

Frank Podlesak

Entwicklung und Verifizierung eines vorlochfreien
mechanischen Fügeverfahrens zum Verbinden von
Leichtmetallen und Faser-Kunststoff-Verbunden

**Wissenschaftliche Schriftenreihe
CHEMNITZER FÜGETECHNIK**

Band 4

Prof. Dr. Peter Mayr (Hrsg.)

Frank Podlesak

Entwicklung und Verifizierung eines
vorlochfreien mechanischen Fügeverfahrens
zum Verbinden von Leichtmetallen und
Faser-Kunststoff-Verbunden



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Universitätsverlag Chemnitz
2017

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Titelgrafik: Frank Podlesak
Satz/Layout: Frank Podlesak

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

readbox unipress
in der readbox publishing GmbH
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
<http://unipress.readbox.net>

ISSN 2198-6797 (Druck), ISSN 2198-6789 (Online)

ISBN 978-3-96100-016-6

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-220249>

**Entwicklung und Verifizierung eines vorlochfreien
mechanischen Fügeverfahrens zum Verbinden von
Leichtmetallen und Faser-Kunststoff-Verbunden**

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Frank Podlesak
geboren am 3. Mai 1984 in Karl-Marx-Stadt

Tag der Einreichung: 28. November 2016
Tag der Verteidigung: 26. Januar 2017

Gutachter:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Peter Mayr
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Guntram Wagner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Ansatz	3
1.3	Zielstellung	6
2	Stand der Technik	9
2.1	Mischbauweise	9
2.1.1	Allgemein	9
2.1.2	Leichtmetalle	10
2.1.3	Faserverstärkte Kunststoffe (FKV)	14
2.2	Vergleichbare Fügeverfahren in der Mischbauweise	16
2.2.1	Allgemein	16
2.2.2	Blindnieten	18
2.2.3	Stanznieten	19
2.2.4	Clinchen	21
2.2.5	Fließlochformen	22
2.2.6	Fließlochformendes Schrauben (FDS)	24
2.2.7	Warmformen	26
2.2.8	Thermomechanisches Ausformfügen (TAF)	27
2.2.9	Thermoclinchen	28
2.2.10	Wärmeleitungsfügen	28
2.2.11	Blindniettechnologien	36
2.2.12	Schädigungsmechanismen	37
2.3	Technologie des Modifizierten Blindnietens	39
2.3.1	Aufbau und Funktion des Nietes	39
2.3.2	Prozessablauf	40

2.3.3	Prozessgrößen	50
2.3.4	Randbedingungen aus verwandten Verfahren . .	51
2.3.5	Konstruktive Randbedingungen	52
2.4	Qualitätskriterien	53
2.5	Auslegung	55
3	Experimentelles	61
3.1	Herangehensweise	61
3.2	Eingesetzter Blindniet	62
3.3	Randbedingungen	64
3.4	Versuchsanlage	69
3.5	Prozessablauf	72
3.6	Werkstoffe	74
3.6.1	Metallische Werkstoffe	74
3.6.2	Faserverstärkte Kunststoffe (FKV)	76
3.6.3	Materialkombinationen	78
3.7	Versuchsplan	79
3.8	Prozessuntersuchungen	79
3.9	Probencharakterisierung	83
3.9.1	Optische Bewertung	83
3.9.2	Schliffproben	84
3.9.3	Faserschädigung	85
3.10	Mechanisch technologische Prüfung	86
3.10.1	Kerbzugfestigkeit	86
3.10.2	Scherzug- und Kopfzugfestigkeit	86
3.10.3	Dynamische Festigkeit	89
4	Ergebnisse und Diskussion	95
4.1	Prozesscharakteristik	95
4.2	Fügestellenausbildung bei Metall/FKV Verbindungen .	98
4.3	Fügestellenausbildung bei Metall/Metall Verbindungen .	104
4.4	Optimierung - Der Weg zum richtigen Parametersatz . .	106
4.5	Temperaturbestimmung	111
4.6	Buchsenqualität	115
4.7	Faserschädigung	118
4.8	Umformarbeit	121
4.9	Mechanisch Technologische Gütewerte	124

4.9.1	Kerbzugfestigkeit	124
4.9.2	Kopf- und Scherzugkräfte	125
4.9.3	Dynamische Festigkeit	133
4.10	Vergleich zum konventionellen Blindnieten	135
4.11	Vergleich zu anderen Verfahren	138
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	141
6	Ausblick	145
	Literaturverzeichnis	147
	Abbildungsverzeichnis	157
	Tabellenverzeichnis	161
	Stichwortverzeichnis	162

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangssituation

In vielen Industriebereichen, insbesondere im Automobilbau wird fortwährend eine Verbesserung der Produkteigenschaften angestrebt. Ein aktuelles Thema ist dabei der Leichtbau, mit dem gewichtsreduzierte Konstruktionen unter Beibehaltung von Festigkeit und Steifigkeit ermöglicht werden. Ausgehend von niedrig legierten Stahlblechen, die noch vor wenigen Jahrzehnten fast ausschließlich im Karosseriebau verwendet wurden, lässt sich eine Gewichtsersparnis über verschiedene Lösungswege erreichen:

- **Legieren:** Durch Legierungselemente und Wärmebehandlungen werden die Festigkeitseigenschaften des Stahls bei gleichbleibender Dichte verbessert. Aktuelle Entwicklungen gehen zu Komplexphasenstahlsorten und borlegierten Vergütungsstählen (z.B. 22MnB5).
- **Leichtmetalle:** Stahlbleche werden durch Bleche oder Profile aus Aluminium- oder Magnesiumlegierungen ersetzt. Durch die geringe Dichte dieser Werkstoffe kann das Bauteilgewicht reduziert werden.

- **Faser-Kunststoff-Verbunde:** Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) besitzen eine hohe Zugfestigkeit bei geringer Dichte. Sie sind jedoch stets auf Zug und nicht auf Druck zu belasten.

Das werkstoffspezifische Leichtbaupotential lässt sich mit dem notwendigen Bauteilgewicht bei gleichbleibender Belastbarkeit unter Einsatz der verschiedenen Materialien zeigen (siehe Abbildung 1.1).

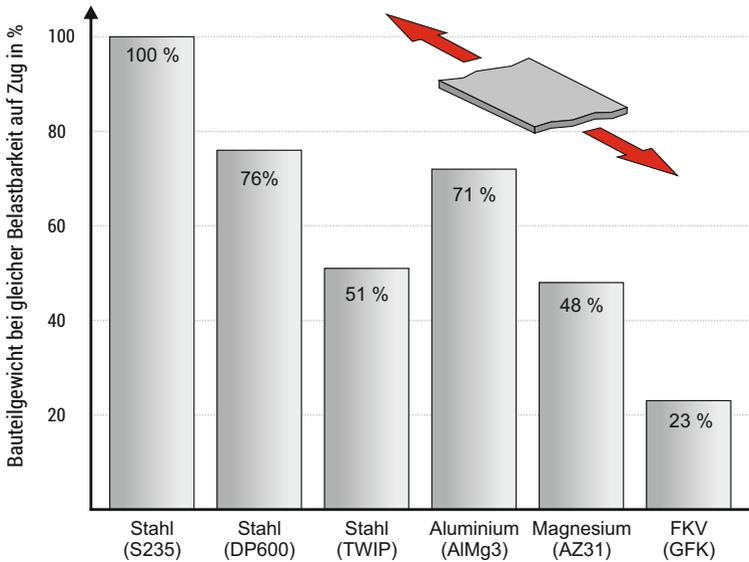


Abbildung 1.1: Gewichtseinsparung bei gleichbleibender Bruchlast auf Zug durch den Einsatz alternativer Werkstoffe im Vergleich zum niedriglegierten Stahl S235 [1, 2]

Der Trend im Karosseriebau geht dahin, die oben genannten Lösungswege zu kombinieren. Bei der Verbundbauweise, beziehungsweise dem Multi-Material-Design werden die spezifischen Eigenschaften von hochfesten Stahlliegierungen, Leichtmetallen und FKV so kombiniert, dass sie lokal den größten Gewichtsvorteil gewährleisten und die Gesamtkonstruktion optimiert wird. Eine große Herausforderung bei der Verbund-

bauweise ist das Verbinden der unterschiedlichen Werkstoffe. Aufgrund der unterschiedlichen chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften können konventionelle Schweißverfahren nicht eingesetzt werden. Vor allem das Fügen der Metalle mit einem Faser-Kunststoff-Verbund ist problematisch. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit dem Kleben, dem Schmelzkleben und mechanischen Fügeverfahren. Lösungen sind damit zwar geschaffen, es bestehen jedoch oftmals Probleme hinsichtlich einer hohen Streubreite in den Festigkeitswerten, langen Prozesszeiten oder einer starken Schädigung des FKV durch Faserzerstörung oder Delamination.

1.2 Ansatz

Das konventionelle Blindnieten besitzt aufgrund großer Prozesstoleranz und hoher statischer und dynamischer Belastbarkeit Vorzüge, die vor allem bei sicherheitsrelevanten Bauteilen genutzt werden können. Außerdem lassen sich im Gegensatz zum Schweißen und gegenüber anderen mechanischen Fügeverfahren nahezu alle Werkstoffe miteinander fügen, ohne dass deren Eigenschaften aufgrund von Umformung oder Wärmeeintrag beeinflusst werden. Ein Nachteil besteht jedoch darin, dass die zu fügenden Bauteile über ein Loch verfügen müssen. Dieses muss nicht nur einen exakten Durchmesser besitzen, damit der Niet problemfrei eingeführt werden kann, die Löcher der Bauteile müssen bei Überlappverbindungen zudem fluchten, erfordern also einen erhöhten Aufwand bei Fertigung und Montage. Im automatisierten Bereich besteht zudem das Problem der Lochfindung. Industrieroboter oder ähnliche Automatisierungslösungen benötigen eine aufwändige Sensorik zur Lochfindung, um einen Niet in ein Bohrloch setzen zu können. Werden Löcher für die Nietverbindung erst in der Montage gesetzt, kommt es zur Spanbildung, was zur Verunreinigung von Bauteilen führt und oft unerwünscht ist. Sind faserverstärkte Kunststoffe Teil einer Nietverbindung, werden diese darüber hinaus durch das Bohren stark geschädigt. Es wird der Faserverlauf lokal zerstört und es treten Delaminationserscheinungen zwischen den Schichten des faserverstärkten Kunststoffs auf [3]. Es ist

von Vorteil, wenn auf das Vorlochen verzichtet und die Schädigung des FKV Bauteils verringert werden kann. Das modifizierte Blindnieten stellt eine Weiterentwicklung des konventionellen Blindnietens dar. Dabei wird der verwendete Blindniet rotiert, mit einer definierten Kraft auf sich überlappende Bleche gedrückt und damit durch diese getrieben. Es entsteht eine vorloCHFfreie Nietverbindung. Der Prozessablauf ist schematisch in Abbildung 1.2 dargestellt.

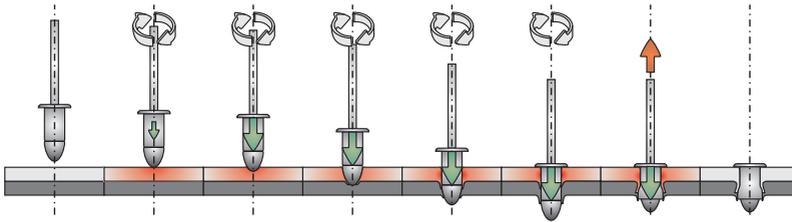


Abbildung 1.2: Prinzip des Modifizierten Blindnietens

Das Modifizierte Blindnieten wird in folgende Schritte eingeteilt:

- **Prozessstart:** Der Niet wird in Rotation versetzt und mit der Fügekraft gegen die Bleche gedrückt. Durch die resultierende Reibung kommt es zum Erwärmen von Niet und Blech.
- **Eindringen in das Metallblech:** Infolge der Kombination aus Reibungswärme und einem vom Niet ausgeübten Druck auf das oben liegende Metallblech wird dieses zunehmend plastifiziert und beginnt zu fließen. Der Niet verdrängt dadurch Material und dringt tiefer in das Blech ein. Dieses bildet eine Buchse in Richtung des Kunststoffes aus.
- **Eindringen in den Kunststoff:** Aufgrund von Wärmeleitung wird die Prozesswärme in das unten liegende FKV Blech übertragen. Ist dessen Matrix thermoplastisch, wird diese lokal angeschmolzen. Die eingebetteten Fasern können sich dadurch begrenzt bewegen. Sowohl der rotierende Niet als auch die sich ausbildende

Buchse des Oberblechs dringen kontinuierlich in das Kunststoffblech ein und verdrängt Matrixmaterial, sowie Fasern. Wie beim Oberblech wird auch hier eine Art Buchse, jedoch in einem geringeren Umfang ausgebildet. Aufgrund des ausgeübten Drucks auf die Bleche fließt das schmelzflüssige thermoplastische Matrixmaterial in entstehende Hinterschnitte und füllt Lücken zwischen den Blechen auf.

- **Ausformen:** Die Nietrotation wird gestoppt und der Niet wird durch eine Zugkraft am Nietdorn ausgeformt. Wie beim konventionellen Blindnieten wird dabei der Nietdorn an einer Sollbruchstelle abgerissen, der Prozess ist abgeschlossen. Die Bleche kühlen ab und es kommt lokal zu einer Anhaftung des Kunststoffs am Metallblech.

1.3 Zielstellung

Ziel der Dissertation ist es, basierend auf der beschriebenen Idee das Modifizierte Blindnieten zu entwickeln. Dabei werden physikalische Mechanismen erforscht und sich daraus ergebende Einflussgrößen und Randbedingungen ermittelt. Aufgrund der Neuheit kann sich an bestehenden Verfahren lediglich orientiert werden. Größtenteils werden aber Kenntnisse erstmalig erforscht und wissenschaftlich bewertet.

Das modifizierte Blindnieten stellt ein neues Verfahren dar, das die Wirkungsweise und Vorzüge verschiedener Prozesse kombiniert und eine Möglichkeit bietet, Leichtmetalle und FKV vorlochfrei zu verbinden.

Das Verfahren vereint die Wirkungsweisen des konventionellen Blindnietens, des Fließlochformens, des Warmformens sowie des Schmelzklebens miteinander. Es entsteht eine Blindnietverbindung, die im Metallbereich eine Buchse entsprechend dem Fließlochformen ausbildet und damit eine Verstärkung der Fügestelle ermöglicht. Im Bereich des FKV wird ein Loch analog zum Warmformen geschaffen, was eine verringerte Faserschädigung ermöglicht und eine Delamination verhindert. Des Weiteren entsteht zwischen Metall und FKV eine Schmelzklebezone, welche die Festigkeit erhöht und eine verdrehsichere Verbindung gewährleistet.

Im ersten Schritt werden die notwendigen theoretischen Grundlagen und Rahmenbedingungen erarbeitet. Das Prinzip des Lochformens ist ein komplexer Vorgang, der intensiver theoretischer Betrachtung bedarf. Anhand vergleichbarer Verfahren werden physikalische Randbedingungen ermittelt und auf das neue Verfahren übertragen. Daraus folgend wird eine entsprechende Versuchsanlage konzipiert und gebaut, die eingehende Untersuchungen zulässt. Diese Anlage wird so ausgelegt, dass sie die erwarteten Prozesskräfte aufnehmen bzw. aufbringen kann. Des Weiteren werden Sensorik und Regelung entwickelt, dass ein frei einstellbarer und

nachvollziehbarer Prozess mit einer hohen Wiederholgenauigkeit realisiert wird. Im Weiteren werden Versuche an verschiedenen Materialkombinationen durchgeführt. Entsprechend der Verbundbauweise sollen dazu primär FKV mit Leichtmetallen verbunden werden. In Hinblick auf das Hauptanwendungsgebiet im Karosseriebau werden dazu Aluminium- und Magnesiumlegierungen, sowie FKV bestehend aus einer thermoplastischen Matrix und einer Verstärkung aus Glas- oder Kohlefasern betrachtet. Aber auch Metall-Metall oder FKV-FKV Verbindungen werden untersucht. So ist es möglich, für die betrachteten Materialkombinationen ein umfassendes Wissen für die Vorgänge beim Fügen zu erhalten. Aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften werden jeweils andere Mechanismen auftreten und vielseitige Auswirkungen auf die gefügten Materialien festzustellen sein.

Ziel ist es, einen völlig neuen Prozess von der Idee soweit zu entwickeln, dass ein fundiertes wissenschaftliches Verständnis für die Vorgänge, die Randbedingungen, sowie die resultierenden Verbindungseigenschaften entsteht und das Verfahren hinsichtlich seiner Einsetzbarkeit richtig einzuordnen. Damit wäre ein Fügeverfahren entwickelt, das der Verbundbauweise und deren Anforderungen gerecht wird und industriell eingesetzt werden kann.

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Mischbauweise

2.1.1 Allgemein

Multi-Material-Design fasst Technologien zusammen, bei denen verschiedenartige Werkstoffe miteinander kombiniert werden. Zweck ist die optimale Ausnutzung der individuellen Vorteile, um gewichtsreduzierte und ressourcenschonende Produkte zu realisieren. Nach [4] kann das Multi-Material-Design in Mischbauweisen und hybride Strukturen untergliedert werden. Bei der Mischbauweise müssen die individuellen Werkstoffe miteinander gefügt werden. Dabei muss die Fügestelle den Anforderungen beider Werkstoffe gerecht werden und darf keinen Schwachpunkt in einer Konstruktion darstellen. Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich hauptsächlich mit der Kombination von Metallen und Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV). Darüber hinaus wird ebenso die Kombination verschiedener Metalle behandelt.

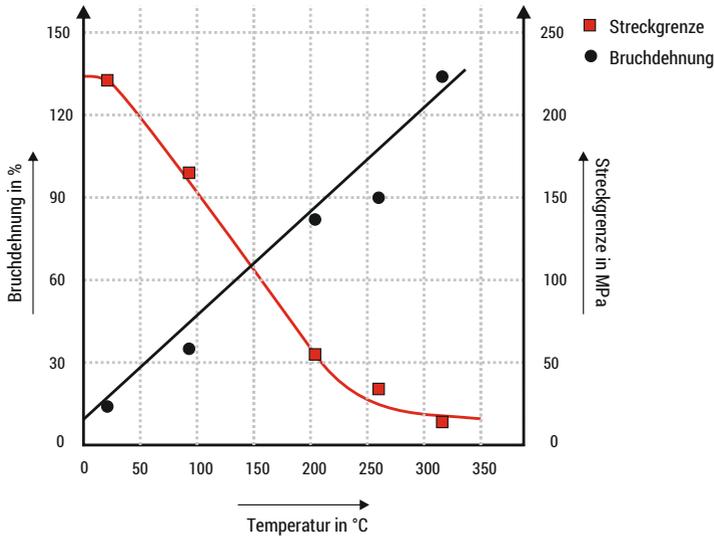


Abbildung 2.1: Bruchdehnung und Streckgrenze der Magnesiumlegierung AZ31 in Abhängigkeit von der Temperatur [6]

2.1.2 Leichtmetalle

Magnesium

Eine geringe Dichte und eine hohe spezifische Festigkeit sind zwei Eigenschaften, die Magnesium insbesondere im Leichtbau zu einem wichtigen Werkstoff machen. Anwendungsfelder findet das Material unter anderem im Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrttechnik und in anderen Industriezweigen. In der Vergangenheit wurde Magnesium vor allem als Gusslegierung eingesetzt [5]. Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde so zum Beispiel der Motorblock des VW Käfers aus Magnesiumguss hergestellt. Der Bedarf an dünnwandigem Blechmaterial hat in der jüngeren Vergangenheit die Entwicklung von Knetlegierungen forciert.

Eigenschaften

Herausstechend sind die hervorragenden Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Magnesium. Begründet liegt das in der hexagonalen Gitterstruktur des Metalls. Im Gegensatz zu Aluminium und Stahl, die kubisch raum- oder flächenzentrierte Gitter besitzen). Das hexagonale Gitter führt jedoch auch zu einer geringen Bruchdehnung und zu einer schlechten Umformbarkeit des Materials, was durch eine geringe Anzahl an Gleitebenen begründet ist. Bei Raumtemperatur ist der Werkstoff praktisch nicht umformbar und führt bei Überlastung zu Sprödbbruch. Das macht vor allem die Weiterverarbeitung von Blechen schwierig. Erst ab einer Temperatur von $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden weitere Gleitebenen im Gitter aktiviert und das Umformvermögen steigt sprunghaft an [5]. In Abbildung 2.1 sind die mechanischen Eigenschaften der Magnesiumlegierung AZ31 in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Deutlich ist hier ein steiler Abfall der Streckgrenze zwischen 200 und $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu sehen. Eine Warmumformung ist somit notwendig. Ein weiteres Merkmal von Magnesium ist eine niedrige Entzündungstemperatur. In der spanenden Bearbeitung kann es so zum Entzünden des Werkstoffes kommen. Unter anderem beim Fräsen, Bohren oder Schleifen muss daher unter verschärften Sicherheitsmaßnahmen erfolgen. Es wird deutlich, dass Magnesium ein Werkstoff mit einem hohen Anwendungspotenzial, aber auch mit einer schwierigen Verarbeitbarkeit ist.

Legierungen

Hauptlegierungselemente in Magnesiumwerkstoffen sind Aluminium und Zink. Die gängigsten Werkstoffe sind die Magnesiumlegierungen AZ31 und AZ91, die mit 3 bzw. 9 % Aluminium und 1 % Zink legiert werden. Die Legierungszusammensetzung, sowie die mechanischen Eigenschaften der Legierungen AZ31 und AZ91 sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Es gibt darüber hinaus Legierungen mit Zusätzen an Zirkonium und seltenen Erden [5], welche die Fließspannung herabsetzen und so die Umformbarkeit verbessern. Weitere Entwicklungen gehen zu einer verbesserten Kriechbeständigkeit. In Abbildung 2.2 ist die Legierungsentwicklung in verschiedene Richtungen zu sehen.

Tabelle 2.1: Die Magnesiumlegierungen AZ31 und AZ91 im Vergleich, Angaben in Gewichtsprozent

Legierung	Al in %	Zn in %	Mn in %	Si in %	Fe in %	Cu in %	Ni in %	Ca in %
AZ31	2,5-3,5	0,5-1,5	0,05-0,4	0,1	0,03	0,1	0,005	0,04
AZ91	8,5-9,5	0,45-0,9	0,17-0,4	bis 0,05	bis 0,004	bis 0,025	bis 0,001	bis 0,001

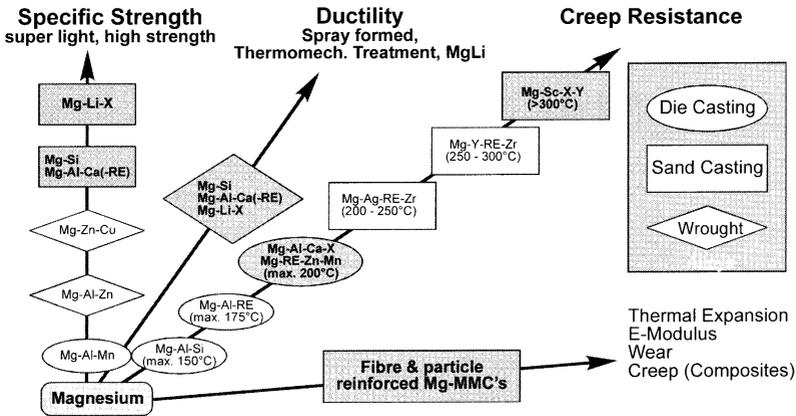


Abbildung 2.2: Legierungsentwicklung von Magnesium hinsichtlich unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften [7]

Einsatz

Aufgrund der Korrosionsanfälligkeit von Magnesium wird der Werkstoff vornehmlich in Bereichen geringer korrosiver Belastung eingesetzt. Im Automobilbau betrifft das vor allem innenliegende Blechbauteile. Am BMW Mini besteht zum Beispiel der Instrumententafelträger aus einer Magnesiumlegierung [8].

Aluminium

Aluminium stellt den Leichtbauwerkstoff mit der häufigsten Nutzung, insbesondere im Automobilbau dar. Als Beispiel dient der Audi A8 in einer Space-Frame-Konstruktion bestehend aus verschiedenen Aluminiumlegierungen [9]. Entscheidend für den Einsatz von Aluminium ist neben den mechanischen Eigenschaften die gute Verarbeitbarkeit des Werkstoffs durch Umformen, Spanen und Schweißen. Durch Verfahren wie Innenhochdruckformen können im Vergleich zu Stahlblechen vielfältigere Geometrien mit hoher Genauigkeit und Oberflächengüte hergestellt werden. Herausragend ist die hohe Korrosionsbeständigkeit von Aluminiumwerkstoffen, da sich an Atmosphäre eine Passivschicht ausbildet. Im Gegensatz zu Stahllegierungen muss keine zusätzliche Schutzschicht wie Verzinkung aufgebracht werden.

Legierungen

Im Gegensatz zu Magnesium gibt es für Aluminium ein deutlich breiteres Spektrum an genutzten Legierungssystemen. Für die Blechherstellung sind dabei Knetlegierungen von Bedeutung. Eingesetzt werden naturharte und kalt- sowie warmaushärtende Legierungen [5].

In Tabelle 2.2 ist die Systematik verschiedener Legierungssysteme und deren Benennung aufgeführt.

Tabelle 2.2: Legierungssysteme für Aluminium

Serie	Bezeichnung	Legierungssystem
1000	EN AW-1XXX	Reinaluminium
2000	EN AW-2XXX	Aluminium + Kupfer
3000	EN AW-3XXX	Aluminium + Mangan
4000	EN AW-4XXX	Aluminium + Silicium
5000	EN AW-5XXX	Aluminium + Magnesium
6000	EN AW-6XXX	Aluminium + Magnesium + Silicium
7000	EN AW-7XXX	Aluminium + Zink
8000	EN AW-8XXX	Sonstige

2.1.3 Faserverstärkte Kunststoffe (FKV)

Bei faserverstärkten Kunststoffen oder Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) handelt es sich nicht, wie bei Metall um isotropes Material, das relativ homogen vorliegt. Wie es der Name von FKV schon ausdrückt, handelt es sich um einen Verbund aus einem Matrixmaterial und gleich- oder verschiedenartigen Verstärkungselementen, die in Faserform vorliegen.

Fasern

Die Fasern bei FKV besitzen in der Regel die Eigenschaft, hohe Zugkräfte aufnehmen zu können. Sie können aus unterschiedlichsten Werkstoffen bestehen und teilen sich demzufolge in folgende Kategorien auf.

- **Anorganische Fasern** bestehen in der Regel aus Glas, können aber auch aus Quarz, Asbest oder Siliciumcarbid sein.
- **Organische Fasern** bestehen meist aus Kohlenstoff oder Aramid
- **Naturfasern** bestehen aus Fasern, die aus Pflanzen gewonnen werden oder von Tieren stammen. Beispiele sind Fasern aus Hanf, Baumwolle, Flachs, Schafwolle usw.
- **Metallfasern** bestehen aus metallischen Legierungen auf Wolfram-, Kupfer- oder Aluminiumbasis

Im Bereich der FKV werden vorrangig anorganische oder organische Fasern verwendet. Diese besitzen eine hohe Zugfestigkeit, einen hohen Elastizitätsmodul und können als Endlosfasern hergestellt werden. Ab einer Länge von 50 mm kann der Begriff der Endlosfasern verwendet werden. Die Verstärkungsfasern können in unterschiedlichster Form zu einem Bauteil angeordnet werden. Dabei muss bedacht werden, dass sie ausschließlich auf Zug belastet werden können und ihre Lage in einem Bauteil Auswirkungen auf dessen makroskopische Eigenschaften hat. Die Verstärkungselemente liegen in der Regel als Rovings, also Bündel aus mehreren Einzelfasern vor.

Matrix

Die Matrix ist für die Fixierung und Verbindung der Fasern zuständig. Kräfte können damit in Fasern eingeleitet werden. Da Fasern zudem nur auf Zug belastet werden können, ist die Matrix für das Aufnehmen von Belastungen auf Scherung, Schub und Druck zuständig. Im Fall der FKV besteht die Matrix aus einem Kunststoff, der in der Regel ein Duroplast oder ein Thermoplast sein kann. Die Gruppen der Kunststoffe sind in Abbildung 2.3 aufgeführt.

Da sich Thermoplaste aus unvernetzten Polymerketten zusammensetzen, können diese durch Erwärmen gegeneinander bewegt werden, der Werkstoff beginnt zu fließen. Ähnlich wie bei Metallen kann ein Thermoplast somit durch Erhitzen umformbar oder schmelzflüssig gemacht werden, wobei dies je nach chemischer Zusammensetzung schon bei 200 bis 300 °C geschieht. Gängige Vertreter von Thermoplasten sind Polyamid oder Polyethylen. Duroplaste bestehen aus Polymerketten, die miteinander vernetzt sind. Diese Verknüpfungen lassen sich auch durch Erhitzen nicht lösen und so bleibt der Werkstoff auch bei hohen Temperaturen formbeständig. Dies hat den Vorteil einer guten thermischen Beständigkeit, besitzt jedoch auch Nachteile, zum Beispiel bei Prozessen, die umformend sind oder ein Schmelzen des Kunststoffs verlangen. Typische Vertreter für Duroplaste sind Epoxid oder Polyester. Beide Arten von Matrixmaterial werden aufgrund ihrer spezifischen Vor- und Nachteile für verschiedene FKV eingesetzt. Auch wenn Thermoplaste aufgrund ihrer guten Verarbeitbarkeit in großen Mengen in Produkten verwendet werden, besitzen die meisten FKV eine duroplastische Matrix. Dies hängt in erster Linie mit der besseren Herstellbarkeit von FKV in Folge der geringeren Viskosität von Duroplasten zusammen. Des Weiteren neigt eine thermoplastische Matrix stärker zum Kriechen unter Belastung und die Beständigkeit des Werkstoffs unter Druckbelastung sinkt [10]. Aufgrund optimierter Herstellungsprozesse nimmt die Bedeutung thermoplastischer Matrices jedoch in den letzten Jahren zu.

