



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Institut für Metallformung

Untersuchung des Einflusses der Vorbehandlungsmethoden auf die Haftfestigkeit eines Magnesium-Kunststofftape-Verbundes

Wieland Proep

Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

Vertiefung: Umformtechnik

25. Juni 2021

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten wurden die Bemühungen verstärkt, monolithische und hybride Leichtbauwerkstoffe weiterzuentwickeln und anzuwenden. Als besonderer Treiber dieser Entwicklung kann die Luftfahrtbranche angesehen werden, die unter anderem in den 70er und 80er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts große Fortschritte erzielen konnte. So konnten unter Anwendung von Faserverbundwerkstoffen hochfeste Schichtwerkstoffe entwickelt werden, die im Flugzeugbau seit vielen Jahren Anwendung finden.

Sogenannte Fiber Metal Laminates (FML, deutsch: Faser-Metall-Lamine) zeichnen sich dabei unter anderem durch hohe spezifische Festigkeit, hohe Steifigkeit und günstiges Versagensverhalten aus. Durch die Verwendung von symmetrischen oder asymmetrischen Verbundwerkstoffen in verschiedenen Konfigurationen können auch andere Eigenschaften wie Anisotropie, Hochtemperaturfestigkeit oder Energieaufnahme beim Versagen beeinflusst werden. Eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung der Eigenschaften ist die Verwendung verschiedener Metall-, Matrix- und Faserwerkstoffe. Die häufig verwendete Werkstoffkombinationen aus mehreren Lagen hochfesten Aluminiumblechen mit einem epoxidharzgebundenen Glas- oder Kohlenstofffasergewebe (Glare oder Arall) zwischen den Metallschichten finden in modernen Flugzeugen Verwendung, beispielsweise als Rumpfbauteile.

FML erweisen sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften als vorteilhaft gegenüber anderen Werkstoffen, sind aber aufgrund der relativ langsamen und aufwendigen Produktion bisher nicht in die breite Anwendung übernommen worden. Seit einigen Jahren werden deshalb andere Werkstoffkombinationen untersucht. Dazu zählt unter anderem die Verwendung von anderen Aluminiumlegierungen sowie Stahl, Titan oder auch Magnesium als Metallschicht. Die Verwendung von Magnesium als leichtestem Konstruktionsmetall erscheint dabei aussichtsreich. Werkstoffseitig wird der Einsatz von thermoplastischen Polymeren statt dem bisher dominierendem Epoxidharz untersucht.

Mit diesen Entwicklungen soll das Anwendungsspektrum erweitert werden. Durch die Verwendung von thermoplastischen Matrixwerkstoffen soll die Herstellung vereinfacht und somit für eine größere Produktpalette geöffnet werden. Eine aktuelle Entwicklung ist die Übertragung herkömmlicher Umformprozesse auf FML, was zu deutlich sinkenden Produktionskosten führen soll.

Diese Arbeit soll die Möglichkeit der Herstellung und Nutzung eines Verbundwerkstoffes aus der Magnesiumlegierung ZAX210 und einem Polyamidfaser mit Glasfaserverstärkung untersuchen. Dabei sollen unterschiedliche Möglichkeiten der Oberflächenvorbehandlung betrachtet, ausgewählt und durchgeführt werden. Verschiedene Versuche wie Scherzug-, Biege- oder Zugversuche werden einbezogen, um den Einfluss der Oberflächenvorbehandlung auf die interlaminaire Haftung im Verbund einschätzen zu können. Die optische Untersuchung der Oberflächenzustände nach der jeweiligen Vorbehandlung sowie der Grenzschichtzustände werden in der Arbeit durchgeführt.

Als Ergebnis soll diese Arbeit eine Empfehlung erarbeiten, auf deren Basis ein Prozess zur Herstellung des genannten Verbundes im Prototypenmaßstab erstellt werden kann. Deshalb

sollen die Möglichkeiten anhand der Produktivität und Übertragbarkeit in einen größeren Maßstab eingeschätzt werden.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden abgeschlossene und aktuelle Untersuchungen von FML betrachtet und zusammengefasst. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf Haftung und deren Mechanismen sowie den unterschiedlichen Möglichkeiten der Oberflächenvorbehandlung. Ein weiterer Schwerpunkt der Recherche ist die Untersuchung der Umformung von FML in unterschiedlichen Zuständen und Zusammensetzungen sowie die Herstellung und Eigenschaften der umzuformenden Magnesiumlegierung.

2.1 Fibre Metal Laminates

Neue Hochleistungswerkstoffe wurden in der Vergangenheit zuerst für den Flugzeugbau entwickelt und eingesetzt. Ein Beispiel hierfür sind die sogenannten FML (englisch für Fibre Metal Laminates, deutsche Übersetzung: Faser-Metall-Verbunde). Bereits in den fünfziger und sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurden vorrangig im militärischen Bereich Entwicklungen unternommen, um die Eigenschaften von Metallen und Laminatwerkstoffen in einem Verbund zu vereinen. Die erstmals im großem Maßstab zum Einsatz kommenden FML bestanden aus Aluminiumblechen und Glasfaser- oder Aramidfaserlaminaten [Vogeleisang.2000]. Im Zuge der Elektrifizierung des Individualverkehrs wächst auch der Entwicklungsdruck hin zu Leichtbaulösungen für Strukturbauteile im Automobilbereich weiter. Durch neue Materialkombinationen, automatisierte Fertigungstechnologie und lastorientierte Konstruktionen sollen die Bedürfnisse der Automobilbranche mit FML gedeckt werden [Wollmann.2018].

FML, also Fibre Metal Laminates, bestehen aus mindestens 2 Lagen unterschiedlicher Werkstoffe: Metall und Faserverbundwerkstoff. Diese können je nach gewünschtem Eigenschaftsprofil gewählt werden und in beliebig vielen Lagen, der Dicke und der Ausrichtung und Verwebung der Fasern zusammengestellt werden. Durch die Kombination der Werkstoffe ist es möglich, ein neues Eigenschaftsprofil zu bilden. FML können somit in unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden (siehe auch ??), je nach gefordertem Eigenschaftsprofil des Verbundwerkstoffes.

Neue Werkstoffe konnten in der Vergangenheit erfolgreich implementiert werden. Ein Beispiel hierfür ist Glare, ein Verbundwerkstoff aus Aluminiumblechen und Epoxidharzmatrix mit Glasfaserverstärkung. Der Verbundwerkstoff wird in verschiedenen Kombinationen unter anderem im A380 eingesetzt. Hier werden FML verhältnismäßig intensiv verwendet, unter anderem für den Rumpfhautaufbau. [Airbus.05.04.2021, Vlot.2001]

2.1.1 Anwendung und Eigenschaften

Verbundwerkstoffe mit Faserverstärkung weisen deutlich andere Versagensverhalten auf als monolithische Metallwerkstoffe. Durch die jeweils nur in eine bestimmte Richtung orientierten Fasern sowie den Lagenaufbau mit getrennten Schichten sind die Werkstoffeigenschaften stark

anisotrop. Aus den für sich genommen unterschiedlichen Versagenseigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen und Metallen ergeben sich neue Eigenschaftsprofile. Verschiedene Untersuchungen zeigen auf, dass Ermüdung und Energieaufnahme von FML bei Schlagzähigkeitsversuchen deutlich verbessert werden im Vergleich zu entsprechenden monolithischen Bauteilen [**Cortes.2005**, **Botelho.2006**]. Dieser Vorteil wird durch den zweiten Lastpfad erreicht, der durch die Fasern in den Werkstoff integriert wird [**Beumler.2004**].

FML wurden in der Literatur als Leichtbauwerkstoffe mit günstigen Versagens- und Ermüdungseigenschaften angesehen, die vorrangig in aeronautischen Anwendungen eingesetzt wurden. Die exzellenten Ermüdungseigenschaften werden durch die Verbindung von Faser- und Metallschichten und damit variierenden Last- und Versagenspfaden erreicht. Ein Aufbau von bis zu 9 Schichten konnte als leichte und schlagzähe Struktur identifiziert werden. [**Parnanen.2012**]

Das Konzept von FML wurde ursprünglich entwickelt, um ein verbessertes Ermüdungsverhalten gegenüber monolithischem Metallblech zu erhalten. Andere Vorteil wie die erhöhte Schlagzähigkeit wurden später am Konzept FML untersucht [**Alderliesten.2008**]. Die Art der Rissinitiation in der Metalllage hängt dabei vom Steifigkeitsunterschied zwischen Metall und eingesetzten Fasern ab. Bei der Überbrückung (englisch "bridging") von Lastspitzen kann die Rissausbreitung gestoppt werden. Die Effektivität dieses Effektes wird durch ein Versagen der Fasern durch Spannungsspitzen minmiert, wie aus Erfahrungen mit Arall hervorgeht [**Marissen.1988**]. Delaminationen zwischen den Schichten begünstigen Spannungsspitzen und Faserversagen. Eine Möglichkeit um Delamination zu verhindern, ist die Verringerung des interlaminaren Lasttransfers, also der Spannungsunterschiede zwischen einzelnen Lagen. Dazu kann die Zahl der Lagen erhöht werden, was zu einer verringerten Blechdicke oder Lagendicke führt. Da dünne Magnesiumbleche teilweise Fertigungsprobleme hervorrufen, schlägt [**Alderliesten.2008**] die Aufteilung des Kunststoffvolumens auf eine höhere Lagenanzahl dünnerer Kunststofflagen vor.

Vogelesang et al. [**Vogelesang.2000**] zeigt auf, dass bei der Betrachtung von Schadensfällen an Luftfahrzeugen der letzten Jahrzehnte neue Wege der Materialauswahl für Strukturwerkstoffe entstehen müssen. Dabei sollen verschiedene Eigenschaften zusammengeführt werden, unter anderem geringe Materialermüdung, Korrosion, Schlagzähigkeit und langlebige Klebeverbindungen, um eine hohe Schadenstoleranz zu erreichen. Auch im Hinblick auf Wartungskosten sind langlebige Hochleistungswerkstoffe erwünscht. Das geforderte Eigenschaftsprofil wurde durch die Kombination von Aluminiumlegierungen (schnelle Materialermüdung) und Faserverbundwerkstoffen (niedrige Aufprall- und Restfestigkeit) erreicht. Dadurch ist das Risswachstum in Glare-Verbunden unter realistischen Bedingungen etwa 10-100 mal langsamer als in einem entsprechendem Aluminiumbauteil (Al 2024). FML weisen im Hinblick auf das Verhalten bei einem Schlagversuch ähnliche Effekte auf wie ein Aluminiumblech mit gleicher nominaler Dicke und unterscheiden sich so von reinen Faserverbundwerkstoffen. Es können qualitativ gleiche plastische Verformungen verzeichnet werden, allerdings bei deutlich höheren Aufprallenergien bei FML. Somit erhöht sich die Sicherheit, da erst bei höheren Schlagenergien fatale Schäden entstehen.

Wollmann et al. [**Wollmann.2018**] prüfte mit einem dreilagigen Verbund aus Stahldeckblechen und einer PA6 Matrix mit Kohlefaserverstärkung die Umformbarkeit von FML. Dabei wurde eine gute Vorhersagbarkeit des Verhaltens und von Fehlern mithilfe entwickelter Modelle festgestellt. Die Umformbarkeit ist durch Reißen und Knicken der Deckbleche und Abreißen der Fasern begrenzt.

