

Michael Roderus
Ultraschallunterstütztes thermisches Direktfügen von
faserverstärkten Thermoplasten mit Aluminium

Dresdner Fügetechnische Berichte
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel
Technische Universität Dresden
Professur Fügetechnik und Montage
01062 Dresden

Tel.: 0351 / 463 37615
Fax: 0351 / 463 37249

Michael Roderus

**Ultraschallunterstütztes thermisches
Direktfügen von faserverstärkten Thermoplasten
mit Aluminium**

TUD*press*

2022

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.ddb.de>>

ISBN 978-3-95908-566-3

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2022

© 2022 THELEM

Universitätsverlag & Buchhandlung GmbH und Co.KG

TUDpress ist ein Imprint von THELEM

Alle Rechte vorbehalten.

All rights reserved.

Satz und Redaktion durch den Autor

Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verleger für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Printed in Germany.

Ultraschallunterstütztes thermisches Direktfügen von
faserverstärkten Thermoplasten mit Aluminium

Der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegte Dissertation

Dipl.-Ing. Michael Roderus

geb. 23.12.1988 in Neustadt/Aisch

DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist während meiner Zeit in der zentralen Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH entstanden. Ich möchte mich bei allen Kolleginnen und Kollegen bedanken, die mich während dieser Zeit auf unterschiedlichste Weise unterstützt haben. Insbesondere bei Dominic Woitun für die ungemein konstruktiven und erhellenden Diskussionen, die halfen, manchen Rückschlag leichter zu überwinden. Bei Martin Dieterle und Ingo Kesel unter anderem für den labortechnischen Support und bei Friedhelm Günter für die Schaffung der Rahmenbedingungen, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Nicht zu vergessen sind an dieser Stelle Marc Müller, Alexander Greß und Simon Rebholz, die ich während meiner Tätigkeit betreuen durfte.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel für die Begleitung meines Vorhabens über den gesamten Zeitraum hinweg, Prof. Dr.-Ing. Eckhard Beyer für die Übernahme des zweiten Gutachtens und Dr. Elmar Kroner für die konstruktiven und kritischen Diskussionen und die fortwährende Unterstützung.

Worte können nicht ausdrücken, wie viel ich meiner Frau Magdalena Roderus zu verdanken habe und daher verneige mich vor ihrer immerwährenden Unterstützung und bedanke mich für ihre Geduld und ihr Verständnis. Ohne sie hätte ich dieses Unterfangen vermutlich nicht begonnen und ziemlich sicher nie beendet.

KURZFASSUNG

Innovative Multi-Material-Bauweisen bieten durch die Kombination der werkstoff-spezifischen Eigenschaften Kosten-, Gewichts- oder Funktionspotentiale gegenüber klassischen Bauweisen. Im Automobilbau eingesetzt, stellen diese, auch Hybridbauweisen genannten, Materialkombinationen eine Technologie dar, die einen Beitrag zur Bewältigung des Klimawandels leisten kann. Um deren Einsatz in der Breite zu ermöglichen, bedarf es Fügeverfahren, die die werkstoffspezifischen Anforderungen erfüllen. Im Rahmen dieser Dissertation wird das ultraschallunterstützte thermische Direktfügen für Metall-Kunststoff-Verbindungen betrachtet, das das Fügen von faserverstärkten Thermoplasten und Metallen ohne zusätzliche Fügeelemente oder Klebstoff ermöglicht. Dabei können sehr kurze Fügedauern mit äußerst lokal begrenztem Energieeintrag für eine eigenspannungsarme Verbindung realisiert werden, wodurch sich das Verfahren auch in temperaturempfindlichen Bereichen einsetzen lässt.

Um das Fügeverfahren und die daraus resultierende Verbindung zu verstehen, ist ein ganzheitlicher Ansatz von Nöten. Die erzielbaren Verbindungseigenschaften hängen von der Grenzflächengestaltung ab. Die Laservorbehandlung bietet ein breites Spektrum an möglichen Oberflächenstrukturen und somit ein flexibles Werkzeug zur Untersuchung von Oberflächencharakteristiken. Im Rahmen der Arbeit wurde der Einfluss der Oberflächenvergrößerung durch makroskopische Strukturen auf die Verbindungsfestigkeit untersucht. Dabei zeigt sich eine orientierungsunabhängige Zunahme der Zugfestigkeit bei steigender Oberflächenvergrößerung.

Vergleichbare Ergebnisse können jedoch nur erzielt werden, wenn die Mechanismen der Verbindungsbildung vollständig erfasst sind und durch geeignete Prozessführung umgesetzt werden. Mittels statistischer Versuchsplanung wurden Haupteinflüsse auf die Verbindungsbildung identifiziert und anschließend im Detail untersucht. Die zentrale Größe bildet hier der kombinierte Energieeintrag aus induktiver Vorwärmung und Ultraschall, aus dem sich eine kritische Fügeenergie ableiten lässt, die nicht

überschritten werden sollte. Die Zielgrößen bildeten hierbei die qualitativ hochwertige und gleichmäßige Fügeverbindung, sowie die Zugscherfestigkeit. Zusätzlich zu den Prozessgrößen wurde der Einfluss der Metalloberfläche auf den Prozessablauf untersucht. Durch die Analyse der Prozessdaten konnte zudem ein Abbruchkriterium festgelegt werden, das eine Prozessführung abhängig vom Fügefortschritt ermöglicht. Mit den gewonnenen Erkenntnissen lässt sich mit wenigen Versuchen ein Prozessfenster für neue Materialkombinationen und Oberflächenbeschaffenheiten identifizieren, das prozessoptimale Fügeverbindungen ermöglicht.