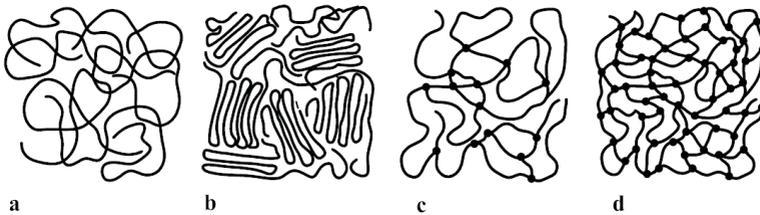


Abbildung 2.3: Darstellung der Kettenstruktur von Kunststoffen: a - amorpher Thermoplast, b - teilkristalliner Thermoplast, c - Elastomer, d - Duroplast [10]

2.2 Vergleichbare Fügeverfahren in der Mischbauweise

2.2.1 Allgemein

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Materialkombinationen, Fügestellengeometrien und Belastungen gibt es eine sehr große Anzahl an potentiellen Fügeverfahren. Eine Einteilung kann nach mehreren Gesichtspunkten (Schlussart, Lösbarkeit, usw.) erfolgen. In diesem Fall sollen sie in mechanische sowie thermische Fügeverfahren, in Kleben und in hybride Verfahren unterteilt werden. Eine Überblicksdarstellung mit möglichen Verfahren ist in Abbildung 2.4 zu sehen.

Bekannte Vertreter der **mechanischen Fügeverfahren** sind das Schrauben, das Nieten und das Clinchen. Gemein ist Ihnen, dass Kräfte über Form- oder Kraftschluss, nicht jedoch über Stoffschluss übertragen werden. Mechanische Fügeverfahren sind größtenteils punktförmige Verbindungen. Für die Mischbauweise sind vor allem umformende Fügeverfahren, wie das Nieten oder das Clinchen von Bedeutung. Zahlreiche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit dem Stanznieten von Metall/FKV Verbindungen [11, 12]. Auch das Clinchen wird in Bezug auf die Mischbauweise untersucht [13]. Eine spezifische Problematik bei Verwendung

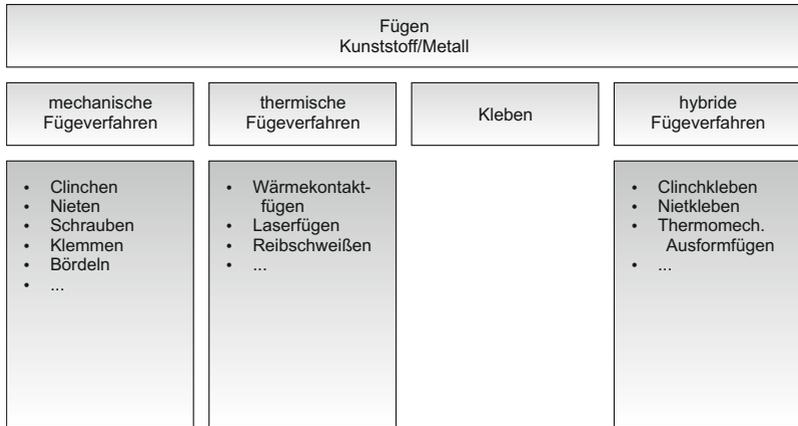


Abbildung 2.4: Fügeverfahren für die Mischbauweise

von FKV ist die Gefahr der Delamination und des Faserbruchs durch hohe Umformgrade [14, 15]. Ein weiteres Problem ist die Kriechneigung der Kunststoffmatrix bei FKV. Eigenspannungen durch umformende Verfahren oder Vorspannung bei Schraubverbindungen werden durch Relaxationserscheinungen abgebaut. Bei Schraubverbindungen geht die Vorspannung somit frühzeitig verloren, bei umformenden Verfahren formt sich der FKV teilweise wieder aus [16, 13].

Thermische Fügeverfahren werden ausschließlich bei FKV mit thermoplastischer Matrix angewandt. Unabhängig vom Verfahren wird diese Matrix über die Schmelztemperatur erhitzt und mit Druck an einen metallischen Fügepartner angehaftet. Die verschiedenen Prozesse, wie Wärmeleitungsfügen, Laserfügen oder Reibschweißen unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Wärmeeinbringung [17, 18, 19, 20]. Allgemein können die thermischen Fügeverfahren als Schmelzkleben bezeichnet werden. Im Gegensatz zum **Kleben** wird kein zusätzlicher Haftwerkstoff eingebracht. Der Vorteil des Klebens und der thermischen Fügeverfahren besteht vor allem in einer geringen Schädigung des FKV, da dieser während des Fügevorgangs kaum mechanisch beansprucht wird. Darüber hinaus handelt es sich um flächige Verbindungen. Um

Verbindungsfestigkeiten zu steigern, kann die Überlappfläche vergrößert werden. Die beschriebenen Verfahren besitzen jedoch ein enges Parameterfenster, da die thermoplastische Matrix geschmolzen werden muss, aber nicht überhitzen darf. Es bestehen zudem hohe Anforderungen an die Oberflächenvorbereitung. Ein Nachteil besteht darin, dass die Fasern eines FKV nicht in die Verbindung einbezogen werden.

Hybride Fügeverfahren nutzen sowohl Elemente aus den mechanischen als auch aus den thermischen Prozessen. Dadurch können Festigkeiten erhöht, und spezifische Nachteile ausgeglichen werden. Da die hybriden Verfahren das größte Potential für hohe Festigkeiten bei geringer Schädigung des FKV besitzen, sind sie aktuell ein Forschungsschwerpunkt. Vielversprechende Verfahren sind beispielsweise das Clinchkleben, das Nietkleben, oder das thermomechanische Ausformfügen [13, 21]. Auch das modifizierte Blindnieten vereint Elemente aus thermischen und mechanischen Fügeverfahren und kann als hybrider Prozess eingestuft werden.

2.2.2 Blindnieten

Der Blindnietprozess ist eines der ältesten mechanischen Fügeverfahren. Vorteile besitzt der Prozess vor allem dadurch, dass die Verbindungseigenschaften und der Prozess maßgeblich durch den Niet, nicht durch das Verarbeitungsgerät oder Parametereinstellungen bestimmt werden. Darüber hinaus lässt sich der Niet dem Anwendungsfall anpassen, indem der Werkstoff oder die Nietgeometrie beeinflusst wird. Grundsätzlich besteht ein Blindniet aus einem Nietdorn und einem Hohnniet. Beide Komponenten können weitreichend modifiziert werden, so dass verschiedenste Ausführungen erhältlich sind. Neben dem klassischen Blindniet gibt es zum Beispiel Becherniete für gute Dichtungen, Hochfestverbinder, Spreizniete und Hülsenfalter für reduzierte Lochleibungskräfte. Sowohl das konventionelle Blindnieten als auch abgewandelte Formen sind Gegenstand der Untersuchung in der Mischbauweise. Das konventionelle Blindnieten ist generell für die Kombination von FKV und Metallblechen geeignet, wobei es beim Vorbohren des FKV zu Schädigungen kommen

kann (siehe Kapitel 2.2.12), aber auch zu Schäden beim Setzprozess aufgrund auftretender Klemmkräfte, welche die Niethülse auf die Bleche ausübt [22]. Zu sehen ist das in Abbildung 2.5. Eine punktuelle Krafteinleitung kann so Delaminationen in faserverstärkten Kunststoffen hervorrufen.

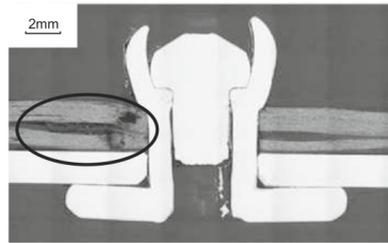


Abbildung 2.5: Delamination beim Blindnieten [22]

2.2.3 Stanznieten

Stanznieten ist ein punktförmiges mechanisches Fügeverfahren, das vor allem für das Verbinden von Metallblechen eingesetzt wird [4, 23, 24]. Das Prinzip ist in Abbildung 2.6 dargestellt. In zahlreichen Veröffentlichungen wird das auch als Self-Piercing Riveting bezeichnete Verfahren in Bezug auf die Mischbauweise untersucht [11, 25, 26, 12, 27]. In [11] werden zum Beispiel Aluminiumblech und ein kohlefaserverstärkter FKV gefügt. Bedingung bei diesem Fügeverfahren ist, dass sich der FKV auf der Oberseite befindet, da sich nur so eine Fügstellengeometrie mit Hinterschnitt bildet. Dieser Hinterschnitt ist entscheidend für die Festigkeit der Verbindung. In Schlifffbildern ist zu sehen, dass der FKV beim Stanznieten erheblich geschädigt wird. Dies liegt zum Einen an der niedrigen Prozesstemperatur, zum Anderen an einem sehr hohen Umformgrad, bei dem es zu Schädigungen an Fasern und Matrix kommt [14, 22]. In Abbildung 2.7 ist eine gefügte Probe in Mischbauweise mit Schädigungen am FKV zu sehen. Der Vorteil des Verfahrens liegt wie beim modifizierten Blindnieten darin, dass keine Fügstellenvorberei-

tung notwendig ist. Damit sich eine gewünschte Geometrie ausbildet, ist hier jedoch ein speziell geformter Gegenstempel, auch als Matrize bezeichnet notwendig. Teilweise wird eine Kombination aus Stanznieten und Kleben angewendet, um die Festigkeit der Verbindung zu erhöhen [11].

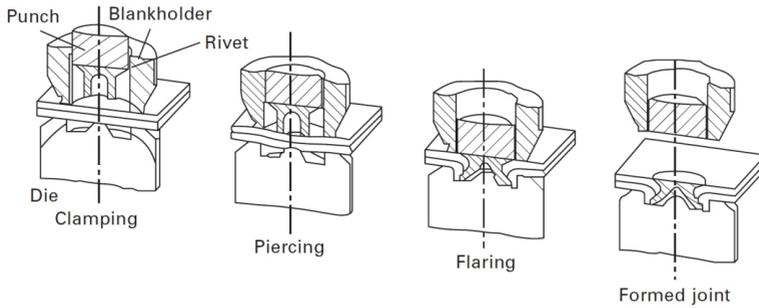


Abbildung 2.6: Prinzip des Stanznietens [28]

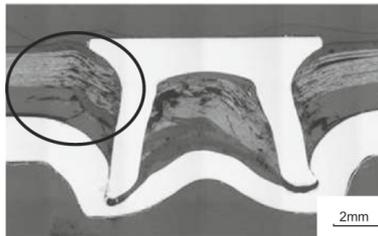


Abbildung 2.7: Delamination beim Stanznieten [22]

2.2.4 Clinchen

Wie das Stanznieten ist auch das Clinchen ein mechanisches Fügeverfahren, das zur Herstellung einer punktförmigen Verbindung dient. Die zu fügenden Bleche werden im Überlappstoß positioniert und ein Stempel formt diese lokal um. Durch einen Gegenstempel wird die Fügegeometrie so beeinflusst, dass die Verbindung Hinterschnitte aufweist und so ein Formschluss gewährleistet ist (siehe Abbildung 2.8). Die Applikation des Verfahrens für die Mischbauweise wird aktuell untersucht, wobei es verschiedene Herangehensweisen gibt. In [13] wird eine klassische Clinchverbindung hergestellt, bei der ein Metallblech auf der Oberseite und ein FKV auf der Unterseite positioniert werden. In Abbildung 2.9, links ist eine solche Verbindung zu sehen. Das größte Problem besteht derzeit darin, dass vorrangig nur kurzfaserverstärkte Kunststoffe verwendet werden können und, dass sich der ausgebildete Hinterschnitt aufgrund von Relaxationserscheinungen im Kunststoff zurückbildet. Damit Verbindungsfestigkeiten auch langfristig gewährleistet werden, sind weitere Entwicklungen notwendig. Ein anderer Lösungsweg wird in [29] untersucht. Hier wird der FKV im Fügestellenbereich vorgelocht. Dadurch wird lediglich das Metall unter Ausbildung eines Hinterschnitts umgeformt und eine Rückbildung ist nicht zu erwarten. Es kann jedoch durch lokale Belastungen zur Delamination im FKV kommen und durch das Vorlochen ist der Prozess aufwendiger, als das konventionelle Clinchen. Die Verbindung ist in Abbildung 2.9, rechts zu sehen.

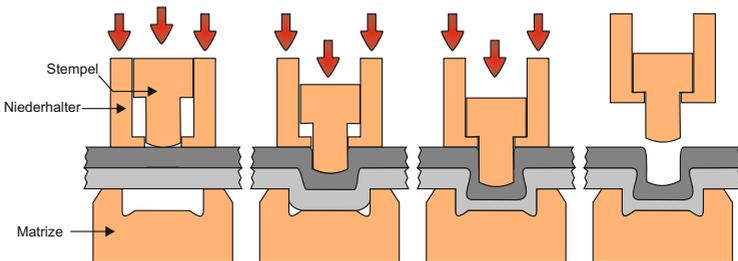


Abbildung 2.8: Prinzip des Clinchens

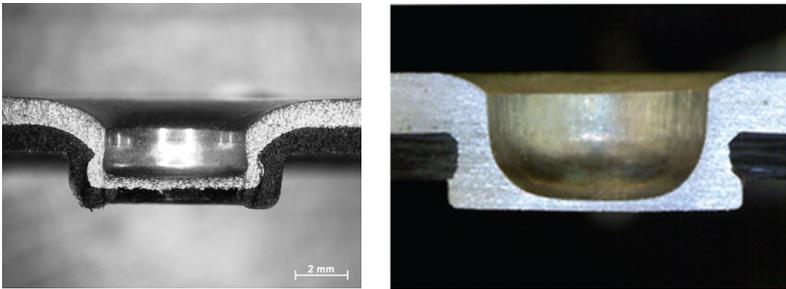


Abbildung 2.9: Clinchverbindungen von FKV und Metall von [13] (links) und [29] (rechts)

2.2.5 Fließlochformen

Das Prinzip eines rotierenden Dorns, der unter Kraftaufwand in Blechwerkstoffe eindringt, diese plastifiziert und eine Buchse ausbildet, wird mit dem Fließlochformen nach [30] dargestellt. In Abbildung 2.10 ist das Prinzip zu sehen. Dieses Verfahren ist weniger zum Fügen als vielmehr zur Ausbildung von Buchsen in Blechwerkstoffen gedacht, um Funktionsgeometrien herzustellen. In Kombination mit dem Gewindefurchen lassen sich so zum Beispiel Gewindebuchsen in ein Metallblech einbringen. Nach [31] bilden dabei $\frac{2}{3}$ des verdrängten Werkstoffs die Buchse aus, während $\frac{1}{3}$ auf die Oberseite verdrängt wird und entweder zu einem Kragen umgeformt oder im Nachgang spanend entfernt wird. Das Verfahren lässt sich an nahezu allen Metalle (Stahl, Aluminium, Kupfer, etc.) bei einer Blechdicke von bis zu 12,5 mm anwenden.

Im Gegensatz zum modifizierten Blindnieten wird beim Fließlochformen kein Verbindungselement, sondern ein wieder verwendbarer Dorn benutzt. Wie in Abbildung 2.11 dargestellt, lässt er sich in verschiedene Funktionsbereiche aufteilen. Während der Schaft zur Einspannung an einer Arbeitswelle dient, ist der Arbeitsbereich für das Verdrängen des Blechwerkstoffs zuständig. Die Gestaltung dieses Bereichs hat Auswirkungen auf das Verdrängungsverhalten und auf die daraus fol-

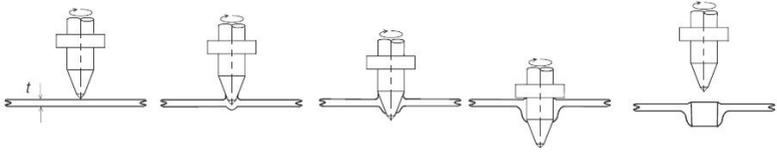


Abbildung 2.10: Prinzip der Buchsenausbildung beim Fließlochformen [30]

genden Prozessgrößen. Der Zylinderbereich des Dorns definiert den Lochdurchmesser und stellt sicher, dass dieser über die gesamte Blechdicke konstant ist. Die Länge dieses Bereichs hängt von der Blechdicke des zu durchdringenden Werkstücks ab. Der Kragen ist dafür verantwortlich, aufsteigendes Blechmaterial umzuformen. Wie in Abbildung 2.11 zu sehen, lassen sich dem Blindniet ähnliche Bereiche mit gleicher Funktion zuordnen. Eine speziell auf das Lochformen ausgerichtete Gestaltung der Komponenten kann sich somit auf den Prozess auswirken.

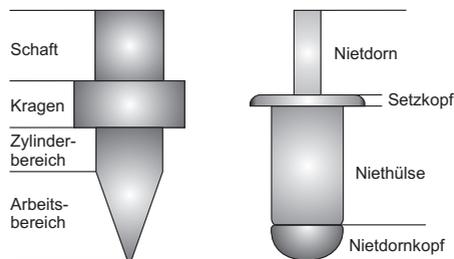


Abbildung 2.11: Vergleich von Fließlochformer und Blindniet mit analogen Funktionsbereichen

2.2.6 Fließlochformendes Schrauben (FDS)

Das fließlochformende Schrauben stellt eine Kombination aus dem Direktverschrauben und dem Fließlochformen dar. Es wird das Prinzip des Fließlochformens genutzt, jedoch mit einem Schraubelement als verlorenen Dorn. Es wird ein höherfestes Schraubelement mit speziell gestalteter Spitzengeometrie in sich überlappende Bleche eingebracht. Dabei bildet sich eine Metallbuchse aus, in die im gleichen Arbeitsgang ein Gewinde gefurcht wird [32]. In entsprechenden Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass diese Verbindung vor allem für Metall/Metall Verbindungen, aber auch für die Kombination aus Metallen und FKV geeignet ist. In Abbildung 2.12 sind entsprechende Schlibbilder zu sehen. Begrenzt wird das Verfahren durch die Festigkeit des Verbindungselements und auftretende Momente beim Eindringen in die zu fügenden Bleche. Aus diesem Grund können höherfeste Materialien nur im Dünnblechbereich gefügt werden. Alternativ ist eine Lösung, das oben liegende Blech vorzulochen und so die auftretenden Prozesskräfte zu verringern. Dadurch wird dem Prozess ein Arbeitsgang hinzugefügt. Ein entsprechender Prozessablauf ist in Abbildung 2.13 zu sehen. Gegenüber dem modifizierten Blindnieten ist eine komplexere Prozesssteuerung notwendig. Solange die Schraube die Bleche durchdringt, wird sie mit einer hohen Drehzahl rotiert. Danach muss das Gewinde gefurcht werden. Zu diesem Zweck wird die Drehzahl auf wenige hundert Umdrehungen pro Minute reduziert. Zum Schluss wird die Schraube mit einem definierten Drehoment bei geringer Drehzahl angezogen. Diese Änderungen in Drehzahl und Drehmoment erfordern einen Antrieb, der über ein breites Einsatzspektrum verfügt und hochdynamisch zu regeln ist. Darüber hinaus werden hohe Anforderungen an die Steuerung und die Sensorik gestellt. Wird die Abfolge nicht genau eingehalten, kann zu einer unzureichenden Gewindeausbildung kommen. Ein weiterer Nachteil des FDS Prozesses ist die Größe der verwendeten Schraube. Der Arbeitsbereich, also die Eindringgeometrie muss vom Gewindebereich getrennt sein. Dadurch ergibt sich eine große Länge des Verbinders und die FDS Verbindung hat nach dem Fügevorgang auf der Rückseite einen Überstand von mindestens 15 Millimetern. Dadurch steigt auch das Gewicht pro Verbindungspunkt im Vergleich zu einem Blindniet. Da der

Arbeitsbereich beim Blindniet gleichzeitig der Nietdornkopf ist, kann dieser beim Setzvorgang eingezogen werden, wodurch sich ein deutlich kleinerer Überstand auf der Rückseite ergibt.

Im Vergleich zum modifizierten Blindnieten, wird das fließlochformende Schrauben mit geringeren Drehzahlen betrieben, damit ein Gewindefurchen ermöglicht wird. Dadurch entsteht eine geringere Reibwärme und der Eindringvorgang unterscheidet sich in seiner Charakteristik.

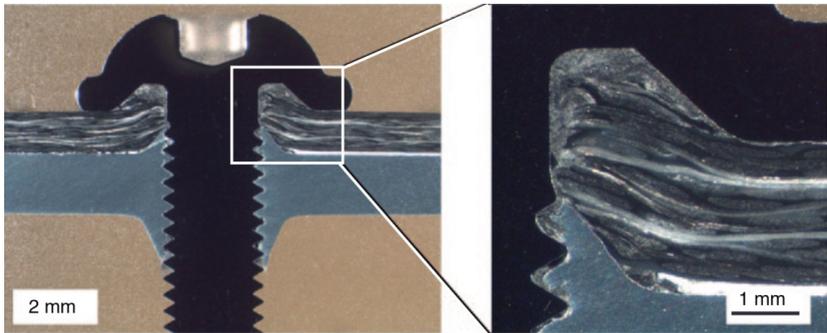


Abbildung 2.12: Fließlochformendes Schrauben eines hochfesten Stahls mit einem FKV [32]

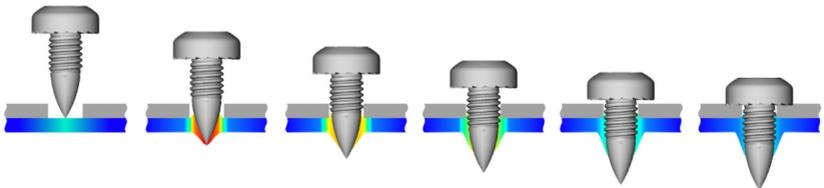


Abbildung 2.13: Prinzip des fließlochformenden Schraubens mit vorgelochtem Oberblech [33]

2.2.7 Warmformen

Beim Warmformen wird ein Bolzenloch in ein Blech aus FKV eingebracht [34], [35]. Das Prinzip ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Wie beim Fließlochformen wird ein Dorn durch ein Blech getrieben. Dieser wird dabei jedoch nicht rotiert, sondern durch ein Heizelement erhitzt. Infolge einer axialen Kraft in Verbindung mit Wärmeleitung wird die thermoplastische Matrix des FKV plastifiziert und ähnlich wie beim Fließlochformen zu einer Buchse verdrängt. Die eingelagerten Verstärkungsfasern werden dabei teilweise umgelenkt und nur teilweise zerstört. Hufenbach konnte in [35] nachweisen, dass ein warmgeformtes Loch eine deutlich geringere Materialschwächung darstellt, als ein spanend gebohrtes Loch. Auch die übertragbaren Kräfte durch einen Bolzen werden durch das Warmformen gesteigert. Das modifizierte Blindnieten nutzt das gleiche Prinzip, da sowohl Niet als auch Blech durch die Reibwärme stark erhitzt werden.

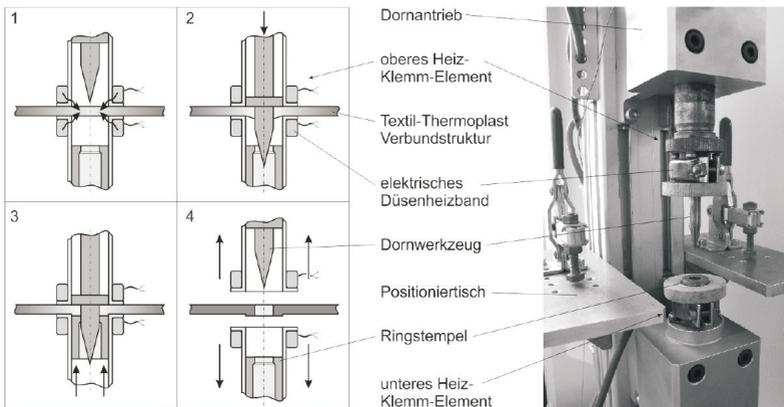


Abbildung 2.14: Prinzip des Warmformens [35]

2.2.8 Thermomechanisches Ausformfügen (TAF)

Das thermomechanische Ausformfügen (TAF) ist Ergebnis jüngerer Entwicklungen im Bereich der mechanischen Fügechnik. Der Prozess ist zum Fügen von Blechen in Verbundbauweise im Überlapstoß geeignet. Das Prinzip ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Ein rotierender Dorn dringt fließformend in die Bleche ein. Unter Bildung eines Durchzugs kommt es zur Durchdringung der Fügepartner. Der ausgebildete Kragen wird durch einen Stempel auf der Gegenseite umgeformt und führt so zu einer formschlüssigen Verbindung. Gleichzeitig wird der Fügebereich über eine Heizeinheit erwärmt und der Kunststoff lokal aufgeschmolzen. Nach Erkalten ist eine form- und stoffschlüssige Verbindung gewährleistet. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in hohen Verbindungsfestigkeiten und durch die Prozesswärme in einer verringerten Faserschädigung im Kunststoff. Durch das Anschmelzen des Kunststoffs und die damit erhöhte Umformbarkeit im Verbindungsbereich können auch Endlosfasern bis zu einem gewissen Grad ausweichen anstatt geschädigt zu werden. Durch das entstehende Loch ist eine TAF Verbindung nicht mediendicht, was gegenüber dem Blindnieten oder dem Clinchen als Einschränkung für den Einsatzbereich angesehen werden kann [36]. Darüber hinaus wird die Prozesszeit durch notwendige Aufheizzeiten bestimmt, da die entstehende Reibwärme nicht genügt [37].

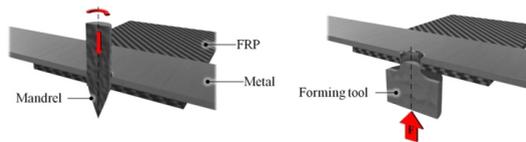


Abbildung 2.15: Thermomechanisches Ausformfügen [36] (Mandrel - Dorn, FRP - Faser-Kunststoff-Verbund, Metal - Metall, Forming tool - Formwerkzeug)

2.2.9 Thermoclinchen

Das Thermoclinchen ist ein neues Verfahren, das an der TU Dresden entwickelt wurde [38]. Das Verfahren kann als Abwandlung des thermomechanischen Ausformfügens interpretiert werden. Dabei wird ein beheizter Bolzen durch den FKV gezogen, der sich durch ein gelochtes Metallblech drückt. Das durchgedrungene Material wird durch einen Stempel zu einem Hinterschnitt geformt und so entsteht eine formschlüssige Verbindung (siehe Abbildung 2.16). Da im Gegensatz zum TAF Prozess ausschließlich der FKV durchgedrungen wird, sind deutlich geringere Prozesskräfte notwendig. Für den Prozess muss jedoch das Metallblech vorgelocht und exakt positioniert werden. Darüber hinaus ist die Verbindungsfestigkeit ausschließlich vom verwendeten FKV abhängig. Aufgrund der Neuheit sind noch keine Festigkeits- oder Kraftwerte bekannt. Es ist jedoch mit im Vergleich zum Nieten oder zum thermomechanischen Fügen geringeren Werten zu rechnen.

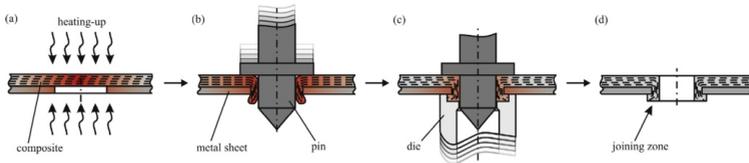


Abbildung 2.16: Prinzip des Thermoclinchens nach [38]

2.2.10 Wärmeleitungsfügen

Wärmeleitungsfügen ist ein Verfahren zum flächigen Verbinden von thermoplastischen Kunststoffen und Metallen durch partielles Schmelzen des Kunststoffs in Kombination mit der Aufbringung einer Fügekraft. Es können verschiedene Erwärmungsstrategien eingesetzt werden. So kann ein Laserstrahl das Metall erhitzen und der Thermoplast wird durch Wärmeleitungseffekte geschmolzen [39, 40]. Ein ähnlicher Effekt wird durch induktive Erwärmung, wie in [41] beschrieben erreicht. Aktuelle

Veröffentlichungen beschäftigen sich zudem mit dem Rührreißschweißen als Wärmequelle [42, 43]. Die erkaltende Kunststoffschmelze haftet zwischen den Fügepartnern und übernimmt analog zu Klebeverbindungen die Funktion des Klebstoffs. Die Verbindungsfestigkeit hängt in erster Linie von der Größe der Fügezone und von den Anhaftungseigenschaften der Fügepartner ab. Dies lässt sich vorzugsweise durch die geeignete Wahl der Überlappung und durch eine entsprechende Oberflächenvorbereitung, insbesondere bei metallischen Werkstoffen beeinflussen. Unklar sind noch die genauen Mechanismen, die zum Anhaften führen. Sie werden in der Regel unter den Begriff der Adhäsion gestellt. Dies ist jedoch lediglich ein Überbegriff, der auf verschiedenen Theorien beruht. Wenn auch in der jüngsten Vergangenheit intensive Forschung auf dem Gebiet der Adhäsion betrieben wurde [31], so beziehen sich alle Betrachtungen auf Theorien, die 1983 von C. Bischof und W. Possart in [44] und [45] zusammengefasst wurden. Basierend auf diesen Modellen sind Anhaftungseigenschaften zwischen Metallen und Kunststoffen nicht nur von Temperatur und Druck beim Fügen abhängig. Der Zustand der metallischen Oberfläche hat ebenso großen Einfluss. In Abbildung 2.17 ist dargestellt, dass die Rauheit, die Sauberkeit der Oberfläche und der Aktivierungszustand Faktoren für die Anhaftung sind. Durch Reinigen, mechanisches Strahlen oder andere Oberflächenbehandlungen lassen sich diese Eigenschaften manipulieren.

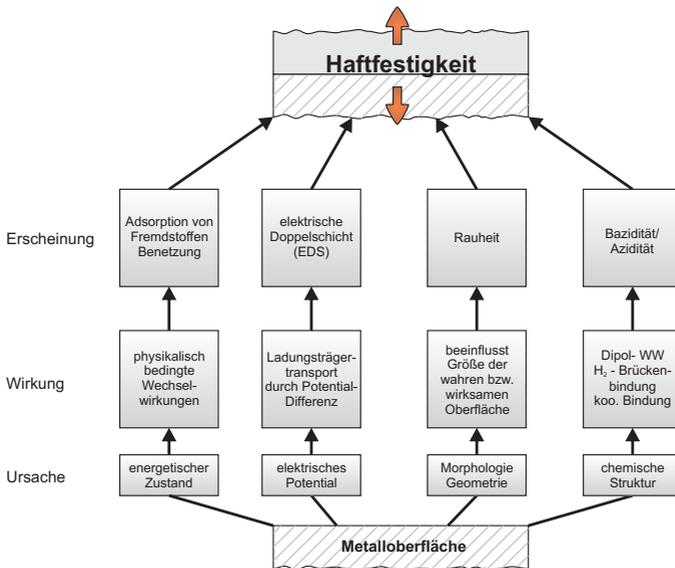


Abbildung 2.17: Oberflächenvorbehandlungen auf Basis verschiedener Adhäsionstheorien nach [45]

Mechanisches Adhäsionsmodell

Im Gegensatz zu anderen Theorien beruht das mechanische Adhäsionsmodell nicht auf molekularen oder atomaren Vorgängen sondern auf Mikroformschluss. Aufgrund der Größenordnungen wird es trotzdem im Bereich des Stoffschlusses betrachtet. Das Modell geht davon aus, dass in der Fügestelle auf Seiten des metallischen Partners mikroskopische Poren oder Unebenheiten vorhanden sind, die Hinterschneidungen aufweisen. Der schmelzflüssige Kunststoff kann in diese Poren eindringen und es kommt zu einer lokalen formschlüssigen Verbindung, ähnlich dem Druckknopfeffekt. Untersuchungen an behandelten Oberflächen zeigen, dass die geometrische Beschaffenheit des Metallbleches tatsächlich einen starken Einfluss auf die Anhaftung von Kunststoff an Metall haben kann [20]. Vor allem Behandlungen, wie mechanisches Strahlen führen zu einer Oberflächenstruktur, die beschriebene mikroskopische

Formschlüsse zulässt und eine erhöhte Belastbarkeit der Verbindung zur Folge hat. Die mechanische Verklammerung kann jedoch nicht die alleinige Begründung für die Adhäsion sein, da Kunststoffe auch auf glatten Metalloberflächen haften können, obwohl dort kein Formschluss im mikroskopischen Bereich möglich ist.

