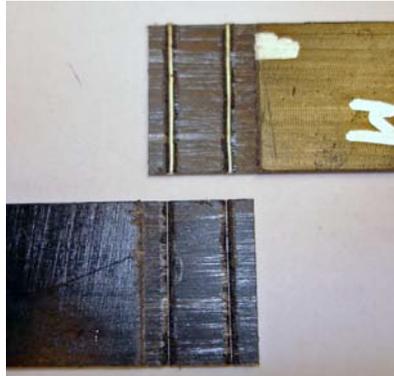
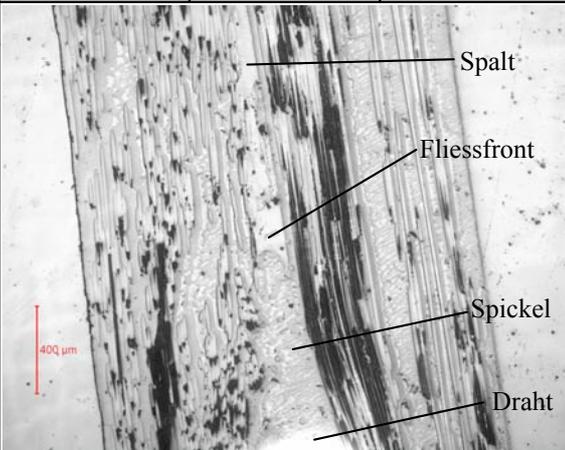


SD-Diagramm, Probe

SD-Diagramm, Probe 4.3/4.1

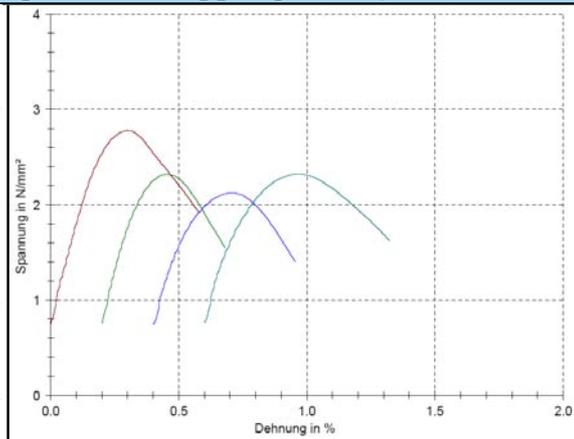
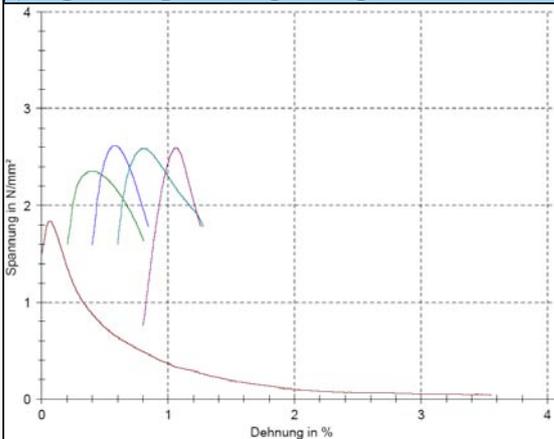
Bemerkungen

Das EMABond Material hat sich auch nicht sehr gut verteilt im Überlappungsbereich beim Probenpaar 4.3/4.1 war dies jedoch besser. Auf einer Seite sind an der Oberfläche Schmelzspuren sichtbar und in der Fuge hat sich ein wenig Rost gebildet. Die SD-Diagramme beziehen sich auf die verfügbare Fügefläche und nicht auf die effektiv verschweisste.

Fügemethode		EWS bei KVT Bielefeld		
Geometrie	Einschnittig überlappend			
Prepreg Material	4 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare	Probenpaare 9.2/14.1 und 13.1/8.3			
Anzahl Zugproben	8			
Einspannlänge [mm]	60			
				
Probe 13.1/8.3 gefügt		Probe 9.2/14.1 M nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	678.2	586.0	765.1	
Standardabweichung [N]	58.5			
Fügefläche [mm ²]	75.6	68.9	83.4	
Zugscherfestigkeit [MPa]	9.0	7.0	10.4	
Standardabweichung [MPa]	1.1			
Querschnittsfläche [mm ²]	35.4	32.6	37.6	
Zugfestigkeit [MPa]	19.2	17.5	22.2	
Standardabweichung [MPa]	1.4			
Bruchdehnung [mm]	0.20	0.19	0.20	
ε-Bruch [%]	0.33	0.32	0.33	
E-Modul [GPa]				
Standardabweichung [GPa]				
Mikrofotografie von 9.2/14.1 R				
<p>Ganz unten in der Aufnahme ist ein Teil des eingelegten Drahtes zu sehen. Vom Draht ausgehend breitete sich die geschmolzene Matrix im Spalt aus, verbindet aber nicht einmal auf der ganzen Länge dieses Spickels. Bei stärkerer Vergrößerung ist eine feine Linie festzustellen zwischen Spickel und den beiden Platten.</p>				

Spannungs-Dehnungsdiagramm

(Zugscherspannung bezogen auf die verfügbare Überlappungsfläche)

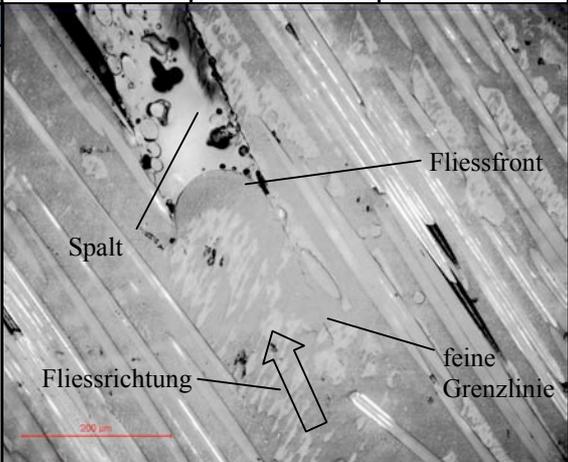


SD-Diagramm, Probe 9.2/14.1

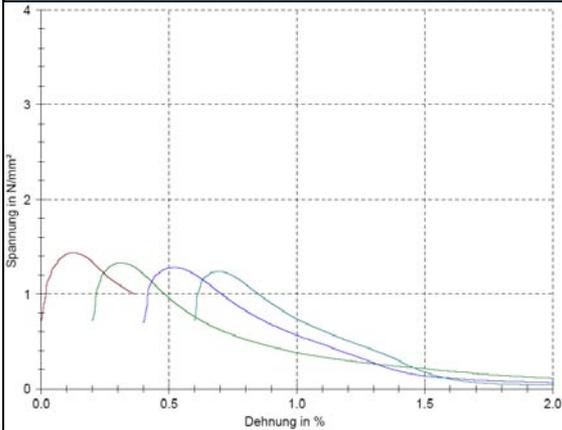
SD-Diagramm, Probe 9.2/14.1

Bemerkungen

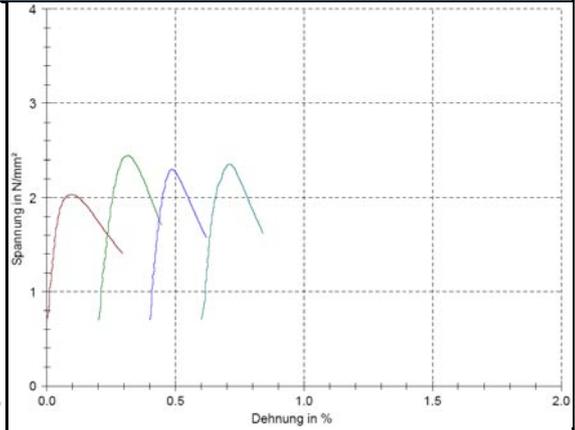
Während dem Schweissvorgang ist die Matrix nur in der unmittelbaren Umgebung des eingelegten Drahtes geschmolzen, was die effektiv verschweisste Fläche relativ klein macht. Die Fügelängen von etwa 4 mm wurden nach dem Zugtest gemessen (ohne den Drahtdurchmesser) und für alle Proben eingesetzt um die effektive Fügefläche zu ermitteln. Aus dieser wurde dann die Zugscherfestigkeit berechnet. Verglichen mit der Plattendicke von 1.7 mm ist der eingelegte Draht mit 0.5 mm Durchmesser doch relativ gross.

Fügemethode		EWS bei KVT Bielefeld		
Geometrie	geschäftet			
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare	Probenpaare 2.2/2.1 und 2.3/3.1			
Anzahl Zugproben	7			
Einspannlänge [mm]	75			
				
Probe 2.2/2.1 MR gefügt		Probe 2.2/2.1 LM gezogen		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	654.3	462.8	911.6	
Standardabweichung [N]	213.7			
Fügefläche [mm ²]	64.0	49.8	81.2	
Bruchkraft/Fügefläche [MPa]	10.1	8.4	11.8	
Standardabweichung [MPa]	1.4			
Querschnittsfläche [mm ²]	72.8	71.5	74.1	
Zugfestigkeit [MPa]	9.0	6.3	12.5	
Standardabweichung [MPa]	2.9			
Bruchdehnung [mm]	0.52	0.13	0.90	
ε-Bruch [%]	0.69	0.17	1.20	
E-Modul [GPa]				
Standardabweichung [GPa]				
Mikrofotografie von 2.3/3.1 M/MR				
<p>Die Mikrofotografieprobe stammt aus der Mitte zwischen M und MR. Die Fließfront breitet sich vom Draht her aus im Spalt. Der Draht ist in die beiden Platten hineingeschmolzen. Der grösste Teil des Fügebereichs bleibt unverschweisst. Zwischen der rechten Platte im Bild und der erstarrten Schmelze ist eine feine Grenzlinie zu sehen.</p>				

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugkraft/theoretische Fügefläche)



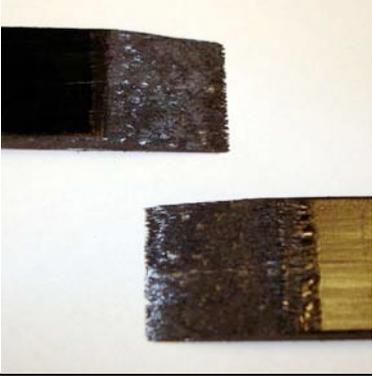
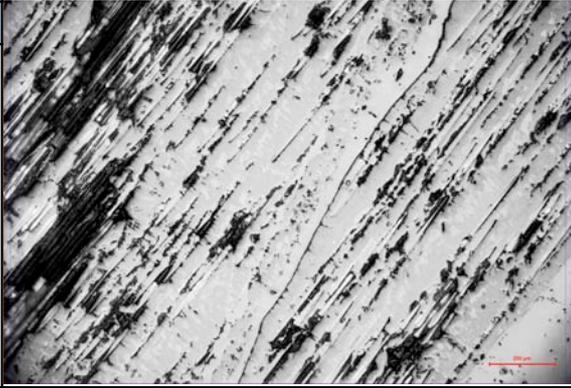
SD-Diagramm, Probe 2.1/2.2



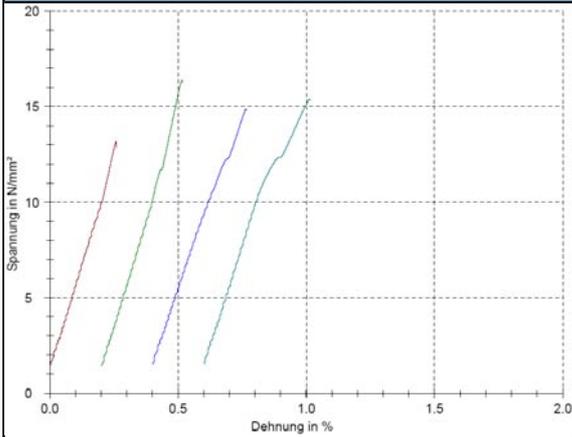
SD-Diagramm, Probe 2.3/3.1

Bemerkungen

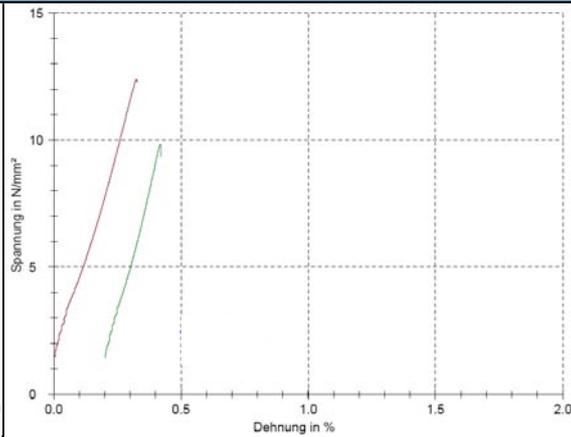
Leider wurde bei beiden Proben effektiv nur ein ganz geringer Teil der möglichen Fügefläche um die Heizdrähte verbunden. Die Frage drängt sich auf, welche Breite mit einem solchen Draht überhaupt richtig verschweisst werden kann. Weiter weg ist die Plattenoberfläche nicht geschmolzen. Wenn die Schmelze durch das Pressen im Spalt verteilt wird, ist nicht klar ob diese die noch nicht geschmolzenen Bereichen des Bauteils anzuschmelzen vermag. Es ist dann fraglich ob die Verbindung sehr gut wird.

Fügemethode		Spiegelschweissen bei KMS Schrenk		
Geometrie	geschäftet			
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare	7.3/5.3 und 7.2/7.1			
Anzahl Zugproben	6			
Einspannlänge [mm]	75			
				
Probe 7.2/7.1 RM geschweisst		Probe 7.3/5.3 M nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	5004.0	4268.3	5770.9	
Standardabweichung [N]	604.9			
Fügefläche [mm ²]	350.3	339.6	362.3	
Bruchkraft/Fügefläche [MPa]	14.3	12.4	16.4	
Standardabweichung [MPa]	1.5			
Querschnittsfläche [mm ²]	65.4	64.5	65.7	
Zugfestigkeit [MPa]	76.5	66.2	87.9	
Standardabweichung [MPa]	8.9			
Bruchdehnung [mm]	0.13	0.10	0.16	
ε-Bruch [%]	0.17	0.14	0.21	
E-Modul [GPa]	4.16	3.87	4.34	
Standardabweichung [GPa]	0.21			
Mikrofotografie 7.3/5.3 L				
Die Schweisslinie ist sehr deutlich zu erkennen. Dies weist darauf hin, dass die Verbindungsflächen nicht optimal ausgeglichen wurden bei der Verschweissung. Es sind auch einige Fehlstellen zu erkennen im Material.				