Für die Entwicklung und Auslegung von Hybridbauweisen ist eine durchgängige Simulationskette zwingend erforderlich. Um dies zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Ersatzmodell für die ultraschallunterstützt thermisch direktgefügte Verbindung entwickelt und auf die Zugscherprobe übertragen. Hierbei zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten für Metalloberflächen ohne makroskopische Struktur. Der Einfluss der Makrostruktur konnte mit dem gewählten Ansatz nicht vollständig abgebildet werden.

INHALTSVERZEICHNIS

Selbstständigkeitserklärung	ii
Danksagung	iii
Kurzfassung	iv
Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Multi-Material-Design	3
2.2 Werkstoffe für Multi-Material-Bauweisen	4
2.2.1 Metalle	4
2.2.2 Faserverbundkunststoffe	5
2.3 Fügetechnik für Metall-Kunststoff-Verbindungen	7
2.3.1 Konzeptionelle Betrachtung	7
2.3.2 Direktfügen Metall/Kunststoff	9
2.3.3 Ultraschallfügen	15
2.3.4 Grenzfläche Metall/Kunststoff	18
2.4 Numerische Methoden zur Beschreibung von Fügeverbindungen	24
2.4.1 Numerische Festigkeitsberechnung adhäsionsbasierter Verbindungen	25
2.4.2 Das Kohäsivzonenmodell	26
3 Motivation und Zielsetzung	30
4 Experimentelle Vorgehensweise	32
4.1 Verwendete Werkstoffe	32
4.2 Probekörper und Geometrien	33
4.3 Vorbehandlung der Fügepartner	35

4.3.1	Laservorbehandlung Aluminium	35
4.3.2	Vorbehandlung Organoblech	45
4.4	Ultraschallunterstütztes Direktfügen	45
4.4.1	Prozessablauf	45
4.4.2	Anlagentechnik	47
4.5	Mechanische Prüfverfahren	48
5	Prozessanalyse ultraschallunterstütztes thermisches Direktfügen	51
5.1	Analyse der Einflüsse auf den Fügeprozess	51
5.1.1	Einfluss der Randbedingungen	51
5.1.2	Einfluss der Prozessgrößen	52
5.1.3	Einfluss der Oberflächenstruktur	54
5.2	Analysemethodik	55
5.2.1	Verbindungsbildung	56
5.2.2	Verbindungseigenschaften	63
5.3	Diskussion der Prozessanalyse	68
5.3.1	Kritische Fügeenergie	68
5.3.2	Prozessfenster	71
6	Verbindungseigenschaften	74
6.1	Wechselwirkung Oberfläche-Verbindungseigenschaften	74
6.2	Diskussion	77
7	Numerische Simulation der Fügestelle	80
7.1	Methodik	80
7.2	Modellaufbau	81
7.3	Modellkalibrierung	84
7.4	Validierung der numerischen Simulation	87
7.5	Implementierung von Makrostrukturen	89
7.6	Diskussion der Simulationsergebnisse	91
8	Zusammenfassung und Ausblick	94
	Literaturverzeichnis	98
	Abkürzungsverzeichnis	110
	Symbolverzeichnis	111
A	Anhang	113

1. EINLEITUNG

Der globale, vom Menschen verursachte Klimawandel stellt eine zentrale Herausforderung unserer Zeit dar und beherrscht zunehmend gesellschaftliche Debatten. Durch diverse Maßnahmenpakete versucht die Politik auf den unterschiedlichsten Ebenen auf die Entwicklung zu reagieren und nimmt dadurch mitunter Einfluss auf technologische Entwicklungen [1]. Insbesondere der Verkehrssektor steht, als einer der Hauptverursacher, unter Druck, den Ausstoß schädlicher Emissionen zu reduzieren. Fahrverbote in Städten und geplante Zulassungsverbote für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren in verschiedenen Ländern Europas sind neben der Begrenzung von Emissionen konkrete Maßnahmen, die Fahrzeughersteller und Kunden gleichermaßen betreffen [2, 3]. Automobilhersteller sind dadurch gezwungen, den flottenweiten Ausstoß an CO_2 zu reduzieren. Dies geschieht unter anderem mit einer zunehmenden Elektrifizierung, wobei das Gewicht der Fahrzeuge durch Zusatzkomponenten (Hybridfahrzeuge) und den gesamten elektrischen Antriebsstrang (Elektrofahrzeuge) ansteigt [4, 5]. Dieses Mehrgewicht steht den angestrebten Zielen durch die Erhöhung des Energieverbrauchs im Fahrbetrieb entgegen.