Polarisationstheorie nach de Bryne

In den 1930er Jahren wurde ein erstes Modell zur Erklärung der Adhäsionseffekte auf molekularer Ebene entwickelt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die verschiedenartigen Werkstoffe durch atomare und molekulare Wechselwirkungskräfte aneinander haften. Grundlegende Bedingung ist dabei das Vorhandensein von polaren Atomgruppen an den Werkstückoberflächen. Auf der Metallseite können das Oxid- und Hydroxidgruppen sein, welche eine Dipolwechselwirkung mit funktionalen Gruppen des Polyamids eingehen. Des Weiteren kann es zur Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen kommen. In Abbildung 2.18 ist dies schematisch dargestellt. Nach dieser Adhäsionstheorie trägt eine modifizierte, zum Beispiel gestrahlte Oberflächenstruktur in erster Linie durch eine Oberflächenvergrößerung zum Festigkeitswachstum bei. Wichtig ist auch das Vorhandensein von Sauerstoff oder Metalloxiden an der Oberfläche des Metalls. Dies kann in erster Linie durch chemische Behandlungen, wie Beizen erreicht werden.

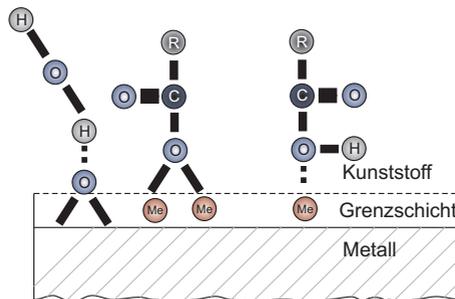


Abbildung 2.18: Schema des Polarisationsmodells nach de Bryne

Elektrostatistisches Modell

In den 1950ern wurde die Theorie aufgestellt, dass es beim Kontakt verschiedenartiger Festkörper an der Grenzfläche zu einer thermodynamisch bedingten Diffusion an Ladungsträgern kommt (siehe Abbildung 2.19). Dies führt zu einer lokalen Störung der elektrischen Neutralität, es bildet sich eine sogenannte elektrische Doppelschicht (EDS) aus, die eine positive und eine negative Raumladung besitzt. Bei diesem Modell entspricht die Adhäsionskraft der elektrischen Anziehungskraft der Raumladungen, was experimentell jedoch kaum zu ermitteln und rechnerisch nur begrenzt nachweisbar ist [44]. Um eine möglichst starke EDS zu realisieren, muss die Diffusion der Ladungsträger maximiert werden. Das kann zum Beispiel durch eine möglichst große Berührungsfläche zwischen den Werkstoffen geschehen. Beim Kleben oder Wärmeleitungsfügen wird das vor allem durch eine gute Benetzung erreicht.

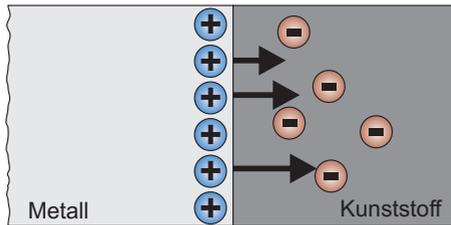


Abbildung 2.19: Schema des elektrostatistischen Modells

Thermodynamische Adhäsionstheorie

Die bekannteste Theorie zur Adhäsion basiert auf thermodynamischen Vorgängen, also auf energetischen Größen an den Grenzflächen. Im Inneren einer Phase oder eines Werkstoffes sind die Kräfte auf ein Molekül allseitig und ausgeglichen. Oberflächennah wirken diese Kräfte jedoch nicht mehr von allen Seiten gleichermaßen und es kommt zu einem Ungleichverhältnis der Kraftrichtungen und somit zu einer potentiellen Energie, die dem Molekül auferlegt wird (siehe Abbildung 2.20 links). Aus der Summe der potentiellen Energie der oberflächennahen Moleküle ergibt sich die sogenannte Grenzflächen- oder Oberflächenenergie. Wichtig ist diese Betrachtung vor allem für den Fügevorgang selber, bei dem der Kunststoff bzw. der Klebstoff in einer flüssigen Phase vorliegt.

Für eine Haftung der Werkstoffe müssen Kunststoff und Metall so nah wie möglich aneinander gebracht werden, damit intermolekulare Kräfte oder in den anderen Theorien beschriebene Effekte stattfinden können. Die Annäherung einer flüssigen und einer festen Phase kann als Benetzung beschrieben werden. Experimentell ist nachgewiesen, dass die Oberflächenenergie einen unmittelbaren Einfluss auf die Benetzung hat. In Abbildung 2.20 rechts ist dieser Vorgang schematisch zu sehen. Die flüssige Phase benetzt die Metalloberfläche in einem Benetzungswinkel θ , der durch die Grenzflächenenergien flüssiger Kunststoff/Luft (γ_{lv}), flüssiger Kunststoff/Metall (γ_{sl}) und Metall/Luft (γ_{sv}) beeinflusst wird. Nach Dupré wird die sogenannte Adhäsionsarbeit so definiert, dass sie die Energie angibt, welche benötigt wird, um Flüssigkeit und Festkörper zu trennen [46]. Sie kann also als Haftung angesehen werden. Errechnet wird sie nach:

$$W_a = \gamma_{lv} + \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (2.1)$$

Die Adhäsionsarbeit hängt somit in einem erheblichen Maß von der Grenzflächenenergie zwischen Kunststoff und Metall ab und drückt sich durch den experimentell bestimmbaren Benetzungswinkel durch folgende Formel aus.

$$W_a = \gamma_{lv}(1 + \cos\theta) \quad (2.2)$$

Bei minimaler Grenzflächenenergie γ_{sl} bzw. minimalem Benetzungswinkel ist die Haftung maximal. Die Grenzflächenenergie wird hauptsächlich durch chemische oder physikalische Wechselwirkungen zwischen den Phasen herabgesetzt. Diese können durch eine entsprechende Oberflächenvorbehandlung (Beizen, Plasmabehandlung, Beschichten) beeinflusst werden.

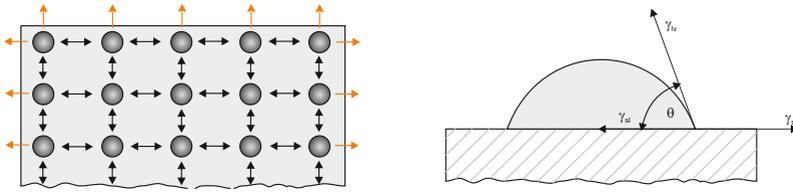


Abbildung 2.20: Thermodynamische Adhäsionstheorie (links: Prinzip des Kräftegleichgewichts an der Oberfläche, rechts: Zusammenhang zwischen Grenzflächenspannung und Benetzungswinkel)

Chemisches Adhäsionsmodell

Es wird beim chemischen Adhäsionsmodell davon ausgegangen, dass sich in der Phasengrenzschicht kovalente Bindungen zwischen den Atomen der unterschiedlichen Werkstoffe aufbauen. Als Sonderfall der chemischen Adhäsion gilt das Mikroelektrolytmodell. Dabei wird davon ausgegangen, dass Metalloberflächen stets mit adsorptiv gebundenen Wassermolekülschichten bedeckt sind. Bei Kontakt mit Kunststoff soll sich zwischen den Körpern ein Mikroelektrolyt ausbilden, das einen Gleichgewichtszustand erreicht. Dargestellt ist das Prinzip vereinfacht in Abbildung 2.21. Kationen unedler Metalle gehen dabei eine Bindung mit den funktionalen Gruppen des Kunststoffs ein. Der Theorie nach kann dieses Verhalten durch die Aktivierung der Metalloberfläche, durch Beizen oder Plasmabehandlung gesteigert und die Haftfestigkeit somit verbessert werden.

Zusammenfassung der Modelle

Die verschiedenen Theorien bieten jeweils Ansatzpunkte, um die Haftung von Kunststoff an Metall zu erklären. Einzelne können sie nicht alle Verbindungseigenschaften begründen, in ihrer Gesamtheit vermitteln sie ein Verständnis, wodurch sie beeinflusst werden. Allgemein können Veränderungen der Oberfläche im mikroskopischen und molekularen Maß zu verbesserten Haftfestigkeiten führen. Bischof hat dazu in [45] ein Diagramm veröffentlicht, das die Einflüsse unterschiedlicher Ober-

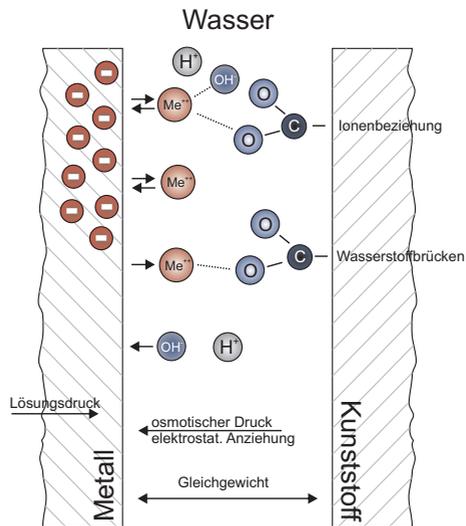


Abbildung 2.21: Chemisches Adhäsionsmodell

flächenvorbehandlungen auf die Haftfestigkeit unter Berücksichtigung der Theorien darstellt (siehe Abbildung 2.17).

Es gibt verschiedenste Methoden, mit denen die Verbindungseigenschaften beeinflusst werden können. Untersuchungen beschäftigen sich mit mechanischen und chemischen Oberflächenvorbereitungen, um die Verbindungsfestigkeit zu erhöhen [20, 47, 17, 48]. Es zeigt sich, dass sowohl Ätzen als auch mikroskopische Oberflächenveränderungen, zum Beispiel durch mechanisches Strahlen zu höheren Festigkeitswerten führen als mit unvorbereiteter Oberfläche. Auch spezifischere Oberflächenmodifikationen, wie das Gravieren mittels Laser, wie in [39] führen zu verbesserten Eigenschaften. Generell unterliegen die ermittelten Festigkeitswerte einer hohen Streubreite, die deutlich höher als bei mechanischen Fügeverfahren liegt. Das macht eine Auslegung mit hohen Sicherheitsfaktoren notwendig. Ein weiterer Nachteil beim Wärmeleitungsfügen besteht in der Kraftübertragung, die zwischen zwei Werkstücken lediglich im Anhaftungsbereich erfolgt. Im FKV befindliche Verstärkungsfasern befin-

den sich nicht in diesem Fügebereich und können somit auch lokal keine Kräfte übertragen. Um sie in die die Fügezone einzubeziehen, können makroskopische Elemente verwendet werden, die den FKV durchdringen. Diese Elemente können Bolzen oder Pins sein und werden zum Beispiel in [49] und [50] untersucht. Dadurch kann neben einer gesteigerten Verbindungsfestigkeit eine verringerte Schwankung der mechanischen Kennwerte erreicht werden.

2.2.11 Blindniettechnologien

Neben dem modifizierten Blindnieten in dieser Arbeit gibt es mehrere Lösungsansätze für die Adaption des konventionellen Blindnietens an das Fügen von FKV und Metallen. Die vielversprechendste Lösung findet sich in einer Entwicklung von General Motors, dem Friction Stir Riveting [10, 51]. Das Prinzip ähnelt dem modifizierten Blindnieten sehr stark, wobei der Niet selber mit einem schneidenden Nietdorn versehen ist. Dadurch handelt es sich um einen spanbildenden Prozess. Die Entwicklung dieses Verfahrens läuft parallel zu der Forschung an der TU Chemnitz und verfolgt das ähnliche Ziele, wobei sich vielmehr auf das Fügen von Metall/Metall Verbindungen konzentriert wird. Das Prinzip ist in Abbildung 2.22 zu sehen. Hierbei ist zu beachten, dass die Bleche durch den schneidenden Nietkopf gelocht werden und Spanabfall entsteht. Eine weitere aktuelle Entwicklung ist das Rotation Friction Pressing Riveting (siehe Abbildung 2.23), das dem gleichen Prinzip wie dem Friction Stir Riveting folgt. Auch hier wird ein Blindniet mit schneidendem Nietdorn zum vorlochfreien Nieten verwendet, zum Ausformen ist jedoch ein Gegenstempel mit einem zusätzlichen Dorn notwendig [24]. Dieses Verfahren benötigt damit einen höheren Aufwand in Bezug auf das Spannen und Lagern der zu fügenden Bauteile.

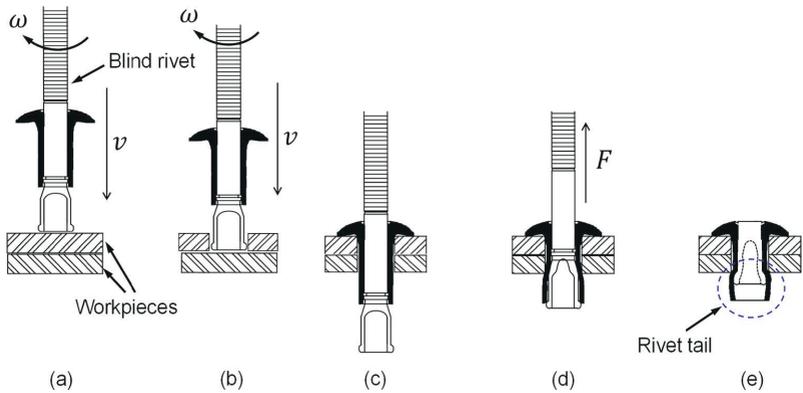


Abbildung 2.22: Prinzip des Friction Stir Rivetings [10]

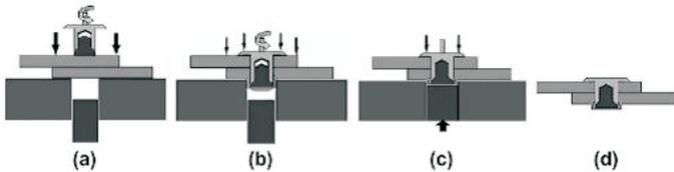


Abbildung 2.23: Prinzip des Friction Pressing Rivetings [24]

2.2.12 Schädigungsmechanismen

Infolge des Fügeprozesses kann der FKV geschädigt werden. Sowohl die Krafteinwirkung, als auch thermische Einflüsse und die Umformung können zu verschiedenen Schädigungen führen.

- **Matrixschädigung** ist insbesondere durch thermische Fügeverfahren möglich. Ist der Energieeintrag in einen FKV zu hoch, kann

die Matrix überhitzen und geschädigt werden. Lokal ist dadurch keine Fasereinbettung mehr vorhanden und das Bauteil wird lokal stark geschwächt.

- **Delamination** ist eine Schädigung, bei der es zum Ablösen zwischen zwei Lagen des FKV kommt. Als Ursache können die thermische Zerstörung der thermoplastischen Matrix zwischen zwei Faserlagen oder eine übermäßige Druckbelastung des FKV unter Ausknicken einzelner Lagen gelten.
- **Zwischenfaserbruch** ist eine Schädigung beziehungsweise Rissbildung in der Matrix zwischen zwei Faserlagen. Ausgelöst durch eine mechanische Belastung tritt das Versagen als Kohäsionsbruch auf.
- **Faserbruch** ist die Schädigung der Fasern oder Rovings selber. Sie erfolgt in der Regel durch sehr hohe Belastungen in Faserrichtung, also auf Zug oder Druck.
- **Korrosion** ist insbesondere bei der Kombination von Metallen mit kohlefaserverstärkten Werkstoffen ein Problem. Kommt es zum direkten Kontakt zwischen Faser und Metall, kann unter Anwesenheit eines Elektrolyts Kontaktkorrosion auftreten. Die Kohlefaser stellt dabei in der Spannungsreihe den edleren Werkstoff dar, unabhängig davon welcher Metallwerkstoff verwendet wird [52]. Dadurch wird immer das Metall korrosiv geschädigt. So konnte bei Versuchen Lochkorrosion an Aluminium oder Rosterscheinungen bei hochlegierten Stählen festgestellt werden [53, 3].

Besonders hervorzuheben ist das Risiko von Delaminationen beim mechanischen Bohren, wie es zum Beispiel für Verschrauben oder beim konventionellen Blindnieten notwendig ist. Untersuchungen befassen sich mit den Schädigungsmechanismen beim Bohren, können jedoch eine solche Schädigung noch nicht komplett verhindern [54, 55]. Durch Eindringen der Bohrerschneide werden einzelne Faserlagen des Laminats an der Oberseite nach oben gerissen oder auf der Unterseite hinausge-

drückt, durch diese Zugbelastung der Schichten kommt es zur lokalen Delamination (siehe Abbildung 2.24).

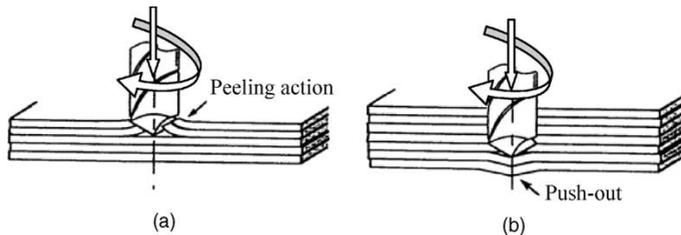


Abbildung 2.24: Delamination beim Bohren [54]: a) durch Schälen, b) durch Ausdrücken

2.3 Technologie des Modifizierten Blindnietens

2.3.1 Aufbau und Funktion des Nietes

Der Aufbau eines Blindnietes ist in Abbildung 2.25 zu sehen. Für den Prozess des Blindnietens übernimmt er nicht nur die Funktion des Verbindungselements, sondern ebenso die des eindringenden Dorns, analog zum Fließlochformen (siehe Kapitel 2.2.5). Der **Nietkopf** oder Nietdornkopf stellt dabei das Funktionselement dar, das beim Fließlochformen als Arbeitsbereich bezeichnet wird. Seine Geometrie ist mutmaßlich für die Prozesseigenschaften und das Einformverhalten verantwortlich. Der Werkstoff des Nietkopfes muss eine höhere mechanische und thermische Beständigkeit als die zu fügenden Werkstoffe besitzen. Der **Setzkopf** erfüllt die Funktion des Kragens beim Fließlochformen. Gegebenenfalls aufsteigendes Material kann durch diesen verformt werden und mit dem Auftreffen des Setzkopfes auf das Blechmaterial wird das Ende des Einformprozesses festgelegt. Der **Nietdorn** erfüllt die Funktion des

Schaftes. Eingespannt in einer Nietpistole muss der Dorn das anliegende Drehmoment zwischen Blechen und Niet übertragen können, ohne dass es zum Abscheren des Dorns kommt.

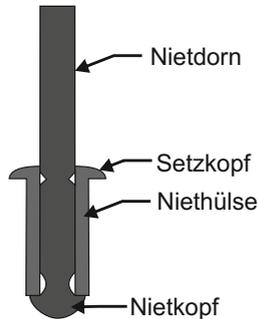


Abbildung 2.25: Aufbau eines Blindnietens

2.3.2 Prozessablauf

Der Prozess des modifizierten Blindnietens kann in verschiedene Schritte unterteilt werden. Zu Beginn übernimmt der Niet die Funktion eines Dorns und schafft sich sein Loch, um am Ende als Verbindungselement eingesetzt werden zu können. Der Prozess zum Fügen von einem Metallblech auf der Oberseite und ein Kunststoffblech auf der Unterseite ist in Abbildung 2.26 dargestellt und kann in folgende Stadien unterteilt werden:

- Eindringen im Metall
- Eindringen im FKV
- Ausformen

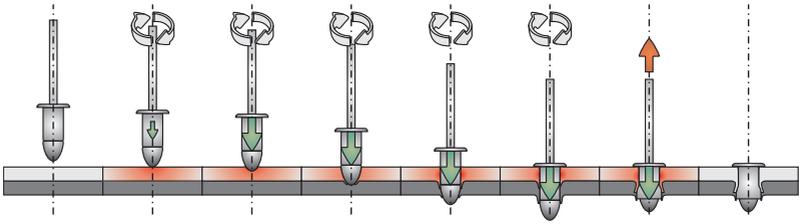


Abbildung 2.26: Prinzip des Modifizierten Blindnietens

Reibungswärme

Eine zentraler Bestandteil des modifizierten Blindnietens ist die entstehende Prozesswärme. Der Niet rotiert unter Druck auf dem Oberblech und erzeugt dadurch Reibungswärme. Dies geschieht analog zum Fließlochformen und Thermomechanischen Ausformfügen. Die Reibungswärme ist dabei abhängig von:

- den Reibwerten von Nietkopf und Blech
- der Eindringtiefe des Niets im Blech und damit der Reibfläche
- der Drehzahl
- der Anpresskraft

Aufgrund der vielen unterschiedlichen Faktoren, deren Größe teilweise unbekannt sind, ist eine rechnerische Ermittlung der Reibungswärme kaum vorzunehmen. Ein Ansatz ist die Berechnung der eingebrachten Rotations- und Translationsenergie:

$$E = \int_0^{\Delta t} F \cdot v \cdot dt + \int_0^{\Delta t} T \cdot \omega \cdot t \quad (2.3)$$

Die Energie ist die Summe der Eindringenergie infolge der axialen Kraft F mit einer Eindringgeschwindigkeit v und der Rotationsenergie, die ein Produkt aus der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Drehmoment T ist. Es ist ersichtlich, dass entsprechende Betrachtungen nur unter Vorliegen von Messdaten aus Versuchen vorgenommen werden können.

Gemäß der Literatur werden bei analogen Prozessen Temperaturen von 400 bis 500 °C beim Durchdringen von Aluminiumblechen erreicht [56]. Mit solchen Werten ist auch beim modifizierten Blindnieten zu rechnen. Aufgrund von Wärmeleitungseffekten verteilt sich die eingebrachte thermische Energie zuerst im Oberblech, um im Fortgang auch auf das Unterblech übertragen zu werden. Das ist insbesondere für das Aufweichen der thermoplastischen Matrix von Bedeutung.

Eindringen im Metall

Bedingt durch Rotation, Andruckkraft und der entstehenden Reibungswärme wird das Oberblech lokal plastifiziert. Die notwendige Kraft für diesen Vorgang kann über die Fließspannung k_f ausgedrückt werden. Sie gibt an, bei welcher Druckspannung der Blechwerkstoff ins Fließen gerät und plastisch umgeformt werden kann. Die Fließspannung ist eine Konstante, die abhängig von Werkstoff, Umformgrad φ , Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und Temperatur v ist. Für gängige Legierungen, vor allem solche, die in der Umformtechnik von Bedeutung sind, gibt es zahlreiche Veröffentlichungen und Bücher, in denen die werkstoffspezifische Fließspannung angegeben ist. Mathematisch lässt sie sich nach Hensel und Spittel ausdrücken [57]:

$$k_f = m_1 \cdot e^{m_2 \cdot \vartheta} \cdot \varphi^{m_3} \cdot e^{\frac{m_5}{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}^{m_4} \quad (2.4)$$

Am Beispiel der Aluminiumknetlegierung AlMg3 sind Fließkurven bei verschiedenen Temperaturen, Umformgraden und Umformgeschwindigkeiten in Abbildung 2.27 zu sehen.

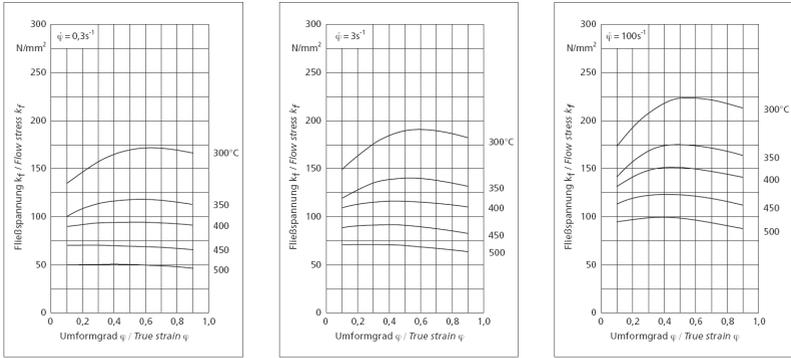


Abbildung 2.27: Fließkurve für AlMg3 [58]

Die Materialverdrängung führt zur Ausbildung einer Hülse. Das heißt, es entstehen keine Späne und sämtliches Blechmaterial wird verdrängt. Die dafür notwendige Umformarbeit kann nach [59] rechnerisch bestimmt werden. Dazu wird das umzuformende Werkstoffvolumen auf gleich große Volumenelemente aufgeteilt (siehe Abbildung 2.28) und nach Hülseausbildung der jeweilige Umformgrad φ bestimmt. Für jedes Einzelsegment ist so die Berechnung der notwendigen Einzelumformarbeit bei einer bestimmten Temperatur möglich. Durch Aufsummieren lässt sich so die Gesamtarbeit abschätzen.

Bei n Segmenten lässt sich der Umformgrad $\varphi_{Segment}$ durch die lokale Veränderung der Blechdicke $s_{Segment}$ bestimmen:

$$\varphi_{Segment} = \ln \left(\frac{s_{Segment}}{s} \right) \quad (2.5)$$

Die Umformarbeit $W_{Segment}$ kann mit dem Umformgrad und der mittleren Fließspannung k_{fm} ermittelt werden, wobei der Umformwirkungsgrad η_F benötigt wird :

$$W_{Segment} = \frac{V_{Segment} \cdot k_{fm} \cdot \varphi_{Segment}}{\eta_F} \quad (2.6)$$

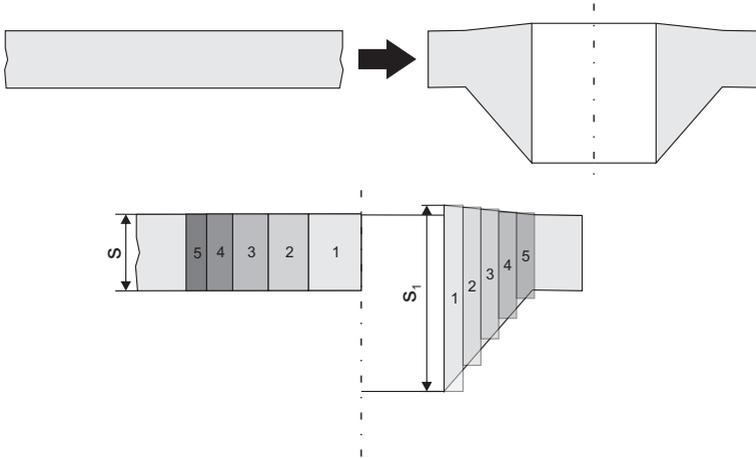


Abbildung 2.28: Röhrenmodell nach [59]: Die eingeförmte Hülse wird segmentiert und der jeweilige Umformgrad bestimmt

Da die Volumina der einzelnen Segmente gleich sind, lässt sich für die gesamte Umformarbeit folgende Formel aufstellen:

$$W = \frac{V \cdot (k_{fm1} \cdot \varphi_1 + k_{fm1}\varphi_2 + \dots + k_{fmn}\varphi_n)}{\eta_F} \quad (2.7)$$

Sind Umformgrad, Prozesstemperatur und die notwendige Umformarbeit für ein Referenzmaterial bekannt, so lässt sich anhand von Fließspannungskurven für metallische Werkstoffe die notwendige Arbeit berechnen und eine Aussage zur Machbarkeit und Anlagenauslegung treffen.

Für das Friction Stir Riveting (siehe Kapitel 2.2.2) werden in [60] benötigte Kräfte und Momente zum Fügen von Aluminiumblechen mit einer Stärke von einem und zwei Millimetern untersucht (siehe Abbildung 2.29). Es wird deutlich, dass sowohl die benötigte Fügekraft als auch das notwendige Rotationsmoment abhängig von der Drehzahl und der Fügegeschwindigkeit sind. Mit einer höheren Drehzahl lässt sich die

Fügekraft reduzieren, insbesondere zwischen 3000 und 6000 Umdrehungen pro Minute. Eine weitere Drehzahlerhöhung auf 9000 Umdrehungen pro Minute führt hingegen nur noch zu leichten Veränderungen in der Eindringcharakteristik. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich abschätzen, dass sich der optimale Drehzahlbereich über 3000 Umdrehungen befindet und bei Aluminium mit Fügekräften zwischen 500 und 3000 N zu rechnen ist.