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugkraft/ Fügefläche)



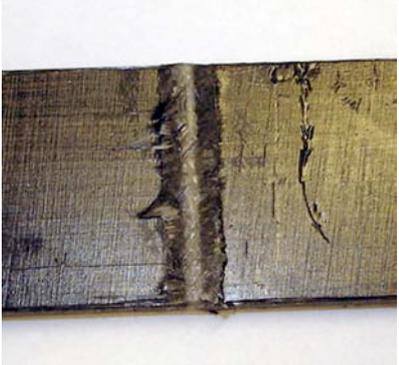
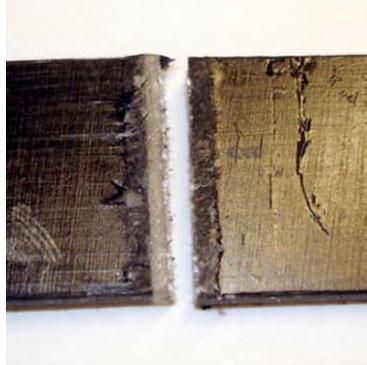
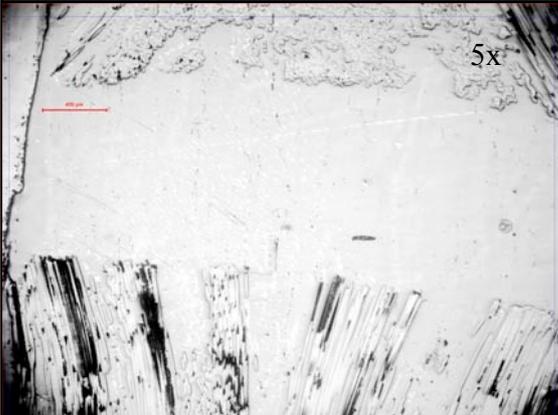
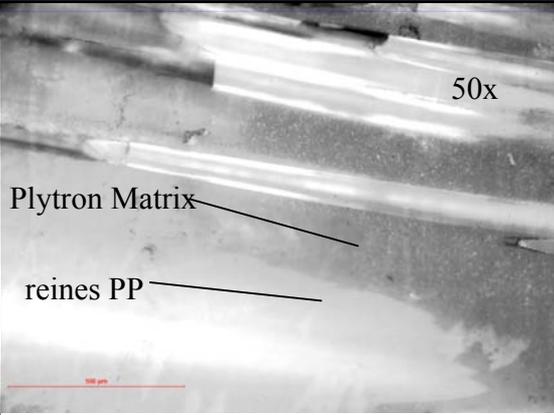
SD-Diagramm, Probe 7.3/5.3



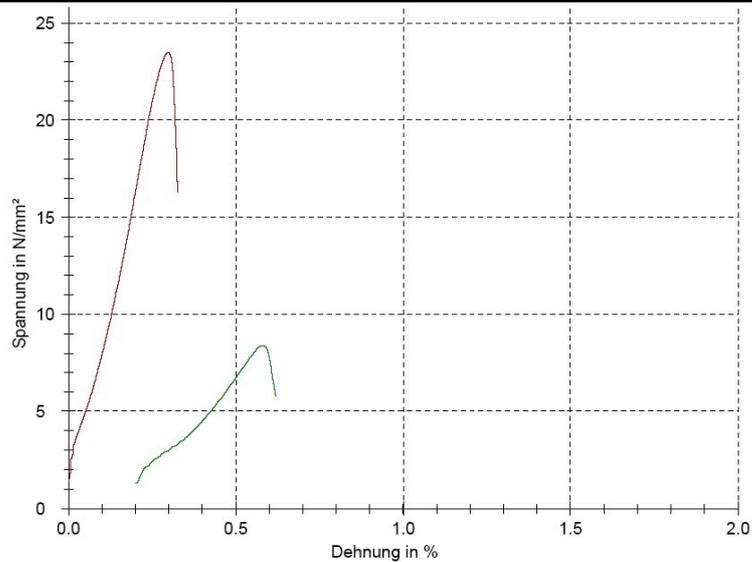
SD-Diagramm, Probe 7.2/7.1

Bemerkungen

Proben 7.2/7.1 L, LM und R waren nicht richtig verbunden. Dieses Probenpaar ist mit der ganzen Fügefläche auf den Heizspiegel gelegt worden. 7.3/5.3 hingegen wurde zuerst am dickeren Ende geheizt bevor die ganze Fläche angelegt wurde. Die Probe 7.3/5.3 L war sehr schmal und wurde für die Mikrofotografie verwendet. Optisch ist die Verbindung nicht ganz zufriedenstellend, denn beim Schmelzen hat sich an den äusseren Oberflächen Rillen gebildet, welche die Faserstruktur darunter abbilden. Beim Probenpaar 7.3/5.3 wurde dies verbessert durch das raschere Ansetzen eines Pressutensils, das die Oberfläche wieder geglättet hat.

Fügemethode	Spiegelschweissen		
Geometrie	Stumpf mit extra PP		
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm		
Plattenrohlingpaare	31.1/31.1		
Anzahl Zugproben	1		
Einspannlänge [mm]	75		
			
Probe geschweisst		Probe nach Zugtest	
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	1850.0		
Standardabweichung [N]	-		
Fügefläche [mm ²]	78.8		
Zugscherfestigkeit [MPa]	-		
Standardabweichung [MPa]	-		
Querschnittsfläche [mm ²]	78.8		
Zugfestigkeit [MPa]	23.5		
Standardabweichung [MPa]	-		
Bruchdehnung [mm]	0.12		
ε-Bruch [%]	0.17		
E-Modul [GPa]	6.53		
Standardabweichung [GPa]	-		
Mikrofotografie			
			
<p>Im Bild ist gut zu sehen, dass das zusätzlich eingebrachte, reine PP zwischen die aufgespreitzten Fasern hineingeflossen ist. Erst bei 50 facher Vergrößerung (unten) ist der Übergang vom reinen PP zur Matrix zu erkennen. Auf einer Seite sind die Fasern flach gedrückt worden beim Zusammendrücken.</p>			

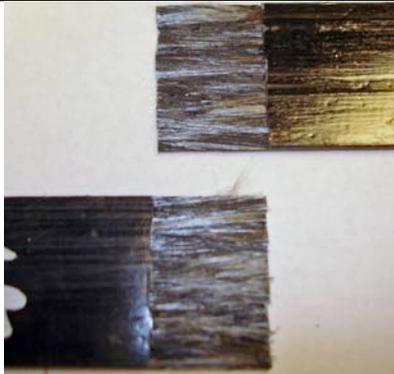
Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)



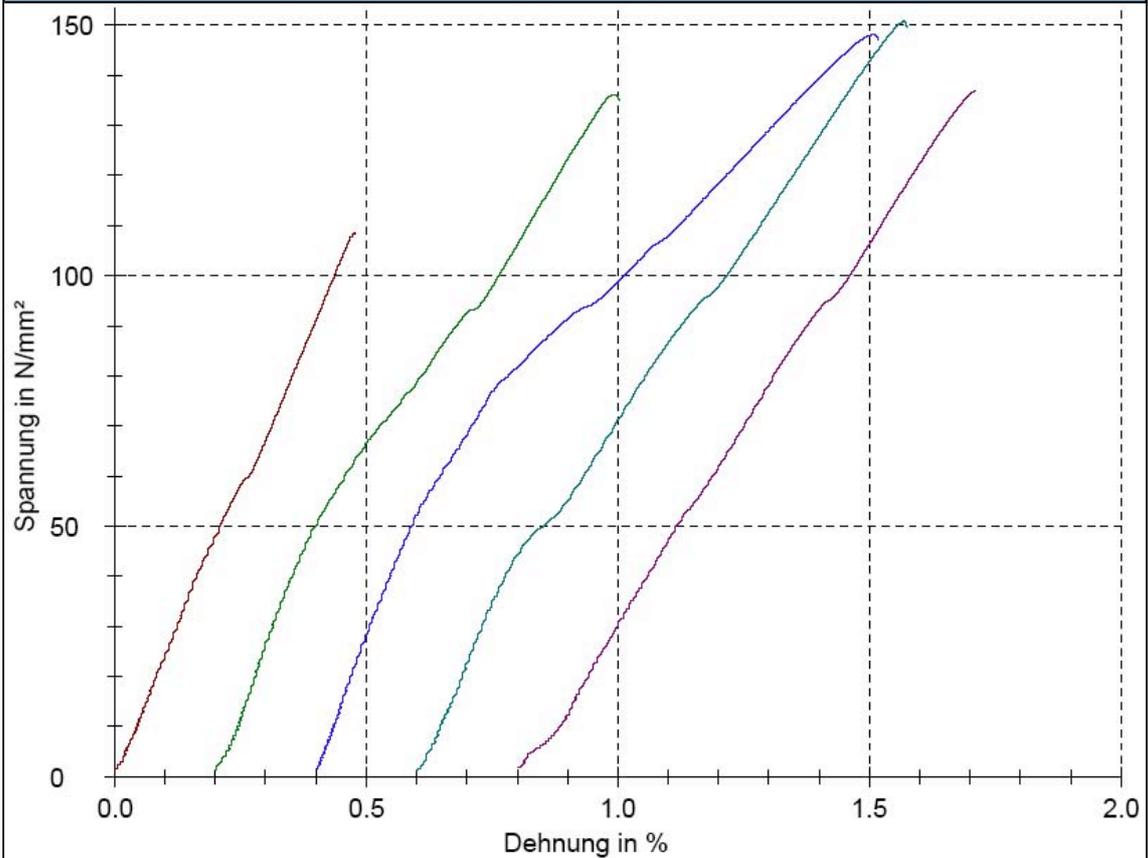
SD-Diagramm, Probe 31.1, erster und zweiter Test mit selber Probe

Bemerkungen

Das Zwischenstück aus reinem PP ist 1.2 mm breit. Die erreichbare Zugfestigkeit ist somit bestenfalls begrenzt durch die Festigkeit von PP. Diese wurde aber nicht erreicht, der Riss entstand zwischen dem reinen PP und einer der zwei Plytron Platten. Wären die beiden Platten so nah zusammen, dass die beidseitig aufgespreizten Fasern ineinander geschoben werden könnten, wären wahrscheinlich höhere Festigkeiten

Fügemethode	Heisspressen		
Geometrie	einschnittig überlappend		
Prepreg Material	4 Lagen Plytron Band 50 mm		
Plattenrohlingpaare	12.2/13.2		
Anzahl Zugproben	5		
Einspannlänge [mm]	55		
			
Probe 12.2/13.2 M gefügt		Probe 12.2/13.2 LM nach Zugtest	
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	4091.0	3415.5	4498.8
Standardabweichung [N]	434.9		
Fügefläche [mm ²]	275.4	270.2	279.1
Zugscherfestigkeit [MPa]	14.8	12.6	16.2
Standardabweichung [MPa]	1.4		
Querschnittsfläche [mm ²]	30.1	29.1	31.4
Zugfestigkeit [MPa]	136.1	108.6	150.9
Standardabweichung [MPa]	16.7		
Bruchdehnung [mm]	0.31	0.17	0.40
ε-Bruch [%]	0.56	0.31	0.73
E-Modul [GPa]	18.46	16.32	22.29
Standardabweichung [GPa]	2.42		
keine Mikrofotografie			

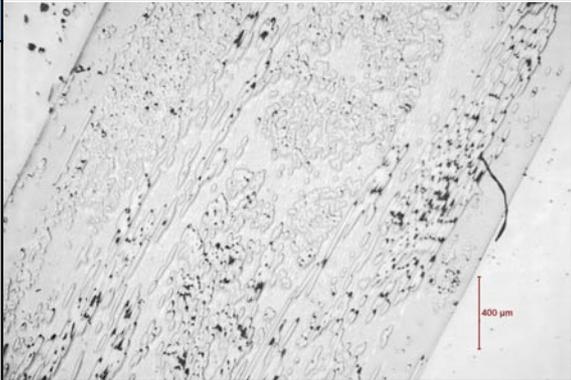
Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)



SD-Diagramm, Probenpaar 12.2/13.2

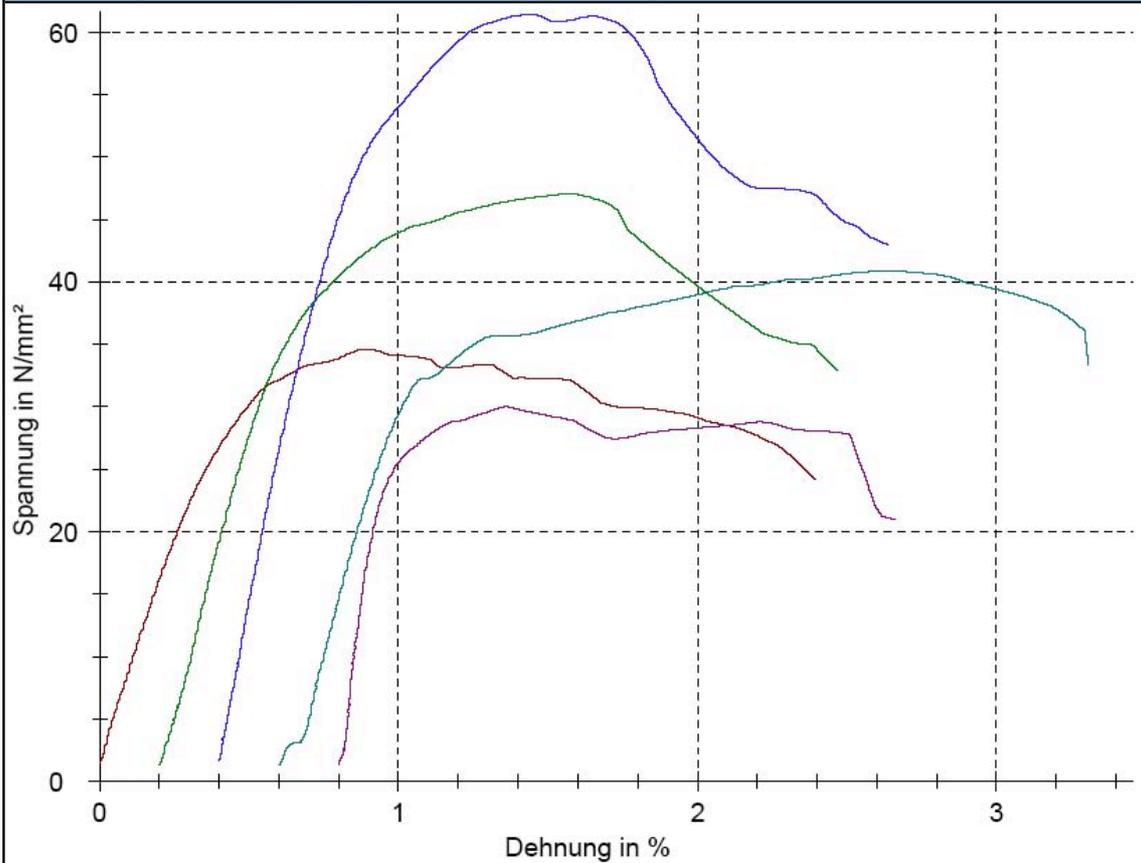
Bemerkungen

IM Bruch der getesteten Zugproben ist zu sehen, dass nicht alle Fasern komplett von Matrix Material umschlossen waren. Die Verschiebung der Fasern durch Matrixfluss ist gering. Die erreichte Zugscherfestigkeit ist leicht höher als diejenige der längeren einschnittigen Verbindung (Proben 29.2/29.1 34.1/34.2), die Zugfestigkeit hingegen ist fast doppelt so hoch aufgrund der halben Materialdicke.