Bild von Vogelesang mit Versagensverhalten von Glare etc einfügen

Im Vergleich von verschiedenen Magnesiumlegierungen mit in Glare eingesetzten Aluminiumlegierungen zeigt sich nach [**Alderliesten.2008**], dass die Magnesiumlegierung AZ31B H24 vergleichsweise gute Eigenschaften aufweist. Im Vergleich der spezifischen mechanischen Eigenschaften zeigt sich ein ähnliches Niveau von Al 2024 und AZ31B H24. Legierungen der 7000er Reihe, wie Al 7475, weisen deutlich höhere Werte auf, wie beispielsweise eine um circa 50 % erhöhte Zugfestigkeit. Andere Magnesiumlegierungen wie AZ31B0, HM21A und ZM21A werden als unzureichend angesehen und daher als nicht aussichtsreich bei der Verwendung in FML. Bezüglich des Versagensverhaltens weisen magnesiumbasierte FML schlechtere Eigenschaften auf, da der Risswachstumswiderstand von AZ31B H24 signifikant niedriger ist als von Al 2024. Somit entstehend Risse schnelle und wachsen mit höheren Geschwindigkeiten. Für entsprechende Bauteile mit hoher zyklischer Belastung ist die untersuchte Magnesiumlegierung somit nicht geeignet. Dies zeigt sich auch im direkten Vergleich der Rissausbreitung von einem monolithischen Blech Al 2024 mit getesteten und berechneten Rissausbreitungsraten in magnesiumbasierten FML [**Alderliesten.20018**, **Cortes.2005**]. Die Rissausbreitungsrate kann durch die Erhöhung der Lagen bei Beibehaltung der Masse verringert werden, so dass ein sinnvoller Ansatz im Einsatz von dünneren Metalllagen besteht [**Alderliesten.2008**].

Nach Diskussion der bis dahin verfügbaren Untersuchungen kommt Alderliesten et al. [**Alderliesten.2008**] zur Aussage, dass die Verwendung von Magnesium in FML im Flugzeugbau wenig sinnvoll erscheint. Dies wird mit den Eigenschaften von Magnesium im Versagensfall begründet, da die magnesiumbasierten Verbunde eine vergleichsweise hohe Rissausbreitung, geringere Schersteifigkeit sowie eine niedrigere Energieaufnahme aufweisen. Der Vorteil durch die niedrigere Dichte wird durch diese Eigenschaften umgekehrt. Eine Anwendungsmöglichkeit wird bei statischer Belastung und gleichmäßiger Spannungsverteilung angesehen, was durch geringe Lagendicken erreicht werden kann. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung in Bereichen, die sich durch eine Knickbelastung auszeichnen. Wenn durch die Verwendung des leichteren Magnesiums eine dickere Struktur genutzt werden kann, so steigt die Steifigkeit des Bauteils oder das Gewicht kann entsprechend reduziert werden. In jedem Fall sollte die Gesamteigenschaft betrachtet werden und nicht nur die Dichte und Eigenschaften des Metalls. [**Alderliesten.2008**]

Pan et al. [**Pan.2016**] untersuchte die Festigkeiten von FML aus Magnesium AZ31 und Epoxidmatrix mit Kohlenfaserverstärkung. Dabei wurden zwei Versagensmodi herausgearbeitet, die in verschiedenen Belastungssituationen auftreten können. Modus I entspricht dabei der Festigkeit in einer Schälbelastung, während Modus II dem Versagen bei Scherung entspricht. Für Versagensmodus I konnte ein rein adhesives Versagen zwischen Metall und Epoxidmatrix beobachtet werden, da bei einer Schälung der sogenannte mechanical interlock, also die Verklammerung von Oberflächenrauheiten beider Fügepartner, der Belastung deutlich weniger entgegenwirkt (siehe ??). Für Modus II wurde eine Mischung aus adhesivem und kohäsivem Versagen ermittelt, so dass sowohl an der Grenzschicht zwischen Metall und Matrix als auch in der Matrix Risse aufgetreten sind. Delamination ist also in allen Belastungssituationen ein wesentlicher Teil des Versagensverhaltens.

Magnesiumbasierte Verbunde sind eine relativ neue Klasse von FML, die in der letzten Zeit verstärkt untersucht wurde und hohe spezifische Festigkeiten, gute Schlagzähigkeit und Ermüdungsverhalten zeigt [**Cicco.2019**]. Unter anderem wurden neue Verfahren entwickelt, um Magnesium mit kohlefaserverstärkten Matrixwerkstoffen zu fügen und so verbesserte Eigenschaften

ten zu erzeugen [Pan.2017]. Auftretende Nachteile dieser Verbunde sind die geringe Zähigkeit von Manganlegierungen sowie die geringe Haltbarkeit der Verbindung von Magnesium zu Kunststoff.

Magnesium bietet verschiedene Vorteile, unter anderem eine geringe Dichte und gute Abschirmfähigkeiten gegenüber elektromagnetischer Strahlung, die im Flugzeugbau eine wichtige Eigenschaft darstellt [Cortes.2005b]. Magnesium bietet dabei Nachteile hinsichtlich der Steifigkeit, Korrosionsbeständigkeit und des Spröbruchverhaltens [Cortes.2005b, Alderliesten.2008]. Cortes et al. [Cortes.2005b] zeigt auf, dass die Rissausbreitung in magnesiumbasierten FML geringer ist als in monolithischem Magnesiumblech. Dies reicht aber für eine Anwendungsempfehlung nicht aus, solange das Ermüdungsverhalten schlechter ist als bei monolithische Aluminiumblechen gleichen Gewichts [Alderliesten.2008].

Pärnänen et al. [Parnanen.2012] verglich einen fünflagigen Aufbau aus Magnesiumblechen und Epoxidmatrix mit zwei Glare-Aufbauten. Die jeweiligen Verbunde aus 3 Lagen Metall und dazwischen 2 Lagen Epoxid-Prepreg mit FM94/S2 Glasfaserverstärkung wurden in Fallgewichtsversuchen mit unterschiedlichem Energieeintrag getestet. Dabei konnte herausgearbeitet werden, dass der Magnesiumverbund bei deutlich niedrigerer Dichte ($1,85 \frac{g}{cm^3}$ im Vergleich zu $2,4 \frac{g}{cm^3}$ für Glare) eine Rissinitiation bei niedrigeren Energieaufnahmen aufweist, allerdings eine Perforation bei ähnlich hohen Energieeinträgen erfolgt. Das beim Magnesium angewendete Sandstrahlen beeinflusst allerdings die Spannungsverteilung im Werkstoff und erzeugt durch eine höhere Rauheit mögliche Anrisse. Die Magnesiumproben weisen eine verstärkte Delamination in den Außenlagen auf, die teilweise vom verstärkten Anrissverhalten hervorgerufen wird. Die Verwendung von Magnesium AZ31B-H24 für alle metallischen Schichten eines FML scheint wenig vorteilhaft. Die Autoren stellen in der Untersuchung eine Anwendung von Magnesiumblechen als Innenlagen von FML zur Diskussion, um die Spannungsspitzen zu verringern.

Untersuchungen von Pärnänen et al. [Parnanen.2012] zeigten für die Anwendung in FML günstige Eigenschaften der Magnesiumlegierung AZ31B-H24 im Vergleich zu anderen Magnesiumwerkstoffen. Im Vergleich zur häufig eingesetzten Aluminiumlegierung Al 2024-T3 zeigte sich eine geringere Bruchzähigkeit, im Bezug auf andere Parameter wurde AZ31B-H24 besser bewertet. Die Dichte von Magnesiumverbunden ist um 20% geringer als von mechanisch vergleichbaren Aluminiumverbunden wie Glare.

Bei statischer Belastung von Verbunden ist die Spannungsverteilung auf Metall und Kunststofffasern entscheidend für die Eigenschaften. Da die Legierung AZ31B eine geringere Steifigkeit und eine deutlich geringere Streckgrenze gegenüber verwendeten Aluminiumblechen aufweist, ergibt sich eine höhere Spannung in der Faserlage. Dies kann zu Faserrissen führen und zeigt sich in einer insgesamt niedrigeren Steifigkeit des Verbundes [Alderliesten.2008]. Im Zusammenhang mit FML ist also die Steifigkeit des Metallwerkstoffes entscheidend für die Eigenschaften des Verbundes.

Neben den erwarteten und erwünschten mechanischen Eigenschaften wurden FML vermehrt auch aufgrund der möglichen Kostenreduzierung und erhöhter Sicherheit eingesetzt [Vogeleang.2000]. Auch in säurehaltigen Umgebungen können FML die Korrosion durch den Schichtaufbau eindämmen, wenn die Oberflächen von Metall und Kunststoff korrosionsbeständig gestaltet werden [Vogeleang.2000].

Huang et al. [Huang.1995] untersuchte die Eigenschaften von FML bei unterschiedlichen Schwingungen. Dabei konnten die besseren Dämpfungseigenschaften und somit erhöhter Schallschutz im Vergleich zu monolithischen Metallblechen bei deutlich geringerer Dichte festgestellt werden. Unter anderem deshalb werden FML in einigen Automobilanwendungen eingesetzt [Ruokolainen.2008].

Wie in ?? beschrieben, können FML aus sowohl in den metallischen Bestandteilen als auch in der Zusammensetzung der faserverstärkten Kunststofflagen variiert werden. Kutz et al. [Kutz.2017] stellt fest, dass harzbasierte Lamine und FML sich als weniger schlagzäh und schlagenergieaufnahme-fähig als Bauteile mit thermoplastischem Matrixwerkstoff erweisen.

Bellini et al. [Bellini.2020] untersuchte die Einflüsse von Aufbau und Grenzflächendesign auf die Biegefestigkeit von CARALL, also eines Verbundes aus Aluminiumblech und kohlefaserverstärkten Kunststoffen. Alle Verbunde mit gleicher Dicke, aber unterschiedliche Lagendicke und -anzahl. 2 Konfigurationen, drei und fünf Lagen gesamt, Dicke des Verbundes 5 mm. Je mit zusätzlichem Kleber (2 Komponenten Kleber) und nur mit Haftung durch Epoxidharz. Faserlagen immer außen gelegt. Dreipunktbiegeversuche nach ASTM D790 und kürzere Proben zur Untersuchung der interlaminaren Scherfestigkeit nach ASTM D2344. Jeweils dreilagige Verbunde, also zwei Faserlagen und eine mittige Aluminiumlage, am besten. Für lange Proben höhere Biegefestigkeit ohne Kleberverwendung, für kurze mit Kleberverwendung. Fehler durch Versagen der Fasern (Reißen und abknicken) bei langen Proben, kurze Proben versagen durch Delamination und kohäsives Versagen. Klebereinsatz nachteilig für Biegefestigkeit der längeren Proben, aber vorteilhaft für kurze Proben. In langen Proben (160 mm) dominant, in kurzen Proben (20 mm) interlaminare Scherung. Lagenverteilung (jeweils Faserlage so weit wie möglich auf Zugseite) entscheidend für lange Proben, kein Einfluss auf Ergebnisse der kurzen Proben.

Kuhtz et al. [Kuhtz.2019] untersuchten die Versagenseigenschaften eines mehrlagigen FML aus Magnesium- oder Aluminiumblech und kohlefaserverstärkter PA6-Matrix. Dabei wurden Dreipunktbiege Versuche mit einem Charpy Versuchsaufbau durchgeführt. Der Vergleich unterschiedlich langer Proben zeigt, dass die Scherkräfte zwischen den einzelnen Schichten höher werden, je kürzer der belastete Bereich ist. Daher wird ein Unterschied beim Versagen festgestellt abhängig von der Länge der Probe. Es wird beobachtet, dass durch die induzierte Biegung auf der Oberseite der kurzen Probe (Kontaktpunkt zum Stempel) eine Druckspannung entsteht, die zum Ausknicken und dabei zur großflächigen Delamination führt. Das obere Deckblech bildet durch das Ausknicken eine S-Form, während das untere Deckblech nur einer Biegung unterworfen wird. Längere Proben delaminieren nah am Stempel und in einem vergleichsweise kleinen Bereich. Dadurch bleibt mehr Volumen im Ursprungszustand und trägt nicht zur der Energieaufnahme bei. Somit ist die relativ zur Masse absorbierte Energie geringer als bei kurzen Proben. Einen besonderen Versagensfall präsentieren Proben mit AZ31 in langer und kurzer Konfiguration. Aufgrund der geringeren Dehnung und Umformbarkeit reißt das Blech auf der Zugseite (Unterseite), ohne eine vorherige Delamination. Dies stellt einen Unterschied zu den Aluminiumproben dar, die immer auf der Oberseite durch Delamination versagen und keine Risse durch Zugspannungen aufweisen.