Sowohl für die flächendeckende Einführung von Elektrofahrzeugen, als auch für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren stellt der Leichtbau somit eine Schlüsseldisziplin dar. Durch die Verringerung des Gewichts lässt sich auf Grund des dadurch geringeren Kraftstoffverbrauchs direkt der Ausstoß von Schadstoffen reduzieren. Bei Elektrofahrzeugen steigt unmittelbar die Reichweite bei gleicher Akkuleistung. Neben diesen Primäreffekten ermöglicht ein konsequenter Fahrzeugleichtbau die Nutzung von Sekundäreffekten [6]. Durch Masseinsparungen am Fahrzeug lassen sich weitere Komponenten in ihrem Gewicht reduzieren und somit die Effizienz weiter steigern. Ein leichteres Fahrzeug benötigt beispielsweise für die gleichen Fahrleistungen eine geringere Motorisierung wie ein vergleichbares, schwereres Fahrzeug. Durch die Gewichtseinsparungen am Motor können Fahrwerks- oder Bremskomponenten leichter ausgeführt werden [7].

Der Leichtbau darf jedoch kein Selbstzweck sein sondern muss wirtschaftlichen Betrachtungen standhalten. In Zeiten der Transformation der Automobilindustrie sind wirtschaftliche Fahrzeugkonzepte und Bauweisen ein zusätzlicher Anreiz, innovative Strukturen und Komponenten zu entwickeln. Hier stellt der funktionsintegrative Leichtbau in Multi-Material-Design (MMD) einen vielversprechenden Ansatz dar. Durch die Kombination verschiedener Materialien und der Ausnutzung ihrer werkstoffspezifischen Vorteile lässt sich der Materialeinsatz insgesamt reduzieren. Gleichzeitig lassen sich durch die unterschiedlichen Eigenschaftsprofile Funktionen in das Bauteil integrieren. Besonderes Potential zeigt MMD unter Verwendung von (faserverstärkten) Kunststoffen und Metallen. Hier lassen sich beispielsweise die großen Unterschiede bei Dichte, mechanischen Eigenschaften oder elektrischer Leitfähigkeit gezielt nutzen um einen Mehrwert zu erzielen.

Zentral für diese Bauweisen ist die Fügetechnik, die derartige Hybridkomponenten erst ermöglicht. Erst wenn die Fügestelle keine Schwachstelle, sondern vielmehr eine Art „Enabler“ darstellt, kann MMD sein volles Potential ausschöpfen. Eine konstante Kraftübertragung über die Lebensdauer ist hier die Grundvoraussetzung. Für eine Anwendung der Verbindung ist zudem die virtuelle Auslegung für die Produktentwicklung notwendig. Darüber hinaus muss der Prozess in bestehende Fertigungsketten integrierbar und wirtschaftlich darstellbar sein. Es existieren verschiedene Ansätze zur Verbindung entsprechender Metall-Kunststoff-Komponenten, die jedoch Einschränkungen mit sich bringen.

Hier setzt das Ultraschall (US)-unterstützte thermische Direktfügen für faserverstärkte Thermoplaste mit Aluminium an. Um einen robusten Fügeablauf mit kurzen Prozesszeiten darstellen zu können, wird auf einen kombinierten Energieeintrag zurück gegriffen. Sowohl die Induktionserwärmung als auch das Ultraschallschweißen sind in der Fertigungs- und Fügetechnik weit verbreitete Technologien und stellen somit kein Integrationshindernis dar. Um den Fügeprozess zur Anwendung zu bringen, ist es jedoch notwendig, die Verbindungsbildung und den Einfluss der beiden Energiequellen auf selbigen zu verstehen. Neben dem Prozess werden die Verbindungseigenschaften von direktgefügt Metall-Kunststoff-Verbindungen (MKV) durch die Grenzfläche zwischen Metall und Kunststoff definiert, weshalb es eines vertieften Verständnisses der einzelnen Einflussfaktoren bedarf. Dies ist zudem notwendig, um eine Berechnung der Verbindung durch geeignete numerische Simulation zu ermöglichen. Die Entwicklung einer geeigneten Fügetechnik für Metall-Kunststoff-Hybridbauweisen macht folglich eine ganzheitliche Betrachtung von Fügestelle und Fügeprozess notwendig.

2. STAND DER TECHNIK

2.1 Multi-Material-Design

Systemleichtbau mit Multi-Material-Bauweisen (auch: Hybridbauweisen) stellt einen energieeffizienten, wirtschaftlichen Zweig des Leichtbaus dar. Unter MMD werden Bauweisen verstanden, in welchen artungleiche Materialien (z.B. Metall- und Kunststoffkomponenten) vereint sind [8]. Die verschiedenen Materialien übernehmen in der Regel unterschiedliche Aufgaben, wie Krafteinleitung, Energieaufnahme oder plastisches Verhalten [8, 9]. Es gilt daher der Grundsatz, den "*richtigen Werkstoff an der richtigen Stelle*" einzusetzen [10, 11]. Die konsequente Umsetzung von Multi-Material-Bauweisen ermöglicht unter Berücksichtigung der materialspezifischen Eigenschaftsprofile die Nutzung von Synergieeffekten im Bauteil [9, 12]. Auf diese Weise lassen sich gezielt vorteilhafte Eigenschaften einzelner Werkstoffe ausnutzen [8].

In den Arbeiten von Ehrenstein et al. wurden anhand des sog. „Erlanger Trägers“ verschiedene Materialkombinationen untersucht. Dabei wurde insbesondere der Einfluss von verschiedenen Kunststoffverrippungen auf die Biege- und Torsionsfestigkeit, sowie das Versagenverhalten der Träger gezeigt [13]. Als entscheidend für eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Energieaufnahme der Hybridprofile zeigte sich neben der belastungsangepassten Gestaltung und Stoffauswahl die Anbindung zwischen Metall- und Kunststoffkomponente [13].