Fügemethode		Heisspressen Geometreiprobe		
Geometrie	geschäftet			
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare	5.2/5.1			
Anzahl Zugproben	5			
Einspannlänge [mm]	55			
				
Probe 5.2/5.1 MR gefügt		Probe 5.2/5.1 L nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	2239.5	1610.0	2978.4	
Standardabweichung [N]	533.6			
Fügefläche* [mm ²]	348.8	326.4	355.3	
Zugscherfestigkeit [MPa]	6.5	4.5	9.1	
Standardabweichung [MPa]	1.8			
Querschnittsfläche [mm ²]	52.8	48.5	54.8	
Zugfestigkeit [MPa]	42.8	30.0	61.4	
Standardabweichung [MPa]	12.2			
Bruchdehnung [mm]	0.80	0.65	0.93	
ε-Bruch [%]	1.46	1.18	1.69	
E-Modul [GPa]	11.23	6.98	17.66	
Standardabweichung [GPa]	4.13			
Mikrofotografie 5.2/5.1 L				
<p>Sehr viele Fasern die fast normal zur Bildebene verlaufen sind auszumachen. Die Verteilung der Fasern ist sehr unregelmässig. Die Grenzlinie der beiden Platten ist nicht auszumachen in diesem Schnitt.</p>				

*vor dem Pressen

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)



Bemerkungen

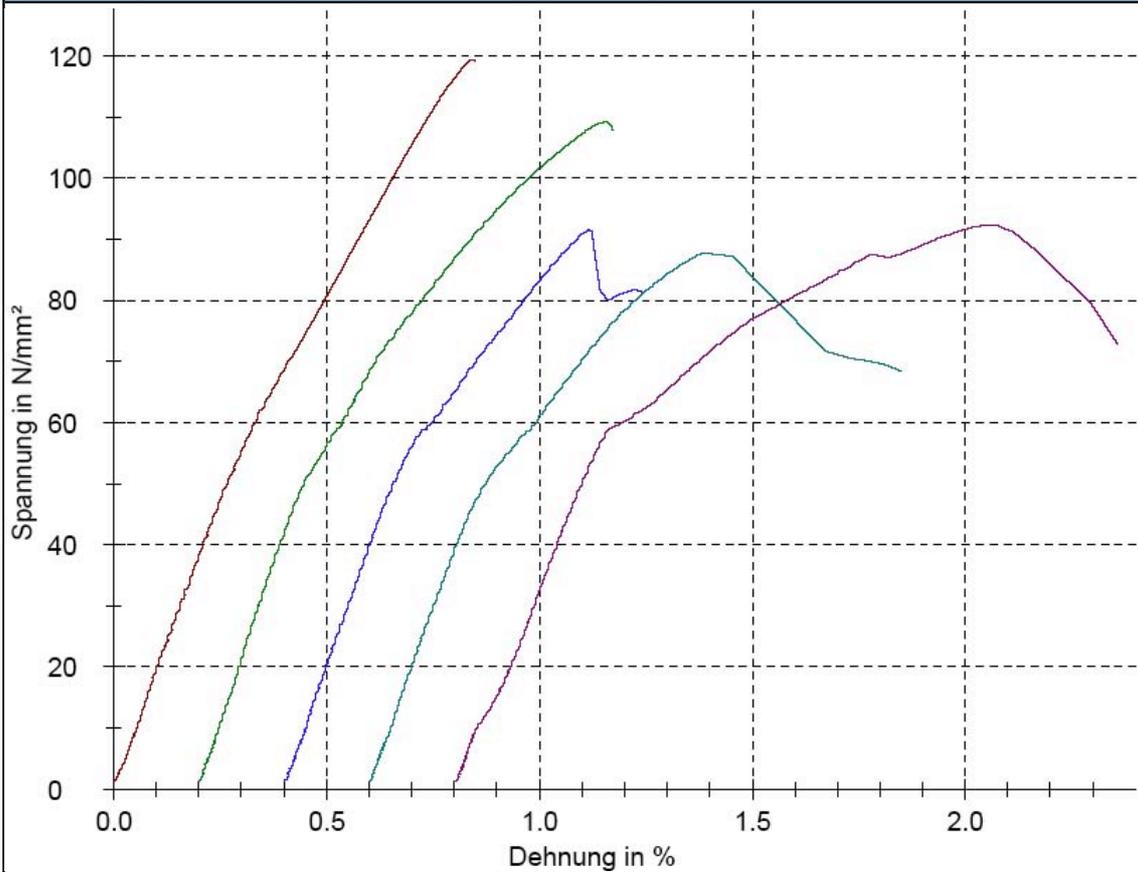
Beim Verpressen dieser Probe traten ausgeprägte Verschiebungen der Fasern auf. Dies äussert sich in sehr unterschiedlichen Ergebnissen der fünf Zugtests und den, ab den ersten Schäden, abgeflachten Kurven im Spannungs-Dehnungsdiagramm. Dieses zähe Verhalten äussert sich auch dadurch, dass keine der fünf Zugproben in zwei Stücke gerissen wurde bis zum Abbruch der Prüfung.

H.2 Proben Verbindungsgeometrie

- Schmale Finger
- Breite Finger 24.1/22.3
- Breite Finger 23.3/23.2
- Versetzte Finger
- Zacken
- Geschäftet 37.2/37.1
- Einschnittig überlappend, lang 29.2/29.1, 34.1/34.2
- Überlappend 10 mm ohne Bearbeitung
- Stumpf

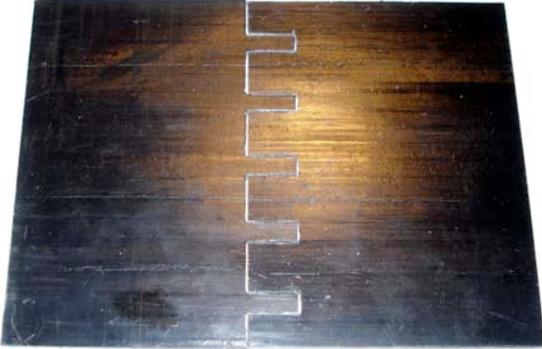
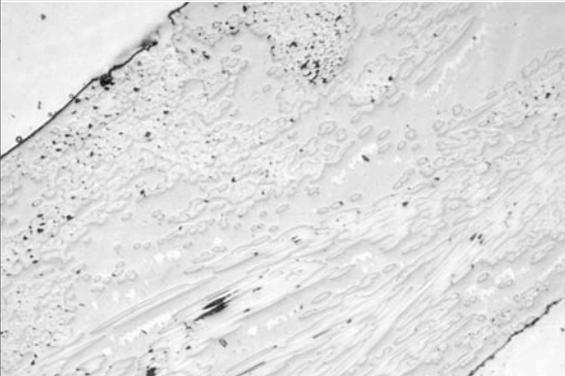
Fügemethode	Heisspressen Geometreiprobe		
Geometrie	schmale Finger		
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm		
Plattenrohlingpaare	24.3/24.2		
Anzahl Zugproben	5		
Einspannlänge [mm]	75		
			
Probe 24.3/24.2 MR gefügt	Probe 24.3/24.2 LM nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	6390.3	5592.6	7644.0
Standardabweichung [N]	877.3		
Fügefläche [mm ²]	320.3	288.2	336.0
Zugscherfestigkeit [MPa]	19.9	17.7	22.7
Standardabweichung [MPa]	2.1		
Querschnittsfläche [mm ²]	63.9	63.8	64.0
Zugfestigkeit [MPa]	100.0	87.7	119.4
Standardabweichung [MPa]	13.6		
Bruchdehnung [mm]	0.38	0.30	0.55
ε-Bruch [%]	0.51	0.39	0.73
E-Modul [GPa]	18.88	16.14	20.76
Standardabweichung [GPa]	1.85		
keine Mikrofotografie			

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)

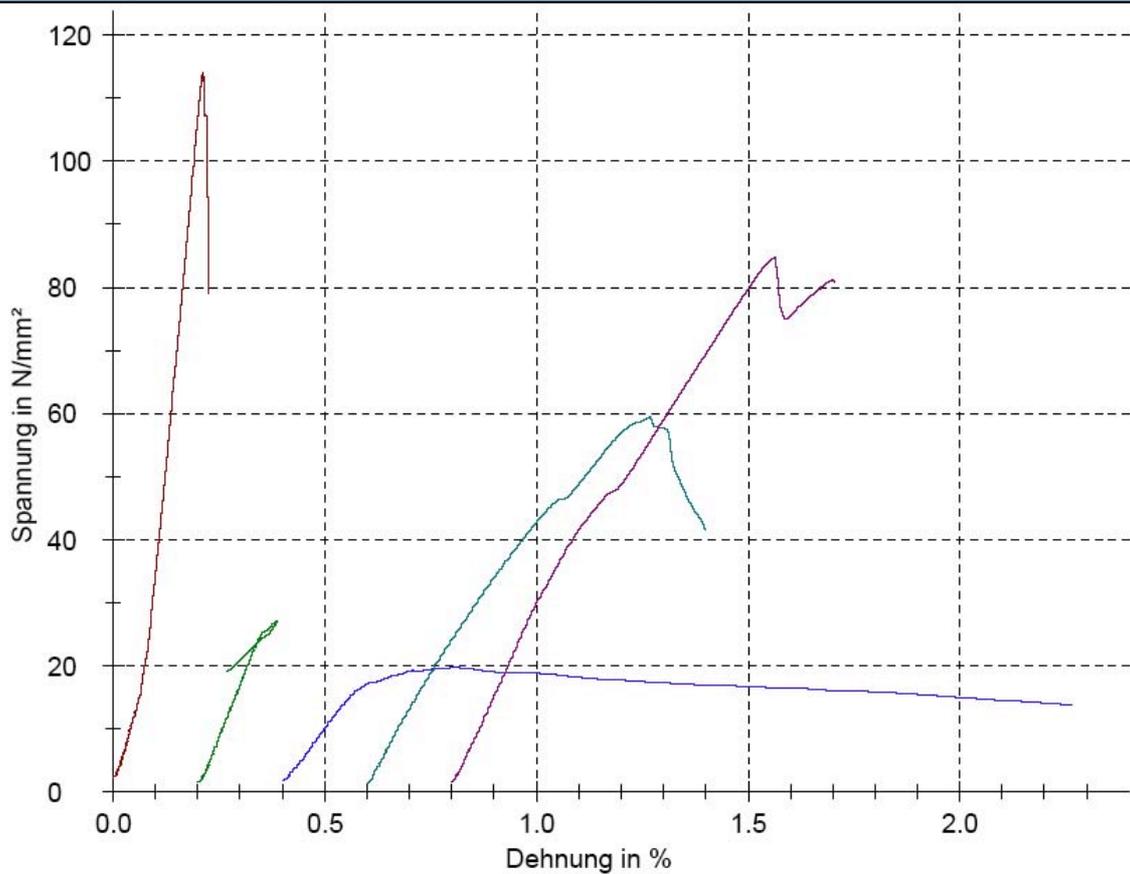


Bemerkungen

Wahrscheinlich bildeten sich auch hier die Risse an den Enden der Finger aus und zwar bei einer über den Querschnitt gemittelten Spannung von etwa 60 MPa. Im SD-Diagramm ist jeweils dort ein Knick zu erkennen. Die Finger sind nicht ganz perfekt geformt, wodurch teilweise in den Zwischenräumen beim Pressen matrixreiche Zonen bildeten, insb. an den Enden der Finger.

Fügemethode		Heisspressen Geometrieprobe		
Geometrie	breite Finger			
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare	24.1/22.3			
Anzahl Zugproben	5			
Einspannlänge [mm]	75			
				
Probe 24.1/22.3 vor dem Fügen		Probe 24.1/22.3 L und LM nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	2450.0	826.0	4495.7	
Standardabweichung [N]	1537.6			
Fügefläche [mm ²]	-			
Zugscherfestigkeit [MPa]	-			
Standardabweichung [MPa]	-			
Querschnittsfläche [mm ²]	40.7	39.4	42.0	
Zugfestigkeit [MPa]	61.0	19.7	114.1	
Standardabweichung [MPa]	39.5			
Bruchdehnung [mm]	0.23	0.08	0.32	
ε-Bruch [%]	0.30	0.10	0.42	
E-Modul [GPa]	21.07	10.43	39.01	
Standardabweichung [GPa]	15.63			
Mikrofotografie M-MR				
Auf diesem Längsschnitt in der Verbindungszone ist gut zu sehen, dass viele der Fasern nun quer stehen, vor allem in der unteren Bildhälfte hat es aber auch längs ausgerichtete Fasern. Beim Pressen sind die Fasern mit der Matrix zur Seite geflossen.				

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)

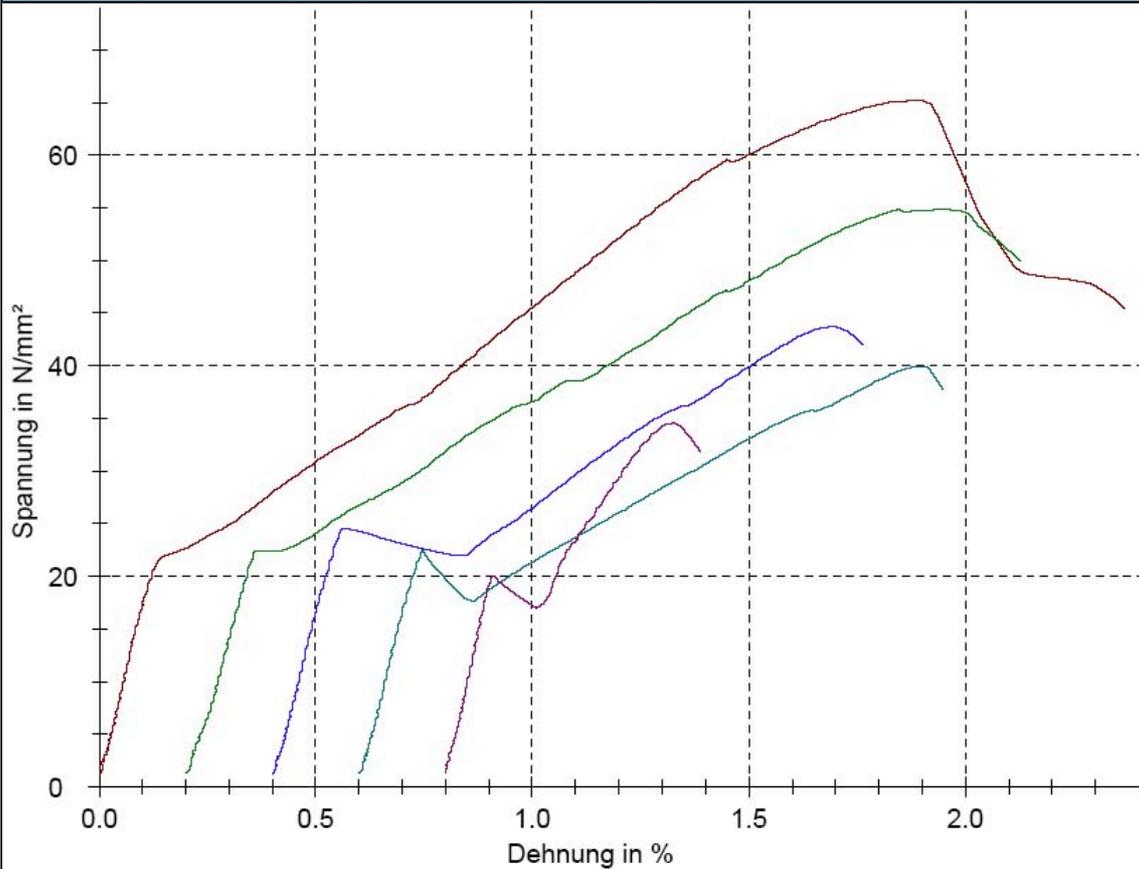


Bemerkungen

Bereits nach dem Pressen war zu sehen, dass vor allem an den beiden Seitenrändern (L und R) die Fasern an der Oberfläche quer lagen. Bei den mittleren Proben kam die ursprüngliche Trennebene mit geringem Faseranteil fast quer zu liegen. In diesen Proben war dann auch die erreichte Bruchkraft um ein vielfaches tiefer als am Rand wo die Fasern von beiden Fügepartnern viel stärker überlappten.