Bild Proben Versagen nach Kuhtz.2019

Kuhtz et al [Kuhtz.2019] weist auf die durch Oberflächenstrukturierung eingebrachten Anrisse hin. Bei mechanischer Oberflächenvorbereitung jeder Art werden anrissähnliche Oberflächenstrukturen eingebracht, die bei Zugbelastung den Anriss und das Versagen des Materials

durch Spannungskonzentrationen begünstigen können. Somit kann eine Oberflächenstrukturierung auch die mechanischen Eigenschaften verschlechtern.

2.1.2 Aufbau

Für den Aufbau kommen verschiedene metallische-, Matrix- und Faserwerkstoffe mit unterschiedlichen Dichten zum Einsatz. Um die jeweiligen Werkstoffe vergleichen zu können, wird in ?? eine Formel nach [Wollmann.2018] gezeigt, die die Berechnung des Aufbaues eines symmetrischen Verbundes aus der Dichte eines monolithischen Bleches ermöglicht.

$$h(t_D) = \frac{2 \cdot t_D(\rho_K - \rho_D) + \rho_B \cdot s_B}{\rho_K} \quad (1)$$

Dabei wird ein dreilagiger Verbund mit zwei Decklagen (D) und einer Kernschicht (K) betrachtet. s_B und ρ_B stellen die Dicke respektive die Dichte des Vergleichsbleches dar, ρ_K und ρ_D die Dichten von Deck- und Kernschicht. Der Gesamtaufbau hat eine Dicke von h mit einer Kerndicke k und einer Deckblechdicke t_D , siehe dazu auch ??.

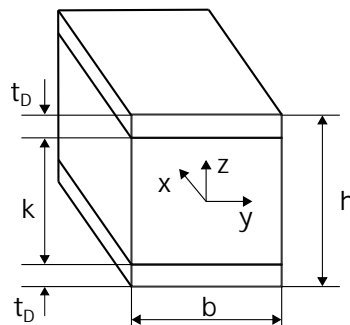


Abb. 1: Aufbau eines dreilagigen FML mit entsprechender Querschnittszusammensetzung nach [Wollmann.2018]

Für Anwendungen in FML wurden anfangs vor allem Aluminiumlegierungen eingesetzt, vorrangig aus den 2000er und 7000er Reihen. Die daraus entstandenen Verbundwerkstoffe weisen die Vorteile auf, die zur Anwendung führten, wie hohe Schlagenergie, niedrige Risswachstumsgeschwindigkeiten geringe Dichte. Um das Werkstoffspektrum zu erweitern, wurden Untersuchungen mit anderen Metallegierungen durchgeführt wie Stählen, Titanlegierungen oder Magnesium.

Neben den weithin verwendeten Aluminiumlegierungen werden Titanbleche für Hochtemperaturanwendungen mit Kohlefasern zu FML verbunden [BurianekDennisSpearing.2003, Hu.2020]. Stahlbleche werden vor allem im Hinblick auf Tiefziehoperationen mit FML untersucht, um mit faserversärkten Polymeren die Eigenschaften von klassischen Stahlbauteilen zu verbessern [Behrens.2014, Behrens.2017, Blala.2021, Hahn.2018]. Magnesium als Metallwerkstoff bietet sich für die Verwendung in FML an, da es als leichtestes Konstruktionsmetall Potenziale im Leichtbau möglich macht und für bestimmte Anwendungen einsetzbar sein kann [Cortes.2005, Alderliesten.2008]. Ein regelmäßig untersuchtes Thema sind die Vorbehandlungsmethoden, um

die Oberfläche von Magnesiumblechen oder -bauteilen belastbar an Kunststoffmatrizen anzubinden [Cicco.2019, Cicco.2019b] Intensive Untersuchungen wurden mit Magnesium durchgeführt, um Beschichtungen anzubringen, beispielsweise auf Organosilanischer Basis [Hausbeck.2012]. Die Beschichtungen sind interessant, um die Adsorptionsprozesse von medizinischen Magnesiumelementen im Körper zu verlangsamen [Galvin.2013, Zucchi.2006]. Die Anbindung der Beschichtung basiert auf den gleichen Prinzipien wie die Anbindung von Kunststoffschichten für mechanisch belastete Werkstoffe wie FML.

Eine wichtige Einteilung von FML kann anhand der verwendeten Kunststoffe oder Matrixwerkstoffe erfolgen. Für bisherige Anwendungen wurden häufig sogenannte Epoxidharze verwendet, welche aus einem Polymer und einem Härter bestehen. Beim Mischen entsteht eine Flüssigkeit, die innerhalb einer Zeit aushärtet und einen duroplastischen Kunststoff darstellt [Dornbusch.2015]. Der Werkstoff ist je nach Zusammensetzung teils spröde und splittert schnell, kann nicht mehr aufgeschmolzen werden und weist hohe mechanische und korrosionsresistente Eigenschaften auf.

Als Laminatwerkstoff kommen die in der klassischen Faserverbundtechnik genutzten Werkstoffe und Verfahren zum Einsatz. Klassischerweise wurde in den ersten FML wie Glare ein Epoxidharz genutzt, der durch eine chemische Reaktion bei einer erhöhten Temperatur aushärtet. Der Auftrag erfolgt in einer Serienfertigung durch Prepreg-Material, also vorimprägnierte Matten von Fasern mit nicht ausgehärtetem Harz, oder andere Verfahren wie Vakuuminfusion. In den Harzen können Fasern wie Aramid, Glas- oder Kohlefasern zur Verstärkung eingesetzt werden. Durch die Aushärtung weisen Epoxidharze eine potenziell längere Prozesszeit auf, was aber in aktuellen Entwicklungen weiter verkürzt wird [Lakho.2017]. Eine in aktuellen Untersuchungen untersuchte Möglichkeit ist der Einsatz von Thermoplasten, also Polymeren wie Polyamid oder Polypropylen [Flock.2012]. Diese weisen den Vorteil auf, in schmelzflüssigem Zustand gießbar zu sein, und werden in vielen Spritzgußbauteilen angewendet. [ehrenstein.2003]

Der Vorteil von Thermoplasten ist die geringe Prozesszeit zum Aushärten, da durch ein Abkühlen des Werkstoffes eine Verfestigung eintritt. Der Vorgang des Aufschmelzens und Abkühlens kann mehrmals wiederholt werden, was mehrstufige Umformoperationen ermöglicht.

Nach Kuhtz et al. [Kuhtz.2019] muss beachtet werden, dass die Haftung der Schichten im Allgemeinen bei der Verwendung von epoxidharzbasierten Matrixwerkstoffen besser ist als bei thermoplastischen Polymeren. Ein weiterer Faktor sind die höheren Verarbeitungstemperaturen von Thermoplasten im Vergleich zu Epoxidharzen, die zum Aufschmelzen des Polymers erforderlich sind. Dadurch können sich erhöhte Eigenspannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten ergeben.

Im Gegensatz dazu kommen Polymere ohne Härter aus und weisen thermoplastische Eigenschaften auf. Ein intensiv genutzter thermoplastischer Werkstoff ist Polyamid, welches sich aus Amidgruppen in verschiedenen Konfigurationen zusammensetzt. Die Zahl in der Werkstoffbezeichnung bei PA (Beispiel PA6) steht dabei für die Anzahl der Kohlenstoffatome in einer Wiederholungseinheit. Die Eigenschaften der verschiedenen Polyamide unterscheiden sich kaum [Flock.2012]. Polyamid erweicht bei höheren Temperaturen und kann somit in eine neue Form gebracht werden. Zur Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit wird PA teilweise mit Glasfasern verstärkt. [Baur.2007]

Behrens et al. [**BerndArno.2017**] nutzt zusätzlich zum normalen Matrixwerkstoff PA6 mit Kohlefaserverstärkung an den Grenzflächen zu Metallschichten je einen $0,2\text{ mm}$ dicken Film PA6 ohne Faserverstärkung. Dieser soll die Haftung verbessern und verhindern, dass sich bei hohen Fügedrücken Fasern direkt an die Metalloberfläche anlegen, ohne dass durch den Matrixwerkstoff eine Haftung entstehen kann. Dies kann also als Möglichkeit angesehen werden, die Haftfestigkeit ohne zusätzlichen Haftvermittler zu erhöhen. Ein Nachteil ist der verringerte Faseranteil des Matrixwerkstoffes, so dass dadurch geringere Festigkeiten in Zug- oder Biegebeanspruchungen hervorgerufen werden können.

Der geometrische Aufbau des Verbundes beeinflusst auch unabhängig von der Materialauswahl die Eigenschaften. Wie in Untersuchungen gezeigt werden konnte, hat für symmetrische Verbunde die Kerndicke einen großen Einfluss auf die spezifischen mechanischen Eigenschaften. Wollmann et al. [**Wollmann.2018**] stellt einem 2 mm dickem Aluminiumblech einen Verbund mit gleicher Dichte gegenüber. Dieser setzt sich beispielhaft aus zwei Stahlblechen mit $0,25\text{ mm}$ Dicke und einer 1 mm dicken kohlefaserverstärkten Polymerschicht dazwischen zusammen. In einer weiteren analytischen Betrachtung zeigt sich, dass die mechanischen Eigenschaften stark von der Kerndicke abhängen und mit steigendem Gewichtsanteil der Deckbleche durchweg verschlechtern. Somit sollte die Blechdicke der Deckbleche in einem dreilagigen Verbund so dünn wie möglich gewählt werden. Dabei muss die anisotrope Eigenschaftsverteilung der Faserverstärkung besonders beachtet werden.

Diagramm aus Wollmann.18 mit Festigkeit nach Dicke Kern/Bleche

Bild: Einteilung anhand verschiedener Werkstoffe und Aufbauten

Einteilung anhand von: Symetrie, Anzahl Lagen, Werkstoff Metall, Werkstoff Matrix, Faserverstärkung

2.1.3 Haftungsmechanismen

Die sogenannte Haftung ist für die Funktionsweise und Fertigung von FML bedeutend. Haftung kann als Stärke der Bindung zweier Werkstoffe miteinander definiert werden [**Mann.1994**]. Eine andere Definition beschreibt die Haftung σ_H als innere Kraft F_i auf die wahre Oberfläche A_w bezogen, was die jeweilige Rauheit der Oberfläche mit einschließt ?? [**Bischof.1993**].

$$\sigma_H = \frac{F_i}{A_w} \quad (2)$$

Diese innere Kraft kann nicht durch eine einzelne Prüfmethode gemessen werden. Auch eine Messung der wahren Oberfläche ist nur mit hohem Aufwand und fehlerbehaftet durchführbar [**Brockmann.1969**]. Daher wird ein neuer Ausdruck eingeführt, die Verbundfestigkeit σ_v , die als Quotient der messbaren äußeren Kräfte F_a und der geometrischen Oberfläche A_g definiert ist (siehe ??). Die geometrische Oberfläche entspricht der belasteten Fläche (Breite b und Überlappungslänge l) [**Habenicht.2009**].

$$\sigma_v = \frac{F_a}{A_g} \quad (3)$$

Bei der Belastung des Verbundes kann es zum Bruch an der Verbindung, im Werkstoff oder in einer gemischten Weise kommen. Dies wird als adhesives oder kohäsives Versagen oder als Mischbruch bezeichnet. Der Wert σ_v muss daher mit den Versagenscharakteristika genannt werden, um eine Aussage über die Haftung zu treffen [Pan.2016].

Der Begriff der Haftung lässt sich in Adhäsions- und Kohäsionsmechanismen unterteilen. Im Inneren einer homogenen Werkstoffphase ist die Energieverteilung isotrop, gleichmäßige Kohäsionskräfte bewirken einen Zusammenhalt des Grundwerkstoffs. An der Oberfläche wirken andere energetische Zustände, die bei der Betrachtung von Grenzflächenvorgängen entscheidend sind. Die Adhäsion charakterisiert eine Kraft, die in den jeweiligen Oberflächen von zwei Fügepartnern wirkt und dabei vom Abstand der Oberflächen abhängt. Diese Kraft wird durch die Überlagerung von physikalischen, chemischen und mechanischen Wechselwirkungen an den Grenzflächen der Fügeile hervorgerufen [Habenicht.2009]. Gute Haftungseigenschaften werden auch durch einen geringen Abstand zwischen zwei Fügepartnern, in diesem Fall zwischen Kunststoff und Metall, erreicht. Molekülabstände zwischen $0,1 - 0,5 \text{ nm}$ führen zu hohen Bindungskräften [Suchentrunk.2007].