Das Potential einer konsequenten Umsetzung des Hybridstruktur-Ansatzes konnten Modler et al. zeigen [14]. Mit einer Kombination aus hochfestem Stahl, endlos-glasfaserverstärktem Organoblech und lang-glasfaserverstärkter Pressmasse konnte in einem Fertigungsschritt eine Hybridkonstruktion gefertigt werden, welche eine Gewichtersparnis von 10 % gegenüber der Vergleichsstruktur in konventioneller Blechbauweise ermöglicht [14]. Die flächige Organoblechverstärkung und die Rippenstruktur sorgen für eine Querschnittsstabilisierung des Bleches unter Biegebelastung und eine erhöhte Energieaufnahme [15]. Bei dieser sog. 3D-Hybrid B-Säule wird

auf die Stahlschale eine Haftvermittlerschicht aufgetragen, die eine stoffschlüssige Verbindung zur Kunststoffkomponente sicherstellt. Der Aufbau der B-Säule inklusive Einzelkomponenten ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

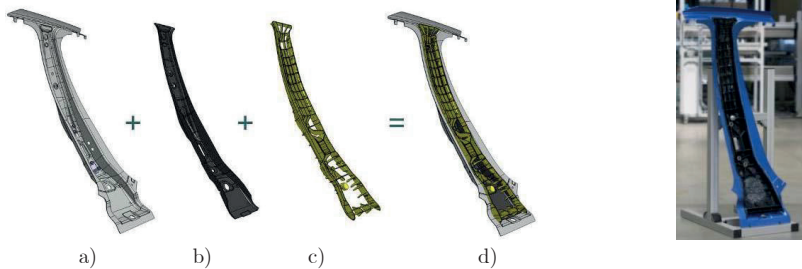


Abbildung 2.1: 3D-Hybrid-B-Säule als Beispiel für die konsequente Umsetzung des Leichtbaus in MMD, bestehend aus den Einzelkomponenten Stahlschale a), Organoblechverstärkung b) und LFT-Rippen c). Gesamtmodell d) und aufgebautes Muster (rechts) [16].

In weiterführenden Arbeiten wurden neben weiteren Haftvermittlern auch metallseitig Laservorbereitungsverfahren zur Kraftübertragung untersucht. Die entwickelte Hybrid-A-Säule weist bei einer Gewichtseinsparung von 2,7 kg je Paar eine um 25 % verbesserte Performance im Vergleich zur Referenzstruktur in Stahl-Schalenbauweise auf und zeigt, welches Potential die Metall-Kunststoff-Hybridbauweise birgt [16, 17].

2.2 Werkstoffe für Multi-Material-Bauweisen

Hybridbauweisen schöpfen ihr Potential dann aus, wenn sämtliche Einzelkomponenten entsprechend ihrer Stärken eingesetzt werden [14]. Es ist daher von großer Bedeutung, die jeweiligen werkstoffspezifischen Eigenschaften genau zu kennen und entsprechend zu nutzen.

2.2.1 Metalle

Metalle stellen in vielen Hybridbauteilen eine Schlüsselkomponente dar. Insbesondere zur Krafteinleitung und bei komplexen Beanspruchungs- und Spannungszuständen eignen sich metallische Werkstoffe in besonderem Maße. Zudem zeichnen sich Metalle durch ihre plastische Arbeitsaufnahme, beispielsweise im Crashfall aus [9].

Im Speziellen die Kombination von metallischen Komponenten mit faserverstärkten Kunststoffbauteilen bietet bei werkstoffgerechtem Bauteildesign und der Wahl geeigneter Fügeverfahren großes Potential [8].

Stahl erscheint auf Grund seiner hohen Dichte von $\rho = 7,85 \frac{g}{cm^3}$ auf den ersten Blick nicht wie ein Leichtbauwerkstoff. Durch konsequente Werkstoffentwicklung in den vergangenen Jahren konnten immer weitere Eigenschaftsmodifikationen realisiert werden, die den Einsatz von Stählen auch in Leichtbaukonstruktionen interessant machen. Neben dem relativ niedrigen Preis spielen hierbei auch die guten mechanischen Eigenschaften, sowie die große Vielzahl verschiedener Eigenschaftsprofile eine Rolle [11].

Einer der am häufigsten im Leichtbau eingesetzte Werkstoff ist Aluminium [7, 11]. Das liegt einerseits an guten mechanischen Eigenschaften bei einer gleichzeitig geringen Dichte von $\rho = 2,7 \frac{g}{cm^3}$. Insbesondere das breite Festigkeitsspektrum der verfügbaren Legierungen im Bereich von $80 - 800 MPa$ und eine gute Verarbeitbarkeit ermöglichen vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Andererseits gewinnt Aluminium auf Grund seiner guten thermischen und elektrischen Leitfähigkeit bei der Substitution von Kupfer an Bedeutung [18].

Leiterwerkstoffe spielen infolge der zunehmenden Elektrifizierung von Antrieben und Fahrzeugen eine zunehmend größere Rolle im Fahrzeugbau [7]. Durch Funktionsintegration lassen sich in diesem Bereich mit MMD Einzelteile und Fertigungsschritte einsparen, die zu einer Kostenreduzierung führen.