Fügemethode	Heisspressen Geometreiprobe		
Geometrie	breite Finger		
Prepreg Material	4 Lagen Plytron Band 50 mm, 8 Lagen Plytron Blätter		
Plattenrohlingpaare	23.3/23.2		
Anzahl Zugproben	5		
Einspannlänge [mm]	75		
			
Probe 23.2/23.3 M gefügt		Probe 23.2/23.3 L nach Zugtest	
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	3257.7	2407.7	4442.9
Standardabweichung [N]	813.4		
Fügefläche [mm ²]	118.7	117.3	120.8
Zugscherfestigkeit [MPa]	27.5	19.9	37.9
Standardabweichung [MPa]	7.2		
Querschnittsfläche [mm ²]	68.5	67.3	69.7
Zugfestigkeit [MPa]	47.6	34.5	65.2
Standardabweichung [MPa]	12.3		
Bruchdehnung [mm]	0.53	0.21	0.83
ε-Bruch [%]	0.71	0.28	1.11
E-Modul [GPa]	16.51	14.12	18.79
Standardabweichung [GPa]	1.65		
keine Mikrofotografie			

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)

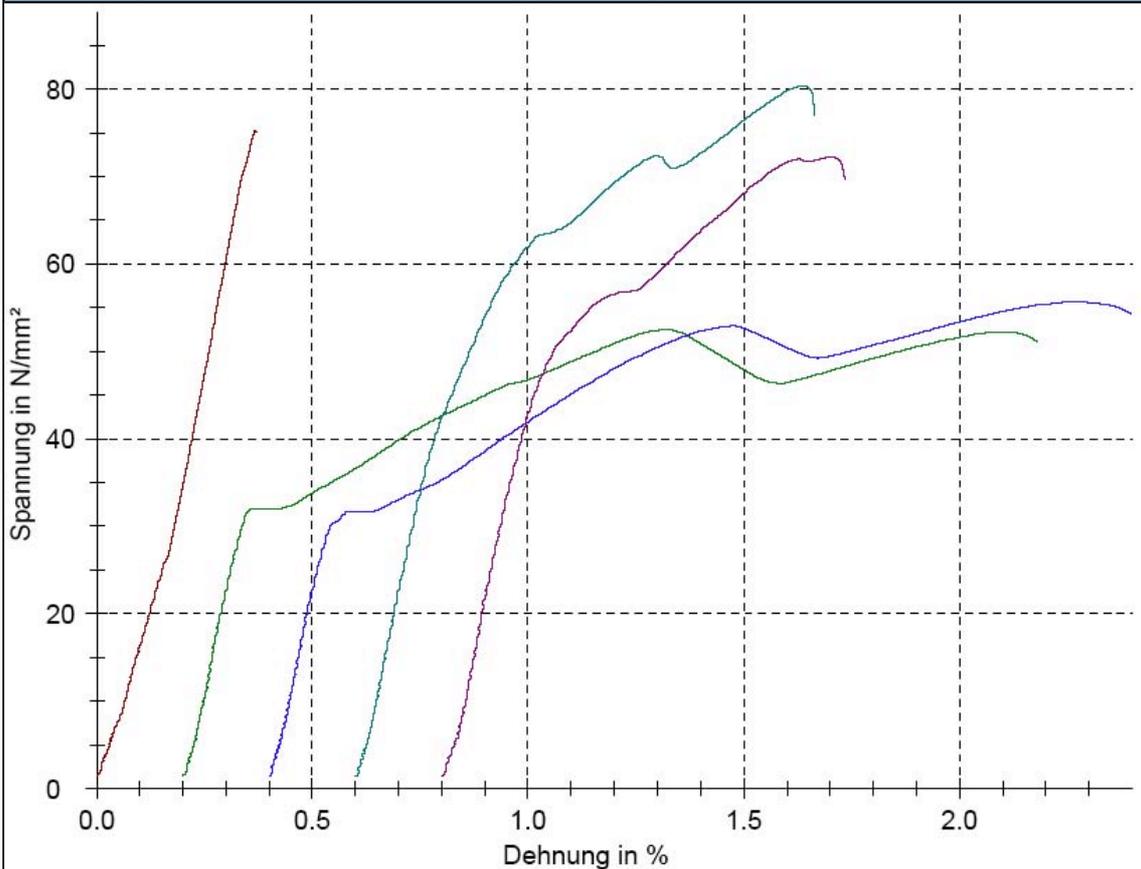


Bemerkungen

Die Proben RM und R sind sehr unsymmetrisch. Einer der Finger beider Finger, auf der Seite mit zwei Fingern, ist extrem schmal geraten. Beim Knick im Spannungs-Dehnungsdiagramm bei etwa 20 MPa tritt der erste Riss auf, wobei ein Knacken zu hören ist. Wahrscheinlich ist dies am Ende der Finger. Die Flanken halten noch ein gutes Stück länger.

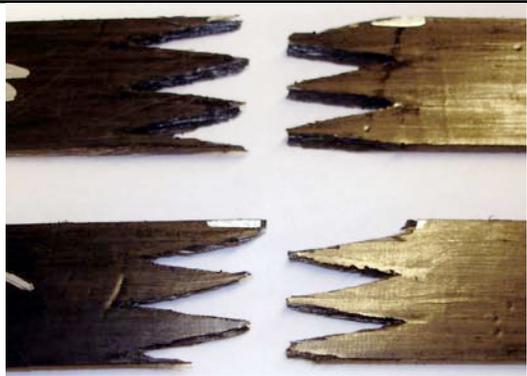
Fügemethode	Heisspressen Geometreiprobe		
Geometrie	gestaffelte Finger		
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm		
Plattenrohlingpaare	22.1/22.2		
Anzahl Zugproben	5		
Einspannlänge [mm]	75		
			
Probe 22.1/22.2 M gefügt	Probe 22.1/22.2 L nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	4334.2	3470.6	5231.2
Standardabweichung [N]	770.4		
Fügefläche [mm ²]	280.5	242.1	312.0
Zugscherfestigkeit [MPa]	15.4	14.3	16.8
Standardabweichung [MPa]	1.0		
Querschnittsfläche [mm ²]	64.6	63.0	66.1
Zugfestigkeit [MPa]	67.2	52.5	80.3
Standardabweichung [MPa]	12.4		
Bruchdehnung [mm]	0.44	0.13	0.69
ε-Bruch [%]	0.59	0.17	0.92
E-Modul [GPa]	21.64	17.17	24.48
Standardabweichung [GPa]	2.82		
keine Mikrofotografie			

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)

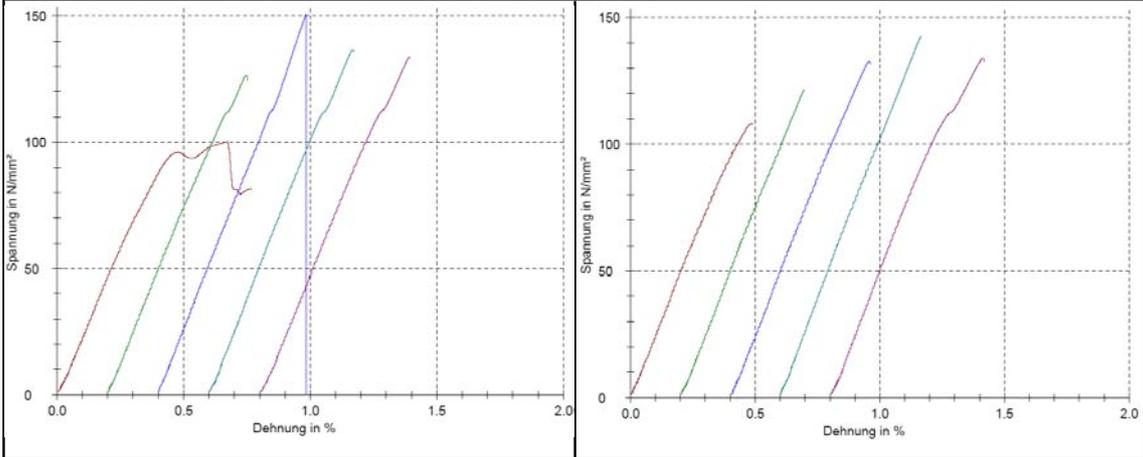


Bemerkungen

Die unterschiedlichen verläufe im SD-Diagramm kommen vom unterschiedlichen Schnittstelle. Wegen dem breiteren Ersatz-Sägeblatt der Nasskreissäge war es nicht mehr möglich 20 mm breite Proben zu sägen an den vorgesehenen Stellen. Probe LM und M haben einen Finger weniger, dafür einen breiteren auf der anderen Seite. Dies verkürzt die effektive Verbindungslänge um bis 23 mm gegenüber Probe L, RM und R. Die resultierenden Zugscherfestigkeiten sind unter berücksichtigung der Verbindungslängen in etwa gleich gross. Die Fasern haben sich nur geringfügig aus ihrer Ursprünglichen Lage bewegt durch das Pressen.

Fügemethode		Heisspressen Geometrieprobe		
Geometrie	Zacken			
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare	18.3/19.3 und 28.3/28.2			
Anzahl Zugproben	10			
Einspannlänge [mm]	75			
				
Probe 28.3/28.2 R geschweisst		Probe 28.3/28.2 M und L v.o. nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	8068.6	6255.0	9288.7	
Standardabweichung [N]	908.8			
Fügefläche [mm ²]	314.0	310.0	325.1	
Zugscherfestigkeit [MPa]	25.7	20.2	29.9	
Standardabweichung [MPa]	2.9			
Querschnittsfläche [mm ²]	62.7	61.7	63.9	
Zugfestigkeit [MPa]	128.7	100.3	150.6	
Standardabweichung [MPa]	15.2			
Bruchdehnung [mm]	0.20	0.17	0.27	
ε-Bruch [%]	0.27	0.23	0.36	
E-Modul [GPa]	25.13	22.61	26.42	
Standardabweichung [GPa]	0.98			
keine Mikrofotografie				

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugfestigkeit)

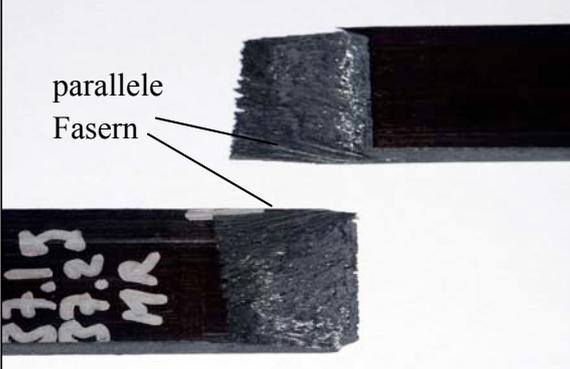
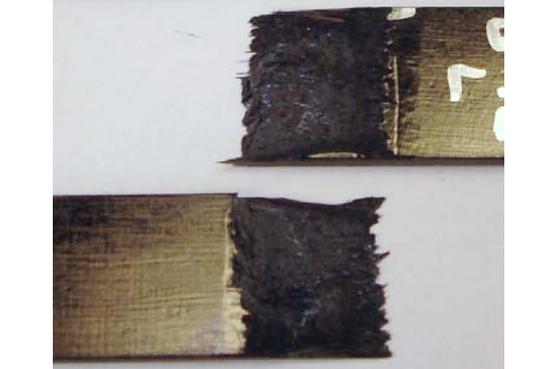
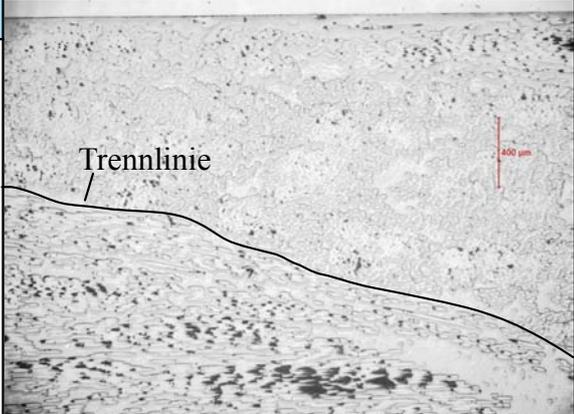


SD-Diag. 18.3/19.3

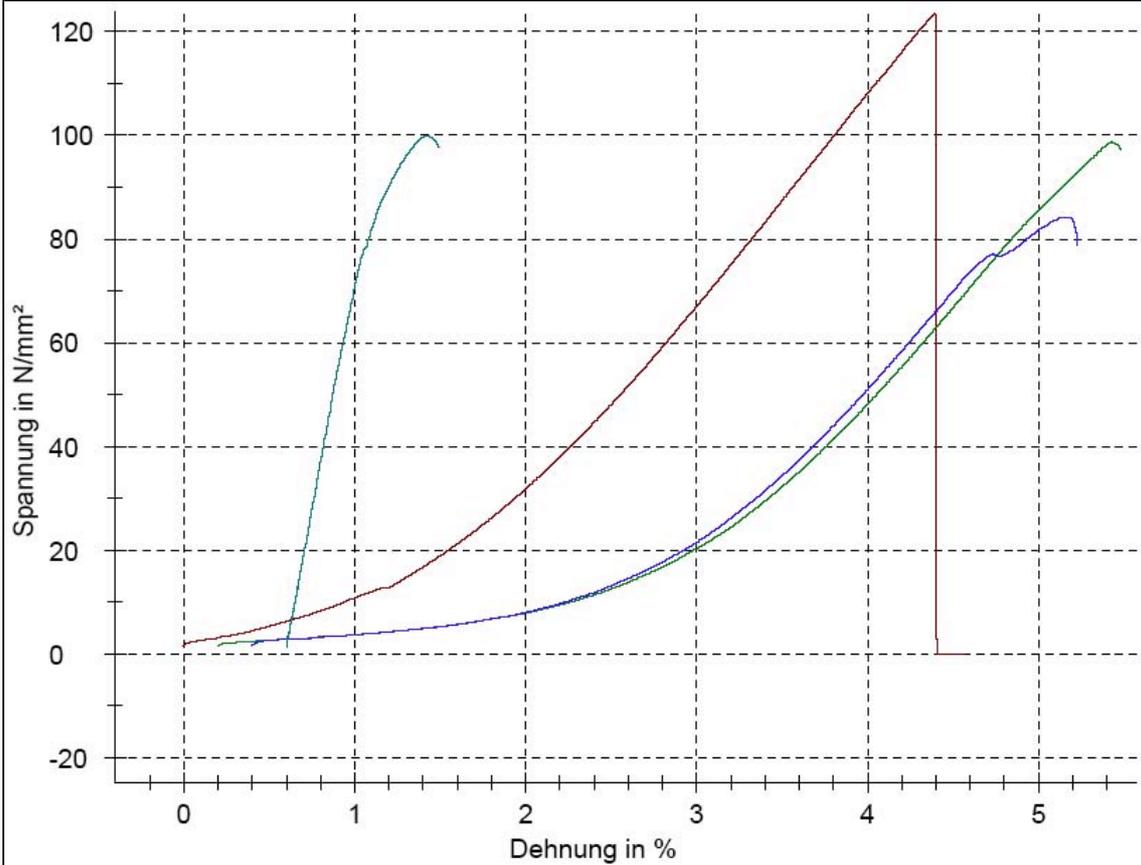
SD-Diag. 28.3/28.2

Bemerkungen

Bei Probe 18.3/19.3 M hat die Zugmaschine automatisch abgeschaltet, da die eingegebene Obergrenze der Zugkraft erreicht wurde. Die Kurven und die Werte dieser Proben sind ziemlich regelmässig verglichen mit den anderen Geometrieproben. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Gestaltung der Fügezone die seitliche Verschiebung der Fasern eindämmt. Ein weiterer Grund ist die gleichmässige Verteilung der Faserenden auf den Fügebereich, wodurch Spannungsspitzen abgebaut werden.