Verschiedene Theorien beschreiben die unterschiedlichen Adhäsionsmechanismen. Dazu zählen die mechanische Adhäsion sowie die spezifische Adhäsion, welche weiter unterteilt werden können. Einen Überblick darüber verschafft ??.

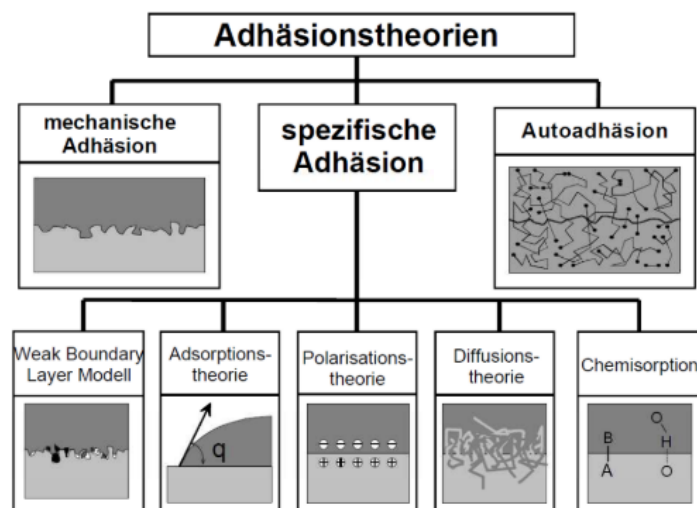


Abb. 2: Unterteilung der Adhäsionstheorien nach [Garbassi.1998]

Mechanische Adhäsion

Unter mechanischer Adhäsion wird die geometrische Verankerung eines Stoffes, in diesem Fall des Matrixwerkstoffes, in der Metalloberfläche verstanden. Durch gezielte Maßnahmen wie dem

mechanischen Aufrauen lassen sich zusätzlich zur immer vorhandenen Oberflächenstruktur zusätzliche Kapillaren, Poren und Hinterschneidungen erzeugen. Wenn der Matrixwerkstoff im flüssigen Zustand in diese Strukturen fließt oder gepresst wird und darin erstarrt, kommt es zu einer formschlüssigen mechanischen Verankerung (auch Druckknopfeffekt genannt), wie in ?? verdeutlicht wird [**Habenicht.2009, Mittal.1999**].

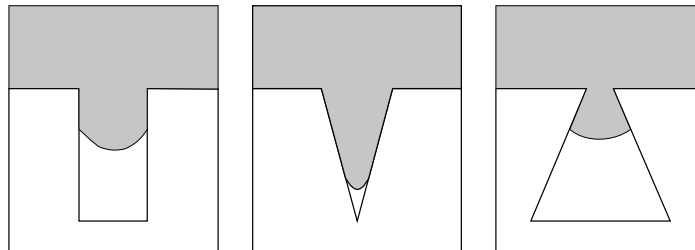


Abb. 3: Schematische Darstellung des Druckknopfeffektes [**Mittal.1999**]

Die Tiefe des Eindringens in die Struktur ist von den Benetzungseigenschaften des eindringenden Fluids sowie dem Gegendruck des eingeschlossenen Gases abhängig [**Mittal.1999**]. Nur ein geringer Anteil der Poren und Oberflächenstrukturen weist die erforderliche Geometrie für eine Verankerung auf. Jede Oberflächenvergrößerung, auch die nicht für den Druckknopfeffekt geeigneten Poren, führt zu zusätzlichen Beiträgen der einzelnen Haftmechanismen [**Flock.b**].

Autoadhäsion

Beim Kontakt chemisch identischer Stoffe kommt es zu einer Selbstdiffusion in den Grenzbereichen, bedingt durch die mikrobrownsche Bewegung und abhängig von Zeit, Temperatur und Druck. Dabei wird eine starke stoffliche Verbindung zwischen den Körpern aufgebaut, allerdings nur bei identischen Werkstoffen.

Für Thermoplaste ist die mikrobrownsche Bewegung von Makromolekülsegmenten von entscheidender Bedeutung für den Effekt der Autoadhäsion. Dabei sind die Molekülsegmente unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g nicht ausreichend beweglich [**SEIDLER.1971**]. Autoadhäsion findet erst bei Temperaturen über T_g statt. Einige Kunststoffe wie Polyethylen weisen bei Raumtemperatur kein adhäsives Verhalten auf, während diese makromolekularen Stoffe bei Erwärmung einen adhäsiven Zustand erreichen können [**SEIDLER.1971**].

Für Metalle kann das Prinzip der Autoadhäsion nicht angewandt werden, da durch das Metallgitter die Effekte nicht eintreten. Für FML ist die Autoadhäsion aufgrund der Materialkombination kein zutreffender Haftungsmechanismus. [**Flock.b**]

Spezifische Adhäsion

Die Theorie der spezifischen Adhäsion setzt sich aus Betrachtungen von chemischen, physikalischen und thermodynamischen Effekten zusammen und gilt im Bereich von 0,2 bis 1 nm. Nach

[Garbassi.1998] gliedert sich die Theorie in die folgenden Modellvorstellungen.

Weak-Boundary-Layer An der Grenzschicht der beiden Fügepartner kann eine sogenannte schwache Grenzschicht (englisch: Weak-Boundary-Layer, WBL) zum Adhäsionsversagen führen. Diese trennt die beiden Grundwerkstoffe und verhindert eine direkte Anbindung [Schroer.1994]. Ursache dafür können Gaseinschlüsse, Verunreinigungen oder auch Oxidationsprodukte auf der Oberfläche sein. Die WBL kann durch geeignete Vorbehandlungen entfernt werden. [Flock.b]

Polarisationstheorie Der Polarisationstheorie zufolge führt die Existenz polarer funktioneller Gruppen in den beiden Grundwerkstoffen bei geringem Abstand ($<5 \cdot 10^{[-10]} m$) zu einer Kraftwirkung, die als Adhäsion bezeichnet werden kann. Grund für die Krafteinwirkung sind Wasserstoffbrücken und Dipolwechselwirkungen [Weiss.2002]. Die Bindungskräfte sind abhängig vom Dipolmoment der Atome bzw. Moleküle und lassen sich durch den Einbau von sauerstoffhaltigen funktionellen Gruppen verbessern [Garbassi.1998]. Die in unpolaren Werkstoffen auftretenden Bindungskräfte können mit dieser Theorie nicht erklärt werden [Habenicht.2009].

Diffusionstheorie Anlehnend an die Autoadhäsionstheorie erklärt die Diffusionstheorie auftretende Bindungskräfte mit einer Selbstdiffusion von Molekülsegmenten innerhalb der Grenzschicht der Fügeteile [Gromov.1963]. Auch diese Diffusionsbewegungen können mit der mikrobrownschen Molekularbewegung begründet werden. Neben der chemischen Verträglichkeit der Fügeteile muss die Molekularmasse und -struktur sowie der Kristallinitäts- und Vernetzungsgrad der Polymere beachtet werden [Habenicht.2009]. Für FML ist die Diffusionstheorie nur bei Verwendung eines Haftvermittlers relevant, da sich dieser an das Metall anbindet und eine Diffusion zwischen Haftvermittler und Polymer stattfindet [Suchentrunk.2007]. Andere Untersuchungen konnten einen Diffusionseffekt an der Grenzschicht von Metall und Polymer und eine Bewegung von Metallatomen in die Kunststoffschicht beobachten [Faupel.2003].

Chemisorption Chemisorption (Kurzform von chemischer Adhäsion) bedeutet die Bindung von Molekülen durch eine kovalente Bindung an der Oberfläche des Substrats. Diese Bindungen lassen sich nicht einfach nachweisen, allerdings wurden exotherme Reaktionen und zwischen Kupfer und Polymeren beobachtet, die auf eine chemische Bindung an der Grenzfläche zu Kupfer schließen lassen [Schroer.1994]. Im Zusammenhang mit FML wird der Effekt der Chemisorption vorrangig im Zusammenhang mit der Verwendung von Haftvermittler betrachtet. Dieser ist auf die Fügepartner abgestimmt und sorgt für eine chemische Anbindung der Werkstoffe. Haftvermittler basieren teilweise auf siliziumorganischen Verbindungen und werden auf die Oberfläche des Metalls aufgetragen [Zucchi.2006]. Bei richtiger Abstimmung wird die Festigkeit der Klebung und die Beständigkeit von Klebung und Oberfläche gegen feuchte Atmosphäre verbessert [Habenicht.2009].

Oberflächenenergie

Die Oberflächenenergie wird als Arbeit definiert, die aufgewendet werden muss um eine Oberfläche um eine Flächeneinheit zu vergrößern [Flock.2012]. Benetzung bedeutet die Verteilung einer Flüssigkeit auf einer festen Oberfläche. Ändert sich der Phasenzustand der Flüssigkeit und erstarrt diese an der Oberfläche, wird diese Benetzung mit Adhesion gleichgesetzt [Habenicht.2009]. Je höher die Oberflächenenergie des Feststoffes im Vergleich zur Oberflächenenergie der Flüssigkeit ist, desto besser ist die Benetzungsfähigkeit der flüssigen Phase [Flock.2012]. Durch die Kenntnis der Oberflächenenergien der Fügepartner kann also eine quantitative Bewertung der Adhäsionsenergien durchgeführt werden [Nikolova.2005]. Die Einschätzung von Oberflächenenergien kann anhand der Tropfenmethode durchgeführt werden, bei der ein Wassertropfen an der zu untersuchenden Oberfläche hängt und anhand der Tropfenform bzw. Kontaktwinkel die Oberflächenspannung errechnet werden kann [Flock.2012].

Weitere Infos zur Tropfenmethode

Die Oberflächenenergie beeinflusst die Benetzungsfähigkeit der Oberfläche mit einer Flüssigkeit und kann auf verschiedene Arten modifiziert werden. Ähnlich wie die mechanische Adhesion kann die Oberflächenenergie durch das Einbringen einer zusätzlichen Rauheit in die Oberfläche erhöht werden. Auch chemische oder plasmaelektrische Verfahren werden dazu angewendet. XXXQuellen

Grenzschichtmodelle

Bei der flächigen Verbindung von Metall und Kunststoff bildet sich eine Grenzschicht aus, welche die auftretende Haftung beeinflusst. Nach [Haefer.1987] gibt es fünf verschiedene Möglichkeiten zur Ausbildung dieser Grenzschicht, welche sich in der jeweils gebildeten Mikrostruktur unterscheiden. Für den Fall von FML können die frei folgenden Modelle angewendet werden [Flock.2012].

Monoschicht - Monoschicht Es wird ein scharfer Übergang zwischen Metall und Polymer ausgebildet, welcher innerhalb weniger Atomlagen stattfindet. Dies tritt auf, wenn Verunreinigungen an der Oberfläche vorliegen oder die Stoffe nicht ineinander löslich sind. Chemische Bindungen oder Diffusionsprozesse treten selten oder gar nicht auf [Mann.1993, Haefer.1987].

Mechanische Verankerung Voraussetzung für mechanische Verankerung sind raue, unebene oder poröse Oberflächen. Das Polymer erstarrt in den Unebenheiten und verankert sich im Metall, wenn die Oberfläche benetzbar und das flüssige Polymer beweglich ist [Haefer.1987]. Die Haftung beruht also ausschließlich auf dem Formschluss der beiden Fügeteile [Flock.2012].