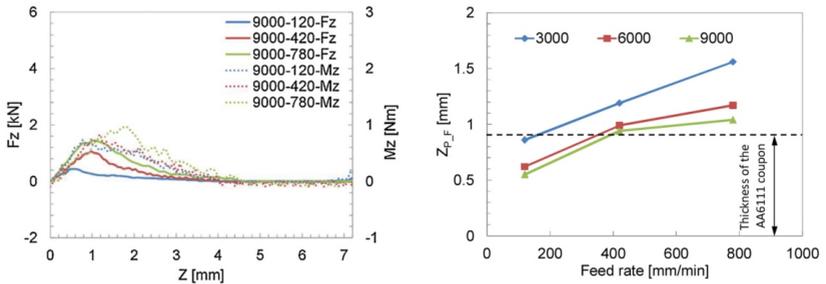


Abbildung 2.29: links: Kraft- und Momentenverlauf für das Friction Stir Riveting in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit; rechts: Benötigte Fügekraft in Abhängigkeit von der Drehzahl nach Ergebnissen aus [60]

Eindringen im FKV

Die Festigkeit des Kunststoffes ist in höchstem Maße durch die Faserverstärkung bestimmt. Alle Verfahren, die den Werkstoff geometrisch ändern (Bohren, Umformen, Fräsen), können diese Endlosfasern schädigen. Jede Schädigung führt dabei zu einer lokalen Schwächung des Werkstoffes und muss soweit möglich minimiert oder verhindert werden. Beim modifizierten Blindnieten formen sich Niet und Durchzug des Oberblechs in den Kunststoff ein. Da es keine Schneidkante gibt, werden die Fasern nicht unmittelbar zerstört. Vielmehr kommt es in einem bestimmten Bereich der Fügestelle durch die Reibungswärme zu einem Anschmelzen der Kunststoffmatrix. Dadurch sind die darin liegenden

Fasern in diesem Bereich beweglich und werden durch Niet und Durchzug verdrängt. Dies ist jedoch nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Fasern, die über ihre Bruchdehnung hinaus verformt werden, reißen. In [36] wurde dieses Verhalten in Bezug auf das Thermomechanische Ausformfügen betrachtet. Prinzipiell kann die dort aufgeführte theoretische Betrachtung auch auf das modifizierte Blindnieten übertragen werden, da sich die geometrischen Verhältnisse ähneln. In Abbildung 2.30 ist der Fügebereich im Kunststoff schematisch dargestellt. Um den eingedrungenen Blindniet ist ein Bereich angeschmolzenen Kunststoffes zu sehen. Nur in diesem Bereich ist es den Fasern möglich, sich zu bewegen. Beide Zonen, Niet und Durchmesser des Schmelzbereichs, lassen sich anhand von Proben bestimmen. Ausgehend davon kann, wie in Abbildung 2.31 zu sehen, die theoretische Faserumlenkung ermittelt werden. Die Umlenkung erfordert eine Dehnung der Faser. Je weiter sich eine Faser vor dem Fügevorgang im Zentrum der Nietstelle befindet, desto größer ist die darauf folgende Umlenkung bzw. Dehnung. In Abhängigkeit von Nietdurchmesser, Schmelzbereichsdurchmesser und Bruchdehnung einer Faser gibt es einen Bereich mit der Breite h , in dem die dort befindlichen Fasern über ihr Verformungsvermögen hinaus umgelenkt und damit zerstört werden. Fasern außerhalb dieses Bereichs können theoretisch ohne Schädigung umgelenkt werden. In Tabelle 2.3 ist die Bruchdehnung für verschiedene Fasertypen angegeben.

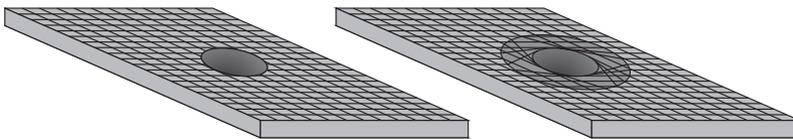
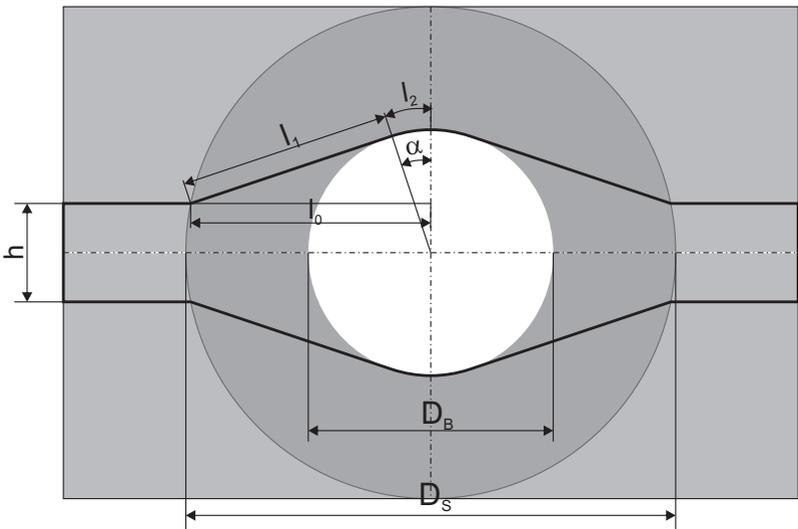


Abbildung 2.30: links: FKV Blech mit gebohrtem Loch - die angedeuteten Fasern sind im Lochbereich zerstört; rechts: FKV Blech mit geformtem Loch - die Fasern sind umgelenkt und nicht zerstört.

Tabelle 2.3: Bruchdehnung verschiedener Fasertypen

Faserwerkstoff	Bruchdehnung in %	Quelle
E-Glas	4,8	[61]
Aramid Standardmodul	4,0	[61]
Aramid Hochmodul	2,7	[61]
Kohlenstoff	1,3-2,0	[62]

**Abbildung 2.31:** Schema der Faserumlenkung mit Grenzwinkel α

Für die rechnerische Bestimmung der Dehnung ε wird die Länge der umgelenkten Faser ($l_1 + l_2$) in das Verhältnis zur Ausgangslänge l_0 gesetzt. Folgende Formeln werden angewandt:

$$\varepsilon = \frac{l_1 + l_2 - l_0}{l_0} \quad (2.8)$$

Mit dem doppelten Abstand der Faser zum Lochmittelpunkt h , mit dem Durchmesser des Lochs D_B und dem Durchmesser des Bereichs der angeschmolzenen Matrix D_S können folgende Berechnungen angestellt werden:

$$l_0 = \sqrt{\left(\frac{D_S}{2}\right)^2 - h^2} \quad (2.9)$$

$$l_1 = \sqrt{\left(\frac{D_S}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_B}{2}\right)^2} \quad (2.10)$$

$$l_2 = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot D_B}{180} \quad (2.11)$$

$$\alpha = 90 - \cos^{-1}\left(\frac{D_B}{D_S}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{2 \cdot h}{D_S}\right) \quad (2.12)$$

Aus den Formeln lässt sich eine Funktion ableiten, die den Bereich der zerstörten Fasern durch Überschreiten der individuellen Bruchdehnung in Abhängigkeit des Verhältnisses von Lochdurchmesser und Durchmesser der Schmelzzone darstellt. Beispielhaft für E-Glasfasern ist das in Abbildung 2.32 zu sehen. Es ist ersichtlich, dass der Wärmeeintrag bzw. die Größe des Aufschmelzbereichs um den Fügebereich Einfluss auf den Grad der Schädigung des FKV besitzt.

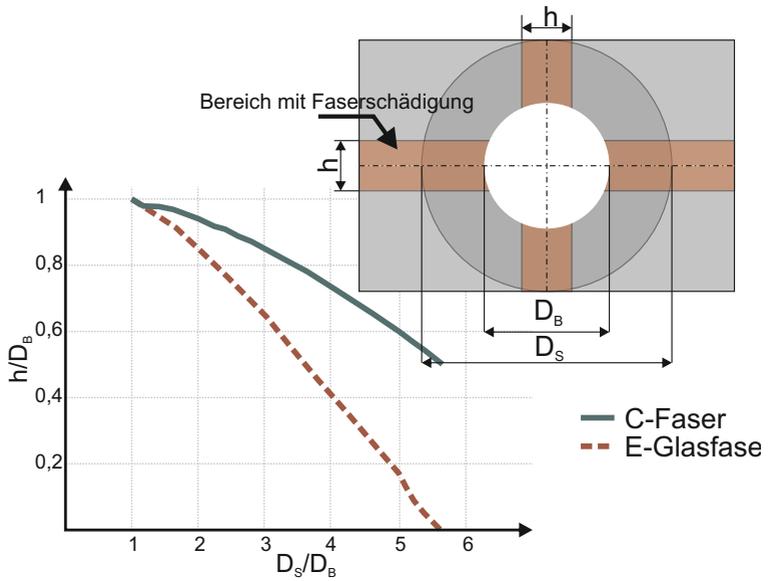


Abbildung 2.32: Bereich der zerstörten Fasern (schraffiert) in Abhängigkeit von $\frac{D_s}{D_B}$ für E-Glas Fasern und Kohlefasern

Anhaftung zwischen FKV und Metall

Durch die entstehende Prozesswärme in Kombination mit dem Fügedruck wird die thermoplastische Matrix des FKV im Verlauf des Blindnietens über die Glasübergangstemperatur erwärmt und im Anschluss abgekühlt. Wie beim Schmelzkleben oder Wärmeleitungsfügen (siehe Kapitel 2.2.10) kommt es so zur Anhaftung zwischen FKV und Metall.

Ausformen

Hat der Blindniet die zu fügenden Bleche komplett durchdrungen, wird er mit dem Setzkopf auf dem Oberblech angedrückt. Zeitgleich wird der Nietdorn mit einer Kraft von 5 bis 25 kN in die entgegengesetzte Richtung gezogen. Durch die folgende Relativbewegung wird der Nietkopf in die Niethülse gezogen und formt diese dabei um. Der Kopf dringt dabei soweit in die Hülse ein, bis die Bleche einen zu großen Widerstand darstellen. Infolge der Zugkraft reißt der Nietdorn an einer Sollbruchstelle ein und das Reststück bricht ab. Der Niet ist ausgeformt und die Verbindung fertig gestellt. Sind Hülsen- und Kopfgeometrie günstig gewählt, kommt es zwischen diesen nach dem Ausformen zu einem Formschluss, wodurch der Nietkopf in der Verbindung gehalten wird. Der Prozess ist in Abbildung 2.33 dargestellt.

2.3.3 Prozessgrößen

Die Axialkraft spielt beim modifizierten Blindnieten eine entscheidende Rolle. Vor allem zu Beginn des Prozesses, wenn sich noch nicht genügend Reibwärme entwickelt hat, kann eine zu hohe Kraft zu Deformationen am Blech führen. Die Kraft muss immer den Anforderungen an Verbindungsqualität und Verarbeitungsgeschwindigkeit angepasst sein. Die Drehzahl ist entscheidend für die Entwicklung der Reibwärme

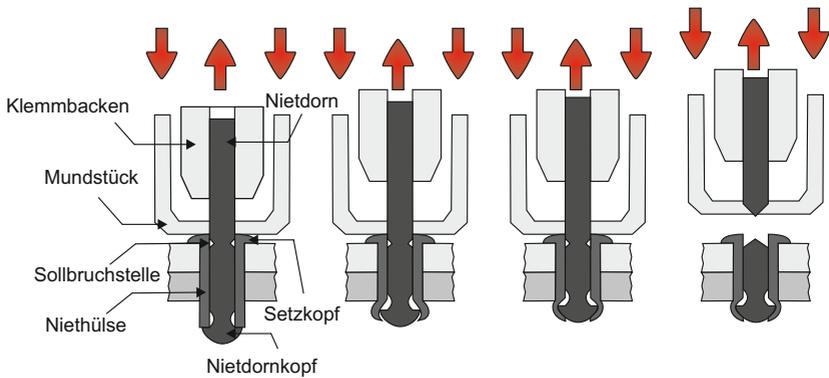


Abbildung 2.33: Ausformen eines Blindnietens

und damit für das Plastifizieren des Blechwerkstoffs. Untersuchungen zeigen, dass die notwendige Axialkraft unmittelbar abhängig von der Drehzahl ist [63]. Der Prozess kann weg- oder kraftgesteuert erfolgen. Fließlochformende Prozesse oder das Thermomechanische Ausformfügen sind weggesteuert. Eine Vorschubgeschwindigkeit wird definiert und die Prozesskraft entsprechend angepasst.

2.3.4 Randbedingungen aus verwandten Verfahren

Sowohl das Fließlochformen als auch das Thermomechanische Ausformfügen können Anhaltspunkte liefern, welche Randbedingungen bezüglich einzelner Parameter erfüllt werden müssen, damit ein stabiler Prozess gewährleistet werden kann. Maßgebend sind dabei der Dornwerkstoff, die Dorngeometrie, Blechwerkstoff und -dicke sowie Drehzahl und Axialkraft. In Tabelle 2.4 sind entsprechende Parameter aus unterschiedlichen Quellen aufgeführt. Aussagen zur notwendigen Fügezeit lassen sich hingegen kaum finden. In den Veröffentlichungen zeigt sich die Tendenz, dass ein Dorn das Material ab einer Drehzahl von ca. 3000 Umdrehungen pro Minute zuverlässig durchdringt und eine Axialkraft im Bereich von 800 bis 3200 N notwendig ist.

Tabelle 2.4: Parameter für das Fließlochformen und Thermomechanische Ausformfügen (TAF)

Verfahren	\varnothing_{Dorn} mm	Werkstoff	Blechdicke mm	Drehzahl U/min	Axialkraft N	Quelle
Fließlochformen	9,2	Aluminium	4	3000	3200	[30]
Fließlochformen	9,2	Aluminium	4	15000	1200	[30]
Fließlochformen	9,2	Magnesium	4	3000	2800	[30]
Fließlochformen	9,2	Magnesium	4	15000	800	[30]
TAF	5,3	Stahl (DC04)	1	3000	1500	[36]
TAF	7,3	Stahl (DC04)	1	2000	1500	[21]

2.3.5 Konstruktive Randbedingungen

Ein Vorteil des modifizierten Blindnietens besteht in der einseitigen Zugänglichkeit. Aufgrund dessen fehlt ein Gegenhalter, der die Fügekräfte aufnehmen kann, wie das zum Beispiel beim Clinchen durch eine Matrize geschieht. Beim modifizierten Blindnietens müssen die auftretenden Kräfte durch das Blechmaterial aufgenommen werden. Dadurch kann es lokal zu elastischen und plastischen Verformungen kommen. Der Grad der Materialbeeinflussung hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Um einen nutzbaren Prozess zu gewährleisten, müssen folgende Randbedingungen erfüllt sein:

- Die Konstruktion muss im Bereich der Fügestelle ausreichend steif sein, um eine übermäßige Durchbiegung zu verhindern.
- Das untere Blech muss eine höhere Biegesteifigkeit als das oben liegende Blech besitzen, damit es im Fügeprozess eine Stützfunktion erfüllt.

Sind diese Punkte nicht erfüllt, muss ein Gegenstempel verwendet werden (siehe Abbildung 2.34).

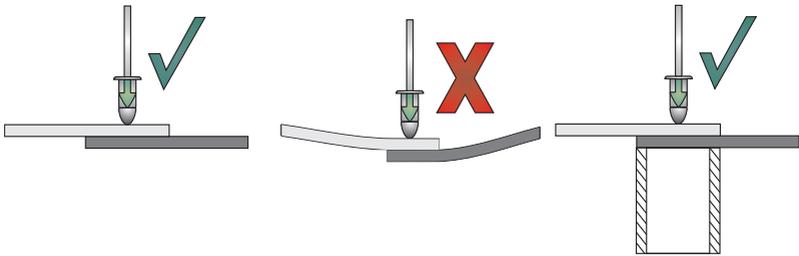


Abbildung 2.34: Links: Bleche sind ausreichend steif, einseitige Zugänglichkeit genügt; Mitte: Bleche nicht steif genug, unzulässige Durchbiegung; Rechts: Ein Gegenstempel übernimmt die Stützfunktion

2.4 Qualitätskriterien

Fügestellen müssen hinsichtlich ihrer Qualität je nach Anforderung stichprobenartig oder ständig nach verschiedenen Maßstäben bewertet werden, um eine Aussage zu ertragbaren Kräften oder zur Einordnung nach i.O oder n.i.O Teilen treffen zu können. Dazu sind optische sowie mechanische Prüfungen notwendig. Für das modifizierte Blindnieten können Bewertungen zu folgenden Punkten vorgenommen werden:

- **Niet:** Gemäß der Norm EN ISO 14589:2001 wird der ausgeformte Niet bei einer konventionellen Nietverbindung hinsichtlich der ertragbaren Scher- und Zugkräfte bewertet. Des weiteren kann sie auf eine Restnietdornverriegelungsfähigkeit und die Nietdornausdrückkraft untersucht werden [64]. Bewertungsmaßstäbe nach optischen Gesichtspunkten sind nicht gegeben.

Tabelle 2.5: Bewertungsgruppen für die Qualität fließlochgeformter Buchsen nach [65])

Qualitätsgruppe	δ_{min}	δ_{max}
Gruppe I		0,1
Gruppe II	0,1	0,3
Gruppe III	0,3	0,5
Gruppe IV	0,5	

- **Buchsenausbildung:** Die ausgeformte Metallbuchse kann nach optischen Gesichtspunkten bewertet werden. Als Orientierung dient dazu die Bewertung für fließlochgeformte Buchsen [63]. Dort wird eine Buchse mit einer geringen Rissbildung als optisch hochwertig angesehen. Je größer die durch Umformung erzeugten Risse im Verhältnis zur Buchsenlänge sind, desto geringer ist die Qualität. Als Wert wird δ nach:

$$\delta = \frac{\text{Risslaenge}}{\text{Buchsenlaenge}} \quad (2.13)$$

definiert. Nach [65] kann die Buchsenqualität in Gruppen nach Tabelle 2.5 eingeteilt werden. Für das modifizierte Blindnieten kann der Bewertungsmaßstab übernommen werden, da sich auch hier Risse auf die Kraftübertragung und die dynamische Belastbarkeit auswirken können.

- **Faserschädigung:** Die Verbindung muss auch dahingehend untersucht werden, inwiefern der faserverstärkte Kunststoff geschädigt wurde. Zum einen müssen dazu Makroschliffe angefertigt und diese im Bereich des FKV auf Delaminationserscheinungen untersucht werden. Zum anderen werden Veraschungsversuche durchgeführt, bei denen der FKV über die Verdampfungstemperatur der thermoplastischen Matrix erhitzt wird. Hat sich diese verflüchtigt, lässt sich der Faserverlauf und der Anteil zerstörter Fasern bestimmen.

- **Anschmelzzone:** Da die Anschmelzung der Kunststoffmatrix zu einer Anhaftung zwischen FKV und Metall führt, hat die Größe der Anschmelzzone einen Einfluss auf die resultierenden Verbindungseigenschaften. Aus diesem Grund wird der Anschmelzgrad γ durch die Formel

$$\gamma = \frac{\varnothing_{\text{Anschmelzzone}}}{\varnothing_{\text{Nietdorn}}} \quad (2.14)$$

betrachtet.

2.5 Auslegung

Das Blindnieten, ob konventionell oder modifiziert, stellt eine punktförmige form- und kraftschlüssige Verbindung her, die in der Regel vor allem auf Lochleibung unter Scherbeanspruchung ausgelegt wird (siehe Abbildung 2.35).



Abbildung 2.35: Bolzenverbindungen werden in der Regel auf Scherbeanspruchung ausgelegt

Der Vorteil einer formschlüssigen Verbindungen besteht darin, dass die komplette Materialstärke der einzelnen Bleche in die Kraftübertragung einbezogen wird. Im Gegensatz zu stoffschlüssigen flächigen Verbindungen kann so durch die Erhöhung der Blechdicken auch die übertragbare Last gesteigert werden. Die größte Problematik besteht sowohl bei Metall als auch bei FKV in der notwendigen Einbringung von Löchern. Diese stellen eine Schwächung des Materials und eine geometrische Kerbe dar. Metalle weisen in der Regel ein isotropes Verhalten auf. Dadurch lässt sich die Kerbwirkung analytisch relativ einfach bestimmen. Unter Last kommt es im Bereich der Verbindung zu einer Spannungskonzentration

durch die Umlenkung des Kraftflusses (siehe Abbildung 2.36). Nach [66] ergibt sich am Lochrand eine maximale Spannung von

$$\sigma_k = 3\sigma_n \quad (2.15)$$

Unabhängig vom Bohrungsdurchmesser kommt es somit örtlich zu einer Verdreifachung der ursprünglichen Spannung, was zur Rissauslösung führen kann.

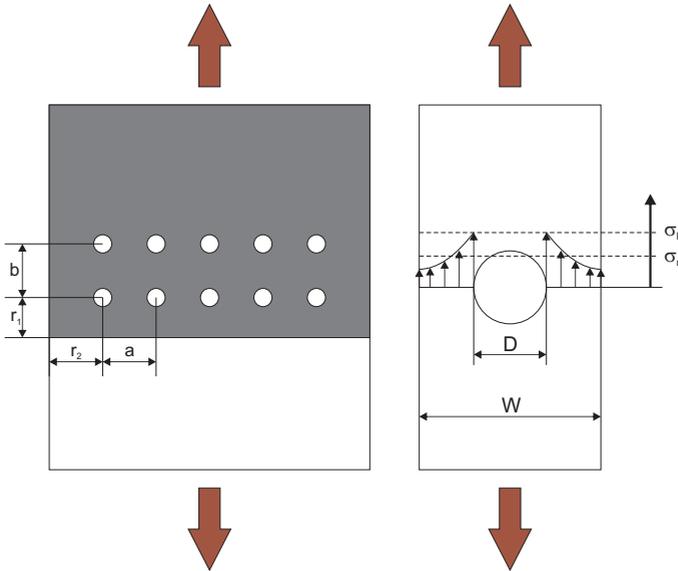


Abbildung 2.36: links: Rand- und Zwischenlochabstände bei Mehrpunktverbindungen; rechts: Kerbwirkung durch kreisförmige Bohrung unter Zugspannung

Neben der Materialschwächung kommt es durch die Krafteinleitung in der Bolzenverbindung zur Lochleibungsbeanspruchung im Blech. Wird die Tragfähigkeit des Materials überschritten, können verschiedene Versagensmodi auftreten (siehe Abbildung 2.37).

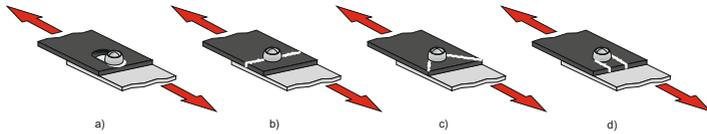


Abbildung 2.37: Versagensarten bei Lochleibung nach [67] - a) Lochleibungsversagen, b) Zugbruch, c) Spaltbruch, d) Scherbruch [45]

Maßgeblich hängt die Versagensart von geometrischen Gegebenheiten ab. Bei einzeln eingebrachten Löchern mit großen Abständen zu den umliegenden Werkstückrändern können die lokal induzierten Spannungsspitzen durch Verformung im umliegenden Blech abgebaut werden. Werden jedoch mehrere Löcher nebeneinander eingebracht oder werden zu geringe Randabstände eingehalten, kann es zu einem Versagen zwischen den Löchern oder an den Rändern kommen. Angestrebt wird das Lochleibungsversagen, da sich diese Versagensart zum einen rechnerisch relativ einfach berechnen lässt, zum anderen ist das Versagen nicht plötzlich, sondern äußert sich in einem allmählichen „Durcharbeiten“ des Verbindungselements durch das Blech.

Um Versagensarten, wie Scherbruch, Scherzugbruch oder ähnliches auszuschließen, müssen die Blechbreite im Verhältnis zum Nietlochdurchmesser und die Abstände der Nietverbindung zu den Blechrändern bzw. der Lochabstand ein Mindestmaß betragen. Die Norm DIN 1992-1-8:2010 gibt Empfehlungen zu den minimalen Randabständen E_1 und E_2 (siehe Abbildung 2.38). Die zulässige Kraft auf eine Bolzenverbindung wird dort mit folgender Formel definiert:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u d t}{1,25} \quad (2.16)$$

Während mit dem Bolzendurchmesser d , der Blechstärke t , der Blechzugfestigkeit f_u und dem Teilsicherheitsbeiwert von 1,25 gegebene Werte

vorliegen, geben die Beiwerte α_b und k_1 an, inwieweit die Lastaufnahmefähigkeit durch Randabstände vermindert wird:

$$\alpha_b = \min\left\{1; \frac{E_1}{3 \cdot d}\right\} \quad (2.17)$$

$$k_1 = \min\left\{2,5; 2,8 \cdot \frac{E_2}{d} - 1,7\right\} \quad (2.18)$$

Um eine Schwächung der Verbindung zu vermeiden, lassen sich folgende Bedingungen ableiten

$$E_1 \geq 3 \cdot d; E_2 \geq 1,5 \cdot d \quad (2.19)$$

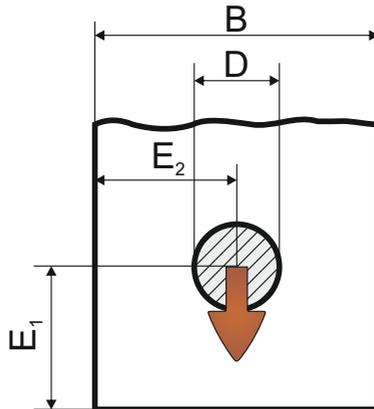


Abbildung 2.38: Randabstände E_1 und E_2 bei einer Einpunktverbindung

Generell lässt sich schlussfolgern, dass die Festigkeit bei Bolzenverbindung an Metallblechen durch den Durchmesser des Verbindungselements, der Materialstärke und der Anzahl der Verbinder direkt beeinflusst wird. Begrenzt wird diese Gestaltungsmöglichkeit durch minimale Rand- und Zwischenlochanstände, die eingehalten werden müssen, um ein vorzeitiges Versagen zu verhindern.

Da faserverstärkte Kunststoffe kein isotropes Verhalten aufweisen, ist eine analytische Bestimmung der Auswirkung der Lochformung durch den Nietvorgang als Kerbe nur schwer möglich. Die Festigkeit des Kunststoffs ist in höchstem Maße durch die Faserverstärkung bestimmt. Alle Verfahren, die den Werkstoff geometrisch ändern (Bohren, Umformen, Fräsen), können diese Endlosfasern schädigen. Schneidende Prozesse zerstören Fasern unmittelbar, umformende Verfahren hingegen können sie umlenken und dehnen. Wird die Bruchdehnung überschritten, kommt es zu einem örtlichen Bruch im Faserverlauf. Es ist somit nicht nur die Geometrie des Lochs ausschlaggebend, sondern inwiefern das umgebende Material beeinflusst wurde. In [35] wird das Bohren mit dem Warmformen hinsichtlich des resultierenden Festigkeitsverlustes untersucht. Es ist ersichtlich, dass durch Bohren eingebrachte Löcher eine größere Materialschwächung verursachen, als thermisch eingebrachte Löcher. Wie bei Metallen müssen für ein Lochleibungsversagen Mindestrand- und Zwischenlochabstände eingehalten werden. Diese sind in Normungen derzeit nicht vorgegeben. Aufgrund der stark unterschiedlichen Materialeigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen infolge der Faserart, -anordnung oder der Matrix sind in der Literatur unterschiedliche Werte zu finden. So werden die Randabstände nach [35] mit

$$E_1 \geq 2 \cdot d; E_2 \geq 1,5 \cdot d \quad (2.20)$$

und nach [68] mit

$$E_1 \geq 2 \cdot d; E_2 \geq 2,5 \cdot d \quad (2.21)$$

angegeben. Diese Werte können jedoch nur als Ansatz verstanden werden und müssen für jedes Material individuell untersucht werden. Aussagen zu Festigkeitswerten in Abhängigkeit vom Material müssen individuell durch Versuche festgestellt werden, da im Gegensatz zu Metallverbindungen keine einfache Übertragung von globalen mechanischen Eigenschaften auf die lokale Belastbarkeit möglich ist [69]. Experimente in [70] zeigen am Beispiel einer Bolzenverbindung an zwei CFK Bauteilen, dass die Festigkeitswerte des FKV unter Lochleibung nur zu 39 Prozent ausgenutzt werden.

Kapitel 3

Experimentelles

3.1 Herangehensweise

Ziel der Untersuchungen war ein grundsätzliches Prozessverständnis für das modifizierte Blindnieten. Aufgrund der Neuheit des Verfahrens mussten in erster Linie generelle Untersuchungen zur Prozesscharakteristik durchgeführt und mit den in Kapitel 3 aufgestellten Theorien verglichen werden. Hauptaugenmerk lag dabei auf der Mischbauweise, also der Kombination von einem metallischen Werkstoff mit einem Faser-Kunststoff-Verbund. Da Reibwärme für den Prozess notwendig ist und diese vor allem bei der Reibung zwischen Niet und Metallblech entsteht, war es naheliegend, das Metallblech werkzeugseitig und den FKV auf der Gegenseite zu platzieren. So kann sich zwischen Blech und Niet Reibwärme entwickeln, während der FKV durch Wärmeleitung erhitzt wird. Um Aussagen über Prozessgrenzen treffen zu können, wurden zudem weitere Materialkombinationen untersucht. Zusätzlich wurden umfassende Untersuchungen zu Prozesszeiten, resultierende Verbindungseigenschaften und zur Prozessstabilität getroffen, damit das modifizierte Blindnieten in der Gruppe der hybriden Fügeverfahren richtig eingeordnet werden kann. So wurden auch Kennwerte aus verwandten Verfahren herangezogen und verglichen.

3.2 Eingesetzter Blindniet

Für die Untersuchungen wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Gesipa ein speziell gestalteter Blindniet eingesetzt. Wie in Kapitel 2.2.5 erwähnt, setzt sich dieser aus einem Hohl Niet und einem Nietdorn zusammen. Ein Schliffbild des Niets ist in Abbildung 3.1 zu sehen. In den Untersuchungen wurde ausschließlich ein sogenannter Stahl/Stahl Niet eingesetzt. Dabei wird sowohl für den Hohl Niet als auch für den Nietdorn eine niedrig legierte Stahlliegierung eingesetzt. Beim Nietdorn handelt es sich mit dem C50D (Werkstoffnummer 1.0586) um einen Stahl mit hohem Kohlenstoffanteil. Dadurch lässt sich dieser vergüten und in der Bruchlast erhöhen. Im Anlieferungszustand besitzt der Werkstoff eine Zugfestigkeit R_m von 1170 N/mm^2 . Die Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Sowohl Hohl Niet als auch Nietdorn verfügen über eine galvanische Verzinkung. Dadurch besitzen beide Komponenten eine Zinkschicht mit einer Stärke von 3 bis $5 \mu\text{m}$.

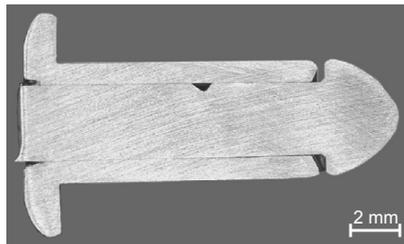
Da der übliche Nietdorn einen balligen Kopf besitzt, ist dieser nicht für das modifizierte Blindnieten geeignet. Eine fehlende Spitze verhindert eine Zentrierung des Niets bei Rotation und die Kopfform erfordert hohe Axialkräfte beim Eindringen in Blechwerkstoffe. Aus diesem Grund wurde ein Nietdorn gestaltet, der eine angepasste kegelige Kopfform besitzt. Diese ist an Dorne verwandter Verfahren angelehnt und führt zu einem linearen Eindringverhalten sowie zu geringeren Prozesskräften. Der Niet ist je nach Hohl Nietlänge für einen Klemmbereich von 2 bis 5 mm Materialstärke geeignet.