Werkstoffe wie Magnesium und Titan haben auf Grund hoher Materialkosten und aufwendiger Verarbeitung bislang nur in Nischenanwendungen ihren Platz gefunden, obwohl ihre Eigenschaftsprofile großes Potential versprechen.

2.2.2 Faserverbundkunststoffe

Als Faserverbundkunststoffe (FVK) werden Kunststoffe bezeichnet, die einen Anteil an Faserverstärkung aufweisen. Die Kunststoffmatrix übernimmt im Verbund die Rolle der Krafterleitung und -übertragung an die Fasern, sowie die Aufnahme von Druckbelastungen [12]. Zudem schützt die Matrix die Verstärkungsfasern vor mechanischen, thermischen und chemischen Umwelteinflüssen [19, 20]. Die Fasern sorgen im Wesentlichen für die Erhöhung von Steifigkeit und Festigkeit [19]. Durch die Fasern werden zudem elektrische und thermische Leitfähigkeit und -ausdehnung stark beeinflusst [12]. Der Grad der Eigenschaftsveränderung durch die Einbringung von Fasern in den Kunststoff hängt stark von Art und Länge der Fasern ab [8].

Unterschieden werden

- Kurzfaserverstärkung ($\approx 0,2$ mm Faserlänge),
- Langfaserverstärkung (bis 25 mm Faserlänge) und
- Endlosfaserverstärkung (ununterbrochene Faserverstärkung über das Bauteil)[19].

Mit steigender Faserlänge steigt auch die Anisotropie der Eigenschaften des Verbundes. Mit entsprechenden Mitteln lassen sich diese anisotropen Werkstoffeigenschaften gezielt nutzen und gleichzeitig der Werkstoffeinsatz im Bauteil minimieren [8]. Häufig eingesetzt werden gewebeverstärkte Kunststoffe. Gewebe weisen zwei, in der Regel rechtwinklig zueinander stehende, Vorzugsrichtungen auf und sorgen im FVK für ein orthotropes Materialverhalten. Kett- und Schussrichtung unterscheiden sich auf Grund der unterschiedlichen Ondulation, können jedoch gezielt beeinflusst und somit gering gehalten werden [20]. Gewebe zeichnen sich, je nach Bindungsart durch eine gute Drapierfähigkeit und Handhabbarkeit, sowie günstige Produktionskosten aus. Als Verstärkungsmaterialien kommen neben Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern auch weitere Kunst- sowie Naturfasern zum Einsatz [21]. Bei der Wahl einer geeigneten Faserverstärkung spielen neben den mechanischen Anforderungen, wie beispielsweise Festigkeit, E-Modul und Energieaufnahmevermögen, die Kosten eine wichtige Rolle, da sich diese stark unterscheiden. Den Großteil der Verstärkungsfasern machen mit mehr als 90% Glasfasern aus. Sie zeichnen sich durch gute mechanische Eigenschaften und einen geringen Preis bei einer Dichte von $\sim 2,5 \frac{g}{cm^3}$ aus [20].

FVK lassen sich zudem nach der Wahl des Matrixmaterials unterscheiden. Eingesetzt werden duroplastische, thermoplastische und in Spezialanwendungen elastomere Kunststoffe. Im Bereich der FVK sind duroplastische Matrixsysteme mit einem Anteil von 61% dominierend, thermoplastische FVK verzeichnen jedoch große Zuwächse [19, 22, 23]. Duroplaste weisen i.d.R. gute Festigkeiten und Steifigkeiten auf und sind thermisch und chemisch äußerst beständig [12]. Ein zentraler Nachteil liegt jedoch im Wesen der Kunststoffklasse begründet. Nach dem Aushärten ist ein erneutes Plastifizieren nicht möglich und verhindert somit jegliche Umformung des Duroplastbauteils. Thermoplaste bestehen aus nicht räumlich vernetzten Makromolekülen und neigen dadurch zum Kriechen, insbesondere bei erhöhten Temperaturen [12]. Bei der Wahl des Werkstoffes sind neben den bauteilspezifischen Anforderungen auch die Fertigungs- und Fügeprozesse zu berücksichtigen. Thermoplaste lassen sich beliebig oft aufschmelzen und umformen, die Schmelzbarkeit erleichtert zudem das

sortenreine Trennen von Bauteilverbunden und ermöglicht die Rezyklierbarkeit des Grundwerkstoffes [24].

Als Organoblech werden thermoplastische FVK-Halbzeuge in Plattenform bezeichnet. Organobleche ermöglichen bis zur Formgebung die Verarbeitung mit konventioneller Anlagentechnik [8]. Dem Formgebungsprozess, in der Regel Press- oder kombinierte Spritzpressprozesse, geht die Erwärmung der Halbzeuge voraus. Einige auf dem Markt erhältliche Organoblechvarianten mit verschiedenen Faser-Matrix-Kombinationen können Tabelle 2.1 entnommen werden.