Chemische Bindung Bei der chemischen Bindung bildet sich die Grenzschicht durch einen konstanten chemischen Aufbau über mehrere Atomlagen hinweg aus. Die Haftung ist das Resultat

tat chemischer Reaktionen zwischen Metall und Polymer [Haefer.1987]. Voraussetzung ist die Reaktionsfähigkeit der Oberflächen, die durch Oxidation, Verschmutzung oder Verunreinigung herabgesetzt werden kann.

Reale Grenzschicht Die drei beschriebenen Grenzschichten treten in der Realität nicht getrennt voneinander auf, so dass sich aus der Wechselwirkung eine reale Grenzschicht ergibt. Diese reale Grenzschicht bildet sich abhängig von der Materialkombination, vom Zustand der Ausgangsmaterialien sowie von den Verarbeitungsbedingungen aus [Flock.2012].

Beeinflussung der Haftung zwischen Metall und Kunststoff

Eine entscheidendes Kriterium für die Verwendung von FML ist es, einen haltbaren und festen Verbund zwischen den einzelnen Lagen sicherzustellen. Wie in ?? dargelegt, sind nicht alle Mechanismen auf die Verbindung von Metall zu Kunststoffen übertragbar. Darum gilt es, Verfahren anzuwenden, die die Haftung in FML erhöhen. Dazu gibt es verschiedene Ansätze wie das mechanische Aufräuen der Oberfläche, eine chemische Behandlung mit Beizen, Beschichtungen, das Aufbringen von Haftvermittlern auf die Metalloberfläche und plasmaelektrische Verfahren. Diese Möglichkeiten sollen hier vorgestellt werden.

Zhou et al. [Zhou.2021] stellt eine Möglichkeit vor, mit der FML auf Magnesiumbasis mithilfe einer Zwischenschicht aus einer eutektischen Mg-Zn-Al-Legierung haltbar verbunden werden. Dazu wurden die Bleche mit Sandstrahlen und Beizen vorbehandelt und mit der Zwischenschicht und einer Epoxidharzmatrix im Heißpressverfahren unter Ultraschalleinwirkung gefügt. Zusätzlich wurden die Kohlefasern mit einer Ni-Schicht beschichtet, um eine bessere Verteilung des Epoxidharzes zu erreichen. Es konnte gezeigt werden, dass sich ein circa $350\text{ }\mu\text{m}$ breiter Übergangsbereich ausbildet, der Anteile an Magnesium-, Aluminium-, Zink- und Kohlenstoffatomen aufweist. Dieser Bereich wird sowohl durch die Applikation der Zwischenschicht als auch durch Diffusion aufgebaut. Eine deutlich höhere interlaminaire Festigkeit ist zu beobachten, da über die Zwischenschicht die Fasern besser an das Magnesiumblech angebunden werden. Dies führt zu erhöhten Biege- und Zugfestigkeiten des Verbundes. Der Verbund versagt ungefähr zeitgleich adhesiv und kohäsiv in der Matrix, so dass eine optimale Ausnutzung der Werkstoffe erreicht wurde.

Ein andere Möglichkeit der Oberflächenvorbehandlung zeigt Wu et al. [Wu.2016]. Gegenüber klassischen mechanischen Methoden oder Lasereinsatz hat eine Vorbehandlung durch eine Art Funkenerosion verbunden mit einem Beizprozess (CrO_3 -Lösung) Vorteile hinsichtlich der geometrischen Flexibilität und der effizienten Anwendbarkeit bei größeren Bauteilen und Stückzahlen. Auch hat dieser „microarc“genannte Funkenerosionsprozess große Vorteile hinsichtlich des Korrosionsschutzes und Hydrophobie und führt zu selbstreinigenden Oberflächen [Lu.2015]. Mit den genannten Methoden konnte eine Oberfläche mit sehr hoher Rauheit und Mikro- und Nanooberflächenstrukturen erzeugt werden, die hervorragende wasserabweisende und damit verbindungsfähige Eigenschaften aufweist.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Haftung stellt Staiger et al. [Staiger.2014] vor. In der Untersuchung werden unter anderem die Metalloberflächen mit Sandstrahlen und Plasmabe-

handlungen bearbeitet. Eine bisher wenig betrachtete Möglichkeit ist die Vorbehandlung des Matrixwerkstoffes, in diesem Fall Polypropylen (PP), mit einer Plasmafunktionalisierung. Dabei werden durch kurze Plasmaentladungen an der Oberfläche funktionale Gruppen angebunden und die adhesiven Eigenschaften des Matrixwerkstoffes deutlich verbessert.

Flock [**Flock.b**] verglich die Haftfestigkeiten von Stahl und Aluminium mit verschiedenen thermoplastischen Polymeren, unter anderen PA66 mit und ohne Glasfaserverstärkung. Dabei wurde für PA66 die höchste Scherzugfestigkeit nachgewiesen, ohne Faserverstärkung wurde eine Mischform zwischen kohäsivem und adhesivem Versagen beobachtet. Mit eingebrachten Glasfasern versagte der Probenverbund rein adhesiv. Von den untersuchten Oberflächenvorbehandlungen konnte die laserstrukturierte Oberfläche mit eigens eingebrachten Hinterschnitten die bei weitem höchste Zugscherfestigkeit verzeichnen. Von den anderen untersuchten Methoden konnte das Sandstrahlen die vergleichsweise höchsten Zugscherfestigkeiten erreichen. Die Plasmaaktivierung der Oberfläche hat einen geringen Einfluss auf die Haftung, diese wird durch den Einsatz aber reproduzierbarer, da die Streuung der Ergebnisse reduziert wird. Die Fügetemperatur wird zwischen 230 °C und 270 °C variiert. Je höher die Fügetemperatur ist, desto besser werden die Haftungseigenschaften, allerdings sinkt für 280 °C die Scherzugfestigkeit. Das kann mit dem seitlichen Austreiben des verflüssigten Kunststoffes aus dem Fügebereich erklärt werden. Dadurch liegen teils Glasfasern direkt am Metall an, ohne dass eine Haftung durch den Matrixwerkstoff hergestellt wird. Somit ist eine zu hohe Fügetemperatur nachteilig und als Optimum wird 270 °C festgestellt.

Bild Laserstrukturiert von Flock

Eine Möglichkeit der Beeinflussung der Oberflächenenergie stellt Gupta et al. [**Gupta.2012**] vor. In der Untersuchung wird AZ31 mit Schwefelsäure geätzt und danach mit einer Wasserstoffperoxid-Lösung behandelt. Dabei konnte die Veränderung des Kontaktwinkels eines Wassertropfens von 140° auf 152° gesteigert werden, was auf eine Erhöhung der Oberflächenenergie hindeutet. Die bei der Vorbehandlung entstehenden Oberflächenstrukturen sind platten- oder nadelförmig aufgebaut und bestehen hauptsächlich aus Magnesium-Wasserstoffverbindungen. Die Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit zeigt schlechtere Ergebnisse für geätzte im Vergleich zu geschliffenen Proben. Dies kann auf die erhöhte Oberflächenrauheit zurückgeführt werden, da Oxidationsprozesse aufgrund der größeren Oberfläche schneller ablaufen.

Eine speziell für Magnesiumlegierungen vorgeschlagene Möglichkeit der Klebevorbereitung ist eine kombinierte mechanische und chemische Oberflächenbehandlung. Dazu schlägt [**Handbuch.1991**] einen vorgeschalteten Strahl- und Schleifschritt vor, um die auf der Oberfläche haftenden Oxide und andere Verunreinigungen mechanisch zu entfernen. Danach schließt sich ein Beizprozess mit einer Lösung aus Salzsäure (HCl), Salpetersäure (HNO_3) und Dichromsäure ($H_2Cr_2O_7$) an. Der Beizvorgang soll bei Raumtemperatur und für eine Minute durchgeführt werden. Abschließend soll die Probe mit Wasser abgespült werden. Diese Empfehlung wird allgemeingültig für alle Magnesiumlegierungen vorgeschlagen, obwohl eine Anpassung an die jeweilige Zusammensetzung erforderlich sein kann. Die Kombination aus mechanischen und chemischen Verfahren bietet den Vorteil, auch starke Oberflächenverunreinigungen und Oxide zuverlässig zu entfernen. Durch eine Variation der mechanischen Vorbehandlung kann eine erwünschte Rauigkeit eingestellt werden.

2.1.4 Herstellung

Kategorisieren nach Zusammensetzung. Lamierte Verbunde Trocken zusammengelegt Eingossen

Es gibt mehrere Möglichkeiten, Verbunde zwischen Metall und Kunststoff herzustellen. Eine Möglichkeit ist das sogenannte Hybridspritzgießen [ridder]. Das Verfahren kann genutzt werden, um Blechbauteile durch Hinterspritzungen mit Polymeren zu versteifen und Funktionen wie Einschraubteile zu integrieren. Dabei werden die Prozessschritte Blechumformen und Verbundherstellung bisher getrennt, auch wenn es Ansätze gibt um die Verfahrensschritte zu kombinieren [LEIKA.2017].

Ein wichtiger Faktor sind die Verarbeitungstemperaturen des Verbundes. Für thermoplastische Matrixwerkstoffe müssen höhere Temperaturen angewendet werden, was auch zu höheren Eigenspannungen im Verbund führt und somit die Lebensdauer verringert. [Alderliesten.2008].

Die grundsätzliche Herstellung von FML gestaltet sich unabhängig der Zusammensetzung des Verbundes immer ähnlich. Im ersten Schritt werden die einzelnen Werkstoffe vorbereitet, beispielsweise Oberflächen aufgeraut oder entfettet. Danach werden die Lagen in einem Werkzeug oder ähnlichem zusammengeführt, so dass der Aufbau lose gepackt (englisch „stacking“). Im dritten Schritt wird eine Temperaturerhöhung durchgeführt sowie eine flächige Druckbeaufschlagung. Die erforderliche Temperatur richtet sich nach dem verwendeten Matrixwerkstoff.

Vorbereitung

Wie in ?? beschrieben, gibt es verschiedene Ansätze und Technologien für eine Oberflächenvorbehandlung. An dieser Stelle sollen Referenzen genannt werden, um die Implementierung anhand der Ergebnisse der Untersuchungen auszurichten.

Um die Haftung zwischen den Lagen eines Verbundwerkstoffes zu optimieren, können mechanische, chemische, elektrische oder Beschichtungsprozesse angewendet werden. Diese sorgen für die Anwendung der in ?? beschriebenen Effekte. In den meisten Fällen werden chemische Bindungen sowie ein mechanisches Verklammern der Oberflächen durch erhöhte Oberflächenrauheit angestrebt.

Eine Oberflächenrauheit kann durch Sand- oder Partikelstrahlen, Schleifen, Prägen, Laserstrukturieren, oder andere Prozesse eingebracht werden. XXXY

Kuhtz et al. [Kuhtz.2019] stellt eine Möglichkeit der mechanischen Oberflächenvorbehandlung mit Prägewerkzeugen vor. In diese können mit unterschiedlichen Methoden Strukturen eingebracht werden, welche bis zu $300\text{ }\mu\text{m}$ hohe regelmäßige oder unregelmäßige Rauheiten in Bleche einbringen können. Diese Oberflächenstrukturen sorgen für eine mechanische Bindung, welche durch chemische Vorbehandlungen und damit verbundene molekulare Bindung in der Grenzschicht verbessert werden können (siehe auch ??). Die Prägewerkzeuge wurden mit einer Flächenpressung von 125 MPa auf die Werkstücke gedrückt und somit die Oberflächenstrukturen in Bleche der Magnesiumlegierung AZ31 und Aluminiumlegierung AL 5754 eingebracht. Höhere

Pressungen führten nicht gleichmäßig zu einer Erhöhung der Rauheit der Blechoberfläche. Es konnte keine komplette Übertragung der Rauheit festgestellt werden.

Flock [**Flock.b**] stellt fest, dass eine laserstrukturierte Oberfläche zu hervorragenden Haftungseigenschaften führt, allerdings ein aufwendiges Verfahren darstellt. Eine Verwendung bei größeren Flächen schließt der Autor aus und begründet so, dass das Verfahren nicht für eine Serienfertigung einzusetzen. Als im Verhältnis zum Aufwand gutes Verfahren wird das Sandstrahlen der Oberfläche vorgeschlagen, da so gute Rauigkeiten mit etablierter Technik erreicht werden können. Auch eine Plasmabehandlung der Oberfläche verbessert die Haftung für PA66 deutlich, stellt allerdings auch ein aufwendiges Verfahren dar.