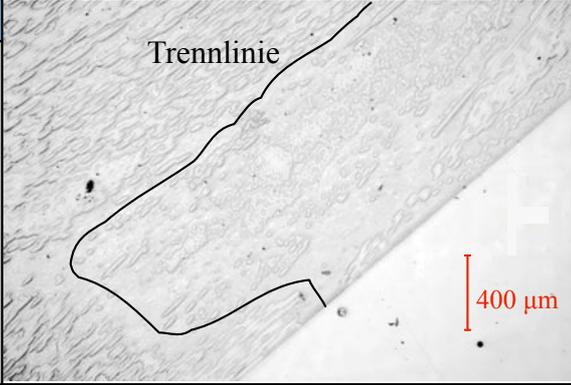
Fügemethode		Heisspressen Geometreiprobe		
Geometrie	geschäftet			
Prepreg Material	16 Lagen Plytron Blätter			
Plattenrohlingpaare	37.2/37.1			
Anzahl Zugproben	4			
Einspannlänge [mm]	60			
				
Probe 37.2/37.1 MR nach Zugtest		Probe 37.2/37.1 L nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	7568.5	6186.5	9307.9	
Standardabweichung [N]	1290.9			
Fügefläche [mm ²]	428.2	422.5	433.5	
Bruchkraft/Fügefläche [MPa]	17.7	14.6	21.5	
Standardabweichung [MPa]	2.8			
Querschnittsfläche [mm ²]	74.4	73.4	75.3	
Zugfestigkeit [MPa]	101.6	84.3	123.6	
Standardabweichung [MPa]	16.3			
Bruchdehnung [mm]	1.47	0.32	2.12	
ε-Bruch [%]	2.45	0.53	3.53	
E-Modul [GPa]	6.99	3.63	16.98	
Standardabweichung [GPa]	6.66			
Mikrofotografie 37.2/37.1 R				
<p>Die Trennlinie ist klar zu erkennen, da die Fasern der Platte oben rechts im Bild fast senkrecht zur Bildebene stehen, während die Fasern der anderen Platte viel flacher liegen. Die Verteilung der Fasern ist jeweils pro Plattenhälfte ziemlich regelmässig.</p>				

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)

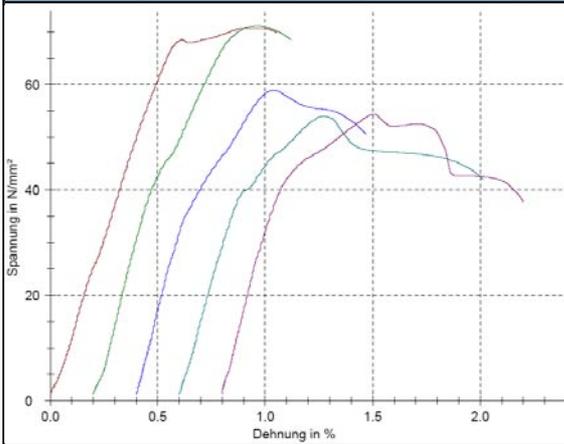


Bemerkungen

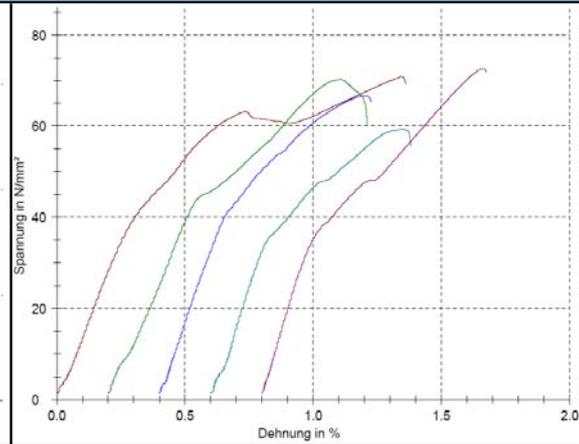
Die Probe R wurde verwendet für die Mikrofotografie. Bei Probe L hat die Zugmaschine abgeschaltet weil die eingestellte obere Zugkraftgrenze erreicht wurde. Unmittelbar danach riss die Probe. Die Probe MR weist eine viel grössere Steifigkeit auf als die anderen drei. Im Bruch ist zu sehen, dass auf einer Breite von etwa 3 mm die Fasern vom Rohling 37.2 in die andere Seite der Verbindung geflossen sind und parallel zu den dortigen Fasern zu liegen kamen (siehe Bild links). Dies verbesserte die lokale Übertragung der Zugkraft.

Fügemethode		Heisspressen		
Geometrie	einschnittig überlappend			
Prepreg Material	16 Lagen Plytron Blätter			
Plattenrohlingpaare	29.2/29.1 und 34.1/34.2			
Anzahl Zugproben	10			
Einspannlänge [mm]	75			
				
Probe 34.1/34.2 L gefügt		Probe 29.2/29.1 LM gezogen		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	4636.2	3941.6	5126.3	
Standardabweichung [N]	500.3			
Fügefläche [mm ²]	337.5	323.0	346.3	
Zugscherfestigkeit [MPa]	13.7	11.6	15.4	
Standardabweichung [MPa]	1.6			
Querschnittsfläche [mm ²]	71.5	69.9	73.1	
Zugfestigkeit [MPa]	64.9	53.9	72.6	
Standardabweichung [MPa]	7.4			
Bruchdehnung [mm]	0.38	0.28	0.50	
ε-Bruch [%]	0.50	0.37	0.67	
E-Modul [GPa]	13.68	12.51	15.64	
Standardabweichung [GPa]	4.45			
Mikrofotografie 29.1/29.2 L				
<p>In dieser Aufnahme ist die Trennlinie zwischen den beiden Platten hervorgehoben. Im Bereich der Trennlinie ist mehr Matrix Material zu sehen, als im Rest der Platte. Die Fasern der rechten Platte stehen fast senkrecht zur Bildebene.</p>				

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)



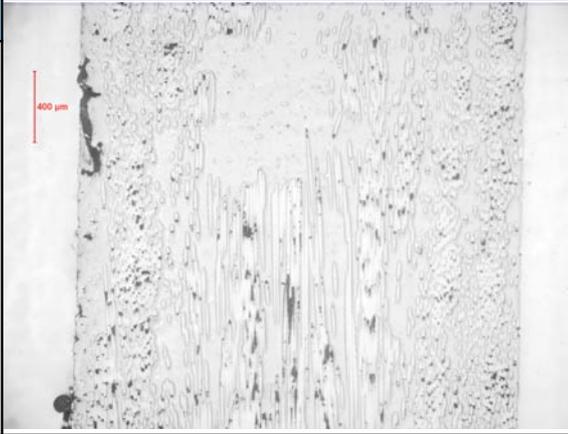
SD-Diagramm, Probe 29.2/29.1



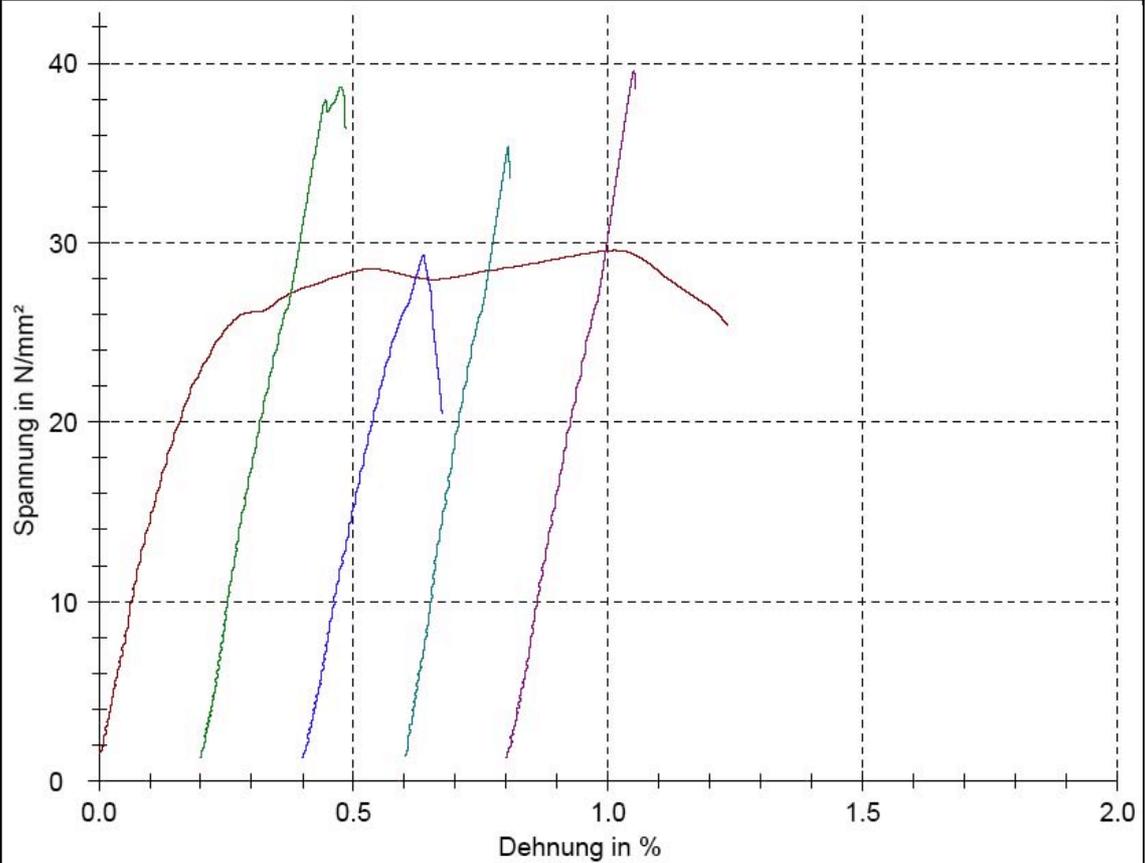
SD-Diagramm, Probe 34.2/34.1

Bemerkungen

Die Fasern im Probenpaar 29.2/29.1 haben sich im Bereich der Verbindung recht stark zur Seite verschoben um bis zu 20°. Bei 34.2/34.1 ist dies viel weniger ausgeprägt. Dort sind auch die Ergebnisse der Zugtests gleichmäßiger über die Testserie. Bei den Proben 29.2/29.1 L und LM sind die Faserenden in der Stufe recht stark ineinander geflossen beim Pressen, im Gegensatz zu den anderen Proben beider Serien. Das ist sehr wahrscheinlich der Grund für die höhere Festigkeit als bei den anderen drei Proben dieses Probenpaares.

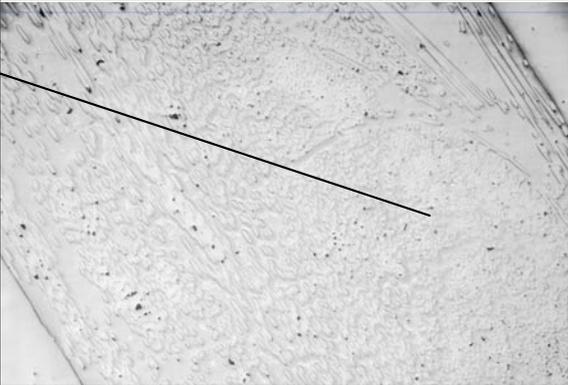
Fügemethode		Heisspressen Geometrieprobe		
Geometrie	überlappend 10 mm, ohne Bearbeitung			
Prepreg Material	16 Lagen Plytron Blätter			
Plattenrohlingpaare	30.1/30.1			
Anzahl Zugproben	5			
Einspannlänge [mm]	75			
				
Probe 30.1/30.2 MR geschweisst		Probe 30.1/30.2 nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	1880.2	1566.7	2198.6	
Standardabweichung [N]	288.2			
Fügefläche [mm ²]	-			
Zugscherfestigkeit [MPa]	-			
Standardabweichung [MPa]	-			
Querschnittsfläche [mm ²]	54.4	53.0	55.6	
Zugfestigkeit [MPa]	34.5	29.3	39.6	
Standardabweichung [MPa]	4.9			
Bruchdehnung [mm]	0.16	0.07	0.44	
ε-Bruch [%]	0.21	0.10	0.58	
E-Modul [GPa]	15.22	11.43	18.10	
Standardabweichung [GPa]	2.63			
Mikrofotografie				
<p>In diesem Schnitt ist in der Mitte der Platte eine Gruppierung von Längsfasern zu sehen, welche umgeben sind von anders ausgerichteten Fasern an den Oberflächen. Vor den Enden dieser Gruppe von Fasern ist ein beachtlicher Bereich fast ohne Fasern zu sehen. An dieser Stelle ist das Entstehen eines Risses unter Zug wahrscheinlich.</p>				

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)

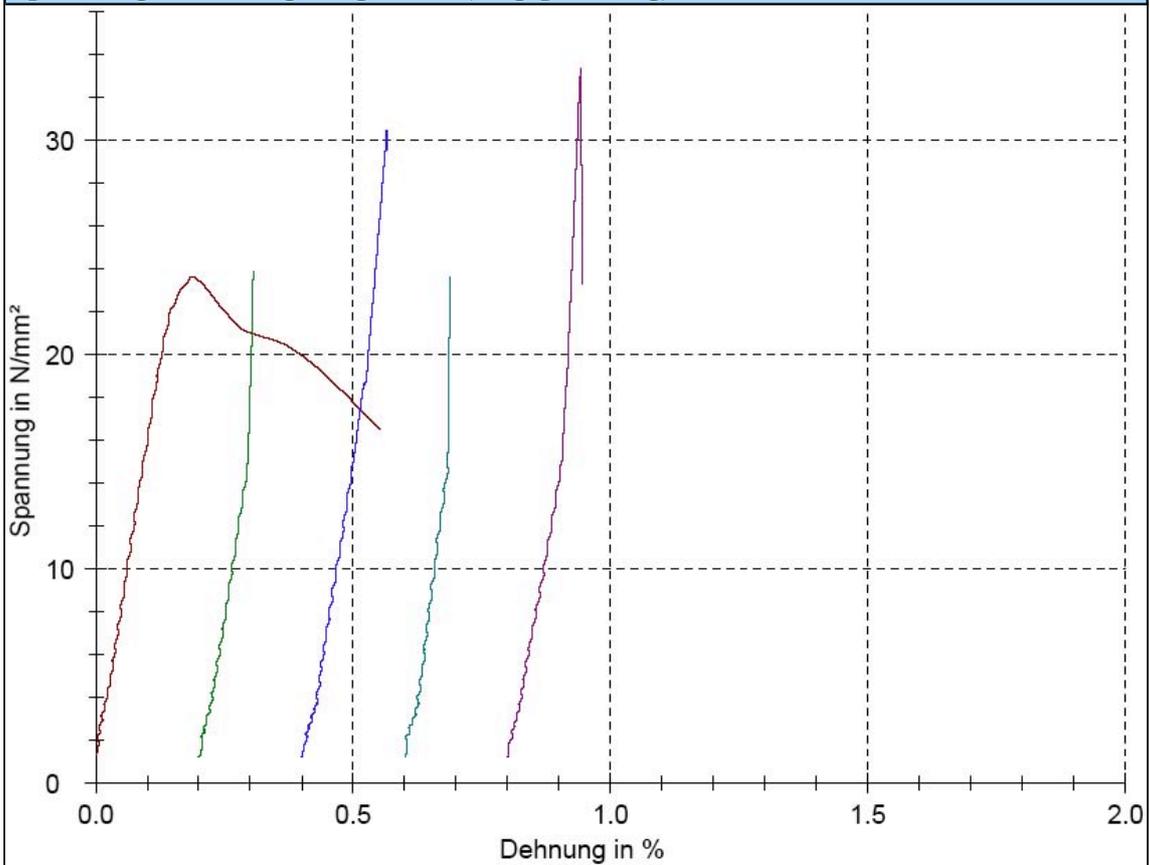


Bemerkungen

Die Fasern der Platte 37.1 wurden beim Pressen gestaucht und die Überlappung rutschte damit ab. Es hat sich daher höchstens eine kleine Überlappung von einem Teil der Fasern ergeben. Die Zugprobe L sticht im SD-Diagramm heraus wegen ihrer Zähigkeit. Die anderen Proben zeigen ein sprödes Verhalten.