Der Nietdorn verfügt darüber hinaus über eine Kerbe, die als Sollbruchstelle dient. Diese örtliche Querschnittsverringerung garantiert beim Setzprozess einen festgelegten Dornabriss. Je nach Klemmdicke muss diese Sollbruchstelle verlagert werden. Im Rahmen der Versuche wurde sie jedoch konstant gehalten. Eine Zeichnung des Nietdorns ist in Abbildung 3.2 zu sehen. In Abbildung 3.1 ist die Sollbruchstelle nur einseitig zu sehen. Dies rührt daher, dass sie nicht umlaufend aufgebracht wird, sondern durch zwei Stempel, die nicht immer parallel zueinander liegen müssen. Dadurch treten in Querschliffen Unregelmäßigkeiten auf.

Tabelle 3.1: Eigenschaften des eingesetzten Nietes

	Nietdorn	Hohlriet
Werkstoffbezeichnung	C50D	C4C
Werkstoffnummer	1.0586	1.0303
Zugfestigkeit	1170 N/mm^2	470 N/mm^2
Beschichtung	galv. verzinkt	galv. verzinkt
Außendurchmesser		4,8 mm
Durchmesser Dorn		3,2 mm
Bruchlast		8626 N
Gewicht (gesetzt)		2,2 g

Bei dem Hohlriet handelt es sich um einen klassischen Hülsenweiter. Er verfügt äußerlich über eine gleichmäßige Geometrie. Das bedeutet, dass der Nietdorn beim Setzvorgang in den Hohlriet schlüpft und diesen nach außen weitet. Andere mögliche Formen sind sogenannte Hülsenfalter, die über Außenkerben verfügen und beim Setzvorgang Falten bilden. Der verwendete Setzkopf ist ein Flachrundkopf mit einem Durchmesser von 9 Millimetern.

**Abbildung 3.1:** Querschliff eines in den Versuchen verwendeten Blindnietes

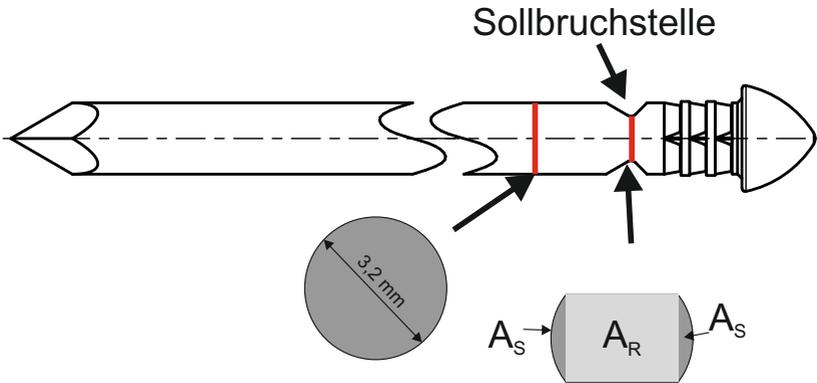


Abbildung 3.2: Verwendeter Nietdorn

3.3 Randbedingungen

Auf Basis der Literaturrecherche und der theoretischen Betrachtungen musste im Folgenden ein Versuchsstand entwickelt werden, der den Prozess des modifizierten Blindnietens abbilden kann. Dazu müssen gleichzeitig mehrere Funktionen ermöglicht werden. Diese sind das Greifen, das Rotieren, die axiale Kraftaufbringung, der Setzprozess, sowie die Prozessdatenerfassung.

Greifen

Das Greifen wird benötigt, damit sowohl ein Drehmoment, als auch eine axiale Kraft übertragen werden können. Das kann ausschließlich im Bereich des Nietdorns oberhalb des Setzkopfes erfolgen. Für eine Auslegung wird sich an mechanischen Kennwerten des verwendeten Blindnietes orientiert.

Für die axiale Belastbarkeit wird sich an der Bruchlast des Nietdorns orientiert. Die Schwachstelle befindet sich dabei an der Sollbruchstelle, die in Abbildung 3.2 dargestellt ist.

Die theoretische Bruchlast F_{Bruch} ergibt sich aus der Zugfestigkeit R_m und der Querschnittsfläche A :

$$F_{Bruch} = R_m \cdot A \quad (3.1)$$

Der Querschnitt in der Sollbruchstelle ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Die Fläche lässt sich bestimmen, indem man die Rechtecksfläche A_R mit der Fläche der Kreissegmente A_S addiert. Die Fläche lässt sich dabei aus der Breite b und der Höhe h errechnen:

$$A = A_R + 2 \cdot A_S \quad (3.2)$$

$$A_R = b \cdot h \quad (3.3)$$

$$A_S = \frac{(b \cdot h)}{4} \quad (3.4)$$

$$A = \frac{3}{2} \cdot b \cdot h = \frac{3}{2} \cdot 1,92 \text{ mm} \cdot 2,56 \text{ mm} = 7,3728 \text{ mm}^2 \quad (3.5)$$

Für die Bruchlast ergibt sich damit:

$$F_{Bruch} = 1170 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 7,3728 \text{ mm}^2 = 8626 \text{ N} \quad (3.6)$$

Das zu übertragende Drehmoment wird auf ähnliche Weise berechnet. Hierbei wird die zulässige Schubspannung γ herangezogen. Diese lässt sich auf Basis der Zugfestigkeit bestimmen und ergibt sich aus:

$$\gamma = 0,9 \cdot R_m = 0,9 \cdot 1170 \frac{N}{mm^2} = 1053 \frac{N}{mm^2} \quad (3.7)$$

Das Widerstandsmoment W_p bei torsionaler Belastung lässt sich nur näherungsweise bestimmen. Dafür werden die Kreissegmente des Sollbruchquerschnitts ignoriert, da diese einen großen Randfaserabstand besitzen und kaum Drehmoment übertragen. Es wird lediglich das Rechteck betrachtet. Für das torsionale Widerstandsmoment wird folgende Formel verwendet:

$$W_t = \frac{c_1}{c_2} \cdot h \cdot b^2 \quad (3.8)$$

mit

$$c_1 = \frac{1}{3} \cdot \left(1 - \frac{0,63}{\frac{h}{b}} + \frac{0,052}{\frac{h^5}{b}}\right) \quad (3.9)$$

und

$$c_2 = 1 - \frac{0,65}{\frac{h^3}{b}} \quad (3.10)$$

Es ergibt sich

$$c_1 = 0,1799466 \text{ und } c_2 = 0,807143 \quad (3.11)$$

$$W_t = \frac{c_1}{c_2} \cdot h \cdot b^2 = 0,229 \cdot 2,56 \text{ mm} \cdot 3,6864 \text{ mm}^2 = 2,1 \text{ mm}^3 \quad (3.12)$$

Aus der Schubspannung γ und dem Widerstandsmoment W_t ergibt sich das maximale Drehmoment M_{max} mit:

$$M_{max} = \gamma \cdot W_t = 1053 \frac{N}{mm^2} \cdot 2,1 \text{ mm}^3 = 2211 \text{ Nmm} = 2,2 \text{ Nm} \quad (3.13)$$

Dieser Wert gibt an, ab welchem Drehmoment der Nietdorn theoretisch versagt. Mit einem Greifmechanismus, der eine axiale Kraftübertragung bis $8,7 \text{ kN}$ und eine Drehmomentübertragung bis $2,2 \text{ Nm}$ zulässt, ist eine Versuchsanlage diesbezüglich ausreichend dimensioniert.

Rotation

Die Rotation ist maßgeblich für den Eindringvorgang von Bedeutung. Wie in der Literaturrecherche gezeigt, erfolgen fließlochformende Prozesse mit Drehzahlen ab 2000 Umdrehungen pro Minute und mehr. Sowohl das thermomechanische Ausformfügen als auch das fließlochformende Schrauben wurden dahingehend intensiv untersucht. Mit Drehzahlen um 6000 Umdrehungen pro Minute nehmen die notwendigen Prozesskräfte gegenüber geringeren Drehzahlen ab. Darüber hinaus ändern sich die Prozesseigenschaften nur noch geringfügig. Aus diesem Grund ist ein Drehzahlkennwert zwischen 2000 und 6000 Umdrehungen pro Minute anzustreben. Während des Eindringvorgangs muss zudem ein Drehmoment auf den Niet übertragen werden, da dieser sich in die Materialien einarbeitet und entsprechend Reaktionskräfte und Momente entstehen. Der Antrieb ist dabei auf ein Drehmoment auszulegen, das mindestens dem ertragbaren Drehmoment des Nietdorns entspricht, also in diesem Fall $2,2 \text{ Nm}$. Die Rotation sollte zudem frei skalierbar sein und der Antrieb muss möglichst schnell auf die Nenndrehzahl beschleunigen und nachfolgend abbremsen können.

Fügekraft

Zum Eindringen in die Bleche ist neben der Rotation eine Fügekraft notwendig. Aus der Literaturrecherche hat sich ergeben, dass je nach Materialkombination und Dorngeometrie bei den fließlochformenden Prozessen Kräfte von mindestens 500 N und mehr aufgebracht werden müssen. Da sich die Geometrie des verwendeten Blindnietes deutlich von der Kopfform eines Dorns zum Fließlochformen unterscheidet, ist von höheren Axialkräften auszugehen. Aus diesem Grund wird die Versuchsanlage für Axialkräfte bis 3000 N ausgelegt. Die Kraftaufbringung muss dabei skalierbar und dynamisch zu regeln sein.

Setzkraft und Setzweg

Ist der Niet in die Bleche eingedrungen, muss er entsprechend dem konventionellen Blindnieten gesetzt werden. Während der Setzkopf gehalten wird, kommt es am Nietdorn zu einer axialen Zugbelastung. Der Niet schlüpft in den Hohl Niet ein, weitet diesen aus bis ein so hoher Widerstand erreicht ist, dass der Nietdorn an seiner Sollbruchstelle abreißt. Der bis dahin erreichte Zugweg des Nietdorns wird als Setzweg, die maximal erreichte Kraft als Setzkraft bezeichnet. Die Versuchsanlage muss in der Lage sein, die notwendige Setzkraft über den Setzweg zu realisieren. Der Setzweg hängt maßgeblich von der Hohl Nietlänge und der Klemmdicke ab. Die Setzkraft entspricht der maximalen Zuglast des Nietdorns, also in diesem Fall 8,7 kN. Der Setzweg beträgt zwischen 5 und 10 mm.

Prozessdatenerfassung

Damit der Prozess geregelt werden kann, müssen insbesondere Fügekraft und Eindringweg überwacht werden. Dazu ist es notwendig, den Weg mit einer hohen Auflösung und mit einer hohen Messfrequenz zu erfassen. Da der Eindringweg nur wenige Millimetern entspricht, muss die Auflösung deutlich genauer sein, also mindestens im Zehntelmillimeterbereich

liegen. Die Fügekraft ist vor allem von Bedeutung, um im Nachgang Reaktionskräfte aufzunehmen und Leistungskennwerte zu erstellen. Da die Fügekraft bis 3000 N ausgelegt wird, ist der Sensor bis zu diesem Kraftwert auszulegen. Anlagenentwicklung

3.4 Versuchsanlage

Um die genannten Randbedingungen zu erfüllen, wurde eine entsprechende Versuchsanlage an der TU Chemnitz entwickelt und gebaut. Der Aufbau ist in Abbildung 3.4 zu sehen.

Greifen und Setzen

Zum Greifen und Setzen wird ein handelsübliches Nietgerät verwendet (Abbildung 3.3). Setzkraft und Setzweg sind bei diesem Gerät ausreichend, um den verwendeten Versuchsblindniet setzen zu können. Aufgrund des Greifsystems mit einem 3-Backenfutter ist es zudem möglich, den Niet sowohl radial als auch axial so zu fassen, dass die Prozesskräfte übertragen werden können. Bei dem Nietgerät handelt es sich um ein Hydraulisch Pneumatisches Verarbeitungsgerät. Angeschlossen an ein Druckluftsystem wird ein pneumatischer Kolben angetrieben, der wiederum über einen Übersetzer Druck auf ein Hydrauliksystem ausübt. Dieses treibt einen weiteren Kolben an, der die notwendige Setzkraft erzeugt. Ausgelegt ist das verwendete System für eine Setzkraft bis zu 14 kN, womit es für den Einsatzfall ausreichend dimensioniert ist.

Fügekraft

Die notwendige Fügekraft von maximal 3000 N wird über einen Pneumatikzylinder aufgebracht, der an dem Schlitten der Nietpistole installiert ist. Dieser wird über ein Wegeventil sowie über ein Proportionaldruckregelventil angesteuert und kann so stufenlos in Richtung und Größe der ausgeübten Kraft verändert werden.

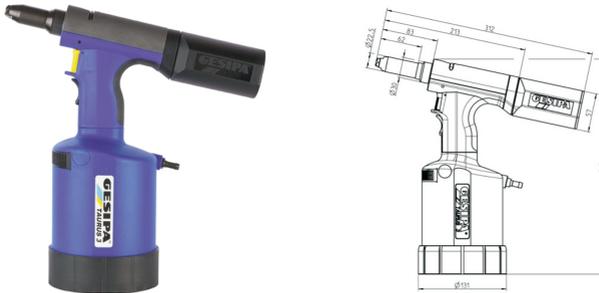


Abbildung 3.3: Verwendetes Nietgerät

Rotation

Um die relative Drehbewegung zwischen Niet und Werkstück zu realisieren, werden die Probebleche in einer Drehvorrichtung (4, 5) eingespannt und über einen Elektromotor (7) rotiert. Lagerungen und die Kupplung zwischen Vorrichtung und Motor sind dabei auf eine Drehzahl von bis zu 6000 U/min ausgelegt. Aufgrund der auftretenden Rotationsenergie müssen Probekörper rotationssymmetrisch ausgeführt werden. Die Probenaufnahme ist für Scher- und Kopfzugprüfkörper konzipiert. Sie werden über einen Spannteller fixiert. Die Stützlagerung ist zusätzlich für die maximale Fügekraft von 3000 N ausgelegt.

Steuerung

Die Steuerung des Prozesses erfolgt über die Software LabVIEW. Dabei wird ein Computer mit entsprechender Software mit einem Messwertaufnehmersystem und einem Signalausgabesystem verbunden. Zur Steuerung der Drehzahl, der Fügekraft und des Nietgerätes werden analoge Signale zwischen 0 und 10 V erzeugt. Die verwendeten Komponenten, also der Frequenzumrichter des Motors und das Proportionalregelventil für den Pneumatikzylinder sind so ausgelegt, dass die analogen Signale in entsprechende Drehzahlen und Kräfte umgesetzt werden. Über digitale Ausgänge werden Relais geschaltet, um Zustände einzustellen. So wird der Pneumatikzylinder über ein Wegeventil auf Zug oder auf Druck belastet und der Setzvorgang des Nietgerätes wird ausgelöst. Über das Messwertaufnehmersystem werden analoge Signale der verwen-

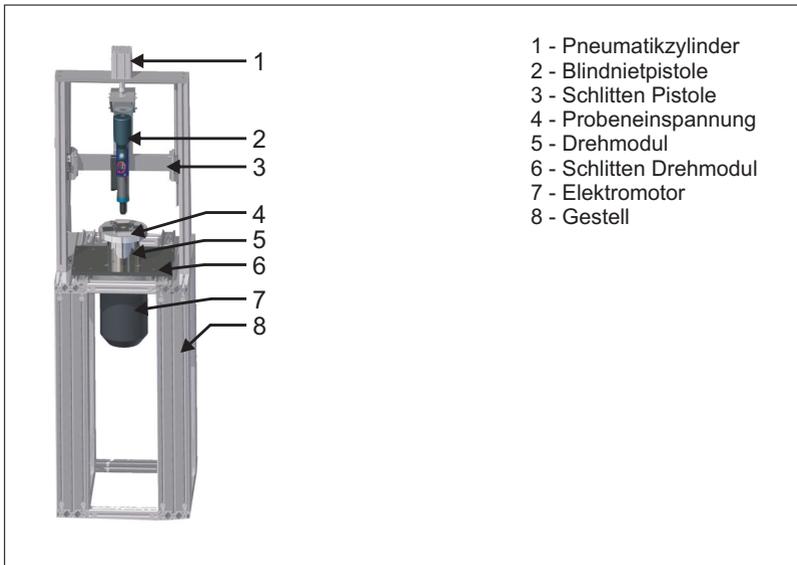


Abbildung 3.4: Anlagenkonzept für das modifizierte Blindnieten

deten Sensoren aufgenommen. So geben Wegaufnehmer und Kraftsensor jeweils ein analoges Signal aus, dessen Größe von den aufgenommenen Werten abhängig ist. Durch Einlesen dieser Werte lässt sich die Größe der Regelparameter Fügeweg und Fügekraft aufzeichnen. Aus der Kombination aus Signalein- und Ausgängen lässt sich mit der verwendeten Software ein Regelkreis erstellen. Über ein Eingabefeld lassen sich die wichtigsten Parameter definieren. Nach Abschluss eines Setzvorgangs werden die erzeugten und erfassten Signale zusammengefasst und in einem Auswertedokument abgelegt. So lassen sich Messwertverläufe im Nachhinein auswerten. Mögliche Parameter sind dabei die Drehzahl, diverse Haltezeiten sowie verschiedene Kraftwerte, die je nach Eindringtiefe des Nietes angesteuert werden. Die fertiggestellte Versuchsanlage ist in Abbildung 3.5 zu sehen.

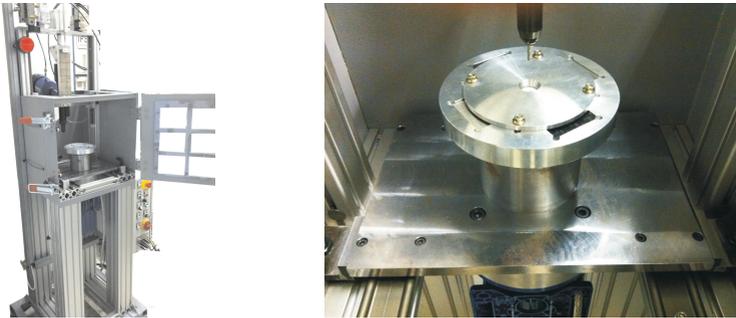


Abbildung 3.5: Versuchsanlage (links: Gesamtaufbau; rechts: Probenaufnahme)

3.5 Prozessablauf

Der Prozessablauf ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Aufgezeigt sind die wichtigsten Prozessgrößen, die Position des Nietgeräts relativ zur Bauteiloberfläche, die Drehzahl, die Eindringkraft und der pneumatische Druck, mit dem das Nietgerät beaufschlagt wird. Drehzahl, Kraft und Druck sind dabei Regelgrößen. Die Drehzahl wird durch den verwendeten Elektromotor geregelt, die Kraft durch einen pneumatischen Zylinder mit Druckregelung. Der pneumatische Druck auf das Nietgerät wird durch ein Druckregelventil gesteuert. Die Position der Pistole ist eine Folgegröße, bedingt durch die Regelgrößen und der zu fügenden Bleche.

- 1. Schritt (Einlegen und radiale Fixierung)
Die Probebleche werden in die Vorrichtung eingelegt und durch den Spannteller fixiert. Der Niet wird manuell in die Nietpistole eingeführt. Über die Steuerung wird die Nietpistole nun mit einem geringen Luftdruck (ca. 0,5 bar) beaufschlagt. Dadurch wird der Zugstab in der Nietpistole leicht angezogen und die Spannbacken greifen den Niet fest, ohne ihn jedoch auszuformen. Das Prinzip der Nietfixierung ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Spannkraft

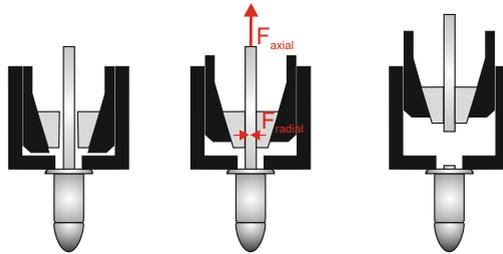


Abbildung 3.6: Fixierung des Niets durch Spannhalter; links: Niet lose eingelegt; mitte: Innenstück des Nietgeräts fährt nach oben und der Niet wird radial gespannt; rechts: Ab einem bestimmten Hubweg reißt der Niet ab

wird über die Druckluftzufuhr am Nietgerät durch ein Proportionaldruckregelventil gesteuert. Wie in der Prinzipskizze zu sehen, übt die Verspannung nicht nur eine radiale, sondern auch eine axiale Kraft aus. Wird eine zu geringe Spannkraft gewählt, wird der Niet nicht ausreichend gegen Rotation gesichert und dreht im Nietgerät. Ist die Spannkraft zu groß, führt die axiale Zugkraft zu einem Einformen des Nietdornes in die Niethülse und so zu einer vorzeitigen Nietschädigung.

- 2. Schritt (Anfahren)
Die eingespannte Probe wird auf die Soll-Drehzahl beschleunigt. Gleichzeitig drückt der Pneumatikzylinder die Nietpistole mit einer kleinen Andrückkraft von 100 bis 200 N nach unten. Die Kraft ist ausreichend, um das Gestell mit Pistole vertikal zu bewegen und so gering, dass es zu keinem Eindringen des Niets in das Bauteil kommt. Berührt der Niet die Probe, wird der Lageistwert als Ausgangspunkt für die Ermittlung des Eindringweges genommen.
- 3. Schritt (Eindringen)
Sind der Niet in seiner Soll-Stellung und die Vorrichtung bei ihrer Soll-Drehzahl, wird die Kraft des Pneumatikzylinders auf die Fügekraft erhöht. Parallel wird die Differenz des Wegesignals

im Vergleich zum Ausgangspunkt ermittelt. Wegabhängig kann der Kraftverlauf linear oder gestuft erfolgen. In diesem Fall ist er vierstufig dargestellt. Während des Eindringvorgangs wird die Spannkraft des Niets im Nietgerät aufrecht gehalten, so dass dieser nicht mit der Probe rotieren kann.

- 4. Schritt (Ausformen)

Ist Weg 4 erreicht bzw. der Setzkopf auf dem Bauteil aufgekommen, werden der Pneumatikzylinder kraftlos geschaltet und der Antrieb des Drehmoduls abgeschaltet. Sobald die Rotatikon stoppt, wird das Nietgerät durch das Proportionaldruckregelventil mit einem hohen Druck beaufschlagt. Spannvorrichtung, die den Niet bis dahin gegen Rotation gesichert hat, zieht nun mit maximaler Kraft axial und führt so zum Ausformen des Niets. Danach wird die Nietpistole durch den Pneumatikzylinder nach oben verfahren und der Prozess ist beendet.

3.6 Werkstoffe

3.6.1 Metallische Werkstoffe

Als Metalle kamen in den Versuchen die Aluminiumlegierung AlMg3 sowie die Magnesiumlegierung AZ31 zum Einsatz. Die Werkstoffdaten sind in den Tabellen 3.2 und 3.3 zu sehen.

Für die nach Gleichung 2.4 definierte Fließspannung sind aus der Literatur die in Tabelle 3.4 aufgeführten Werte gegeben. Daraus lassen sich die in Abbildung 3.8 dargestellten Fließkurven für eine Umformgeschwindigkeit von $\dot{\varphi} = 0,3s^{-1}$ ableiten. Die Fließspannungen der einzelnen Werte zeigen, dass für die Magnesiumlegierung AZ31 bei kleinen Umformgraden eine deutlich höhere Umformarbeit notwendig ist, als für die Aluminiumlegierung AlMg3. Bei einem Umformgrad von $\varphi = 0,25$ bis $0,4$ kehrt sich dieses Verhältnis um.

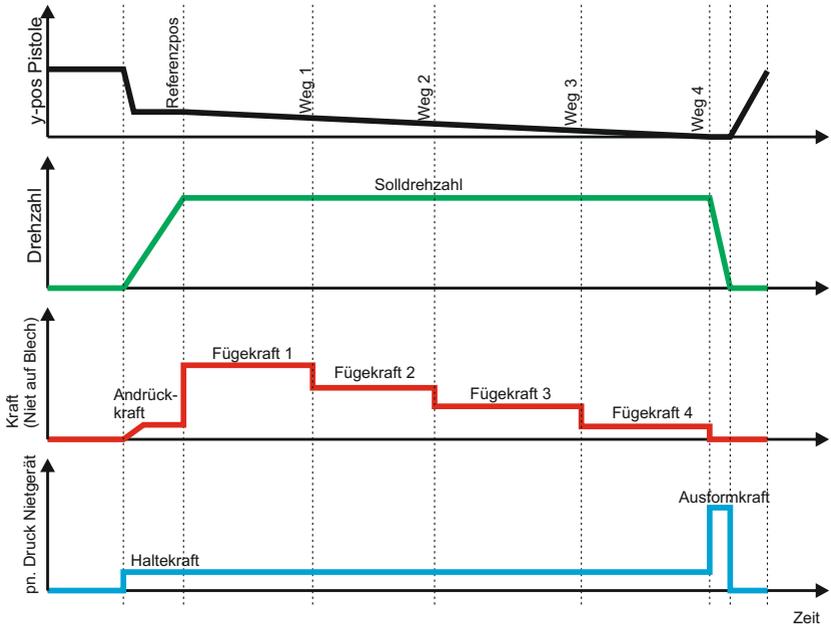


Abbildung 3.7: Ablaufdiagramm des modifizierten Blindnietens an der Versuchsanlage.

Tabelle 3.2: Auszug aus dem Werkstoffdatenblatt Magnesiumlegierung AZ31

Bezeichnung ASTM	AZ31
Werkstoffnummer DIN	3.5312
Bezeichnung DIN	MgAl3Zn
Streckgrenze (RT)	mind. 170 MPa
Zugfestigkeit (RT)	mind. 240 MPa
Bruchdehnung (RT)	17 %
Legierungsbestandteile in Gewichtsprozent	
Mg	Al Zn
Rest	2,5- 3 % 0,6 - 1 %

Tabelle 3.3: Auszug aus dem Werkstoffdatenblatt Aluminiumlegierung AlMg3

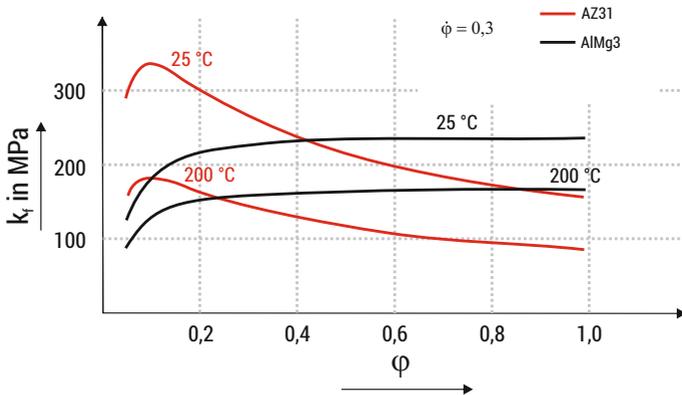
Bezeichnung numerisch	EN AW-5754
Werkstoffnummer DIN	3.353
Bezeichnung DIN	EN AW-AlMg3
Streckgrenze (RT)	mind. 80 MPa
Zugfestigkeit (RT)	190 - 240 MPa
Bruchdehnung (RT)	14 bis 18 %
Legierungsbestandteile in Gewichtsprozent	
Al	Si Fe Cu Mn Mg Cr Zn Ti
Rest	0,4 % 0,4 % 0,1 % 0,5 % 2,6 - 3,4 % 0,3 % 0,2 % 0,15 %

3.6.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FKV)

Als faserverstärkte Kunststoffe kamen ausschließlich solche mit thermoplastischer Polyamidmatrix und einer Endlosfaserverstärkung aus Kohle- oder Glasfasern zum Einsatz. Die Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 3.5 zu sehen. Bei den Produkten Tepex dynalite 102 RG beziehungsweise 201 C handelt es sich um GFK und CFK Materialien, bei denen die Verstärkungsfasern in einer Körperbindung vorliegen. Damit sind die Fasern ineinander verflochten und weisen gegenüber anderen Bindungsarten eine gute Verformbarkeit auf, was insbesondere für den

Tabelle 3.4: Parameter für die Fließkurve nach Gleichung 2.4 aus [71], [72]

Werkstoff	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
AlMg3	252	-0,001285822	-0,042003448	-0,010923309	-0,040677086
AZ31	243,1	-0,003513	-0,544806	0,188858	-0,05318

**Abbildung 3.8:** Fließkurven für die Werkstoffe AZ31 und AlMg3 bei einer Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi} = 0,3s^{-1}$ bei Raumtemperatur und 200 °C nach Tabelle 3.4 und Gleichung 2.4

umformenden Prozess des modifizierten Blindnietens von Bedeutung ist.

Tabelle 3.5: Werkstoffdaten FKV

Bezeichnung	Tepex[®] dynalite 102-RG600	Tepex[®] dynalite 201-C200
Matrix	PA 6	PA 6.6
Faser	Glas	Kohle
Gewichtsanteil	50 %	50 %
Bindung	Gelege (Köper)	Gelege (Köper)
Schichtdicke	0,5 mm	0,25 mm
E-Modul	22 GPa	52 GPa
Zugfestigkeit	400 MPa	750 MPa
Bruchdehnung	2,2 %	2,1 %
Glasübergangstemperatur	60 °C	70 °C
Schmelztemperatur	220 °C	260 °C
Wärmeformbeständigkeit	215 °C	255 °C

3.6.3 Materialkombinationen

Für die Versuche wurden die beschriebenen Werkstoffe miteinander kombiniert. Es wurde neben den Materialien die Blechdicke zwischen 1 und 2 mm variiert. Für eine einheitliche Bezeichnung wurde eine Nomenklatur nach Abbildung 3.9 gewählt. Kombinationen und die entsprechende Kurzbezeichnung für die Proben sind in Tabelle 3.6 aufgeführt. Die aufgeführten Materialkombinationen wurden so ausgewählt, dass ein möglichst breites Anwendungsspektrum für die Verbundbauweise und für Metall/Metall Verbindungen untersucht wird. Alle 24 sich ergebende Materialkombinationen wurden in die Prioritätengruppen A, B und C unterteilt. Alle Proben wurden hinsichtlich ihrer Prozesseigenschaften intensiv untersucht. Die Proben der Gruppen B, C wurden darüber hinaus hinsichtlich ihrer mechanisch technologischen Güterwerte und ihrer geometrischen Eigenschaften betrachtet. Die Kombination aus 2 mm AlMg3 und 2 mm GFK (Al2G2) wird in die Klasse A eingestuft. Sie besitzt vor allem im Automobilbau ein hohes Anwendungspotential, da zwei Leichtbaumaterialien in gängiger Wandstärke kombiniert werden

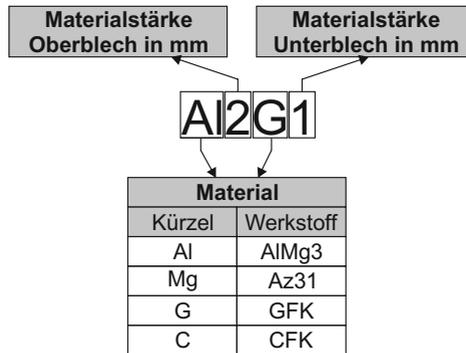


Abbildung 3.9: Nomenklatur für Materialkombinationen

und aufgrund der Glasfaserverstärkung eine geringere Korrosionsgefahr, als bei Kohlefaserverstärkungen besteht. An dieser Materialkombination wurden alle in der Dissertation beschriebenen Untersuchungen durchgeführt, um eine möglichst umfassende Charakterisierung zu ermöglichen. Dazu zählt insbesondere die Prüfung der dynamischen Festigkeitswerte.