Pan et al. [**Pan.2016**] stellte einen Verbund aus Magnesiumblechen der Legierung AZ31 und einer Epoxidharzmatrix mit unidirektionalen Kohlenfaserverstärkungen her. Dazu wurde das Blech mit Aluminiumoxidpartikeln bestrahlt, um die Oberfläche aufzurauen. Vor dem Fügeprozess wurde das Blech mit Aceton gereinigt. Durch die Erhöhung der Oberflächenrauheit konnte ein höherer Effekt der mechanischen Verankerung erreicht werden. Allerdings schließt die Untersuchung mit dem Hinweis auf erforderliche weitere Vorbehandlungen wie Beizprozesse oder dem Einsatz von Haftvermittlern, da die in der Studie angewendete Strategie nur zu einem Bruchteil der möglichen und erforderlichen Festigkeit geführt hat.

Im LEIKA Projekt [**LEIKA.2017**] wurden Verbunde aus Magnesiumbauteilen mit Matrixwerkstoffen und einer Faserverstärkung hergestellt und Strategien zur Verbesserung der Haftung untersucht. Als Matrixwerkstoff wurde der Thermoplast Polyamid 6 verwendet. Faserverstärkungen aus Kohlefaser und Glasfasern wurden untersucht. Die Oberfläche des Magnesiumbauteils aus der Legierung AZ31B wurde mit sauren oder basischen Lösungen behandelt, um die nichtmetallischen Bestandteile des Oberflächenaufbaus abzulösen, die beim stark oxidierenden Magnesium auf der Oberfläche gebildet werden. Bei diesem Prozess wird die native Metalloberfläche passiviert und mit stark polaren Gruppen versehen. An diese Gruppen bindet sich der organische Polymeranteil des Haftvermittlers und sorgt für eine Verdichtung der Grenzschicht, so dass eine festere Verbindung zwischen Polymermatrix und Metalloberfläche entsteht. Außerdem vermindert der vorher aufgetragene Haftvermittler die erneute Korrosion der Metalloberfläche.

Kazemi et al. [**Kazemi.2020**] untersuchte die Einflüsse von Oberflächenvorbehandlungen auf die Eigenschaften eines Verbundes von Titan und kohlefaserverstärktem Epoxidharz. Unter anderem wurden Sandstrahl-, elektrochemische, elektrolytische, chemische Beiz- und Oxidationsprozesse untersucht. Mikrolichtbogenoxidation stellte sich dabei als sehr effektive, aber auch aufwendige Methode der Oberflächenvorbehandlung heraus.

Hausbeck [**Hausbeck.2012**] untersuchte die Beschichtung von medizinischen Stents aus der biodegradablen Magnesiumlegierung WE43 mit sogenannten funktionellen Organosilanen, um die Korrosionsprozesse und den Materialabbau zu verlangsamen. Die Organosilane binden sich mit kovalenten Bindungen an das Metall an, was durch Oxide und andere Verunreinigungen an der Oberfläche behindert wird. Eine vorgestellte Möglichkeit ist das Säubern der Proben mit Salpetersäure. Dazu wird eine Lösung mit 80 g/l Salpetersäure hergestellt (beispielsweise 82,23 ml HNO_3 auf einen Liter mit Reinstwasser aufgefüllt). Die so hergestellte Lösung wird schnell gerührt und die Probe für circa 2 Sekunden eingetaucht. Nach dieser vergleichsweise geringen Einwirkzeit sind die Verunreinigungen abgelöst. Als weitere Vorbereitung zur Anbindung von Silanen schlägt [**Hausbeck.2012**] einen Tauchschrift mit gesättigter isopropanolischer

Natronlauge unter Ultraschalleinwirkung vor. Diese Natronvorbehandlung wirkt sich sehr günstig auf die Anbindungsfähigkeit der Silangruppen aus, da so an der Magnesiumoberfläche Hydroxidgruppen gebildet werden [Hausbeck.2012, Gou.2004], hat aber keinen Einfluss auf die Reinheit der Oberfläche.

Ein Möglichkeit der Oberflächenvorbehandlung stellt das sogenannte microarc oxidation-Verfahren dar, welches durch Stromeinwirkung eine keramische Schicht an der Oberfläche des Substrates entstehen lässt. verschiedene Elektrolyte (Lösungen) möglich, meist wässrige Lösungen mit Si- oder P Anteil [Cai.2006] untersucht die Auswirkung auf AZ91. je nach Elektrolyt schichtdicke von ca. $20\text{ }\mu\text{m}$ eingestellt, und andere Schichtzusammensetzung. Auch Spannung beeinflusst Schichtzusammensetzung, Porosität und Morphologie. deutlich verbesserte Korrosionseigenschaften.

Fügeprozesse

Der Fügeprozess schließt sich an einen Stacking-Vorgang an, also das Schichten der unterschiedlichen Lagen zu einem losen Verbund.

Mousa et al. [Mousa.2017] untersuchte die Herstellung eines dreilagigen Verbundes durch direktes Warmrollfügen. Dabei werden die einzelnen Schichten, in diesem Fall zwei Bleche und eine Polymerschicht ohne zusätzliche Faserverstärkung, in einem kontinuierlichen Prozess erwärmt und zwischen zwei Walzen zusammengepresst. Vor dem Fügevorgang wurden die für die Versuche genutzten Al 1100 Bleche mit Ethanol gereinigt und mit einem Schleifpapier (Körnung 50) abgeschliffen, so dass eine Rauheit von $5,6\text{ }\mu\text{m}$ erreicht werden konnte. Nach der Oberflächenvorbehandlung und der Erwärmung der Blechoberflächen wurden die drei Lagen gestapelt und durch Walzen mit 65 mm Durchmesser in der Dicke reduziert (bei 30 rpm). Eine Dickenreduktion von 60% stellte sich dabei als optimal heraus bezüglich einer hohen zu erreichenden Schälfestigkeit. Der Grund dafür ist die verbesserte Haftung durch höhere Anpressdrücke und den damit verbundenen interlock des Polymers an der Metalloberfläche. Eine Dickenreduktion um 75% zeigte eine geringere Schälfestigkeit, da die hohen Anpressdrücke zum seitlichen Austreten des Kunststoffes aus dem Verbund führten. Dabei kommen Fasern in direkten Kontakt mit einer Metalllage, was keine Haftung erzeugt.

Ein klassischer Ansatz für die Fertigung von faserversärkten Kunststoffbauteilen ist die Anwendung von Vakuumtechnik, um einen erforderlichen Druck aufzubauen, und noch gebundene Gase aus dem Matrixwerkstoff zu ziehen. Das Verfahren funktioniert über eine Folien, welche das Bauteil abdichtet, und einen Schlauch, über eine Vakuumpumpe eine Druckminderung im abgedichteten Bereich erreicht. Durch den Unterschied zum Umgebungsdruck wird der Matrixwerkstoff verdichtet und Lufteinschlüsse werden entfernt. Die Technik wird häufig bei Epoxidharzbauteilen verwendet [Bellini.2020]. Der Aufbau mit evakuiertem Vakuumsack wird erhitzt, was zur Aushärtung führt. Thermoplastische Matrixwerkstoffe können meist ohne Vakuumeinsatz verarbeitet werden, da durch ein separates Extrudierverfahren feste Bauteile ohne weitere Gaseinschlüsse hergestellt werden können.

Bei Epoxidharzen muss die Aushärtetemperatur erreicht und für eine bestimmte Zeit gehalten werden, bei Polymerkunststoffen wie PA wird die Glasübergangstemperatur überschritten, so

dass der Kunststoff mindestens teilweise verflüssigt. Durch den applizierten Druck, beispielsweise mit einem Stempel oder durch Vakuumeinfluss, wird der Matrixwerkstoff in die Vertiefungen der Metalloberfläche gedrückt, so dass die Rauheiten weitgehend ausgefüllt werden. Epoxidharze härten bei der Temperatur über längere Zeiträume aus, während für Polymere die Temperatur wieder gesenkt, der Druck aber aufrechterhalten wird. Somit ergibt sich eine starre Matrix, welche die Fasern miteinander und mit den Metallblechen verbindet. [Sinmazcelik.2011]

Da die Aushärtezeiten von Epoxidharzen sehr lang sein können, wurden die Bauteile meist einzeln gefertigt und häufig per Hand vorbereitet. Dieses Verfahren bedingt den hohen Preis der Bauteile und führt zu einem geringen Automatisierungsgrad. Thermoplaste müssen nur erwärmt und abgekühlt werden, was auch innerhalb einer kurzen Zeit erfolgen kann. Das Potenzial für eine Serienfertigung ist bei Verwendung von thermoplastischen Kunststoffen daher höher und wird intensiv untersucht.

Eine Produktionsmöglichkeit ist das sogenannte Roll Forming, also das Fügen von FML in einem kontinuierlichen, plattierähnlichen Walzprozess. Dabei können auch Profile aus mehreren Lagen hergestellt werden, sowohl mit Prepreg-Verfahren (Epoxidharzmatrix, welche im Anschluss ausgehärtet wird) als auch mit thermoplastischer Matrix [Long.2007]. Das Verfahren bietet Vorteile hinsichtlich der geringeren Rückfederung und Eigenspannung. Ein Auspressen des Matrixwerkstoffes kann durch ungleiche Druckverteilung während der Umformung auftreten. [Long.2007]

Mousa [Mousa.2015] stellt fest, dass eine erhöhte Rauheit zwar die Oberfläche vergrößert, allerdings auch eine Benetzung durch ein Polymer durch zu kleine Oberflächenstrukturen behindert werden kann. Zusätzlich bilden eingebrachte Rauheiten immer Spannungskonzentrationsstellen und können somit Anrisse begünstigen.

Nach Kuhtz et al. [Kuhtz.2019] muss beachtet werden, dass die Haftung der Schichten im Allgemeinen bei der Verwendung von harzbasierten Matrixwerkstoffen besser ist als bei thermoplastischen Polymeren. Ein weiterer Faktor sind die höheren Verarbeitungstemperaturen von Thermoplasten im Vergleich zu Epoxidharzen, die zum Aufschmelzen des Polymers erforderlich sind. Dadurch können sich erhöhte Eigenspannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten ergeben. In der vorliegenden Untersuchung werden die Bleche mit Prägewerkzeugen aufgeraut. Die Fertigung der Proben wurde mit einem auf Polyolefinen basierten Haftvermittler Cox 391 von Nolax durchgeführt. Die geprägten Metallbleche wurden mit dem Laminattape (PA6 Matrix mit Kohlefaserverstärkung) gestapelt und der Verbund auf 250 °C erhitzt.

Für die Herstellung von geringen Stückzahlen beispielsweise in der Luftfahrt ist daher eine Verwendung von Epoxidharz denkbar, allerdings ist die Anwendung von thermoplastischen Kunststoffen aufgrund der geringeren Verarbeitungszeit deutlich besser für eine Massenfertigung geeignet. Thermoplaste können mehrmals aufgeschmolzen werden, was eine Umformung in mehreren Schritten ermöglicht. [ReyesV..2000, Wollmann.2018]

Durch die Verwendung von zusätzlichen Kunststofflagen ohne Faserverstärkung an den Grenzflächen zur jeweiligen Metalllage kann die Haftung deutlich verbessert werden, da so ein direkter Kontakt zwischen Fasern und Metall verhindert wird. Zudem kann eine ideale Benetzung stattfinden. [Marissen.1988].

Pärnänen et al. [Parnanen.2012] untersuchte die Möglichkeit der Herstellung von FML mit

der Magnesiumlegierung AZ31B-H24 und verglich die Versagenseigenschaften des Verbundes mit bestehenden Glare Werkstoffen (Glare 5-3/2-0,4 und Glare 5-3/2-0,5). Dabei wurde als Blechwerkstoff ein 0,5 mm dickes Magnesiumblech der genannten Legierung genutzt, welches mit einem Salpetersäurebad und leichtem Sandstrahlen vorbehandelt wurde.