Tabelle 2.1: Eigenschaften einiger ausgewählter Organobleche mit verschiedenen Faser-Matrix-Kombinationen [25–27]

Matrix- werkstoff	Faser- verstärkung	Dichte [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$]	E-Modul 0°/90° [MPa]	Zugfestigkeit 0°/90° [MPa]
Polyamid 6	Glasfasergewebe	1,8	22,4/21,5	404/390
Polypropoylen	Glasfasergewebe	1,7	20,5/20,5	400/400
Polyamid 6.6	Kohlenstofffaser- gewebe	1,4	53,0/51,0	785/725

2.3 Fügetechnik für Metall-Kunststoff-Verbindungen

Die Fügetechnik stellt für Multi-Material-Bauweisen eine Schlüsselfunktion dar [28]. Die Wahl geeigneter Fügetechniken definiert maßgeblich die Bauteileigenschaften, da sie die Kraftübertragung zwischen den Einzelkomponenten gewährleistet [9]. Artungleiche Materialverbindungen, speziell MKV schränken die Auswahl geeigneter Fügetechniken jedoch teils erheblich ein.

2.3.1 Konzeptionelle Betrachtung

Nach DIN 8593-0 ist Fügen als "*das auf Dauer angelegte Verbinden [...] von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff*" definiert [29]. Für MKV kommen grundsätzlich eine ganze Reihe verschiedener Fügeverfahren in Frage. Unterteilen lassen sie sich nach den Schlussarten, die ihnen zugrunde liegen. In [29] wird nach

- Stoffschluss (z.B. Kleben, Schweißen),

- Formschluss (z.B. Umformen) und
- Kraftschluss (z.B. An- und Einpressen) unterschieden.

Insbesondere für Hybridbauweisen unter Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen müssen bei der Wahl der Füge­technik einige Prinzipien beachtet werden [30]. FVK weisen auf Grund der Faserstruktur ein anisotropes Werkstoffverhalten auf und sind nur in Faserrichtung voll belastbar. Jede Schwächung und Unterbrechung der Faserstruktur (z.B. Bohrung für Schraubenverbindung) sorgt neben der geometrischen Kerbe für eine zusätzliche Schwächung der Struktur. Eine flächige Kraftübertragung ist somit punktförmigen Füge­verbindungen vorzuziehen, Störungen der Faserverstärkung sind aus mechanischen Gesichtspunkten zu vermeiden [23]. Unter Annahme dieser Voraussetzungen stellt, insbesondere für dünnwandige Bauteile, die Klebtechnik eine geeignete Füge­technik für MKV dar [12, 23]. Sie zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen aus:

- Flächige Kraftübertragung ohne Vorlochoperation o.ä.
- Niedrige Temperaturbelastung durch den Klebprozess
- Artungleiche Materialkombinationen ffügbar
- Sehr dünne Bauteile ffügbar
- Abdichtende, isolierende und toleranzausgleichende Funktion realisierbar [31]

Dem gegenüber stehen jedoch einige Nachteile:

- Geringe Temperaturbeständigkeit
- Teilw. geringe Alterungsbeständigkeit, insb. unter Medieneinfluss
- Komplexe und zeitaufwendige Prozesskette
- Eingeschränkte Recyclingfähigkeit, insb. bei Reaktionsklebstoffen [31]

Werden FVK mit thermoplastischer Matrix eingesetzt, stellt das Direktfügen eine Alternative zur Klebeverbindung dar. Die stark unterschiedlichen Schmelztemperaturen schließen konventionelle Schweißprozesse aus [32]. Direktgefügte Verbindungen können dabei auf zwei verschiedenen Prozesspfaden gefügt werden: Es wird zwischen In-Mold-Assembly (IMA) und Post-Mold-Assembly (PMA) unterschieden, nach dem Zeitpunkt der Verbindungsbildung. Ersteres bezeichnet das Fügen in einem urformen­den Prozessschritt, beispielsweise Fügen während des Spritzguss- oder Pressprozesses [14, 33]. Das sog. PMA umfasst Füge­prozesse, die in einem der Formgebung nachgelagerten Prozessschritt durchgeführt werden. Die Wahl eines geeigneten Prozesses

muss für jeden Anwendungsfall unter Einbeziehung sämtlicher Randbedingungen erneut getroffen werden. Für Hybridbauteile mit temperatur- oder drucksensiblen Komponenten stellt das PMA eine Alternative zum IMA dar.

2.3.2 Direktfügen Metall/Kunststoff

Bei direktgefü­gten MKV werden Metalle und Kunststoffe ohne Hilfsstoffe miteinander verbunden. Die Grenzfläche von direktgefü­gten MKV kann jedoch analog einer Klebeverbindung betrachtet werden, bei der der „Klebstoff“ die Eigenschaften der Kunststoffmatrix aufweist. Entsprechend lassen sich zwischen Kleben und Direktfügen Parallelen in den Wirkmechanismen finden. Diese Analogie ist in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt.

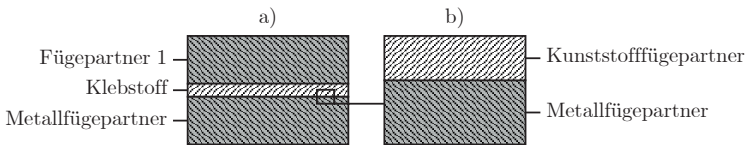


Abbildung 2.2: Analogie der direktgefü­gten Metall-Kunststoff-Verbindungen b) zu Klebeverbindungen a)

Dabei werden zwei Haftungsmechanismen unterschieden:

- Spezifische Adhäsion und
- Mechanische Adhäsion [34].