3.7 Versuchsplan

3.8 Prozessuntersuchungen

In Abbildung 3.10 ist der Versuchsplan für die durchzuführenden Untersuchungen zu sehen. Der genaue Ablauf wird im Folgenden beschrieben. Im ersten Schritt wurden prozessspezifische Untersuchungen durchgeführt. Erfasst wurden standardmäßig der Eindringweg, die Eindringzeit sowie die aufgezeichneten Werte der Anpresskraft. Des Weiteren wurden Schiffe angefertigt und mikroskopisch auf spezifische Merkmale untersucht.

Tabelle 3.6: Materialkombinationen

		Oberblech	AlMg3	AlMg3	AZ31	AZ31
		Blechdicke	1 mm	2 mm	1 mm	2 mm
Unterablech	Blechdicke					
AlMg3	1 mm		A11A1	A12A1	Mg1A1	Mg2A1
AlMg3	2 mm		A11A2	A12A2	Mg1A2	Mg2A2
CFK	1 mm		A11C1	A12C1	Mg1C1	Mg2C1
CFK	2 mm		A11C2	A12C2	Mg1C2	Mg2C2
GFK	1 mm		A11G1	A12G1	Mg1G1	Mg2G1
GFK	2 mm		A11G2	A12G2	Mg1G2	Mg2G2

Prioritätenklasse

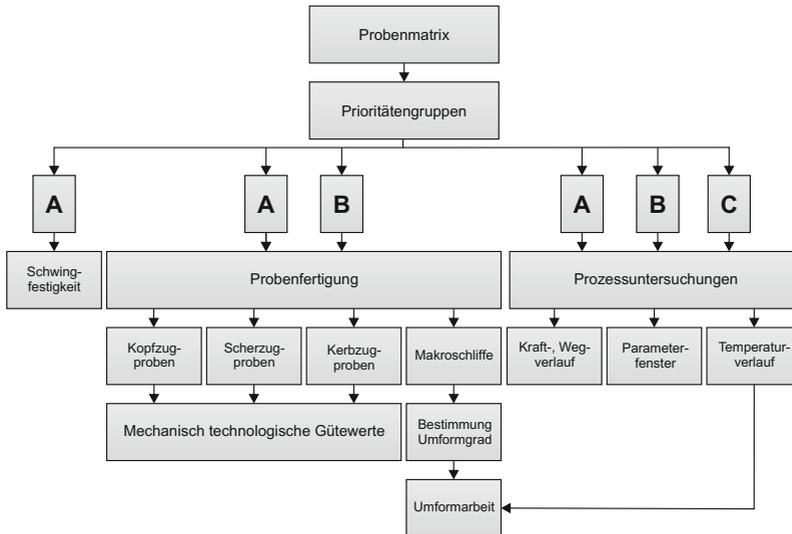


Abbildung 3.10: Versuchsplan

Um das Eindringverhalten sowie die Buchsenbildung genauer zu betrachten, wurden Stufenversuche durchgeführt. Dazu wurde der Niet, basierend auf den aufgenommenen Messwerten des Wegaufnehmers, nur bis zu einer bestimmten Eindringtiefe in die Bleche getrieben und anschließend entfernt. Durch stufenweise Erhöhung der Eindringtiefe erhält man so Proben in unterschiedlichen Stadien der Fügestellenausbildung. Diese Proben wurden optisch sowie über Schliiffuntersuchungen charakterisiert. Darüber hinaus ist es für das Prozessverständnis und für die spätere Auslegung des Prozesses notwendig, Kennwerte über Umformgrad der Metallbleche, sowie die Prozesstemperatur zu erhalten.

Für Temperaturmessungen wurde an den Nietdorn eines Blindnietes ein Thermoelement vom Typ K angeschweißt (siehe Abbildung 3.11). Dabei ist es wichtig, dass das Thermoelement nicht unmittelbar an der Spitze angebracht ist, damit es nicht bei der ersten Berührung von Niet und Blech zerstört wird. Es darf auch nicht zu weit von der Spitze entfernt sein, damit Wärmeleitungsverluste ausgeschlossen werden können. Diese Art der Temperaturmessung ist lediglich in der ersten Prozessphase, dem Eindringen des Nietes in die Bleche möglich. Sobald eine gewisser Eindringweg erreicht ist, wird das Thermoelement zerstört und die Messung bricht ab. Dies reicht jedoch, um Temperaturanstieg und Maximaltemperatur bestimmen und damit weitere Prozesseigenschaften und den Einfluss auf die beteiligten Werkstoffe abschätzen zu können.

Für die weitere Auslegung des modifizierten Blindnietens ist es unerlässlich, zu ermitteln, welche Arbeit eine entsprechende Fügeanlage aufbringen muss, um einen Nietvorgang durchzuführen. Basierend auf den durchgeführten Prozessuntersuchungen wurden Materialkombinationen der Prioritätenklasse **B** auf die notwendige Umformarbeit hin untersucht. Dazu wurden an Schliiffproben Vermessungen der ausgebildeten Buchse vorgenommen. Über das in Kapitel 2.3.2 beschriebene Röhrenmodell wurde der Umformgrad des Metallblechs bei Metall/-Kunststoffverbindungen ermittelt.

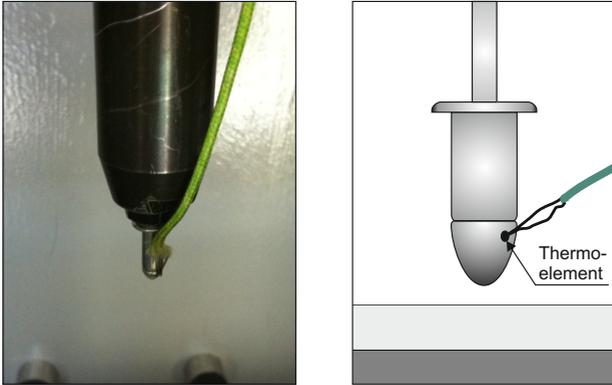


Abbildung 3.11: An den Blindnietkopf wird zur Temperaturbestimmung eine Thermoelement angeschweißt (links: Foto, rechts: schematische Darstellung)

Aus Umformgrad und der in der Parameterstudie bestimmten Eindringzeit lässt sich die Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ errechnen:

$$\dot{\varphi} = \frac{\varphi}{t_{Eindring}} \quad (3.14)$$

Anhand Umformgrad, Umformgeschwindigkeit und Temperatur können die in Kapitel 3.6.1 ermittelten Fließkurven genutzt werden, um die Fließspannung zu bestimmen. Aus dieser kann nach Formel 2.7 die Umformarbeit in Abhängigkeit des Umformwirkungsgrades errechnet werden. Da dieser nicht bekannt ist, können keine absoluten, zumindest jedoch relative Aussagen zur Umformarbeit getroffen werden. Aus diesem Grund wird die relative Umformarbeit W_{rel} genutzt:

$$W_{rel} = V \cdot (k_{fm1} \cdot \varphi_1 + k_{fm1} \varphi_2 + \dots + k_{fmn} \varphi_n) \quad (3.15)$$

3.9 Probencharakterisierung

3.9.1 Optische Bewertung

Ausgehend von den Prozessuntersuchungen wurden alle in Tabelle 3.6 aufgeführten Materialkombinationen hergestellt und entsprechend charakterisiert. Dazu wurden mehrere Proben pro Kombination gefertigt und im ersten Schritt optisch bewertet. Auf der Probenoberseite wurde die Beeinflussung durch das modifizierte Blindnieten betrachtet. Mögliche Beobachtungen sind Deformationen, Anrisse, Späne oder sonstige Unregelmäßigkeiten. Auf der Unterseite wurde die Buchsenbildung bewertet. Bei Metall/Kunststoff Verbindungen, wie Al2G2 oder Mg1C1 wird die sichtbare Faserschädigung, die Faserumlenkung, Deformationen und Anrisse im Unterblech bewertet. Bei Metall/Metall Verbindungen wurden auf der Unterseite ebenfalls die Buchsenbildung, sowie mögliche Anrisse und Deformationen, also die Durchbiegung des Blechs im Bereich der Fügezone bewertet. Die Ausformgeometrie des Blindnietes wurde in Bezug auf die Bildung eines notwendigen Hinterschnitts zur Übertragung von Kopfbelastungen betrachtet. Zu jeder Materialkombination wurden Proben zur Untersuchung der Zwischenschichteigenschaften angefertigt. Dazu wurde das modifizierte Blindnieten bis zum kompletten Durchdringen des Nietes durch die Bleche durchgeführt, der Niet anschließend jedoch nicht ausgeformt, sondern entfernt. Aufgrund dessen konnten die Bleche voneinander gelöst und untersucht werden. Betrachtet wurden dabei die Buchsenbildung des Oberblechs, Schmelzbereiche im FKV, mögliche Anhaftungen zwischen Ober- Unterblech bei Metall/Kunststoff Verbindungen und mögliche Anrisse oder Deformationen der Bleche. Als Orientierung zur Bewertung der optischen Eigenschaften wurden die in 2.4 aufgeführten Qualitätskriterien aus vergleichbaren Verfahren, wie dem Fließlochformen herangezogen. Insbesondere die in Metallblechen ausgebildeten Buchsen wurden hinsichtlich ihrer Größe, Gleichmäßigkeit und dem Verhältnis aus Buchsenlänge und Risslänge quantifiziert.

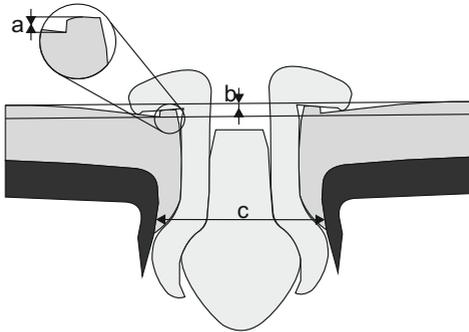


Abbildung 3.12: Geometrische Kennwerte einer Nietverbindung im Schlift:
 a - Materialaufstieg, b - Materialdurchbiegung, c - äußerer Buchsendurchmesser, gemessen am Durchmessermaximum

3.9.2 Schliffproben

Für jede Materialkombination wurden Schliffproben angefertigt. Diese wurden so angefertigt, dass ein Querschnitt durch die Symmetrieachse der Nietverbindung entsteht. Durch Schleifen mit einer feinen Körnung wurde die Probenoberfläche so präpariert, dass lichtmikroskopische Makroaufnahmen angefertigt werden konnten. Diese wurden nach folgenden Kriterien bewertet:

- **Buchse:** Bewertung von Größe und Gleichmäßigkeit der sich bildenden Buchse bei Metall/Kunststoff und Metall/Metall Verbindungen (siehe Abbildung 3.12).
- **Deformation Oberblech:** Plastische Verformung bzw. Eindellen des Oberblechs außerhalb des Fügepunktes (siehe Abbildung 3.12)
- **Deformation Unterblech:** Plastische Verformung des Unterblechs. Eventuelle Spaltbildung zwischen den Blechen

- **Materialaufstieg:** Überhöhung auf der Oberseite des Oberbleches durch Materialverdrängung und damit fehlerhaftes Aufliegen des Setzkopfes auf dem Oberblech
- **Schädigung des Kunststoffs** Delaminationserscheinungen, Faserbruch, weitere Schädigungen im Schliff (siehe Kapitel 2.2.12)
- **Schädigungsgrad Niet:** Verformungen oder Schädigungen von Niethülse, Dorn oder Setzkopf des Blindniet.
- **Ausformung:** Bewertung von Hülseneinformung und Nietdornposition im Vergleich zur konventionellen Nietverbindung.

3.9.3 Faserschädigung

Damit der Grad der Faserschädigung bestimmt werden kann, wurden für ausgewählte Proben Veraschungsversuche durchgeführt. Dabei wurden Versuchskombinationen mit FKV in einem Ofen auf 600 °C erhitzt und die thermoplastische Matrix damit verdampft. Die verdampfte Matrix wurde über eine Entlüftung abgesaugt. Die Dauer der Veraschung wurde so gewählt, bis sich keine Verdampfung mehr feststellen ließ. Danach konnten die einzelnen Gewebeschichten aus der Probe entfernt und optisch ausgewertet werden. Es wurde ermittelt, in welchem Bereich Fasern tatsächlich geschädigt, also durchtrennt oder abgeknickt sind. Da jede einzelne Schicht betrachtet werden kann, ist so eine dreidimensionale Aussage zur Faserschädigung möglich. Es wurden zudem Vergleiche zum Modell der Faserumlenkung in Kapitel 2.3.2 angestellt.

3.10 Mechanisch technologische Prüfung

3.10.1 Kerbzugfestigkeit

In Kapitel 2.5 wird die Schwächung des Materials durch Bohren oder andere lochformende Prozesse in einem Metallblech oder in einem FKV beschrieben. Um entsprechende Proben für das modifizierte Blindnieten herzustellen, wurden Bleche mit der in der in Abbildung 3.14 (rechts) gezeigten Geometrie in Orientierung an DIN 65559:1991 hergestellt und gefügt. Dabei wurde der Prozess so manipuliert, dass der Niet nach dem Eindringen durch die Bleche nicht ausformt, sondern direkt entfernt werden kann (siehe Grafik 3.13). Die Bleche besitzen somit die Ausbildung einer Buchse oder eines Lochs, nicht jedoch das Fügelement. Die entstandenen Kerbzugproben wurden anschließend statisch auf Zug bis zum Werkstoffversagen belastet. Dabei wurden Maximalkraft bzw. Spannung und Versagensart bewertet und mit im gleichen Durchmesser durch Bohren hergestellte Lochungen verglichen. Dadurch ist eine Aussage über den Grad der Materialschädigung im Vergleich zum konventionellen Blindnieten mit Vorbohren möglich.

3.10.2 Scherzug- und Kopfzugfestigkeit

Basierend auf den gewonnenen Prozesskenntnissen wurden für die Materialkombinationen der Prioritätengruppen **A** und **B** Scher- und Kopfzugproben hergestellt. Die dafür genutzten Probengeometrien sind in Abbildung 3.14 zu sehen. Anschließend wurden die Proben statisch geprüft. Ausgewertet wurden Maximalkraft und Versagensmodus. Zur statistischen Absicherung wurden für jede Materialkombination und Belastungsart mindestens fünf Einzelproben herangezogen. Die Ergebnisstreuung wird über die Standardabweichung angegeben.

Um die Blindnietverbindung hinsichtlich der ertragbaren Lasten mit anderen Prozessen vergleichen zu können, werden in der Regel Festig-

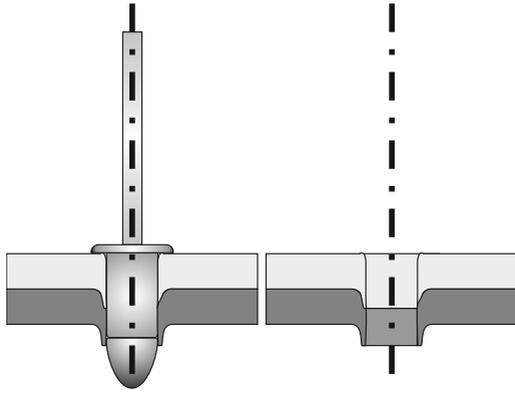


Abbildung 3.13: Prozessablauf ohne Nietausformen zur Probengewinnung für die Untersuchung der Kerbzugfestigkeit

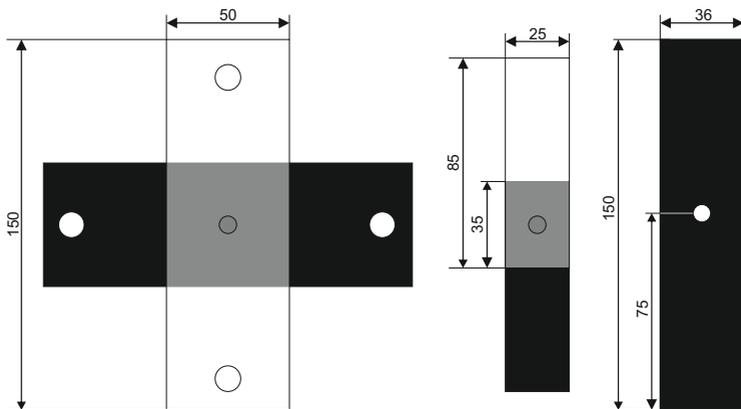


Abbildung 3.14: Probenformen für Kopfzug (links), Scherzug (mitte) und Kerbzugfestigkeitsprobe nach DIN 65559 (rechts)

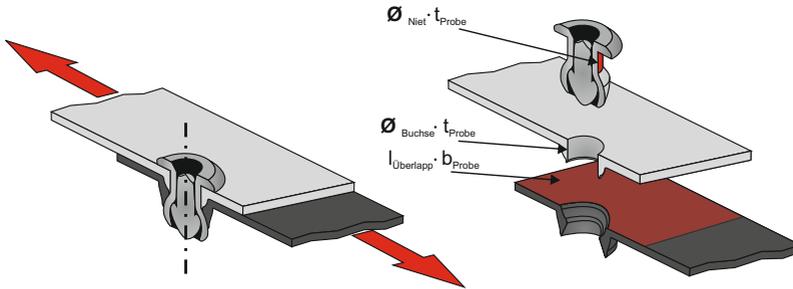


Abbildung 3.15: Mögliche Bezugssysteme für Festigkeitswerte: Überlappfläche, Klemmfläche und Buchsenfläche

keitswerte verwendet. Vor allem in der Mischbauweise besteht dabei das Problem des Bezugssystems. Während zum Beispiel für Schweißnähte im Stahlbau als Bezug für die Festigkeit der Nahtquerschnitt dient, können das beim Fügen von FKV und Metallen unterschiedliche Flächen sein. Dies ist in Abbildung 3.15 aufgeführt. Für Klebe- oder Schmelzklebeverbindungen wird die Überlappfläche genutzt (Probenbreite \times Überlapplänge). Bolzenverbindungen werden auf den Bolzendurchmesser und die Probenstärke hin betrachtet, so beim konventionellen Blindnieten auf den Nietdurchmesser und die Klemmlänge. Beim modifizierten Blindnieten kann dies auch gemacht werden, gleichermaßen könnte sich jedoch ebenso auf den Außendurchmesser der sich bildenden Metallbuchse bezogen werden. Aus diesem Grund werden im Weiteren Kräfte und nicht Festigkeiten betrachtet. Für eine Vergleichsbasis, werden Referenzgeometrien gebildet. Dabei handelt es sich um eine Überlappverbindung mit festgelegter Materialstärke. Die Abmaße der Probe sind so groß, dass ein Bolzenpunkt gesetzt werden kann und die zulässigen Randabstände nach Kapitel 2.5 gerade eingehalten werden. Die notwendige Überlappfläche wird als Referenz für Klebe- und Schmelzklebeverbindungen verwendet. So lassen sich aus Festigkeitswerten in der Literatur ertragbare Kräfte errechnen und vergleichen.

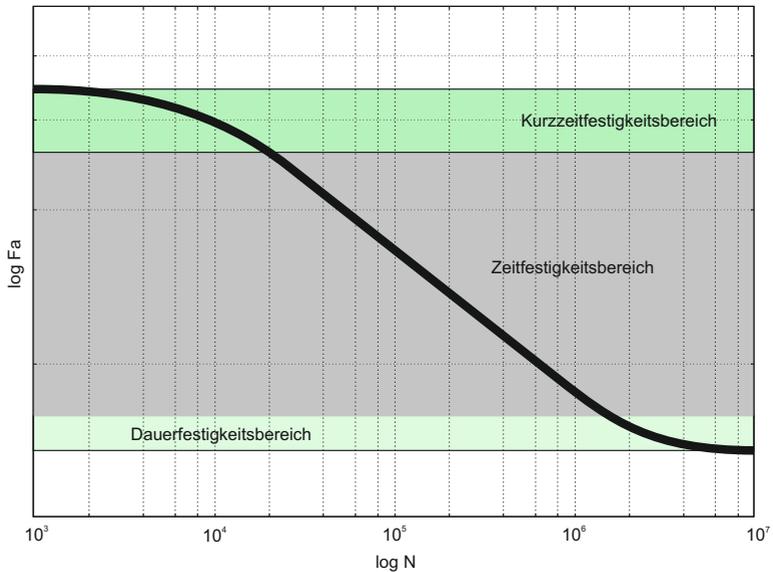


Abbildung 3.16: Darstellung einer Wöhlerlinie

3.10.3 Dynamische Festigkeit

Für Proben der Prioritätenklasse **A** wurden Untersuchungen zur dynamischen Scherzugbelastbarkeit vorgenommen. Dazu wurde der sogenannte Wöhlerversuch durchgeführt, bei dem die ertragbare Schwingspielzahl für bestimmte Belastungsamplituden ermittelt und in einem Diagramm mit logarithmischer Achsaufteilung aufgetragen wird (siehe Abbildung 3.16) [73]. Die Wöhlerlinie wird in den kontinuierlich abfallenden Bereich der Zeitfestigkeit und in den stagnierenden Bereich der Dauerfestigkeit eingeteilt. Als dauerfest gelten in der Regel Proben, die eine Schwingspielzahl von bis zu $2 \cdot 10^6$ ohne Schädigung erreichen.

Zur Ermittlung der Wöhlerlinie für das modifizierte Blindnieten wurden Versuche sowohl im Zeitfestigkeitsbereich als auch im Dauerfestigkeitsbereich durchgeführt. Dazu wurden die Proben schwellend mit Vor-

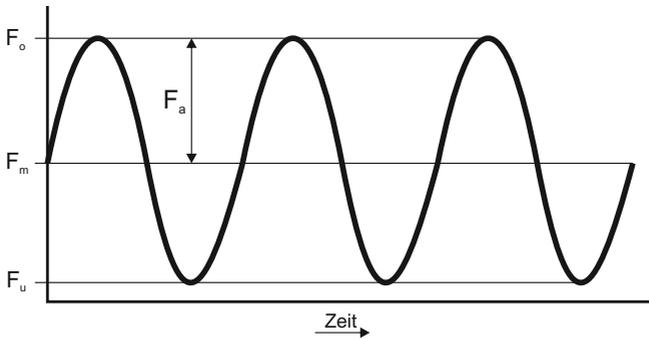


Abbildung 3.17: Schwingbelastung mit der Oberlast F_o , der Unterlast F_u , der Lastamplitude F_a und der Mittellast F_m

spannung belastet. Der prinzipielle Kraftverlauf ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Festgelegt sind dabei die Prüffrequenz $f = 40\text{Hz}$ sowie das Spannungsverhältnis R , das sich aus der Oberlast F_o und der Unterlast F_u ergibt:

$$R = \frac{F_u}{F_o} = 0,1 \quad (3.16)$$

Die Lastamplitude F_a drückt den Belastungsgrad der Probe aus mit:

$$F_a = \frac{F_o - F_u}{2} \quad (3.17)$$

Untersuchungen im Zeitfestigkeitsbereich

In einem Bereich hoher Schwingenspielzahlen N weist der Festigkeitsabfall über die Zyklenzahl in der doppelt logarithmischen Darstellung ein nahezu lineares Verhalten auf. Aus diesem Grund wird von einer Zeitfestigkeitsgeraden gesprochen. Der Geradenabfall wird dabei durch den Faktor k ausgedrückt. Je höher dieser ist, desto geringer ist der

Festigkeitsverlust über die Schwingenspielzahl und desto flacher die sich ergebende Wöhlerlinie. Quantitativ lässt sich die ertragbare Schwingenspielzahl durch folgende Formel errechnen.

$$N = N_D \cdot \left(\frac{F_a}{F_{aD}} \right)^{-k} \quad (3.18)$$

Während N_D die Anzahl der Lastspiele im Übergang zur Dauerfestigkeit und F_D die Lastamplitude in diesem Bereich darstellt, ist die statistisch ertragbare Schwingenspielzahl bei Last F_{aD} durch N ausgedrückt. Durch Umstellen kann die ertragbare Lastamplitude bei einer bestimmten Schwingenspielzahl dargestellt werden durch:

$$F_a = F_{aD} \cdot \left(\frac{N}{N_D} \right)^{-\frac{1}{k}} \quad (3.19)$$

Das Horizontverfahren ist eine Methodik zur Ermittlung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich. Dabei werden nur ausgewählte Versuchslasten untersucht, diese jedoch jeweils mit einer hohen Probeanzahl. Ausgehend von Erkenntnissen aus Vorversuchen werden dabei mindestens drei sogenannte Lastenhorizonte definiert. Diese sollten so verteilt sein, dass sie nahezu den gesamten Bereich der Zeitfestigkeit abdecken. Für jeden Lasthorizont werden mehrere Proben bis zum Versagen geprüft, wobei Durchläufer nicht in die Auswertung einfließen können. Für jeden Horizont und dessen Probenschar erfolgt eine separate statistische Ermittlung der erreichbaren Schwingenspielzahl mit einer bestimmten Überlebenswahrscheinlichkeit P . In Abbildung 3.18 ist ein Wöhlerdiagramm zu sehen, in dem drei Lasthorizonte mit jeweils mehreren Einzelproben aufgetragen sind.

In der Horizontauswertung werden Einzelproben in einem Gaußschen Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen. Dazu werden die Werte in einem Schema absteigend nach ihrer Überlebensdauer N angeordnet und es wird aufsteigend von 1 beginnend der Wert m zugeordnet. Mit der

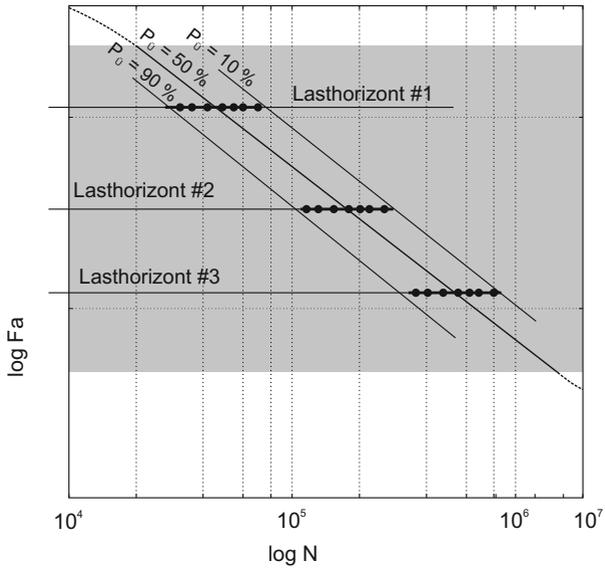


Abbildung 3.18: Ermittlung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich durch drei Lasthorizonte mit einer Hüllkurve der Überlebenswahrscheinlichkeit von 10 % bis 90 %

Anzahl n an Einzelversuchen lässt sich die Überlebenswahrscheinlichkeit jeder erreichten Schwingspielzahl nach folgender Formel ermitteln.

$$P = \frac{3 \cdot m - 1}{3 \cdot n + 1} \quad (3.20)$$

Für jede Überlebenswahrscheinlichkeit kann nun eine entsprechende Wöhlerlinie durch Interpolation zwischen den Lasthorizonten erstellt werden. In der Regel wird dabei eine Hauptlinie für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % genutzt, welche durch einen Hüllbereich von 10 % bis 90 % abgedeckt wird.

Kapitel 4

Ergebnisse und Diskussion

4.1 Prozesscharakteristik

In Abbildung 4.1 ist der Prozessverlauf für das modifizierte Blindnieten von 2 mm Aluminium auf der Oberseite und 2 mm glasfaserverstärkten Kunststoff auf der Unterseite zu sehen (Materialkombination Al2G2). Im Diagramm ist der Eindringweg des Nietes in die Bleche über die Prozesszeit aufgezeichnet. Der Weg stellt den Abstand zwischen Setzkopfunterseite und Blechoberseite dar. Zusätzlich ist die gemessene Fügekraft aufgetragen. Während verschiedener Prozessstadien wurde das modifizierte Blindnieten gestoppt und Proben entnommen. Deren Schliffbilder sind neben dem Diagramm abgebildet und mit dem jeweiligen Zeitpunkt im Kurvenverlauf verbunden. Wie in der Abbildung zu sehen, wird der Niet zu Beginn des Prozesses mit einer Kraft von 200 N auf die Bleche gedrückt. Das dient dem Zweck, dass er sich beim Start auf einer Referenzposition befindet. Nach zwei Sekunden wird die Kraft über den Pneumatikzylinder auf 2000 N erhöht. Der Niet dringt mit einer nahezu gleichförmigen Geschwindigkeit in das Aluminiumblech ein. Ab einem bestimmten Weg beschleunigt der Eindringvorgang deutlich. In diesem Bereich wird die Fügekraft stufenweise herabgesetzt. Der Niet dringt durch die Bleche, bis der Setzkopf auf deren Oberseite auftrifft.

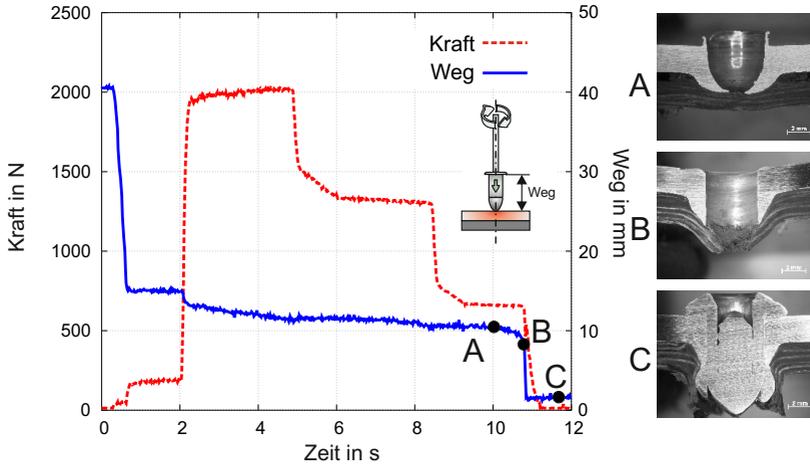


Abbildung 4.1: Prozessablauf für das modifizierte Blindnieten der Materialkombination Al2G2 bei einer Drehzahl von 4200 U/min. Zeitlicher Verlauf von Eindringweg und Kraft mit dazugehörigen Schlibbildern.