Fügemethode	Heisspressen Geometrieprobe		
Geometrie	Stumpf		
Prepreg Material	8 Lagen Plytron Band 50 mm		
Plattenrohlingpaare	25.1/25.2		
Anzahl Zugproben	5		
Einspannlänge [mm]	85		
			
Probe 25.1/25.2 M vor und LM nach dem Zugtest			
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	1573.8	1376.3	1945.0
Standardabweichung [N]	264.0		
Fügefläche [mm ²]	58.3	57.9	58.9
Zugscherfestigkeit [MPa]	-		
Standardabweichung [MPa]	-		
Querschnittsfläche [mm ²]	58.3	57.9	58.9
Zugfestigkeit [MPa]	27.0	23.6	33.4
Standardabweichung [MPa]	4.6		
Bruchdehnung [mm]	0.04	0.03	0.06
ε-Bruch [%]	0.05	0.03	0.07
E-Modul [GPa]	16.15	13.76	19.95
Standardabweichung [GPa]	2.68		
Mikrofotografie 25.1/25.2 L			
<p>Vorallem die Fasern von einer Seite (rechts unten im Bild) liegen in der Umgebung der Verbindung zu einem grossen Teil quer zu ihrer ursprünglichen Lage verdreht. Oben rechts sind einige längs ausgerichtete und weniger dicht gepackte Fasern zu sehen.</p>			

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)



SD-Diagramm, Probe25.1/25.2

Bemerkungen

Die relativ ebene Bruchfläche legt die Vermutung nahe, dass über diese Fläche nur sehr wenige Fasern sich mit den Fasern der gegenüberliegenden Seite verschränkt haben. Dies wird auch von der Mikrofotografie gestützt.

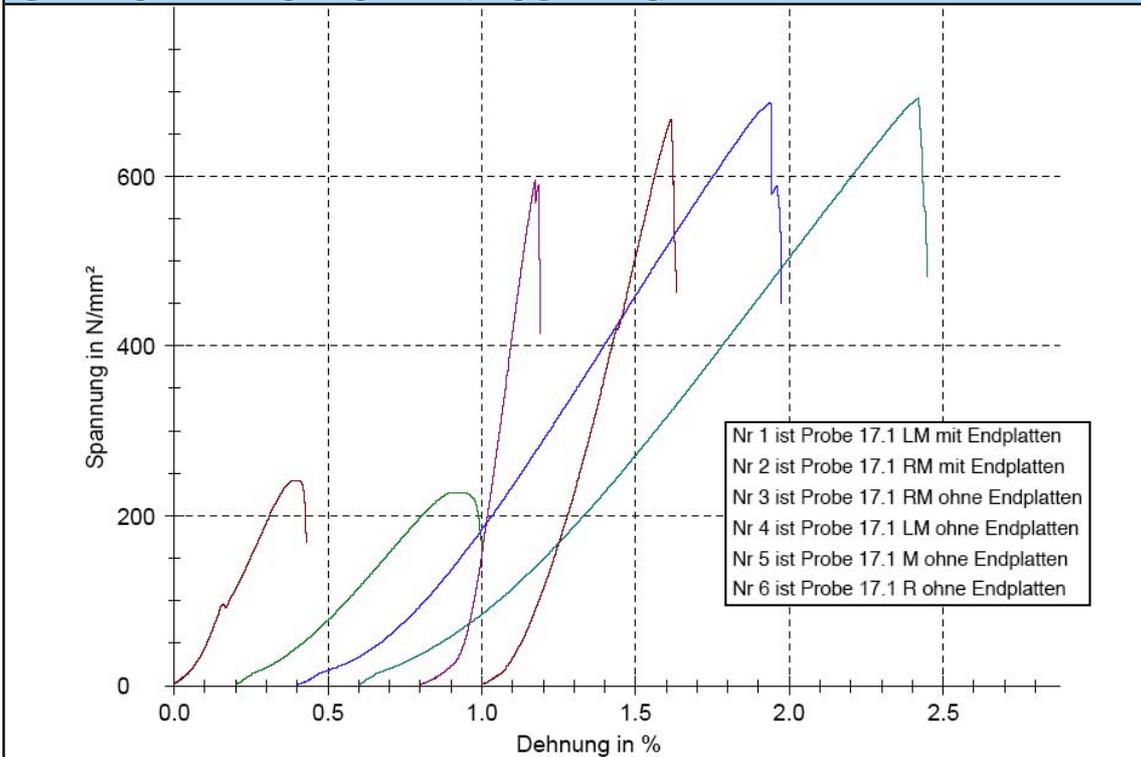
H.3 Durchgehende Referenzproben

- Referenzproben ohne Endplatten
- Referenzproben mit dicken Enden

Fügemethode		Referenzproben ohne Endplatten		
Geometrie	UD durchgehend			
Prepreg Material	4 Lagen Plytron Band 50 mm			
Plattenrohlingpaare				
Anzahl Zugproben	4			
Einspannlänge [mm]	40			
				
oben Probe 17.1 M nach Zugtest		unten rechts Probe 17.1 L nach Zugtest		
unten links Probe 17.1 M nach Zugtest				
Testresultate	Mittelwert	Min	Max	
Bruchkraft [N]	20943.4	18871.6	21958.3	
Standardabweichung [N]	1446.7			
Fügefläche [mm ²]	-			
Zugscherfestigkeit [MPa]	-			
Standardabweichung [MPa]	-			
Querschnittsfläche [mm ²]	31.7	31.5	32.0	
Zugfestigkeit [MPa]	660.2	595.7	691.9	
Standardabweichung [MPa]	44.3			
Bruchdehnung [mm]	0.33	0.09	0.57	
ε-Bruch [%]	0.82	0.22	1.43	
E-Modul [GPa]*	117.37	41.29	250.16	
Standardabweichung [GPa]	96.32			
keine Mikrofotografie				

* nicht realistisch, vorallem bei M und R

Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)



SD-Diagramm, Probe 17.1

Bemerkungen

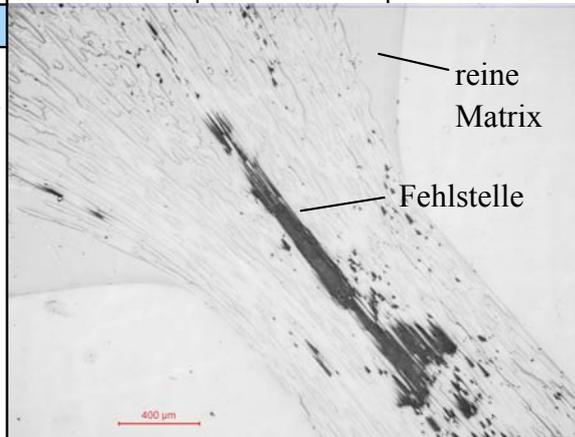
Diese Proben sollten zuerst mit aufgeklebten Endplatten getestet werden, diese rutschten aber ab vor dem Bruch der Proben. Sie wurden ohne Endplatten getestet. Die Spannbacken beschädigten das Plytron Material und die Zugkraft wurde mit lokalen Spannungsüberhöhungen eingeleitet. Daher ist anzunehmen, dass der Bruch von diesen Stellen in der Einspannung ausgehend sich ausbreitete. Die erreichten Zugfestigkeiten sind leicht tiefer als die vom Hersteller angegebene Zugfestigkeit von 720 MPa für eine 3 mm dicke UD Platte.

Fügemethode	Referenzproben
Geometrie	durchgehende Fasern
Prepreg Material	4 Lagen Plytron Band 50 mm
Plattenrohlingpaare	38
Anzahl Zugproben	4
Einspannlänge [mm]	110

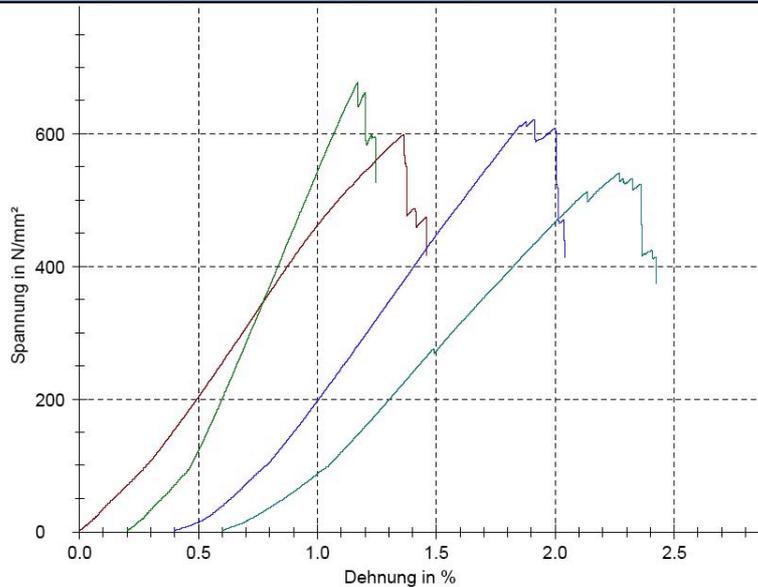


oben Probe 38 MR	unten Probe 38 LM nach Zugtest		
Testresultate	Mittelwert	Min	Max
Bruchkraft [N]	14591.7	12608.3	16283.3
Standardabweichung [N]	1538.6		
Fügefläche [mm ²]	-		
Zugscherfestigkeit [MPa]	-		
Standardabweichung [MPa]	-		
Querschnittsfläche [mm ²]	23.9	23.3	24.3
Zugfestigkeit [MPa]	609.3	540.2	676.8
Standardabweichung [MPa]	56.5		
Bruchdehnung [mm]	0.52	0.36	0.63
ε-Bruch [%]	0.47	0.33	0.57
E-Modul [GPa]	30.68	22.71	37.07
Standardabweichung [GPa]	6.57		

Mikrofotografie 38
<p>Die Mikrofotografie zeigt den Übergang zum aufgedickten Ende. Der Bereich in der Mitte ist nicht perfekt konsolidiert, wahrscheinlich aufgrund des lokal geringeren Anpressdrucks, welcher von den auseinander gehenden Fasern resultiert.</p>



Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugspannung)



SD-Diagramm, Probe 38

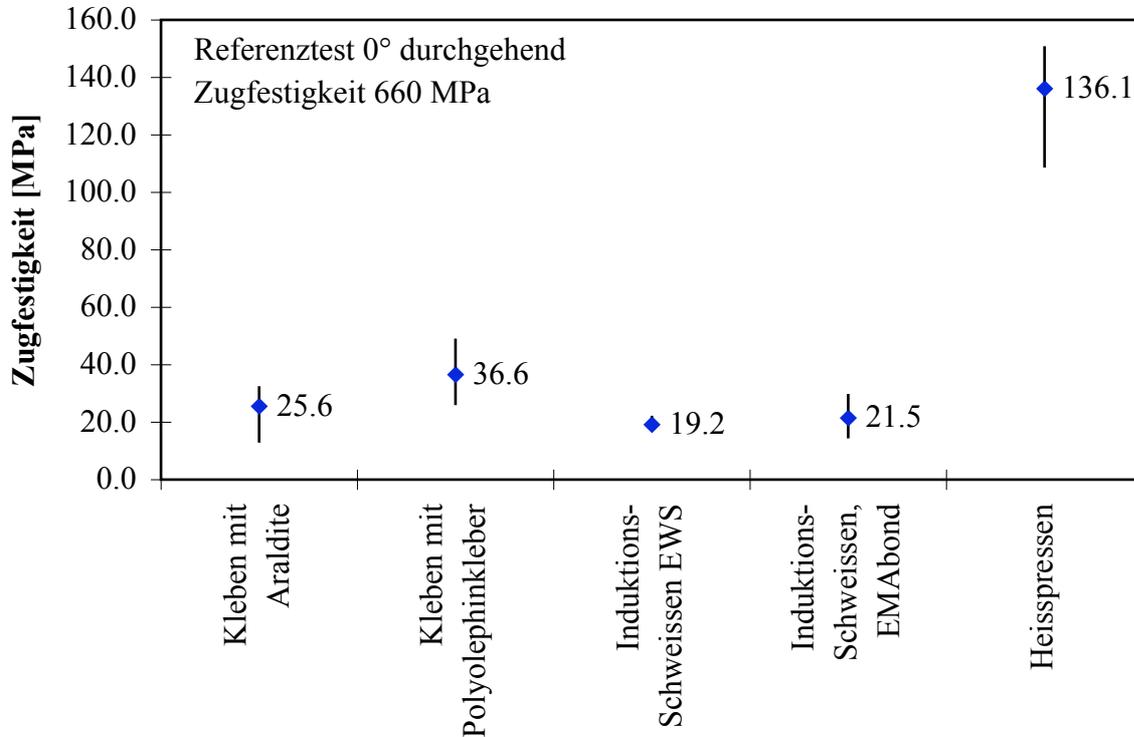
Bemerkungen

Bei dieser Probe sind die Enden dicker gestaltet um die Zugkraft gleichmässig in die Probe einzuleiten. Die Probe R wurde nicht in der Messung nicht berücksichtigt, da die Fasern dieser Probe bis ca. 5° von der Zugrichtung abwichen. Die erreichte Zugfestigkeit von 609 MPa kommt nicht an die 720 MPa heran aus dem technischen Datenblatt vom Plytron Material. Die Daten sind dort für eine 3 mm dicke Platte angegeben, die gemessenen Proben hingegen sind 1.2 mm dick. Zudem können Matrixrisse von diesen Fehlstellen im Übergang ausgegangen sein. Die höchste gemessene Zugfestigkeit wurde in der Probe LM erreicht mit 677 MPa. Die anderen Proben aus 4 Lagen Plytron Band haben eine Dicke zwischen 1.5 und 1.7 mm. der seitlicher Ausfluss von geschmolzenem Plytron während dem Pressen war sehr gering, daher ist anzunehmen, dass die Matrix in die Enden umverteilt worden ist und der Faservolumengehalt im mittleren Bereich dadurch erhöht wurde.