Alderliesten [**Alderliesten.2009**] stellt fest, dass durch die Wärmeeinwirkung während der Herstellung von Verbundwerkstoffen Eigenspannungen entstehen, da Metalle, Matrixwerkstoffe und Fasern unterschiedliche Kontraktionen beim Abkühlen erfahren. Diese Spannungen wirken sich negativ auf das gewünschte Eigenschaftsprofil aus und können zu früherem unkontrollierten Risswachstum, ungewünschtem Versagensverhalten, Verzug sowie adhesivem Versagen führen. Um die Nachteile der entstehenden Spannungen umzukehren, können komplett gefügte Bauteile in einer Streckziehoperation bis zur plastischen Deformation gezogen werden. Dazu schlägt [**Delft.1**] das Einspannen des Bauteils von beiden Seiten mit Klemmbacken vor, ohne die Oberfläche zu beschädigen. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Walzen, um eine minimale Dickenreduktion des Verbundes und damit eine leichte Überlagerung der Spannungen zu erzielen [**Vogelesang.1989**].

Staiger et al. [**Staiger.2014**] stellt eine Möglichkeit vor, das Fügen von Thermoplast zu Faserverstärkung im gleichen Schritt erfolgen zu lassen wie den Fügeprozess von Metall zum Matrixwerkstoff. Dazu können Fasern aus thermoplastischen Kunststoffen mit den Verstärkungsfasern verwebt, aber nicht erhitzt werden. Diese Gewebematten sollen dann mit den Blechen gestapelt werden. In diesem Zustand kann durch Erhitzen das Gewebe teilweise aufgeschmolzen und eine Haftung eingestellt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass auch die Fasern vorher beschichtet werden können, um eine verbesserte Haftung zwischen Matrixwerkstoff und Faserverstärkung einzustellen.

Bild von unterschiedlichen Schermodi

Die Fertigungsversuche in [**LEIKA.2017**] wurden in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wurden Faseranteile, Polymermatrixfolien und die Metallbleche mit aufgetragenem Haftvermittler gestapelt. Durch Erwärmung und Druckbeaufschlagung in einer Presse wurden die Polymeranteile aufgeschmolzen und somit die Faseranteile imprägniert. Eine formschlüssige Verbindung von Metall zu Polymer sowie Polymer zu Faseranteil wurde durch das Abkühlen des Kunststoffes im dritten Verfahrensschritt hergestellt. In diesem wurden die Verbunde auf die Zieldicke konsolidiert, aus der Presse entnommen und nachbearbeitet. Für die Erwärmungszone wurde eine Werkzeugtemperatur von 280 °C gewählt bei einer Heizdauer von 130s. Die Werkzeuge für die Abkühlstufe wurden mit 80 °C temperiert und für jeweils 30 s eingesetzt. [**LEIKA.2017**]

Bild von LEIKA über Stufen der Fertigung

Carrado et al. [**Carrado.2010**] stellt einen Fügeprozess mithilfe einer Rollenvorrichtung vor. Dieser Vorgang wird als Press-Joining-Rolling bezeichnet, übersetzt Pressfügerollen. Dabei werden die Metallkomponenten, in diesem Fall zwei Stahlbleche, erst gereinigt und mit einem Epoxidharz als Kleber beschichtet. Nach einer Erwärmung auf 254 °C wird das untere Blech in der Rollvorrichtung zwischen zwei Walzen mit einer thermoplastischen Folie gefügt. Nach der Erwärmung des oberen Bleches wird ein dreilagiger symmetrischer Sandwichwerkstoff in der Rollanlage zweistufig hergestellt.

Weiterverarbeitung

Behrens et al. [Behrens.2014] zeigt eine Möglichkeit auf, aus vorbehandelten Werkstoffen in einem Schritt einen dreidimensionalen Verbund herzustellen. Dazu wird mit erhöhten Temperaturen gearbeitet, um den thermoplastischen Matrixwerkstoff formbar zu machen. Das Konzept des Tiefziehens thermoplastischer Werkstoffe wird als Thermoforming bezeichnet und unter anderem von Engelmann et al. [Engelmann.2012] beschrieben. Die Tiefziehfähigkeit von nicht faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen ist durch hohe mögliche Dehnung sehr gut. Faserverstärkte Kunststoffe weisen durch die nicht dehnbaren Fasern andere Mechanismen auf. Diese werden von Friedrich et al. [Friedrich.1997] auf fünf Mechanismen zusammengefasst: Harzdurchfluss, Querfließen der Lagen, Abgleiten zwischen Lagen, Scherung zwischen Lagen und Rotation von Lagen. Diese Mechanismen müssen bei der Auslegung eines Formgebungsprozesses beachtet werden. Behrens et al. [Behrens.2014] weist darauf hin, dass für den verwendeten Kunststoff nur ein bestimmtes Temperaturfenster für die Verarbeitung zulässig ist. Bei zu niedriger Temperatur kann es zu Fehlern bei der Umformung kommen, wenn der Werkstoff einer zu hohen Temperatur ausgesetzt wird, kann es zur chemischen Zersetzung der Verbindungen und damit zur Zerstörung kommen. Die Temperaturverteilung sowie die Faserrichtung beeinflusst den Umformvorgang und das Ergebnis maßgeblich.

untersuchter Ansatz: Fügeschritt und Umformschritt in einem, so auch bei [BerndArno.2017]. Ein Werkzeug mit konstanter Temperatur, wird geöffnet um kalten losen Verbund einzulegen, durch Schließen wärmt Verbund auch und Thermoplast schmilzt, durch eingebaute Kühlung kühlt Verbund ab und erstarrt. Bei 160 °C Öffnen Werkzeug und Entnahme des Verbundes. Innerhalb von 4 min kann das Werkzeug wieder auf Temperatur gebracht werden. In der Untersuchung erwies sich eine maximale Temperatur von 250 °C als optimal für die Herstellung einer Haftung. Bei niedrigeren Temperaturen kam es nicht zu einer Haftung, während bei hohen Temperaturen um 280 °C Gaseinschlüsse vorliegen. Vorgang: lose Zusammensetzung des Verbundes, dann 30 s bei erhöhter Temperatur, Kühlung aktiviert, bei 160 °C Teil entnommen. Bei Umformoperation zu Hutprofil mit symmetrischem Verbund keine Niederhalterkraft, um Auspressen Matrixwerkstoff zu verhindern. Dadurch Materialanhäufung in Eckenbereichen durch Steifigkeit der Bleche.

Blala et al. [Blala.2021] untersuchte die Möglichkeit, einen symmetrischen Glare Verbund, also zwei Blechen Al 2024 mit einer mittigen Lage Glasfasern in einer Epoxidharzmatrix im Prepreg-Verfahren herzustellen. In dem sogenannten Hot-Press-Verfahren wurde eine Niederhalterkraft im Flanschbereich aufgebracht. Dies führte zur deutlich weniger Faltenbildung im Flanschbereich und damit verbunden weniger Delamination. Es wurden geringere Dehnungen und Ausdünnungen durch die erhöhte Niederhalterkraft beobachtet.

Nach Pohl [Pohl.2000] kann eine Thermoplastische Matrix statt in einem separaten Fügevorgang auch im Umformprozess mit der Metallage gefügt werden. Dazu muss ein mindestens partielles Aufschmelzen erfolgen, um den Kunststoff formbar zu machen und den Fließwiderstand deutlich zu verringern. Ohne ein Aufschmelzen kann keine direkte Haftung zwischen Matrix und Metall entstehen. Die Verwendung eines Haftvermittlers kann die Haftung dabei deutlich verbessern. Eine Tiefziehprozess von FML ist bei der Verwendung eines Sandwichwerkstoffes günstiger, also eines beidseitig mit Metallblechen bedeckten Kunststoffes. Bei Verwendung eines asymmetrischen Aufbaus kann es zu Anhaftungen des Matrixkunststoffes am Werkzeug

kommen. Daher werden häufig beidseitig des Kunststoffes Bleche eingesetzt, um im Prozess auf bekannte Reibungseigenschaften zurückgreifen zu können. [Behrens.2014]

Behrens et al. [Behrens.2014] untersuchte die Umformung eines Verbundes aus Al 5754 beidseitig einer Kunststoffschicht aus PA6 mit einem Glasfaseranteil von 40 % und untersuchten Dicken von 1, 2 und 2,5 mm. Der Fügevorgang erfolgte ohne Haftvermittler und im Umformschritt. Dazu wurden die Lagen erst vorbehandelt, dann zusammengelegt, im Ofen erhitzt und als Verbund umgeformt. Es wurde eine Napfgeometrie umgeformt. Die Temperatur von Stempel, Matrize und Niederhalter wurde auf 270 °C eingestellt. Um ein Herausdrücken des Matrixwerkstoffes im flüssigen Zustand zu verhindern, wurde der Niederhalter nicht mit Kraft auf den Flansch des Werkstückes gedrückt, sondern in einem Abstand von 0,5 mm gehalten. Nach der Umformung wurde das Werkstück im Werkzeug zum Abkühlen gelassen und erst mit erstarrter Matrix herausgenommen. Während des Tiefziehvorgangs wurde Matrixwerkstoff zwischen den Blechen herausgepresst. Dabei kann der Einfluss der unidirektionalen Faserverstärkung in der ungleichmäßigen Verteilung beobachtet werden. Der Kunststoff tritt vorrangig quer zur Faser aus, da in dieser Richtung die Fasern beweglicher sind. Längs der Faserrichtung tritt deutlich weniger PA6 aus, da die Fasern in dieser Richtung starrer liegen und durch die Reibung eine Bewegung des Kunststoffes behindert wird. Bei direktem Kontakt zwischen Kunststoff und Werkzeug färbt sich das PA6 dunkel, was auf eine chemische Reaktion durch zu hohe lokale Temperaturen schließen lässt. Die Bleche verhindern eine solche Reaktion an einer Stelle und verteilen die Wärme besser. Durch die nicht aufgebrachte Niederhalterkraft traten Falten erster Ordnung im Flanschbereich auf. Auf der Innenseite drückten die Bleche in den weicheren Kunststoff hinein. Im Bereich des Stempelradius nahmen beide Deckbleche einen größeren Abstand ein und es kam zu einer Materialanhäufung des Kernmaterials. Dadurch wurden Faserlagen überlappt, rotiert und teilweise geknickt. Die Materialanhäufung wurde bei beiden verwendeten Kerndicken beobachtet. Jede Abweichung der Faserrichtung von der Belastungsrichtung senkt die Festigkeit des Bauteils und sollte verhindert werden.