Der Niet wird ausgeformt und der Prozess gestoppt. Auf dem untersten Bild ist ein Schliff der fertiggestellten Verbindung zu sehen.

Für hohe Drehzahlen ab 3500 Umdrehungen pro Minute zeichnet sich ein sehr stabiles Eindringverhalten ab. Bei konstanten Parametern ändern sich auch bei mehrmaliger Versuchsdurchführung die Prozesszeit oder Charakteristik nicht messbar. Der Eindringvorgang erfolgt nahezu linear. Nur beim Einsetzen der Fügkraft gibt es im Wegverlauf einen geringen Versatz. Das lässt auf eine Durchbiegung von Nietgerät und Befestigung infolge der erhöhten Kraft schließen. Sind der Prozess abgeschlossen und der Niet ausgeformt, sitzt dieser spielfrei in der Verbindung und wird gleichmäßig ausgeformt. Bei niedrigen Drehzahlen unter 3500 Umdrehungen pro Minute zeichnet sich eine Unregelmäßigkeit im Prozess ab. In Abbildung 4.2 ist der Prozessablauf für einen Versuch bei 1500 Umdrehungen pro Minute dargestellt. Das Eindringen in die Bleche ist nicht mehr linear und deutlich langsamer, als bei hohen Drehzahlen.

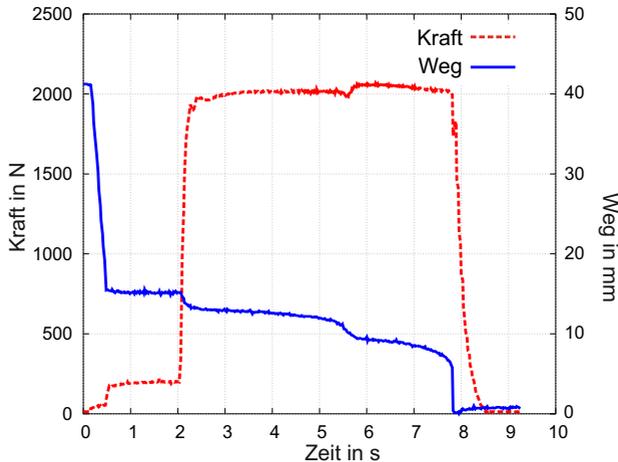


Abbildung 4.2: Prozessablauf für das modifizierte Blindnieten der Materialkombination Al2G2 bei einer Drehzahl von 1500 U/min.

Darüber hinaus gibt es größere Streuungen in den Prozesseigenschaften. Die Eindringzeit kann so zwischen 7 und 10 Sekunden schwanken.

Diese Unregelmäßigkeiten resultieren in einer veränderten Fügestellenbildung. Wie in Abbildung 4.3 zu sehen, dringt der Niet inhomogen in die Bleche ein. Schon während des Eindringens wird der Niet am Nietkopf geschädigt. Es kommt zu Anschweißerscheinungen des Aluminiumblechs am Nietkopf und die Niethülse wird in diesem Bereich deformiert. Der Setzkopf weist auf der Oberseite Schleifspuren auf, was auf eine Rotation zwischen Niet und Nietpistole hindeutet. In der gebildeten Aluminiumbuchse sind Rasterlinien sichtbar. Diese Merkmale sind Indizien dafür, dass es bei niedrigen Drehzahlen zum Stick-Slip Effekt kommt. Dabei übersteigt die Haftreibung die Gleitreibung und der Nietkopf bleibt kurzzeitig in der Aluminiumbuchse stecken. Dadurch dreht der Niet im Nietgerät. In Abbildung 4.4 ist dieser Effekt zu sehen. Bei einem stabilen Prozess wird der Nietdorn durch das Dreibackenfutter sicher gehalten und es ergeben sich örtlich begrenzte Griffmarken im Nietdorn. Sobald es zum Durchrutschen des Dorns kommt, sind an

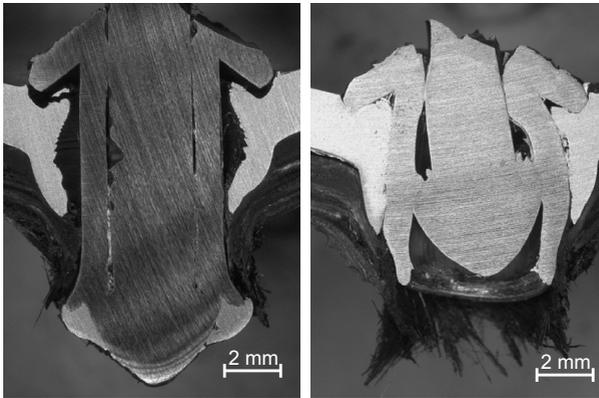


Abbildung 4.3: Schliffbilder einer nicht ausgeformten und einer ausgeformten Nietprobe (Al2G2) mit den Parametern aus Abbildung 4.2

dieser Stelle umlaufende Rillen infolge der Relativbewegung zwischen Dorn und Futterbacken zu beobachten. Darüber hinaus ist die Niethülse geschädigt. Es ist zu vermuten, dass durch die Unregelmäßigkeiten so hohe Kräfte am Nietkopf auftreten, dass dieser lokal verformt wird. Aus dem Stick-Slip-Effekt und der deformierten Niethülse ergibt sich eine veränderte Buchsenausbildung. Wird der Niet ausgeformt, wird die Hülse in die sich gebildete Lücke deformiert und der Nietkopf formt sich deutlich weiter und in einer verkippten Position ein. Die Fügestelle ist somit unregelmäßig, stark verformt und damit von minderer Qualität.

4.2 Fügstellenausbildung bei Metall/FKV Verbindungen

Für die Untersuchung des Eindringverhaltens wurden Stufenversuche durchgeführt. Für die Materialkombination Al2G2 sind die jeweiligen



Abbildung 4.4: Links: Nietdorn und Nietkopf nach Blechdurchdringung bei hoher Drehzahl und stabilem Prozess; Rechts: geschädigter Nietdorn und Nietkopf bei niedrigen Drehzahlen mit Schleifspuren und einer leicht eingeformten Niethülse

Schliffbilder für das Metallblech in Abbildung 4.5 und für den Faser-Kunststoff-Verbund in Abbildung 4.8 zu sehen. Es entsteht eine Buchse mit einem anfänglich geschlossenen Buchsenboden. Durch einen hohen Umformgrad und einen kontinuierlichen Druck durch den Niet reisst dieser schlussendlich auf und es entsteht eine offene Buchse. Bei ausreichend hoher Drehzahl von über 3500 Umdrehungen pro Minute bildet sich eine wiederholbare Buchsengeometrie aus. Nur ein geringer Anteil des Blechmaterials steigt zur Oberseite des Blechs auf. Dort bildet sich ein dünner Kranz aus, der durch das Auftreffen des Setzkopfes verformt wird (siehe Abbildung 4.6). Der Großteil des verdrängten Blechmaterials bildet eine Buchse in Vorschubrichtung des Niets. Die Wandstärke der Buchse nimmt von der Oberseite bis zum unteren Rand kontinuierlich ab. Dieser weist Einrisse beziehungsweise Unregelmäßigkeiten auf, die durch das Aufklaffen des ursprünglich vorhandenen Buchsenbodens entstehen. Das Eindringen in den Faser-Kunststoff-Verbund erfolgt in deutlich kürzerer Zeit und mit weniger Anpresskraft, als das Eindringen in Metall. Primär kommt es zum Kontakt von Metallblech und FKV. Solange der Buchsenboden im Metall nicht durchbrochen wird, kann es nicht zur Berührung von Niet und FKV kommen. Da beide Bleche fixiert sind, gibt es beim Durchdringen keine rotative Relativbewegung zwischen den Blechen. Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, ist dieses Verhalten mit dem Warmformen nach Hufenbach zu vergleichen [34], [35]. Das erhitzte Metallblech erwärmt die Kunststoffmatrix über die Schmelztemperatur und verdrängt sie nach außen unter Ausbildung eines Schmelzkranzes. Dieser entsteht, indem der flüssige Kunststoff in den Spalt zwischen Metallblech und FKV gepresst wird. Das ist sowohl in Schliffbildern (Abbildung 4.8) als auch in Abbildung 4.9 deutlich zu erkennen. Im Bereich des Schmelzkranzes kommt es zu Anhaftungen der Kunststoff-Matrix am Metallblech. In Abbildung 4.7 ist eine getrennte Probe zu sehen. Anhaftungsreste weisen darauf hin, dass es beim Trennen teilweise zum Kohäsionsbruch im FKV kommt. Durch die Verdrängung der Matrix werden die Fasern größtenteils freigelegt und entweder seitlich verschoben oder soweit in Vorschubrichtung verdrängt, bis es zum Faserbruch kommt.

In Abbildung 4.10 ist der Stufenversuch für die Buchsenbildung im Metallblech für die Materialkombination aus zwei Millimeter Magnesium

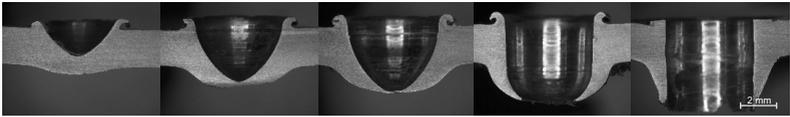


Abbildung 4.5: Buchsenbildung für 2 mm starkes Aluminium (AlMg3)



Abbildung 4.6: Links: Noch nicht fertig ausgebildete Buchse mit einem Kranz aus aufgestiegenem Material; Rechts: Bei der fertig ausgebildeten Buchse wird der Kranz durch das Auftreffen des Setzkopfes verformt

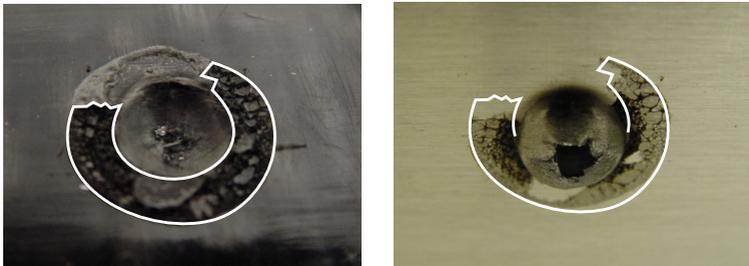


Abbildung 4.7: Aluminium- und GFK-Blech nach der Probentrennung: Im Bereich des Schmelzkranzes (Markierung) kommt es zu Anhaftungserscheinungen.

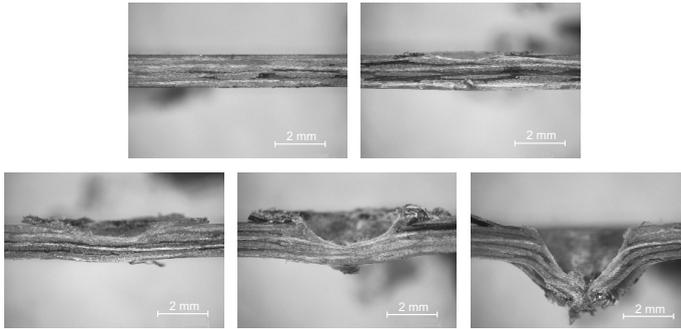


Abbildung 4.8: Buchsenbildung im FKV (Tepex dynalite RG102 mit Glasfaserverstärkung mit Schmelzkranzbildung auf der Blechoberseite)



Abbildung 4.9: Eindringen des Metallblechs in den FKV unter Aufschmelzen des Matrixmaterials.

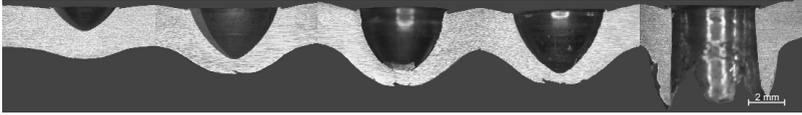


Abbildung 4.10: Buchsenbildung für 2 mm starkes Magnesium (AZ31)



Abbildung 4.11: Rissbildung während der Buchsenbildung auf der Unterseite des Magnesiumbleches mit sprödem Aufklaffen des Buchsenbodens

und zwei Millimeter GFK (Mg₂G₂) abgebildet. Im Gegensatz zu Aluminium kommt es beim Einformen in Magnesium zu einem geringeren Aufsteigen von Material und somit zur Bildung eines sehr dünnwandigen Kranzes (siehe Abbildung 4.10). Auf der Blechunterseite kommt es schon zu Beginn des Eindringvorgangs zur Bildung von Anrissen im Bereich der größten Zugspannung infolge der Verformung. Grund hierfür ist die geringe Umformbarkeit von Magnesium bei Raumtemperatur. In Abbildung 4.11 ist diese Rissbildung in den verschiedenen Eindringstadien zu sehen. Der anfängliche Anriss führt zu einem sprödem Aufklaffen der Magnesiumbuchse und somit auch zu Sprödrissen in der Buchse selber.

Schliffbilder von gefügten Materialkombination mit Metallblechen als Oberblech und FKV als Unterblech sind in Abbildung 4.12 zu sehen. Wie beschrieben, bildet sich im Oberblech eine Buchse und im Unterblech eine Lochung mit Ausfransungen an der Unterseite. In den Schliffbildern ist zu sehen, dass es vor allem bei Materialkombinationen mit Aluminium als Oberblech zu Deformationen im Bereich der Füge­stelle kommt. Da Magnesium sich schlechter verformen lässt, tritt dieser Effekt dort weniger ausgeprägt auf. Die Deformationen sind allerdings

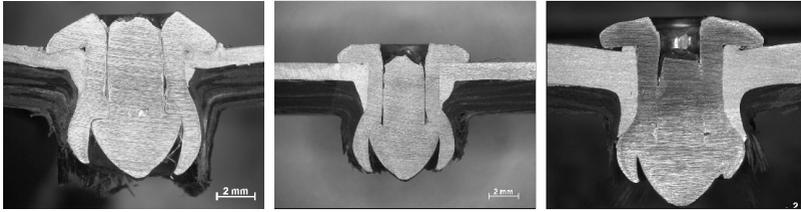


Abbildung 4.12: Schliffbilder von Metall/FKV Verbindungen; von links nach rechts: Al1G2, Mg1G2, Al2G1

auch von der Steifigkeit des Unterblechs abhängig. Allen Proben gleich ist, dass die Fasern in Vorschubrichtung des Niets umgelenkt werden. Es treten zwischen Metallblech und FKV keine Lücken oder Spalte auf. Das deutet darauf hin, dass die Matrix des FKV während des Fügevorgangs schmelzflüssig wird, in den Spalt zwischen Metall und FKV gedrückt wird und diesen auffüllt. Zwischen den einzelnen Gewebelagen lassen sich keine Delaminationen feststellen. Bis auf die Faserbrüche in Form von Ausfransungen an der Rückseite der Verbindung kommt es zu keiner weiteren Schädigung des FKV im tragenden Bereich. Das spricht für eine hochwertige Verbindung, vor allem verglichen mit mechanischen Fügeverfahren, bei denen offensichtliche Schädigungen, wie Delaminationen und Faserbrüche im Schliffbild zu erkennen sind [14].

4.3 Fügstellenausbildung bei Metall/Metall Verbindungen

Werden zwei Metallbleche mit dem modifizierten Blindnieten gefügt, verändert sich die Prozesscharakteristik, insbesondere in Bezug auf das Eindringverhalten. In Abbildung 4.13 sind Schliffbilder aus einem Stufenversuch mit der Materialkombination Al2Al2 zu sehen. Das Eindringen in das Oberblech erfolgt analog zu Versuchen mit Metall/FKV

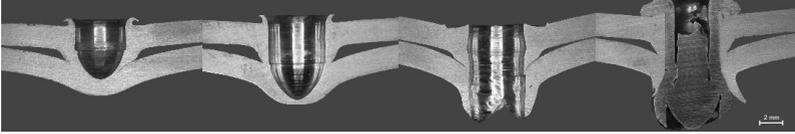


Abbildung 4.13: Buchsenausbildung beim Fügen der Materialkombination Al2Al2

Verbindungen. Da das Unterblech bei Metall/Metall Kombinationen einen höheren Widerstand gegen das Durchdringen und gleichzeitig eine geringere Steifigkeit aufweist, unterscheidet sich in diesem Bereich die Prozesscharakteristik deutlich.

Im ersten Bildabschnitt ist zu sehen, dass die Buchse des Oberblechs noch einen geschlossenen Boden besitzt. Diese drückt mit der Fügekraft der Versuchsanlage auf das untere Blech. Auch wenn dieses durch Wärmeleitung erhitzt wird, kann das Material nicht wie bei FKV verdrängt werden. Das Unterblech wird durch den Druck im Fügebereich plastisch verformt und es klafft außerhalb der Buchse eine Lücke zwischen den Blechen auf. Erst im weiteren Verlauf, wenn die Buchse des Oberblechs durchbrochen wurde, formt sich der Niet auch im Unterblech ein und bildet auch hier eine Buchse aus. Durch die Ausbildung von zwei Metallbuchsen vergrößert sich in diesem Bereich deutlich die Klemmlänge des Blindnietes. Insgesamt wird für das Fügen von zwei Metallblechen mehr Zeit zum Eindringen benötigt, als bei Metall/FKV Verbindungen. Darüber hinaus besteht bei Metall/Metall Verbindungen die Gefahr der thermischen Überlastung des Niets. Durch die längere Fügezeit und der durchgängig hohen Fließspannung im Prozess kann die Reibwärme den Niet so erhitzen, dass dieser sich in der entstehenden Metallbuchse verschweißt und es so zum Abbruch des Fügevorgangs kommt. Das tritt vor allem bei geringeren Fügekräften auf. Da keines der gefügten Materialien in den schmelzflüssigen Zustand übergeht, wird der entstandene Spalt zwischen Ober- und Unterblech nicht ausgefüllt. Durch den Setzvorgang werden die Bleche zwar zusammengezogen, ein gewisser Abstand bleibt jedoch, da die Buchsen von Ober- und Unterblech anstoßen. Die Buchse des Oberblechs kann somit auch nicht in das Unterblech greifen.

4.4 Optimierung - Der Weg zum richtigen Parametersatz

Unabhängig von der untersuchten Materialkombination hat sich gezeigt, dass der Prozess mit höchstmöglicher Kraft und Drehzahl ein sehr stabiles Eindringverhalten aufweist und einen schnellen Prozessverlauf ermöglicht. In Abbildung 4.14 ist der Verlauf des Eindringweges und der Fügekraft für einen einstufigen Prozess mit einer Drehzahl von 4200 Umdrehungen pro Minute zu sehen. Der Verlauf ist in diesem Fall in drei Abschnitte eingeteilt. Ausgehend von der Ausgangsposition wird die Nietpistole mit Niet anfänglich mit einer Aufsetzkraft auf die Bleche geführt (Abschnitt I). Abschnitt II stellt das lineare Eindringen dar, welches durch die maximal mögliche Kraft von knapp 3000 N für die Kombination Mg2G2 in unter einer Sekunde erfolgt. In Abschnitt III durchstößt der Niet die zu fügenden Bleche, wodurch der Widerstand gegen das Eindringen schlagartig nachlässt. Der Niet fällt unter voller Fügekraft innerhalb von 0,06 Sekunden durch, bis er mit dem Setzkopf auf dem Blech aufschlägt. Im Kraftverlauf stellt sich das durch ein kurzzeitiges Absacken durch den fehlenden Widerstand und ein folgendes Maximum von 2500 N dar. Dieses Aufschlagen des Niets auf das Werkstück führt zu starken plastischen Deformationen in den Blechen. Dies ist in Abbildung 4.16 (links) zu erkennen. Da das Herabfallen des Niets sehr schnell erfolgt, kann eine Kraftsteuerung dieses Verhalten nicht ausgleichen.

Inwiefern die Eindringzeit durch Fügekraft und Drehzahl bestimmt ist, kann in Abbildung 4.15 gesehen werden. Hier wurden diese Parameter an der Materialkombination Mg2G2 verändert. Die Kombination aus einer geringen Drehzahl und einer niedrigen Fügekraft hat sehr hohe Eindringzeiten zur Folge. Dort tritt auch der der Slip-Stick Effekt einhergehend mit Schäden am Niet auf. Bei einer Drehzahl von 4200 Umdrehungen pro Minute kann die Eindringzeit durch Änderungen der Fügekraft zwischen einer und fünf Sekunden variiert werden.

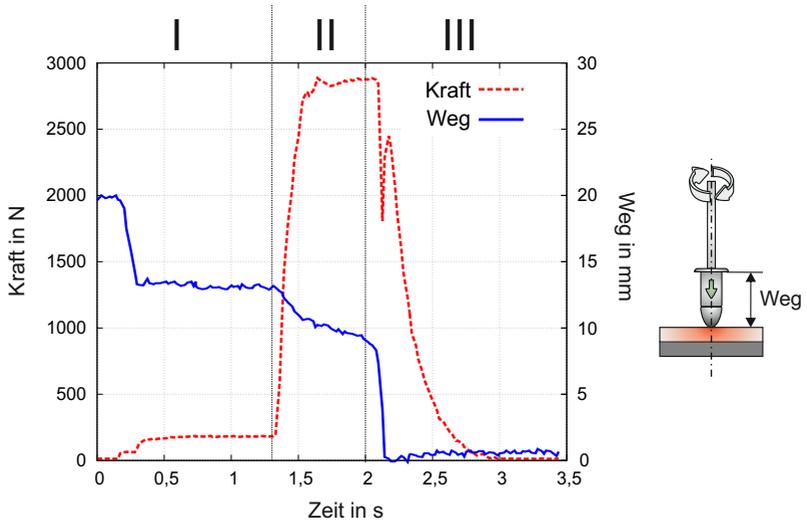


Abbildung 4.14: Eindringverhalten bei einstufigem Kraftverlauf. Nach dem Heranfahren des Niets an das Blech (Abschnitt I) dringt dieser mit gleichbleibender Geschwindigkeit in die Materialien ein (Abschnitt II), bis sich die Eindringgeschwindigkeit sprunghaft erhöht und der Niet mit dem Setzkopf auf die Bleche auftrifft (Abschnitt III)

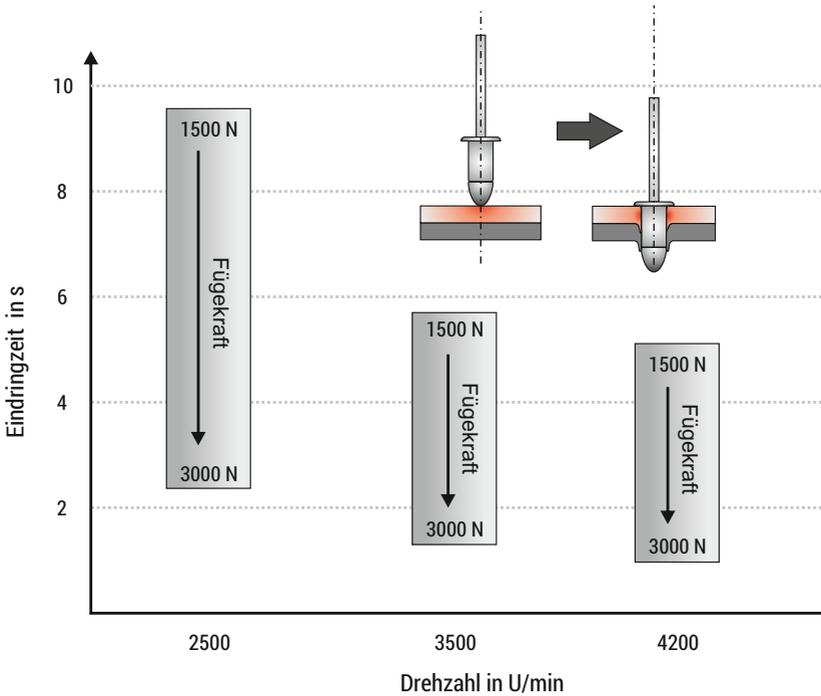


Abbildung 4.15: Mögliches Zeitfenster vom Aufsetzen des Nietes bis zur Durchdringung der Bleche bei der Kombination aus 2 mm Magnesium und 2 mm GFK in Abhängigkeit von Drehzahl und Fügekraft

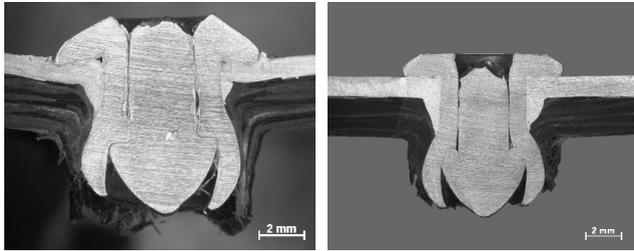


Abbildung 4.16: Deformation der Materialkombination Mg1G2, links: einstufiger Prozess; rechts: gestufter Prozess

Aufgrund des Aufschlagens des Setzkopfes im einstufigen Kraftverlauf muss der Prozessverlauf so optimiert werden, dass die Versuchsanlage die Anpresskraft schon beim Übergang von Abschnitt II zu Abschnitt III in Abbildung 4.14 herabregelt. Aus diesem Grund hat sich ein gestufter Prozess als geeignet für einen schnellen Prozessverlauf ohne zu starker Deformation der Bleche gezeigt. In Abbildung 4.17 ist ein solcher Verlauf zu sehen. Kurz vor dem kompletten Durchdringen des Nietes wird die Kraft reduziert. Dadurch erhöht sich minimal die Fügezeit, es tritt jedoch im Gegensatz zu Versuchen mit konstanter Anpresskraft keine Lastspitze auf. Die Kraftreduzierung ist hierbei über den gemessenen Eindringweg gesteuert.

Um mit möglichst geringem Aufwand für eine Materialkombination die Kraftabstufung zu optimieren, ist wie bei der Untersuchung der Buchsenbildung ein Stufenverfahren durchzuführen. Dabei müssen folgende Schritte erfolgen:

- **1.** Mit höchstmöglicher Kraft und Drehzahl wird der Niet bis zu einem Weg x_1 geführt.
- **2.** Wird x_1 erreicht, ohne dass der Niet die Probe durchdrungen hat, wird ein zweiter Versuch mit einem verlängerten Weg $x_2 = x_1 + a$ durchgeführt, wobei a eine Konstante ist und bei ca. 0,5 mm

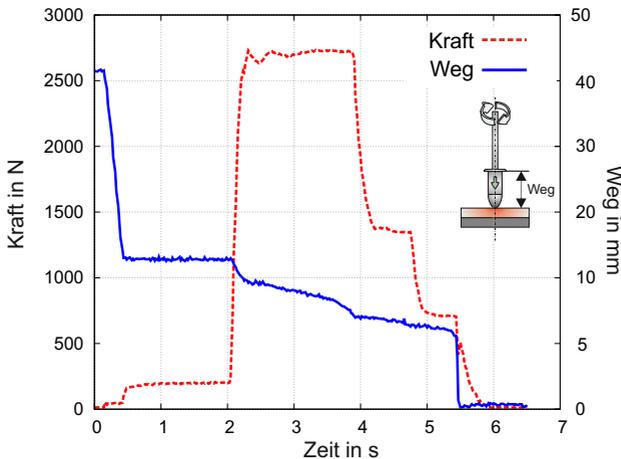


Abbildung 4.17: Eindringverhalten bei gestuftem Kraftverlauf. Materialkombination Al2Al2 mit einer Drehzahl von 4200 U/min

liegen sollte. Dieser Vorgang wird bis zu einem Weg x_n wiederholt, bei dem der Niet bei Versuch n die Bleche durchdringt.

- **3.** Der Prozess wird so gestuft, dass die Kraft ab Weg x_{n-1} um 50 % reduziert wird.
- **4.** Für den zweistufigen Prozess werden die Schritte 1. und 2. wiederholt. Dabei wird der Weg $x_{b1} = x_{n-1} + \frac{a}{2}$ genutzt, bis der Niet die Probe bei einem Weg x_{bm} durchdringt.
- **5.** Der Prozess wird so gestuft, dass die Kraft ab Weg x_{bm-1} um 80 % reduziert wird.

Diese Schritte können je nach Anzahl der Kraftstufen beliebig erhöht werden. Je feiner der Kraftverlauf gestuft werden soll, desto größer ist der Versuchsaufwand. Mit einer geeigneten Wegsteigerung a kann in kurzer Zeit ein wegabhängiger Kraftverlauf erarbeitet werden, der im größten Teil des Eindringens die maximale Eindringgeschwindigkeit

Tabelle 4.1: Parameter für die untersuchten Materialkombinationen

Materialkombination	Drehzahl U/min	Kraft N	Eindringzeit s
Al1G1/Al1C1	4200	1500	0,4
Al1G2/Al1C2	4200	1500	0,4
Al2G1/Al2C1	4200	3000	1,0
Al2G2/Al2C2	4200	3000	1,0
Mg1G1/Mg1C1	4200	1500	0,4
Mg1G2/Mg1C2	4200	1500	0,4
Mg2G1/Mg2C1	4200	3000	1,0
Mg2G2/Mg2C2	4200	3000	1,0
Al1A1	4200	1500	1,0
Al1A2	4200	3000	1,6
Al2A1	4200	3000	1,6
Al2A2	4200	3000	2,2
Mg1A1	4200	1500	1,0
Mg1A2	4200	3000	1,5
Mg2A1	4200	3000	1,5
Mg2A2	4200	3000	2,2

ermöglicht und kurz vor dem Durchdringen die Kraft zurücknimmt. Durch dieses Vorgehen konnte für sämtliche Materialkombinationen ein geeigneter Parametersatz erarbeitet werden. Es hat sich gezeigt, dass bereits ein dreistufiger Kraftverlauf ein stabiles Prozessverhalten mit geringen Probedeformationen zulässt.

In Tabelle 4.1 sind die ermittelten Parameter für die untersuchten Materialkombinationen zu sehen.