Die Spezifische Adhäsion beschreibt sämtliche chemisch-physikalischen Wirkmechanismen zwischen den beiden Fügepartnern. Eine Isolierung von einzelnen Einflüssen ist nach heutigem Stand nicht möglich. Vielmehr handelt es sich um eine Vielzahl von sich überlagernden und ergänzenden Mechanismen. Dazu gehören unter anderen

- Hauptvalenzbindungen,
- Nebervalenzbindungen,
- Diffusionsvorgänge und
- elektrische Doppelschichten [35].

Sie unterscheiden sich stark in der Höhe der durch sie hervorgerufenen Bindungsenergien und tragen somit unterschiedlich stark zur Verbindungs­festigkeit bei. Die

spezifische Adhäsion ist stark abhängig vom eingesetzten Materialsystem und der Oberflächenvorbehandlung. So können bei unterschiedlichen Materialkombinationen verschiedene Mechanismen zum Tragen kommen und dennoch ähnliche Festigkeiten erzielt werden [34, 35].

Als mechanische Adhäsion wird die formschlüssige Verbindung zwischen Metall und Kunststoff bezeichnet, die durch ein Eindringen von Kunststoffschmelze und ggf. Fasern in Oberflächenstrukturen des Metallfügepartners entsteht. Abbildung 2.3 zeigt zur Verdeutlichung des Effekts schematisch eine solche Metall-Kunststoff-Grenzfläche im Querschnitt.



Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Grenzfläche einer MKV zur Verdeutlichung der mechanischen Adhäsion durch (Mikro-)Formschluss

Abhängig von der Belastungsrichtung kann auf makroskopischer Ebene durch mechanische Adhäsion eine Festigkeit erzielt werden, wenn entsprechende Hinterschneidungen in der Oberflächenstruktur mit Kunststoff gefüllt sind [34, 36, 37]. Zusätzlich zur Makroebene sind auch auf mikroskopischer Ebene Verklammerungen möglich, sodass die mechanische Adhäsion über die Skalengrenzen hinweg einen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit hat. Bildlich lässt sich die mechanische Adhäsion mit dem „Druckknopfeffekt“ beschreiben [38].

Ein entscheidender Unterschied zwischen Direktfügen und Kleben liegt in der Prozesskette. Abbildung 2.4 zeigt die Prozessabläufe der beiden Verfahren. Deutlich wird die verringerte Anzahl an Prozessschritten beim Direktfügen.

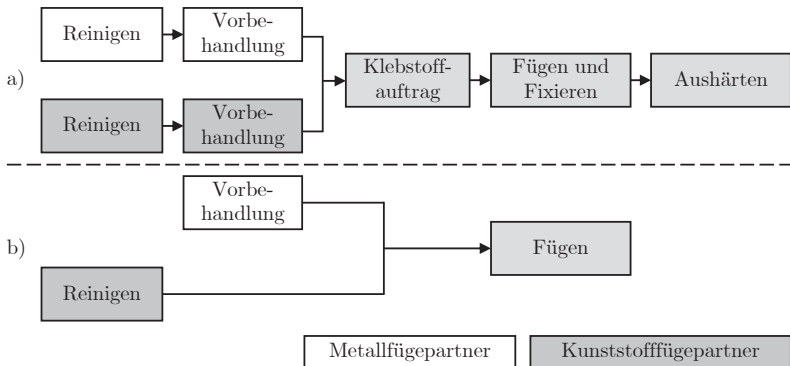


Abbildung 2.4: Vergleich der Prozessketten von Klebprozess a) und Direktfügen b): die deutlich verkürzte Prozesskette des Direktfügens sorgt für eine Reduzierung der Prozesskomplexität und -zeit

Beim Direktfügen entfällt die Vorbehandlung des Kunststoffes, da dieser aufgeschmolzen wird. Der Reinigungsschritt sollte jedoch beibehalten werden, um eine vorhersagbare Verbindungsbildung zu gewährleisten und die gewünschten Verbindungseigenschaften zu erzielen. Der Reinigungsprozess des Metallfügepartners kann, abhängig von der Vorbehandlungsmethode, entfallen. Überflüssig werden zudem Klebstoffauftrag und -aushärtung. Bei näherer Betrachtung der entfallenden Schritte wird deutlich, dass insbesondere der Wegfall des Klebstoffaushärtens auf Seiten des Direktfügens einen enormen Zeitvorteil mit sich bringt [39].

Versagensarten von Metall-Kunststoff-Verbindungen

Das Versagen von MKV lässt sich in Anlehnung an Klebeverbindungen kategorisieren. Dabei werden adhäsives und kohäsives Versagen, sowie Mischformen und der Füge- teilbruch unterschieden [34]. Für direktgefügte MKV müssen diese Definitionen teilweise angepasst werden. Abbildung 2.5 zeigt schematisch die verschiedenen Brucharten für direktgefügte MKV. Das adhäsive Versagen kann unverändert von Klebeverbindungen übernommen werden. Adhäsives Versagen liegt vor, wenn die Materialtrennung an der Grenzfläche der Fügepartner auftritt und nach dem Bruch keine Rückstände des jeweils anderen Materials auf den Bruchflächen vorhanden sind [34].