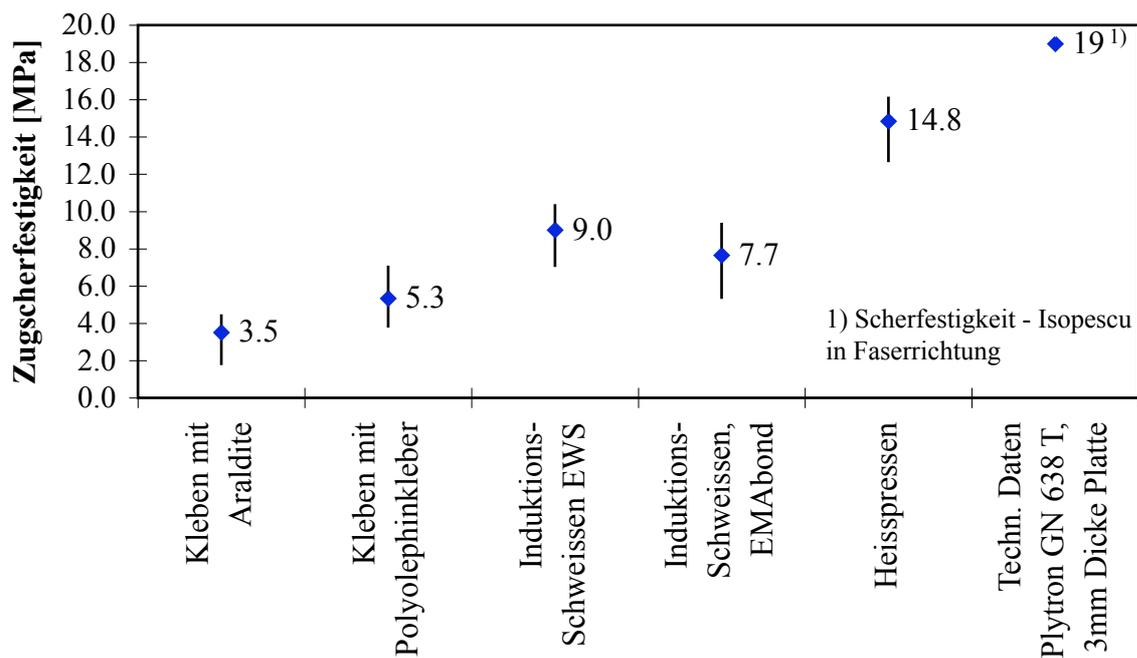
H.4 Zusammenfassung und Diagramme

Vergleich der Fügemethoden

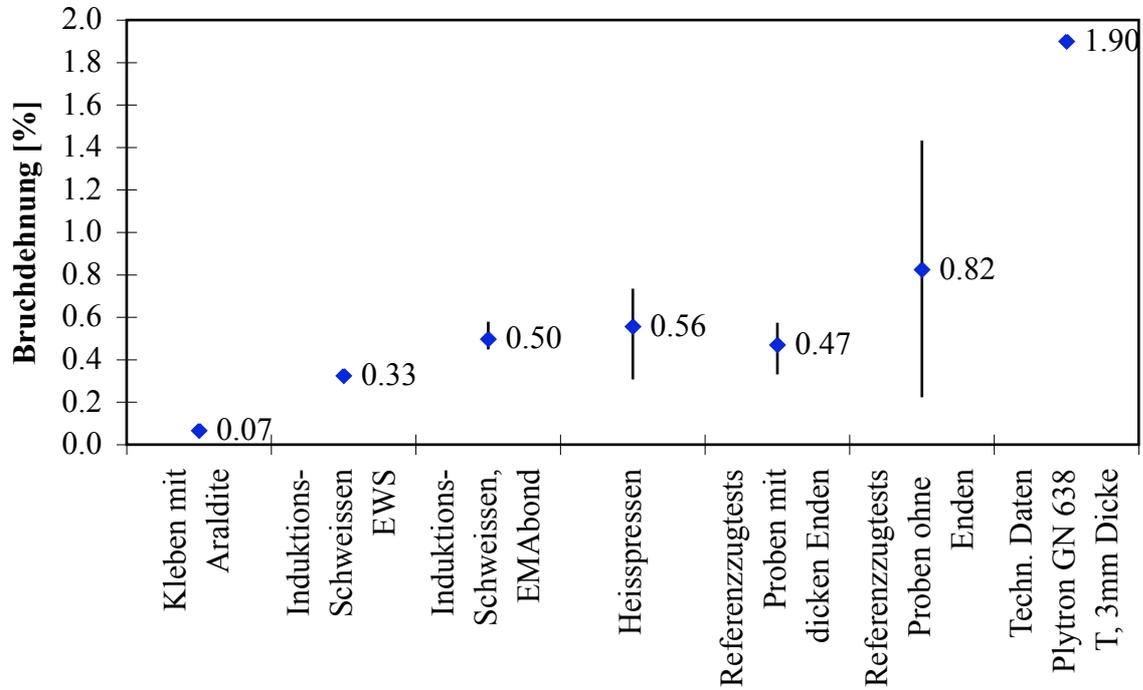
Zugfestigkeit ermittelt an einschnittig überlappenden Fügeproben aus Plytron 0°



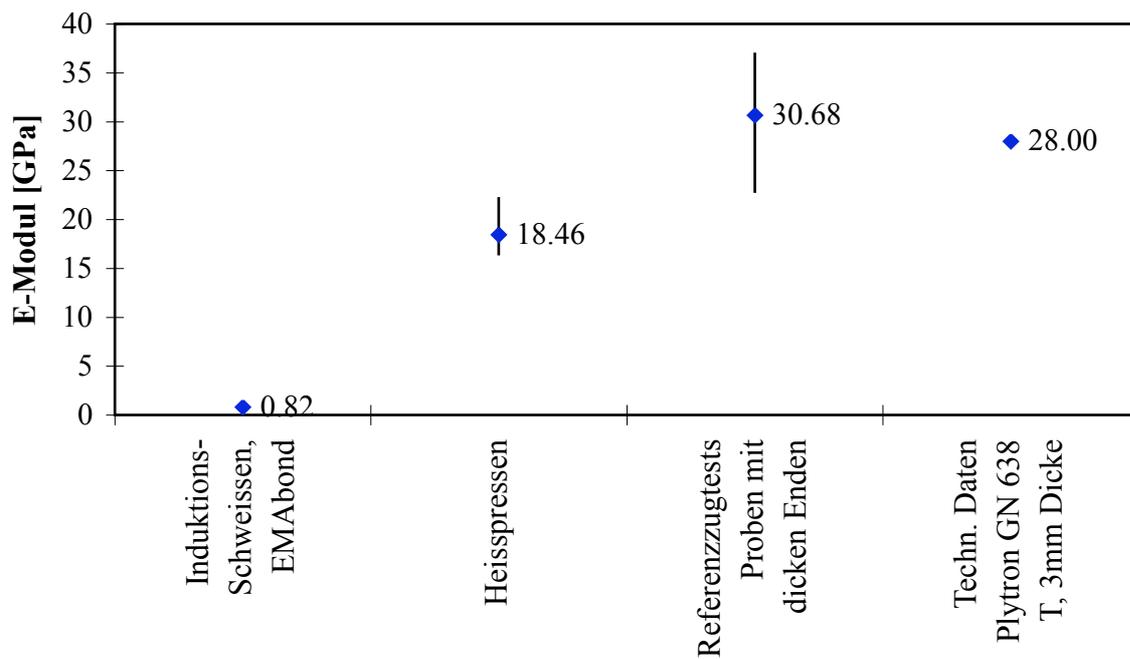
Zugscherfestigkeit ermittelt an einschnittig überlappenden Fügeproben aus Plytron 0°



Bruchdehnung ermittelt an einschnittig überlappenden Fügeproben aus Plytron 0°



E-Modul ermittelt an einschnittig überlappenden Fügeproben aus Plytron 0°

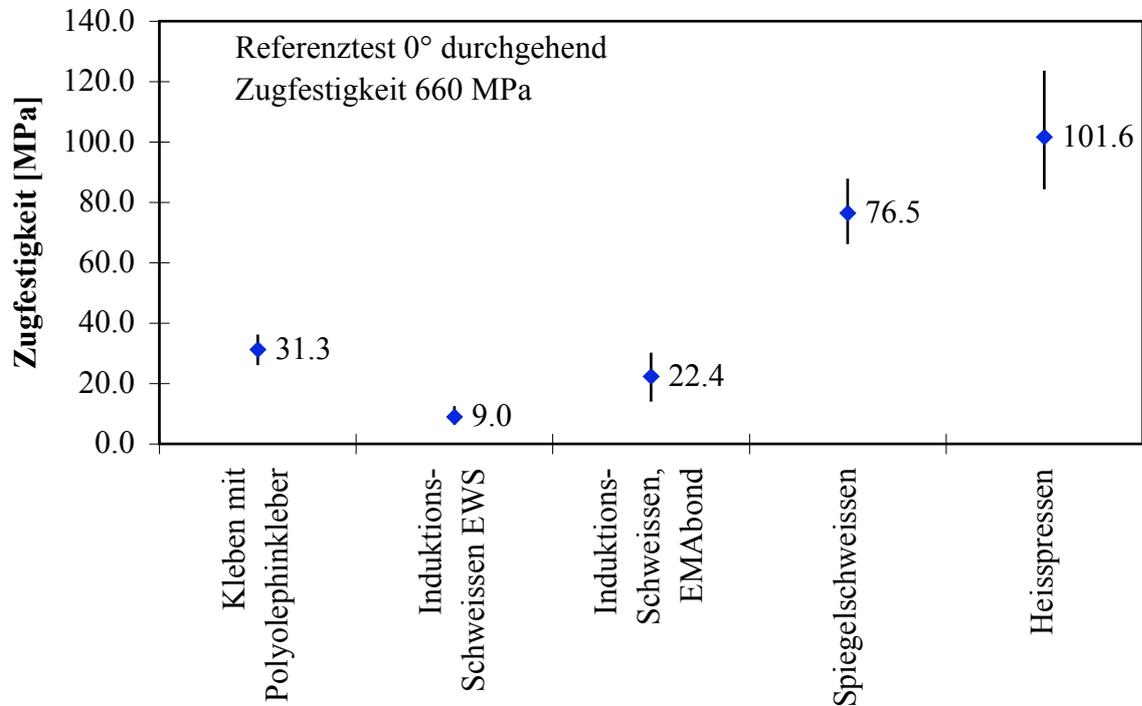


Ergebnisse der geschäfteten Proben

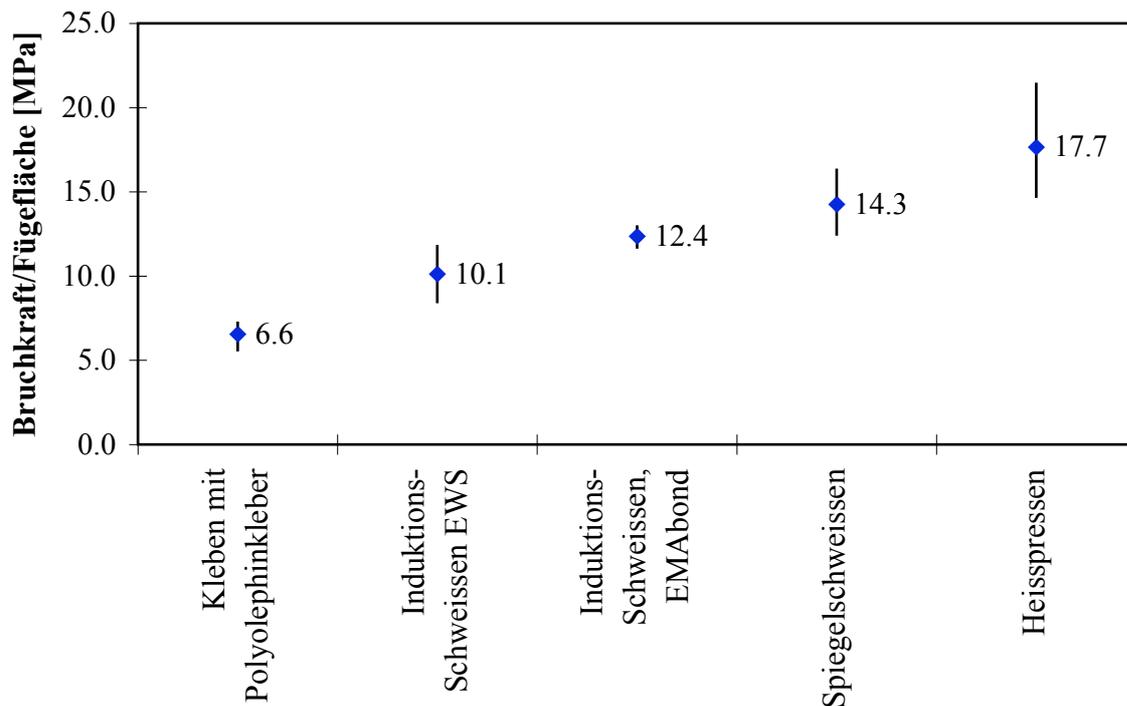
	Kleben mit DP8005 Polyolephinkleber			Induktions-Schweißen EWS, KVT Bielefeld			Induktions-Schweißen, EMAbond			Spiegelschweißen		
	Mittelwert	x/Ref [%]	Min Max	Mittelwert	x/Ref [%]	Min Max	Mittelwert	x/Ref [%]	Min Max	Mittelwert	x/Ref [%]	Min Max
Fügefläche [mm ²]	327.2	320.4	334.3	64.0	49.8	81.2	79.0	160.0	350.3	339.6	362.3	
Bruchkraft/Fügefläche	6.6	37.1	5.5 7.3	10.1	57.3	8.4 11.8	12.4	70.0	14.3	80.8	16.4	
Standardabweichung	0.6			1.4			0.4		1.5			
Zugfestigkeit [MPa]	31.3	4.7	26.1 36.2	9.0	1.4	6.3 12.5	22.4	3.4	76.5	11.6	66.2 87.9	
Standardabweichung	3.3			2.9			7.3		8.9			
ε-Bruch [%]	0.13	6.8	0.10 0.16	0.69	36.1	0.17 1.20	0.29	15.1	0.17	8.9	0.14 0.21	
E-Modul [MPa]	3777.0	13.5	3727.0 3827.0				1520.6	5.4	4163.0	14.9	3869.0 4340.0	
Standardabweichung	70.7						375.7		205.1			

	Bruchkraft/Fügefläche [MPa]			Std. Abw.
	Mittelwert	x/Ref [%]	Min Max	
Kleben mit Polyolephinkleber	31.3	4.7	26.1 36.2	3.3
Induktions-Schweißen EWS	9.0	1.4	6.3 12.5	2.9
Induktions-Schweißen, EMAbond	22.4	3.4	14.0 30.2	7.3
Spiegelschweißen	76.5	11.6	66.2 87.9	8.9
Heisspressen	101.6	15.4	84.3 123.6	16.3
Referenzzugtests Proben mit dicken Enden	609.3	92.3	540.2 676.8	56.5
Referenzzugtests Proben ohne Enden	660.2	100.0	595.7 691.9	44.3
Techn. Daten Plytron GN 638 T, 3mm Dicke Platte	720	109.06		

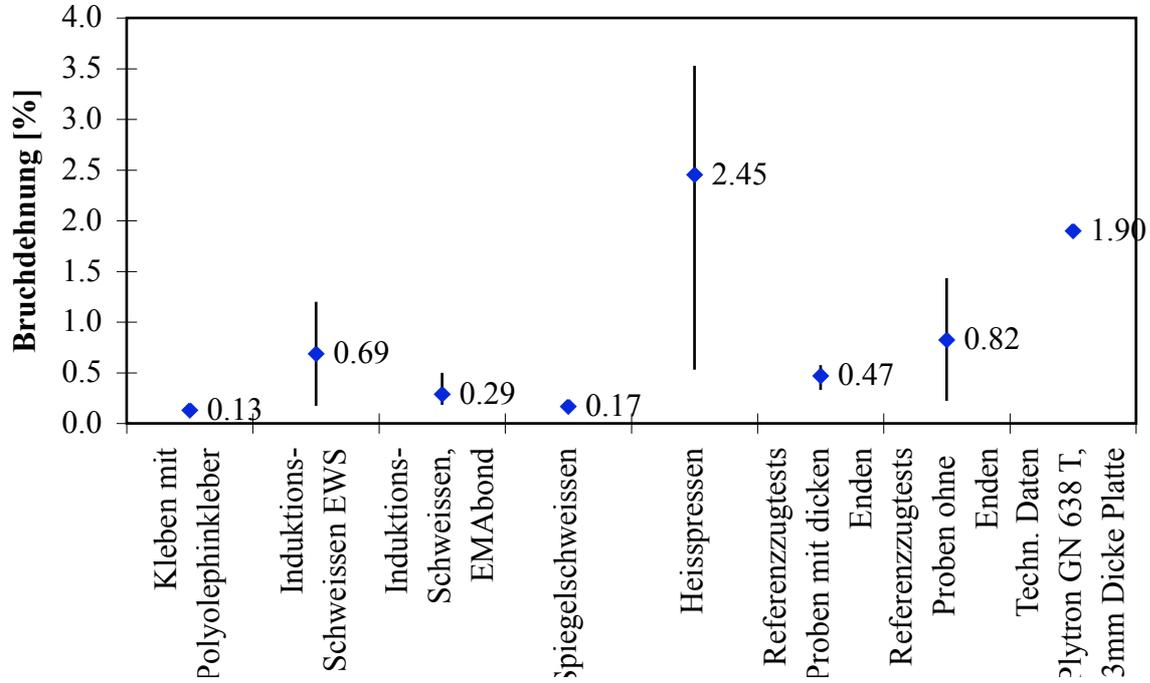
Zugfestigkeit von geschäfteten Fügeproben aus Plytron 0°