Nur faserverstärkten Kunststoff geformt, aber mit normalem Tiefziehwerkzeug. Thermoplaste sinnvoll, weil kurze Prozesszeiten und damit für Serienfertigung geeignet. Umformung von faserverstärkten Kunststoffen durch 3 Mechanismen: Faserdehnung und -glättung, abgleiten der Lagen in Radien Veränderung der Faserlage zueinander. Faserdehnung kann bei entsprechenden Vorprodukten ausgeschlossen werden. Werkzeugtemperatur 110 bis 120 °C, 260 °C in 45 s Proben temperatur, Erwärmung durch Infrarotheizer Matrix PA6 mit Glasfaseranteil, 1,5 mm dick 1600 kN als Konsolidierungskraft auf 260 · 170 mm also einer Grundfläche von 44200 mm² In Ecken kommt es zur Anhäufung von Fasern und zum Bruch. Durch Klemmen der Fasern unter dem Stempel wird der Verlauf unterbrochen und die Faserlage geschwächt. Diese Fehlstellen können durch nachträgliches Aufschmelzen der Fasern untersucht werden. Durch Fasern unterschiedlicher Materialnachzug aus dem Flanschbereich, ähnliche Mechanismen wie beim Blechtiefziehen Kunststoff ist besonders sensitiv auf Temperaturveränderungen. Schon geringe Abkühlung in engen Geometrien im Bodenbereich führen zu Verfestigung, geringerer Faserbeweglichkeit und damit zu einer erhöhten Risswahrscheinlichkeit. Behrens.2017

Behrens.2019 Prozesszeiten unter 20 s bringen als Ziel für Massenfertigung. Dazu konstant erwärmtes Werkzeug, Polymermatrix durch erhitztes Stahlblech 280 °C verflüssigt. Formgebung und Fügevorgang in einem Arbeitsschritt Vorbehandlung von Stahl mit Galvanischer Beschichtung, um raue Oberfläche zu erzeugen. Während einer Wärmebehandlung bei Temperaturen bis 500 °C diffundieren Eisenatome in die aufgebrachte Zinkschicht und formen mit Zinkatomen ei-

ne Eisen-Zink-Schicht. Diese zeichnet sich durch erhöhte Korrosionsbeständigkeit, verbesserter Schweißbarkeit und höherer Härte aus als Tauchbeschichtete Teile. Der Vorteil bezüglich der Fügeigenschaften ist eine deutliche erhöhte Oberflächenrauheit, die zu verbesserter Haftung führt [XXX 12, 13 nach Behrens.2019] Die erzeugte Schicht soll durch mechanical interlocking zu erhöhter Haftung führen, gleichzeitig ein fehlerfreies Umformprodukt ermöglichen. Metall und faserverstärktes Polymer in unterschiedlichen Öfen erwärmt. Durch kälteres Werkzeug kann Werkstück bei Umformung abkühlen und direkt entnommen werden, ohne das Werkzeug abzukühlen. Stahlblech mit Dicke 1 mm, Matrix PA6 mit 0/90°, 66 % Anteil Glasfasern, 1,5 mm dick. Schmelztemperatur des Polymer sind 220 °C Scherzugversuche nach DIN 1465 gestaltet, Bleche mit Isopropanol gereinigt, im Werkzeug auf 280 °C erhitzt, bei höchster Temperatur verpresst mit 8 MPa Dickenreduzierung um 0,1 mm, nach 10 s Haltezeit Werkzeug abgekühlt Je rauer die Oberfläche und je länger die Einwirkzeit der Flächenpressung, desto größer die Scherfestigkeit des Verbundes. Aber schwacher Zusammenhang, Vermutung: Überlagerung von mechanischen und chemischen Haftungseffekten HX340LAD zeigt für längere Einwirkzeiten der Pressung bessere Haftung. Für DP800 stellt sich ein gegenteiliger Effekt ein Versagensarten: kohäsives Versagen der Zinkschicht und Matrixversagen. Bei Werkstoff mit niedrigeren Scherfestigkeiten (DP800) versagt der Werkstoff adhesiv, obwohl teils höhere Rauheitswerte erreicht werden. Beide verwendeten Stähle weisen ähnliche Rauheitswerte und beschichtungen auf, zeigen aber andere Haftungswerte und andere Versagensverhalten. Längere Haltezeiten der Pressung zeigen keinen eindeutigen Effekt auf die Haftung. Bis zu 18 MPa Scherfestigkeit zwischen den Lagen mit der galvanischen Beschichtung erreicht

2.2 Magnesiumlegierungen

Magnesium ist mit einer Dichte von $\rho = 1,74[g][cm^3]$ das leichteste Konstruktionsmetall und bietet ein hohes Potenzial, die immer höheren Anforderungen an den Leichtbau zu erfüllen. Trotzdem andere Werkstoffe wie Stahl oder Aluminium deutlich höhere absolute mechanische Kennwerte aufweisen, zeigt Magnesium im Vergleich der spezifischen Kennwerte Vorteile. Während das spezifische E-Modul der gezeigten Werkstoffe auf einem Niveau liegt, zeigt besonders die Magnesiumlegierung AZ31 eine wesentlich höhere spezifische Dehngrenze, siehe dazu auch ?? [Droeder.1999]

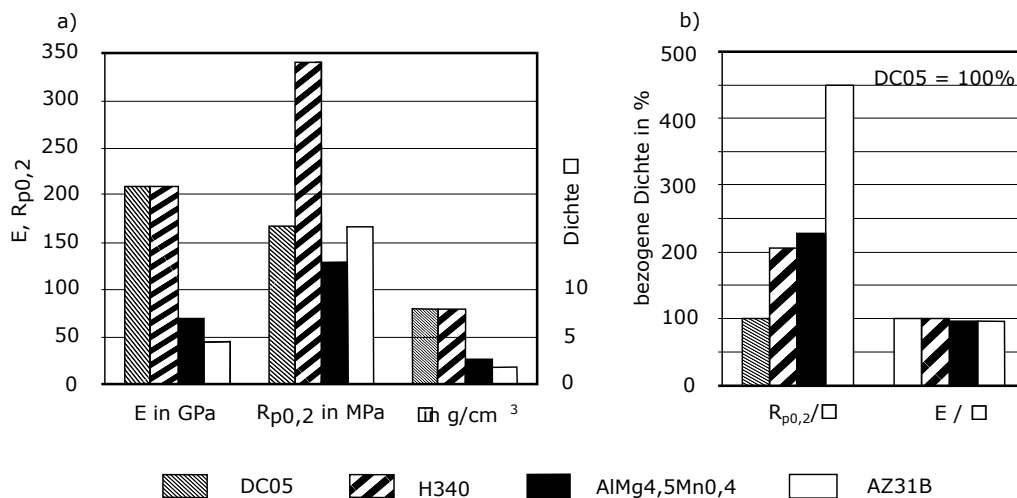


Abb. 4: Mechanische Eigenschaften verschiedener Blechwerkstoffe nach [Droeder.1999] a) E-Modul, Dehngrenze und Dichte von Stahl, Aluminium und Magnesium, b) spezifisches E-Modul und Dehngrenze

Neben der hohen spezifischen Festigkeit bietet Magnesium ein gutes Dämpfungsvermögen, hohe magnetische Abschirmung und eine gute Wärmeleitfähigkeit [.] Dies sind Eigenschaften, die auch im Transportsektor entscheidend für die Anwendung sein können, wie in ?? gezeigt wird. Andere Eigenschaften sind die hohe Beulsteifigkeit von Blechen, hohe elektromagnetische Abschirmung und Wärmeleitfähigkeit sowie die Biokompatibilität [RobertE.Brown.2015, Aghion.2000]. Daher können Magnesiumwerkstoffe auch in der Elektronikindustrie und Medizintechnik Anwendung finden.

Magnesiumlegierungen können als Guß- oder Knetwerkstoffe verarbeitet und eingesetzt werden. Mengenmäßig werden Magnesiumwerkstoffe aktuell vor allem in der Gießereitechnik wegen der sehr guten Gußeigenschaften eingesetzt [AbuFarha.2007]. Knetlegierungen machen nur circa 10 % der verarbeiteten Magnesiumlegierungen aus [You.2017]. Diese bieten aufgrund der durch die Umformung induzierte Festigkeitessteigerung und das günstige Umformgefüge vorteilhafte Eigenschaften im Vergleich zum Gußgefüge [En.2001].

2.2.1 Magnesiumlegierung ZAX210

2.2.2 Eigenschaften und Herstellung von Magnesium-Gießband

2.2.3 Oberflächenvorbehandlungen und Einflüsse

[F]FKraftN [Fi]Fiinnere KraftN [tg]Tg Glasübergangstemperatur°C [Aw]Aw wahre Oberflächemm² [rpm]rpmrounds per minute, Umdrehungen pro Minutes⁻¹

[FML]FMLFibre Metal Laminate [AW]AWAluminiumwerkstoff [Glare]GlareGlass Reinforced Aluminium Laminate [Arall]ArallAramid Reinforced Aluminium Laminate [Carall]CarallCarbon Fibre

Reinforced Aluminium Laminate [Mg]MgMagnesium [Zn]ZnZink [Al]AlAluminium [Ni]NiNickel
[PA]PAPolyamid [PP]PPPolypropylen

3 Zielstellung

Verbunde aus Metallblechen und faserverstärkten Kunststoffen werden weiter untersucht und verbreitet eingesetzt. Ein Fokus der Entwicklung ist die Verwendung von alternativen Leichtbauwerkstoffen wie Magnesium. Dieses zeichnet sich durch hohe spezifische Festigkeiten aus und kann zu signifikanten Gewichtseinsparungen führen. Weiterhin sind die guten Dämpfungseigenschaften von Magnesium erwähnenswert. Magnesium wird in dieser Untersuchung als Blechwerkstoff verwendet. Da die Umformung des Blechwerkstoffes mitgedacht werden soll, wird die Magnesiumlegierung ZAX210 verwendet, die eine verbesserte Umformbarkeit bei guten mechanischen Eigenschaften ermöglicht.

Aktuelle Untersuchungen widmen sich der Weiterverarbeitung von FML in der automatisierten Fertigung durch Umformen. Als vielversprechender Ansatz hat sich die Verwendung von faserverstärkten Polymeren herausgestellt, da durch erneutes Erwärmen und Aufschmelzen eine Formgebung von intakten Bauteilen möglich ist. In dieser Untersuchung wird als Matrixwerkstoff PA6 verwendet, welches als Band mit einer unidirektionalen Endlosfaserverstärkung aus Glasfasern versehen ist.

Tabelle mech Eigenschaften ZAX210 und PA6

Ein Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Erarbeitung von Möglichkeiten der Oberflächenvorbehandlung, mit denen die Haftfestigkeit von Metall-Kunststoff-Verbindungen erhöht werden kann. Daraus sollen mehrere Möglichkeiten ermittelt werden, die mit vertretbarem Aufwand im Labormaßstab umgesetzt werden können. Die entsprechenden Vorbehandlungen sollen durch quantitative und qualitative Verfahren untersucht werden.

Um die Haftfestigkeiten des Verbundes bei unterschiedlichen Vorbehandlungen zu validieren, sollen passende Versuchsaufbauten erstellt werden. Die entsprechenden Proben sollen im Labormaßstab gefertigt werden. Es sollen Versuche durchgeführt werden, um verschiedene Versagensarten zu untersuchen, unter anderem Biege- und Scherzugbelastung.

Das Versagensverhalten der Proben in unterschiedlichen Vorbehandlungszuständen soll untersucht und beschrieben. Entsprechende Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Haftfestigkeit des Verbundes sollen aus den Versuchen abgeleitet werden. Dabei soll eine Bewertung der möglichen Technologien hinsichtlich des Nutzens und der Anwendbarkeit im großtechnischen Maßstab erarbeitet werden.

4 Versuchsvorbereitung

Die Verfügbarkeit von Literaturdaten zu Einflüssen auf die Haftung von Kunststoff - Magnesiumblech ist gering. Um die Einflüsse verschiedener Vorbehandlungsmethoden auf die Haftung des Verbundes einschätzen zu können, werden Scherzugversuche durchgeführt. Die Durchführung der Versuche orientiert sich an DIN-Normen, welche die Geometrie und andere Eigenschaften der Proben festlegen. Die Anwendung des untersuchten Verbundes beinhaltet Biegeoperationen, welche mithilfe von Biegeversuchen untersucht werden sollen. Dabei wird eine anwendungsbezogene Geometrie genutzt, welche in das konstruierte Werkzeug übernommen wird.

Um die Anzahl der gefertigten Proben zu reduzieren, wurde eine zweistufige Untersuchung durchgeführt. Diese besteht im ersten Schritt aus einer Untersuchung der Haftung durch Scherzugversuche. Anhand dieser Untersuchung wurde eine Vorbehandlungskombination ausgewählt, welche sehr gute Haftungseigenschaften aufweist, und in Biegeversuchen weiter untersucht. Durch Biegeversuche werden die Möglichkeiten der Biegeumformung des Verbundes untersucht sowie die Arten des Versagens der Grenzschicht.

4.1 Scherzugversuche

4.1.1 Probengeometrie

4.1.2 Probenherstellung

4.2 Biegeversuche

4.2.1 Probengeometrie

4.2.2 Probenherstellung

4.3 Versuchsplanung

Symbole

h Höhe des Deckbleches