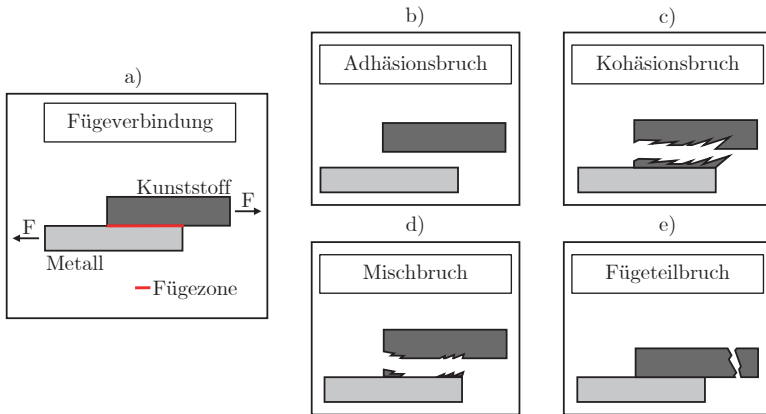


Abbildung 2.5: Versagensarten direktgefühter MKV: Fügeverbindung und Belastungsrichtung a), Adhäsionsbruch b), Kohäsionsbruch c), Mischbruch d) und Fügeteilbruch e) nach [34, 40]

Im Gegensatz zu geklebten Verbindungen bedeutet kohäsives Versagen bei direktgefühten Verbindungen eine Schädigung in einem der beiden Fügepartner. Von kohäsivem Versagen kann also gesprochen werden, wenn es zur Schädigung eines der (oder beider) Fügepartner im Bereich der Fügezone kommt und Rückstände des geschädigten Materials auf der Bruchfläche nachweisbar sind. Die Kombination aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch wird als Mischbruch bezeichnet und liegt vor, wenn die Bruchfläche sowohl Bereiche mit adhäsivem, als auch kohäsivem Versagen aufweist.

Zusätzlich ist der Fügeteilbruch zu unterscheiden, bei dem die Festigkeit der Fügestelle die Grundfestigkeit der Fügeteile übersteigt und es zum Materialversagen außerhalb der Fügezone kommt.

Thermisches Direktfügen

Das sog. thermische Direktfügen basiert auf der Möglichkeit, dass thermoplastische Kunststoffe beliebig oft aufgeschmolzen werden können [24]. Das Prinzip des Fügeverfahrens ist die Erwärmung des Kunststoffes auf eine Temperatur oberhalb seines Schmelzpunktes und die anschließende Erstarrung an der Oberfläche des metallischen Fügepartners. Eine schematische Darstellung des Prozessablaufes zeigt Abbildung 2.6. Im ersten Schritt werden die beiden Fügepartner zueinander positioniert, bevor in

Schritt zwei der Wärmeeintrag in die Fügezone startet. Dieser Schritt kann sowohl drucklos als auch bereits unter Aufbringen einer Kraft auf die Fügezone durchgeführt werden.

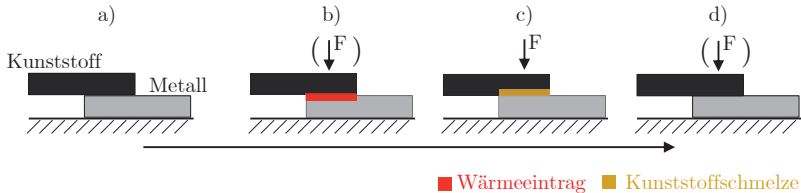


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des Fügeablaufes des thermischen Direktfügens von MKV: Positionierung der Bauteile zueinander a), Wärmeeintrag in die Fügezone b), Aufschmelzen des Kunststoffes und aufbringen des Fügedruckes c), Erstarren des Kunststoffes an der Metalloberfläche d)

Ist der Wärmeeintrag entsprechend der Prozessführung abgeschlossen und ausreichend Kunststoffschmelze erzeugt, kühlt das Bauteil ab. Die Kunststoffschmelze erstarrt in diesem Schritt an der Metalloberfläche. Auch dies geschieht i.d.R. unter Aufbringung einer Kraft um ein erneutes Ablösen oder einen sog. Spring-Back zu verhindern.

Nach Flock lässt sich das thermische Direktfügen nach der Art des Energieeintrages unterscheiden [33]. Eine schematische Darstellung dieser Einteilung und der zugehörigen Mechanismen zeigt Abbildung 2.7.

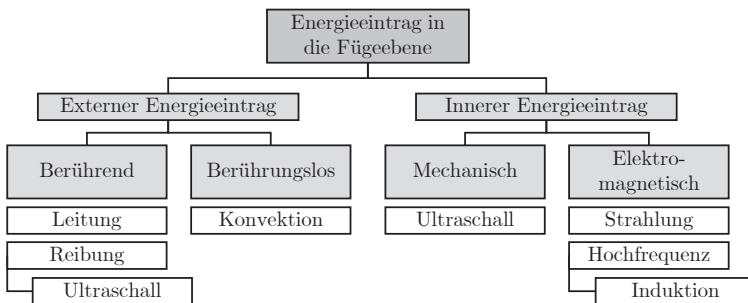


Abbildung 2.7: Einteilung des Energieeintrages in die Fügeebene nach Art des Mechanismus [33, 41]

Der Wärmeeintrag kann sowohl direkt in den Kunststoff erfolgen, als auch über die Erwärmung des metallischen Fügepartners. Dabei steht eine Vielzahl verschiedener