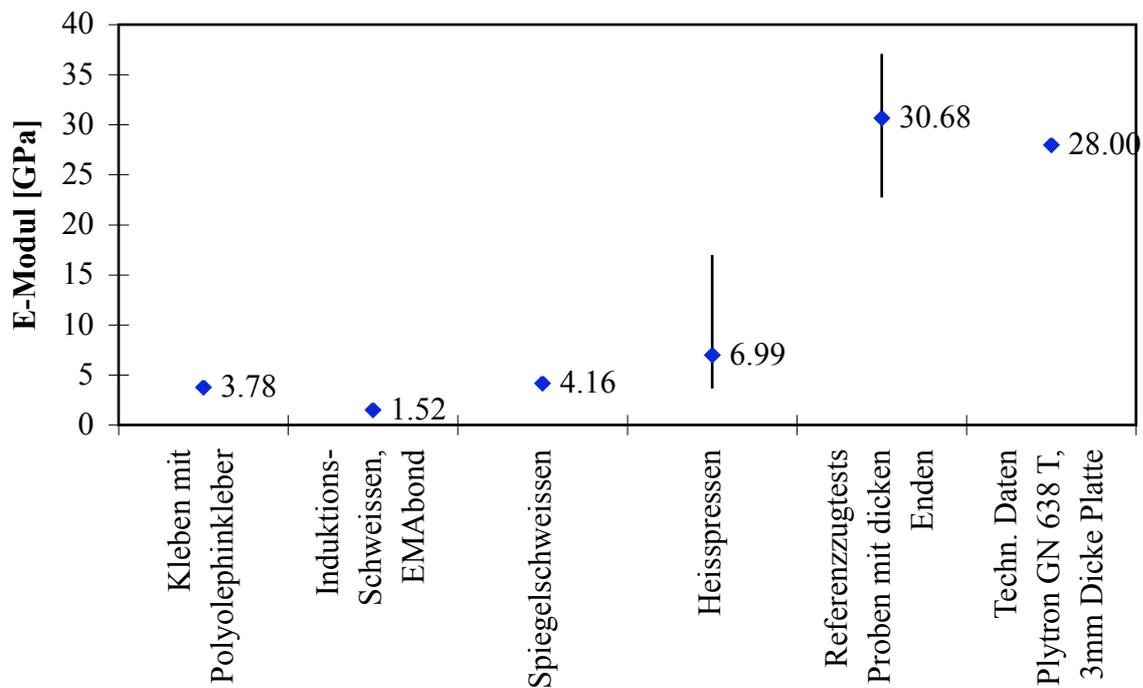
Bruchkraft/Fügefläche von geschäfteten Fügeproben aus Plytron 0°



Bruchdehnung ermittelt an geschäfteten Fügeproben aus Plytron 0°



E-Modul ermittelt an geschäfteten Fügeproben aus Plytron 0°



	Zacken l=17				Geschäftet 10°				Einschnittig überlappend l=17			
	Mittel-Wert	x/Ref [%]	Min	Max	Mittel-Wert	x/Ref [%]	Min	Max	Mittel-Wert	x/Ref [%]	Min	Max
Fügelfläche, AF [mm ²]	314.0		310.0	325.1	428.2		422.5	433.5	337.5		323.0	346.3
Zugscherfestigkeit [MPa]	25.7	135.2	20.2	29.9	17.7	92.9	14.6	21.5	13.7	72.3	11.6	15.4
Standardabweichung [MPa]	2.9				2.8				1.6			
Zugfestigkeit [MPa]	128.7	17.9	100.3	150.6	101.6	14.1	84.3	123.6	64.9	9.0	53.9	72.6
Standardabweichung [MPa]	15.2				16.3				7.4			
Querschnittsfläche, AQ [mm ²]	62.7		61.7	63.9	74.4		73.4	75.3	71.5		69.9	73.1
AF/AQ [-]	5.00				5.76				4.72			
ε-Bruch [%]	0.27	14.1	0.23	0.36	2.45	129.1	0.53	3.53	0.50	26.4	0.37	0.67
E-Modul [MPa]	25125	89.7	22612	26419	6987	25.0	3634	16981	13542	48.4	12310	15640
Standardabweichung [MPa]	979				6663				1132			

ε-Bruch [%]	Mittel-Wert	x/Ref [%]	Min	Max
Schmale Finger	0.5	27.0	0.4	0.7
Breite Finger	0.7	37.3	0.3	1.1
Gestaffelte Finger	0.6	30.9	0.2	0.9
Zacken	0.3	14.1	0.2	0.4
Geschäftet 10°	2.5	129.1	0.5	3.5
Einschnittig überlappend	0.5	26.4	0.4	0.7
Stumpf	0.1	2.7	0.0	0.1
Plytron GN 638 T, 3mm Dicke Platte	1.9	100.0		

	Überlappend 10 mm			Stumpf			Dicke Platte		
	Mittelwert	x/Ref [%]	Min Max	Mittelwert	x/Ref [%]	Min Max	Mittelwert	x/Ref [%]	Min Max
Fügetfläche, AF [mm ²]	-			58.3		57.9	58.9		
Zugscherfestigkeit [MPa]	-						19 1)	100.0	
Standardabweichung [MPa]	-								
Zugfestigkeit [MPa]	34.5	4.8	29.3 39.6	27.0	3.7	23.6 33.4	720	100.0	
Standardabweichung [MPa]	4.9			4.6					
Querschnittsfläche, AQ [mm ²]				58.3		57.9	58.9		
AF/AQ [-]				1.00					
ε-Bruch [%]	0.21	11.2	0.10 0.58	0.051	2.7	0.033 0.068	1.9	100.0	
E-Modul [MPa]	15219	54.4	11431 18097	16148	57.7	13756 19950	28000	100.0	
Standardabweichung [MPa]	2633			2678					

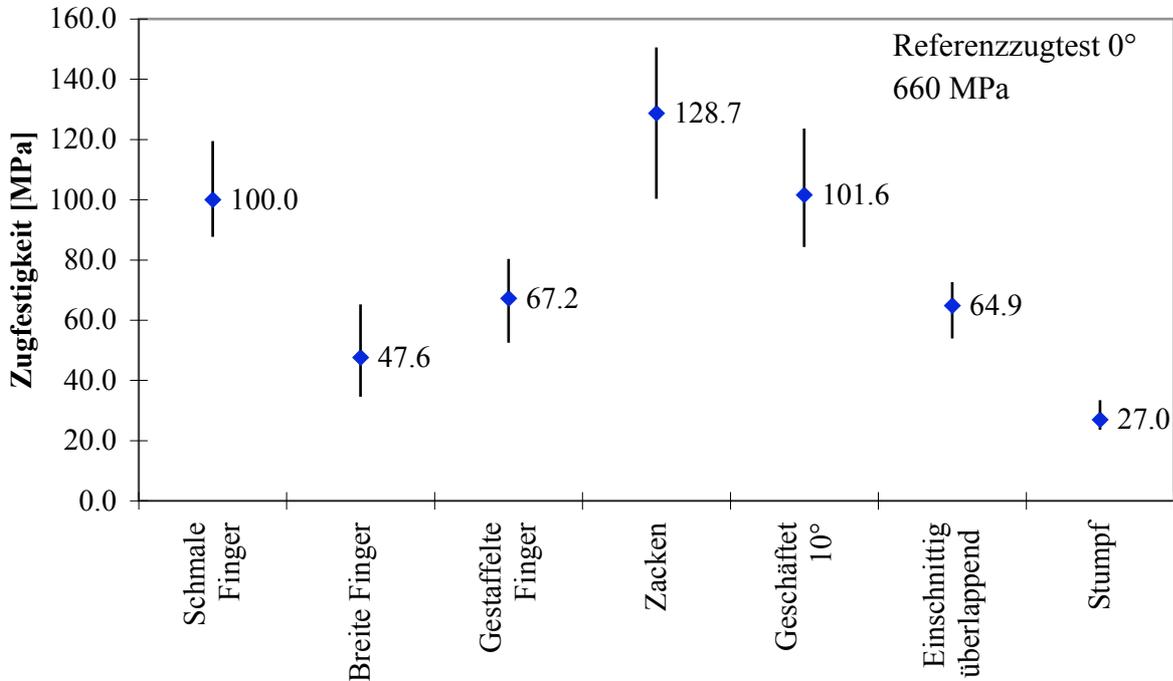
1) Scherfestigkeit - Isopescu

E-Modul [GPa]

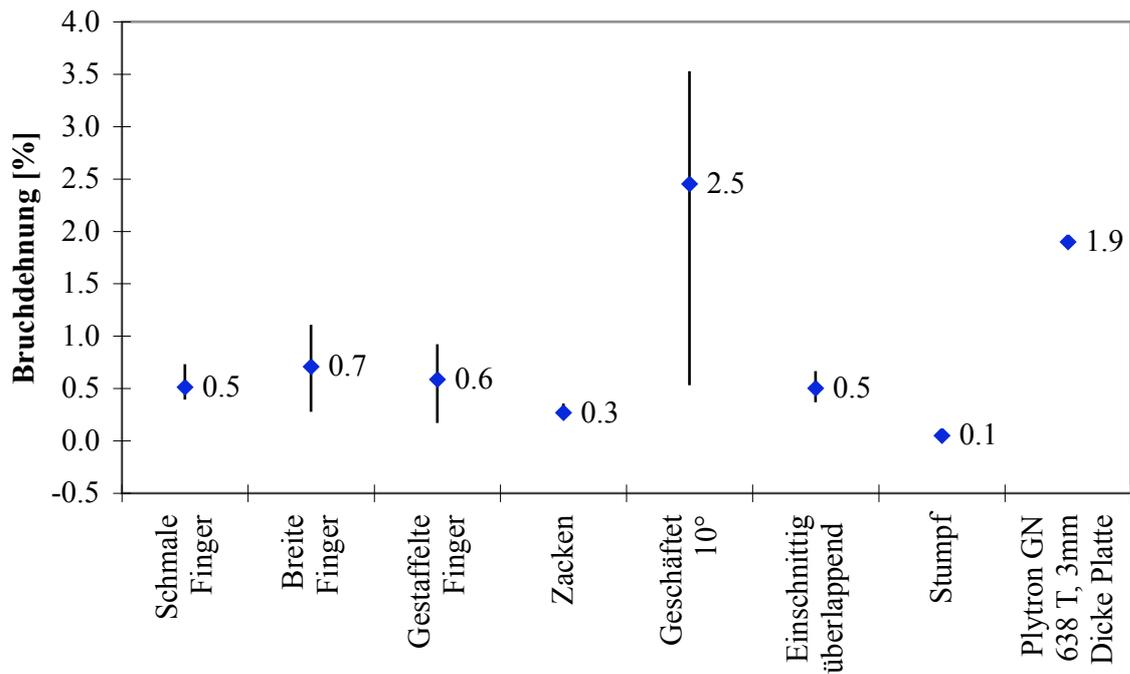
	Mittelwert	x/Ref [%]	Min	Max
Schmale Finger	18.9	67.4	16.1	20.8
Breite Finger	16.5	59.0	14.1	18.8
Gestaffelte Finger	21.6	77.3	17.2	24.5
Zacken	25.1	89.7	22.6	26.4
Geschäftet 10°	7.0	25.0	3.6	17.0
Einschnittig überlappend	13.5	48.4	12.3	15.6
Stumpf	16.1	57.7	13.8	20.0
Plytron GN 638 T, 3mm Dicke Platte	28.0	100.0		

Vergleich der Verbindungsgeometrien

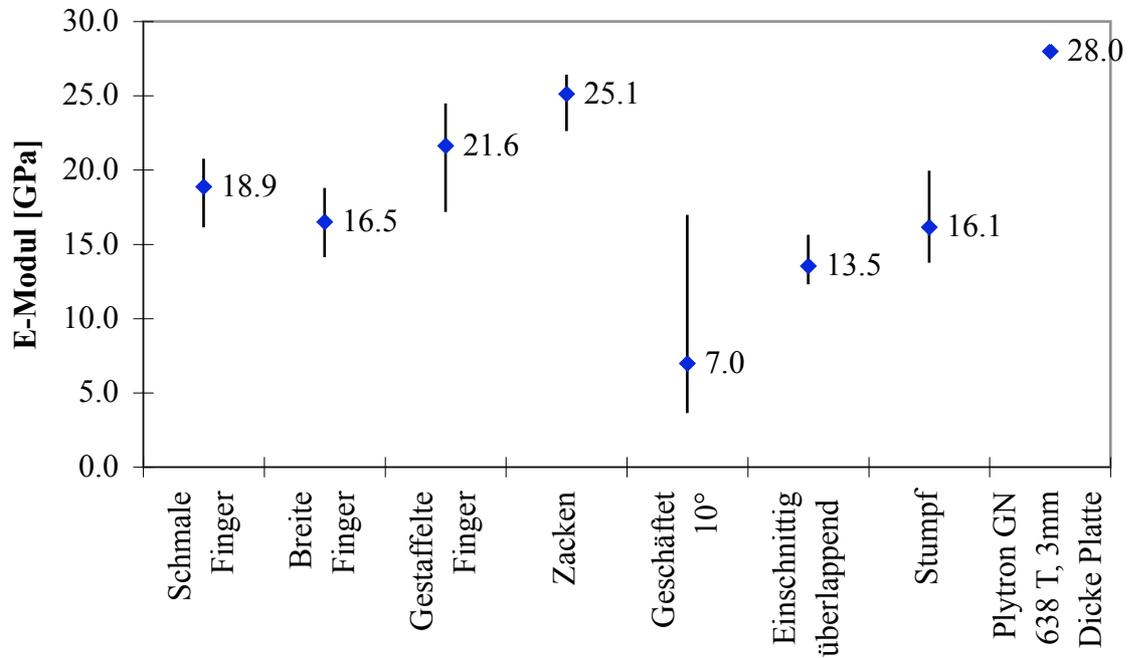
Zugfestigkeit bei unterschiedlichen Verbindungsgeometrien, ermittelt anhand von Balken aus Plytron 0°, in Faserrichtung verbunden



Bruchdehnung bei unterschiedlichen Verbindungsgeometrien, ermittelt anhand von Balken aus Plytron 0°, in Faserrichtung verbunden



**E-Modul bei unterschiedlichen Verbindungsgeometrien,
ermittelt anhand von Balken aus Plytron 0°, in
Faserrichtung verbunden**



H.5 Versuchsprotokolle weiterer Tests

- IR Test mit Plytron 0°
- Ultraschallversuche bei Branson ATG

IR Test mit Plytron 0°

25.01.2006

IR Strahler: Heraeus, kurzwellige standard Strahler mit Zwillingsrohr, Nennleistung 1200W

Platte 10.2
Dicke 1.75 mm

Strahler- Leistung	Zeit [s]	geschmolzene Breite oben		degradierte Breite oben		Bemerkungen
		[mm]	unten [mm]	[mm]	unten [mm]	
50%	30	23	13			
75%	12	22	2			
75%	15	28	14	12		Rauchentwicklung
50%	25	27	17	11		Rauchentwicklung

Platte 35.1
Dicke 3.5 mm

Strahler- Leistung	Zeit [s]	geschmolzene Breite oben		degradierte Breite oben		Bemerkungen
		[mm]	unten [mm]	[mm]	unten [mm]	
50%	50	31	9	15		Rauch nach 15 s
25%	60	32	18	-		nach der Beheizung in Schraubstock gepresst, danach sind keine degradierte Bereiche auszumachen
25%	40	17	15	-		2-seitig beheizt und im Schraubstock erstarren lassen, keine degradierte Bereiche sichtbar

Ultraschallversuche bei Branson ATG

16.12.2005

Proben der Grösse 20 x 30 mit 2 Energierichtungsgeber im Abstand von 10 mm
Schweissanlage: Branson Fügesystem Serie 2000

Nennleistung 2200 W

Schweissfrequenz 30 kHz

Platte 37.1

Dicke 3.5

nach

Schweiss- Amplitude abgeschweisste Haltezeit

Probe	Zeit [s]	[μm]	Höhe [mm]	[mm]	Leistung	Bemerkungen
MR	0.4	80	-	-	100%	Energierichter total flachgeschweisst
ML	0.3	80	0.83	0.90	90%	
R	0.2	80	0.57	0.69		
L	0.1	80	0.30	0.45	60%	