4.5 Temperaturbestimmung

Temperaturmessungen wurden sowohl mit Aluminium als auch mit Magnesium als Oberblech durchgeführt. Neben dem Werkstoff wurde die

Drehzahl zwischen 2500 U/min und 4200 U/min variiert. In Abbildung 4.18 ist der Verlauf bei der Verwendung von Aluminiumblech mit einer Drehzahl von 4200 U/min zu sehen. Da Thermoelemente relativ träge auf Temperaturänderungen reagieren, wurde eine geringe Fügekraft von F gleich 1500 N gewählt, um eine möglichst lang andauernde Eindringphase zu erreichen, bis das angebrachte Thermoelement durch den Eindringvorgang beschädigt wird. Abgebildet sind der Eindringverlauf, aufgezeichnet durch den induktiven Wegaufnehmer und die Temperatur, gemessen durch ein Thermoelement auf dem Blindnietdorn. Der Weg s beschreibt den Eindringweg des Nietes ab dem Beginn des Fügevorgangs. Bei dem Wert 0 setzt er mit der Spitze auf dem Oberblech auf und sinkt in der Folge weiter ein, was einen Anstieg von s zur Folge hat. Es ist das schon beschriebene Eindringverhalten mit einem nahezu linearen Vorschub bis zu einem Punkt nach 7 Sekunden zu erkennen. Ab diesem Zeitpunkt erhöht sich die Eindringgeschwindigkeit deutlich, bis die Bleche durchdrungen sind und der Niet mit dem Setzkopf aufsetzt. Der parallel aufgezeichnete Temperaturverlauf weist mehrere Phasen auf. Ausgehend von einer Ausgangstemperatur von ca. 46 °C, welche durch ein vorheriges leichtes Andrücken der Nietspitze auf dem Blech entsteht, steigt diese mit Beginn des Prozesses nahezu exponentiell an. Nach einer halben Sekunde geht der Temperaturanstieg in einen linearen Verlauf mit einer Heizrate von $\dot{\vartheta}$ gleich 69 K/s über. In der Folge sinkt sie auf 51 K/s ab. Kurz vor der Erhöhung der Eindringgeschwindigkeit in Folge des Durchbrechens des Buchsenbodens im Metallblech wird die Erwärmung noch einmal verstärkt, bis ein Temperaturmaximum von ϑ_{max} gleich 320 °C erreicht wird. Danach fällt der Niet durch das Material und die Messwertaufnahme des Thermoelements reißt ab.

Die Versuche mit verschiedenen Werkstoffen und Drehzahlen haben gezeigt, dass beim Eindringen in Aluminium bis zu 80 °C höhere Spitzentemperaturen erreicht werden, als beim Eindringen in Magnesium. Begründet werden kann das durch unterschiedliche Reibwerte und Wärmeleitfähigkeiten. Die Drehzahl hat keinen entscheidenden Einfluss auf die Spitzentemperatur, jedoch auf den Temperaturanstieg. Bei einer höheren Drehzahl steigt auch die Temperatur schneller an. Die gemessenen Werte entsprechen der Temperatur am Nietkopf. Aufgrund der hohen Rotationsgeschwindigkeit ist eine berührende Messung an der

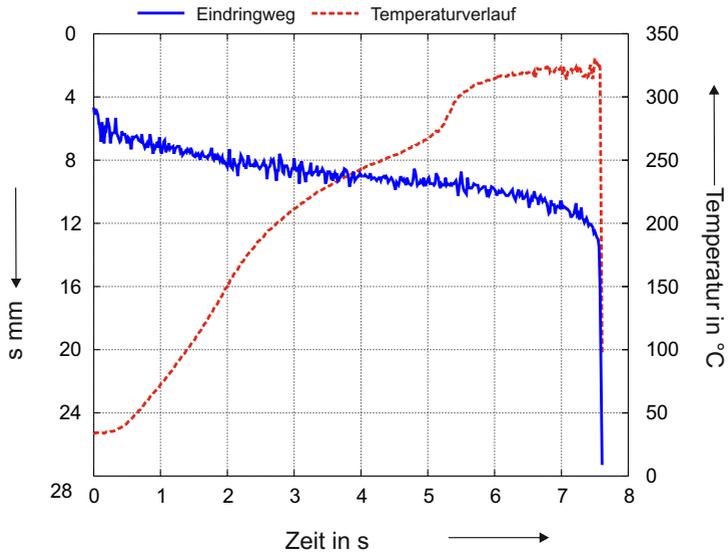


Abbildung 4.18: Verlauf von Eindringweg und Niettemperatur beim Fügen von Al2G2 mit einer Drehzahl von 4200 U/min und einer Fügekraft von 1500 N

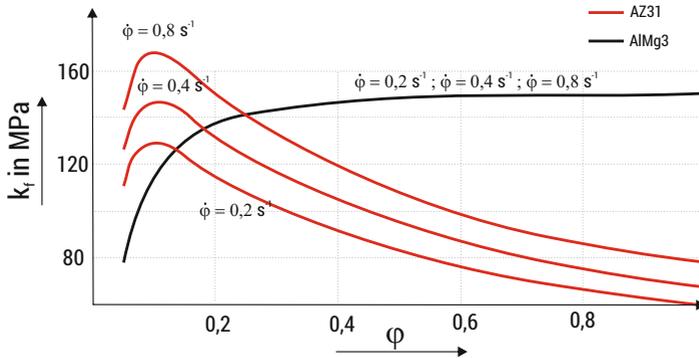


Abbildung 4.19: Fließkurven für AlMg3 und AZ31 bei 300 °C (Magnesium) und 320 °C (Aluminium) in Abhängigkeit von der Umformgeschwindigkeit

Blechprobe nicht möglich. Es kann somit lediglich abgeschätzt werden, welche Temperaturen in den Blechen erreicht werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Reibwärme auch dort zu Temperaturen der gleichen Größenordnung führen. Vor allem für das Fügen von Magnesiumblechen ist das von Bedeutung, da diese erst ab einer Temperatur von ca. 220 °C gut umformbar sind und sonst zu spröden Rissen neigen würden. Aufgrund von Wärmeleitung ist davon auszugehen, dass auch das Unterblech auf über 220 °C und damit über den Schmelzpunkt der thermoplastischen Matrix der FKV erhitzt wird. Nimmt man für das Blech in unmittelbarer Nähe zur Eindringstelle die gleiche Temperatur an, wie sie am Niet herrscht, lassen sich Prozesstemperaturen von 300 °C bei Magnesium und 320 °C bei Aluminium feststellen. Aus diesen Werten werden entsprechend Kapitel 3.6.1 Fließkurven für das Metall erstellt. In Abbildung 4.19 sind diese Fließkurven abgebildet.

4.6 Buchsenqualität

Die im Prozess ausgebildete Buchse beinhaltet im Gegensatz zu den meisten Einsatzfällen beim Fließlochformen zwar keine Funktionselemente wie ein Gewinde, trotzdem ist auch hier die Buchsenqualität von großer Bedeutung. Das Material muss zum größten Teil in Vorschubrichtung verdrängt werden, da aufsteigendes Material ein flächiges Aufliegen des Setzkopfes auf dem Blech verhindert. Zudem muss sich eine gleichmäßige rissarme Buchsenwandung ausbilden. Diese muss zum Einen einen axialen Widerstand beim Ausformen des Nietes ermöglichen, zum anderen soll sie unter Scherbelastung Kräfte übertragen. Darüber hinaus stellen Anrisse Ausgangspunkte für zyklisches Bauteilversagen dar.

In Abbildung 4.20 sind ausgebildete Buchsen für Oberbleche aus Aluminium und Magnesium in unterschiedlichen Blechstärken vor dem Ausformen des Nietes zu sehen. Dazu wurden Proben nach dem Eindringen des Nietes aufgetrennt und der Niet ohne Ausformung entfernt. Die Buchsen besitzen stets eine gleichmäßige Wandung, die lediglich kleine Anrisse aufweist. Die Buchsen können in diesem Stadium in die Qualitätsgruppe I nach den Kriterien für Fließlochbuchsen eingeteilt werden. Je größer die Blechstärke, desto länger werden die Buchsen und desto dicker deren Wandung. Dadurch vergrößert sich die Querschnittsfläche, über die Scherlasten vom Nietdurchmesser auf den Buchsendurchmesser übertragen werden können.

In Abbildung 4.21 sind Buchsen für jeweils 2 mm dicke Bleche aus Aluminium und Magnesium zu sehen. Hierbei wurde der Niet ausgeformt und befindet sich noch in der Fügestelle. Für die Sichtbarkeit der Buchsen wurden lediglich die Unterbleche entfernt. Es ist zu sehen, dass sich in der Buchse aus Magnesium Anrisse ausbilden, die eine deutlich größere Ausdehnung besitzen, als in den vorangegangenen Aufnahmen. Dies lässt sich durch das Nietausformen begründen. Die Niethülse wird gegen die Wandungen der Buchse gedrückt und formt diese nach außen. Dadurch reißt die Buchse an den Rändern ein und die Risse wachsen mit dem Grad der Umformung. Vor allem Buchsen aus Magnesium

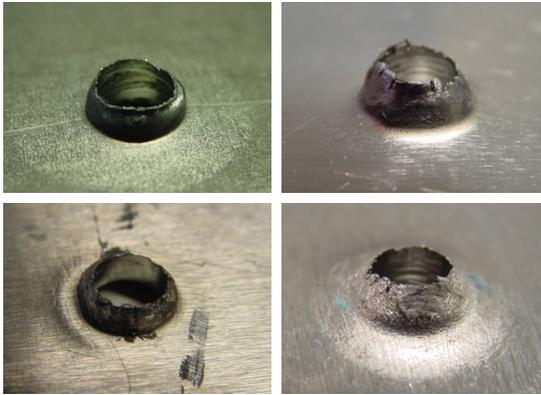


Abbildung 4.20: Gebildete Buchsen (oben links: 1 mm Aluminium; oben rechts: 2 mm Aluminium; unten links: 1 mm Magnesium; unten rechts: 2 mm Magnesium)

sind hier für eine Rissbildung anfällig, da das Ausformen bereits unter auskühlenden Bedingungen nach dem Stopp der Nietrotation stattfindet. Dadurch kann die für das Umformen wichtige Temperatur von 220 °C unterschritten werden und der Werkstoff besitzt spröde Eigenschaften. Durch die Nietausformung wird die Buchsenqualität von der Qualitätsgruppe I auf die Gruppe III gesenkt.

Verstärkt wird dieser Effekt bei Metall/Metall Verbindungen mit einem Aluminiumblech auf der Unterseite. In Abbildung 4.22 ist die Materialkombination Al2Al2 vor und nach dem Ausformen des Nietes zu sehen. Schon vor dem Ausformen besitzt die Buchse des Unterblechs Einrisse. Durch die Nietausformung wird sie zusätzlich stark deformiert und klappt auf. Es kommt zu mehreren großen Einrissen, welche die Buchse entlang der kompletten Länge durchdringen. Aufgrund der scharfkantigen Ausbildung und der Verletzungsgefahr ist die Verbindung in diesem Fall lediglich für den nicht sichtbaren und unzugänglichen Bereich geeignet.

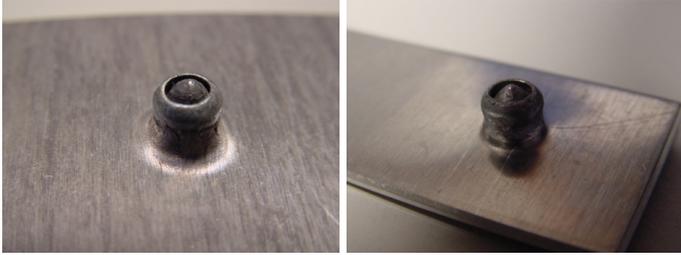


Abbildung 4.21: Buchsen nach dem Nietausformen; links: 2 mm Aluminium; rechts: 2 mm Magnesium

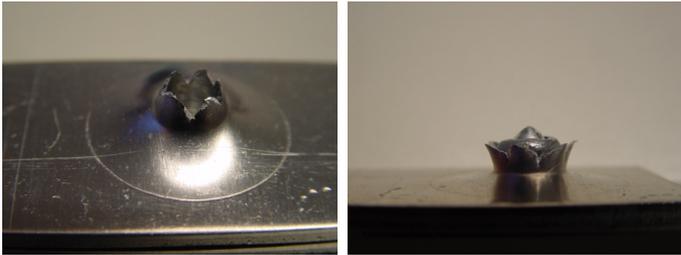


Abbildung 4.22: Buchse bei Metall/Metall Verbindungen (Materialkombination Al2Al2); links: vor dem Nietausformen; rechts: nach dem Nietausformen

Anhand von Mikroschliffen lassen sich im Bereich der Buchse keine besonderen Auffälligkeiten beobachten. In Abbildung 4.23 sind Schliffbilder einer Verbindung mit der Aluminiumlegierung AlMg3 zu sehen. Die Mikrostruktur im Bereich größter Umformung unterscheidet sich nur geringfügig von der im nicht umgeformten Bereich. Lediglich im Übergangsbereich von Niet zu Aluminium sind Mikrorisse als Folge mechanischer Einflüsse zu sehen. Diese treten jedoch in geringer Häufigkeit und in vernachlässigbar kleinen Dimensionen auf. Sichtbar ist die Walzstruktur des Aluminiumblechs. In Abbildung 4.24 sind Aufnahmen im unbeeinflussten Bereich und im umgeformten Bereich gegenübergestellt. Neben einer Umlenkung der Walzstruktur und einer leicht veränderten Anordnung an Ausscheidungspartikeln. Diese treten im Bereich der Buchse gehäufte und ungleichmäßiger verteilt auf.

4.7 Faserschädigung

Für ausgewählte Metall/FKV Verbindungen der Prioritätenklassen A und B wurden Veraschungsversuche nach dem Blindnietdurchgang durchgeführt. Aufgrund der verdampften Matrix ließen sich die einzelnen Gewebeschichten entfernen und getrennt optisch analysieren. Für ein CFK Blech mit 2 mm Blechstärke ist dies in Abbildung 4.25 zu sehen. Dieses besteht aus zehn Gewebelagen mit einer jeweiligen Stärke von 0,25 mm. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Kohlefasern in der Körperbindung kaum umlenken lassen und im Bereich der Fügestelle ein hoher Anteil der Faserbündel Brüche aufweist. Der Grad der Schädigung ändert sich mit der Lage jeder Gewebeschicht. In der ersten Lage werden nahezu alle Fasern um den Nietbereich geschädigt. In der obersten (zehnten) Lage jeweils nur ein Bündel in jeder Anordnung. Aufgrund der verringerten Faserbeweglichkeit in der Körperbindung und der geringen Bruchdehnung der Kohlefasern entsteht auch durch das modifizierte Blindnieten eine sehr starke Faserschädigung. Die Theorie der Faserumlenkung kann hier nicht beobachtet werden.

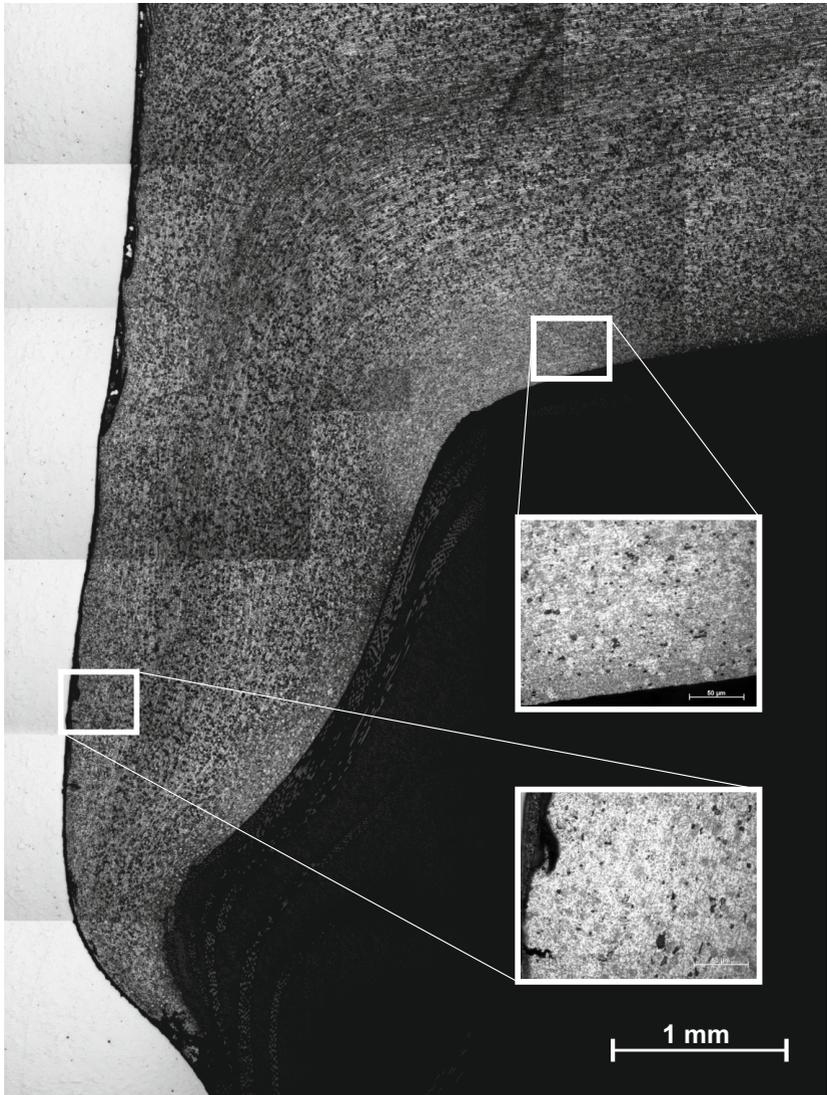


Abbildung 4.23: Mikroschliff einer AlMg3 Buchse (Materialstärke 2 mm), zusammengesetzt aus mehreren Einzelaufnahmen.

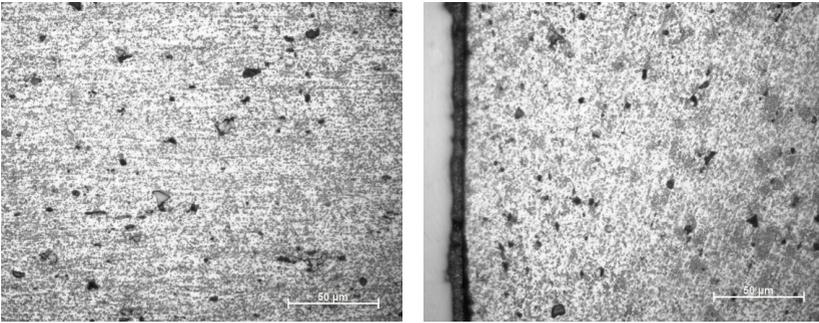


Abbildung 4.24: Mikroschliff von AlMg3 unbehandelt (links) und umgeformt (rechts) mit deutlich erkennbarer Walzstruktur und veränderter Anordnung an Ausscheidungspartikeln

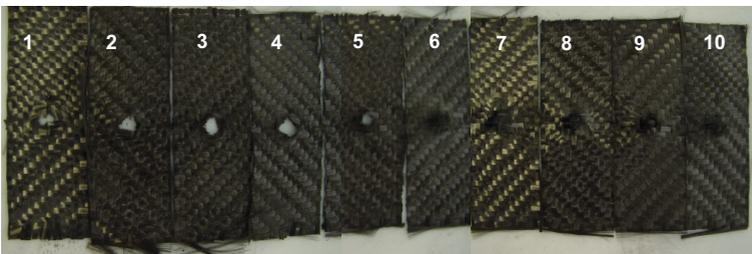
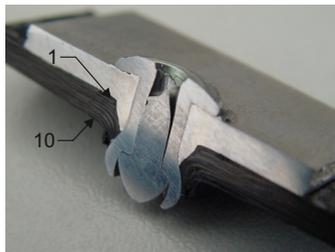


Abbildung 4.25: Faserschädigung an einem 2 mm CFK Blech bestehend aus zehn Gewebeschichten (Schichtanordnung siehe obere Abbildung) nach Veraschung der Matrix.

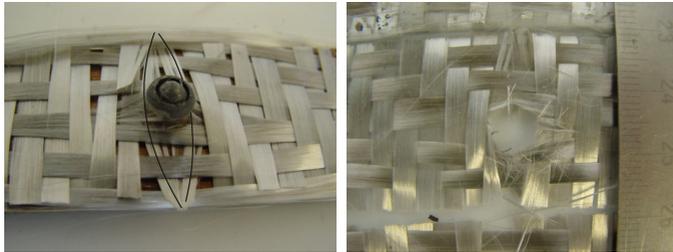


Abbildung 4.26: Faserschädigung an einem 2 mm GFRK Blech bestehend aus fünf Gewebeschichten. Zu sehen ist die unterste und damit am stärksten geschädigte Schicht

Die glasfaserverstärkten Proben besitzen eine Gewebeschichtdicke von 0,5 mm, bestehen bei 2 mm Blechdicke somit aus vier Einzelschichten. In Abbildung 4.26 ist eine entnommene Schicht Glasfasern zu sehen. Auch hier sind die Faserbündel in einer Körperbindung angeordnet. Bei beiden Arten der Faserverstärkung kommt es teilweise zu einer Umlenkung der Fasern im Fügebereich und teilweise zu einer lokalen Zerstörung der Fasern. Der Anteil der zerstörten Fasern ist bei den CFK Werkstoffen höher, als bei den GFRK Werkstoffen. Das lässt sich mit der geringeren Bruchdehnung begründen. Bei allen FKV Werkstoffen behindert zudem die Körperbindung teilweise das Ausweichen der Fasern, da diese durch kreuzende Faserbündel in ihrer Bewegung behindert werden. Des Weiteren werden sie durch die Buchsenbildung nicht nur zwei-, sondern zum Teil dreidimensional verschoben. Dadurch kommt es zu einer vergrößerten Faserdehnung.

4.8 Umformarbeit

Für die vergleichende Bewertung der Umformarbeit wurde anhand von Schlibfbildern, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, nach dem Röhrenmodell der Umformgrad im Bereich der Buchsenbildung ermittelt. In den

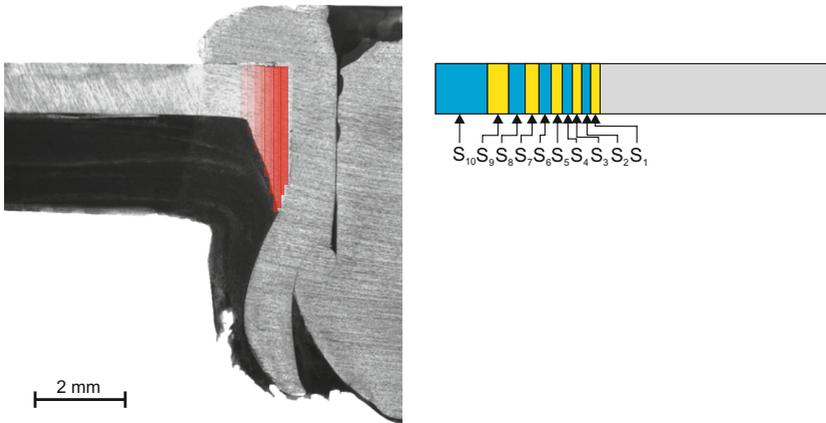


Abbildung 4.27: Umformgradermittlung nach dem Hülsenmodell für 1 mm Magnesium (AZ31) und 2 mm GFK: rechts: Ursprüngliche Blechgeometrie, farblich unterteilt in die Einzelsegmente S_1 bis S_{10} ; links: die Buchsenanbildung und die darüber skalierten Volumensegmente. Je höher der ermittelte Umformgrad, umso stärker ist die rötliche Einfärbung der Segmente.

Abbildungen 4.27 und 4.28 ist beispielhaft die Umsetzung des Röhrenmodells an den Materialkombinationen Mg1G2 und Al2C1 zu sehen. Es wurden 10 Einzelsegmente mit einem Segmentvolumen von $V_{Segment}$ gleich $4mm^3$ angelegt und im Bereich der Buchse auf die jeweilige Geometrie angepasst. Als Ergebnis sind in Tabelle 4.2 die einzelnen Umformgrade $\varphi_{Segment}$ aufgeführt, die in Abbildung 4.27 ebenso durch eine Farbskalierung aufgetragen sind.

Bei einer Eindringzeit von einer Sekunde ergibt sich für zwei Millimeter dickes Blech nach Formel 3.14 eine Umformgeschwindigkeit von $\dot{\varphi}$ gleich $0,8s^{-1}$. Da sich die Eindringgeschwindigkeit zwischen Aluminium und Magnesium nicht unterscheidet und diese nahezu linear von der Materialstärke abhängig ist, trifft der Wert auf alle untersuchten Materialien

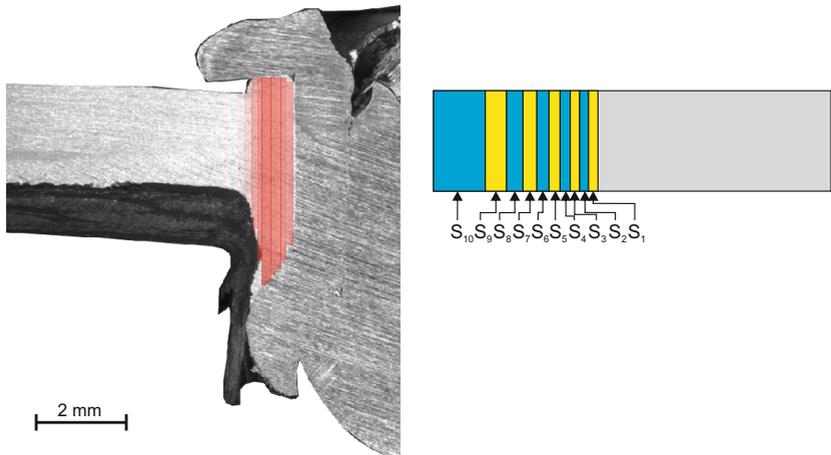


Abbildung 4.28: Umformgradermittlung nach dem Hülsenmodell für 2 mm Aluminium (AlMg3) und 2 mm GFK: rechts: Ursprüngliche Blechgeometrie, farblich unterteilt in die Einzelsegmente S_1 bis S_{10} ; links: die Buchsenausbildung und die darüber skalierten Volumensegmente. Je höher der ermittelte Umformgrad, umso stärker ist die rötliche Einfärbung der Segmente.

Tabelle 4.2: Einzel- und Gesamtumformgrade für die in Abbildung 4.27 dargestellte Probe)

Segment	Volumen mm^3	Ausgangslänge mm	Umformlänge mm	Umformgrad
S_1	4	1	1,1787	0,1644
S_2	4	1	1,2810	0,2476
S_3	4	1	1,6634	0,5089
S_4	4	1	1,9312	0,6581
S_5	4	1	2,1250	0,7538
S_6	4	1	2,4357	0,8902
S_7	4	1	2,7511	1,0120
S_8	4	1	3,0913	1,1286
S_9	4	1	3,0913	1,1286
S_{10}	4	1	2,8952	1,0631
Gesamt	40			0,755

zu. Bei einer Prozesstemperatur von ca. 320 °C kann bei Aluminium eine Fließspannung k_f von 150MPa und eine relative Umformarbeit nach Formel 2.7 von W zwischen 2265 und $3540 \cdot 10^{-9} J$ ermittelt werden. Die bestimmten Werte für verschiedene Oberblechmaterialien und -dicken sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

4.9 Mechanisch Technologische Güterwerte

4.9.1 Kerbzugfestigkeit

Kerbzugfestigkeitsuntersuchungen wurden für 1 mm starkes CFK und 1 mm starkes GFK durchgeführt. 2 mm dicke Proben konnten nicht nach DIN 65559 untersucht werden, da die verwendete Zugversuchsanlage

Tabelle 4.3: Relative Umformarbeit für verschiedene Oberblechmaterialien und -dicken)

Werkstoff	Stärke mm	Umformgrad	Umform- geschwindigkeit s^{-1}	relative Umformarbeit $10^{-9} J$
AZ31	1	0,755	0,8	2567
AZ31	2	0,590	0,8	4012
AlMg3	1	0,755	0,8	2265
AlMg3	2	0,590	0,8	3540

nicht für solche Lasten ausgelegt ist. Es wurden Kerbfestigkeitsproben in Anlehnung an DIN 65559 geprüft und durch das modifizierte Blindnieten gelochte Proben mit ungelochten verglichen. Überraschenderweise versagten die ungelochten CFK Proben bei einer Last von 11800 N, was einer Festigkeit von lediglich 330 MPa entspricht (Werksangaben siehe Tabelle 3.5: 750 Mpa). Die Festigkeit der gelochten Proben beträgt 6600 N, was 56 % der Ausgangsfestigkeit entspricht.

4.9.2 Kopf- und Scherzugkräfte

Für alle Metall/FKV Materialkombinationen wurden Scherzugversuche durchgeführt. Hauptaugenmerk waren dabei die Maximalkraft sowie das Versagensverhalten. In Abbildung 4.29 ist der Kraft-Weg-Verlauf für einen Scherzugversuch der Materialkombination Al2G2 zu sehen. Zu Beginn steigt die Kraft bei geringer Dehnung auf ein Maximum von knapp 4000 N an. Ist dieses erreicht, sackt die Kraft auf 2400 N ab. Danach kommt es zu einer starken Probendehnung unter gleichbleibender Zugkraft. Die Fotoaufnahmen der dazugehörige Proben der Materialkombination Al2Al2 nach dem Zugversuch zeigen dieses Verhalten deutlich. Die Proben haben an der Fügestelle auf Seiten des Faser-Kunststoff-Verbundes versagt. Der Niet hat sich dabei infolge der Scherbelastung durch den Werkstoff durchgezogen, bis der Probenrand

erreicht wurde. Dieses Verhalten kann als Lochleibungsversagen eingeordnet werden. Dies ist als positiv zu bewerten, da es sich um ein allmähliches, nicht um ein plötzliches Versagen handelt.

Dieses Verhalten konnte für die meisten Materialkombinationen beobachtet werden. Ausnahmen bilden die Kombinationen Al1G2, Al1C2, Mg1G2 und Mg1C2, also Proben mit einem dünnen Metall- und einem dicken FKV Blech. Hier tritt das Versagen im Metallblech in der Art auf, dass es im Bereich der Fügestelle knickt und an der Buchse einreißt (siehe Abbildung 4.30). Die erreichten Maximalkraftwerte für Metall/FKV Verbindungen am Beispiel von Aluminium- und Magnesiumblechen kombiniert mit GFK sind in den Abbildungen 4.31 und 4.32 zu sehen. Allen Materialkombinationen gleich ist eine sehr geringe Streubreite der Ergebnisse von unter 5 %. Verglichen mit Literaturwerten zu Festigkeiten in der Mischbauweise stellt das einen sehr guten Wert dar. Bemerkenswert ist dabei, dass die ertragbaren Kräfte ausschließlich durch die Blechstärken beeinflusst werden. Versuche mit veränderten Parametersätzen und Proben, die nach Kapitel 4.1 als ungleichmäßig und qualitativ schlecht eingeschätzt wurden, weisen die gleichen Kraftwerte auf.

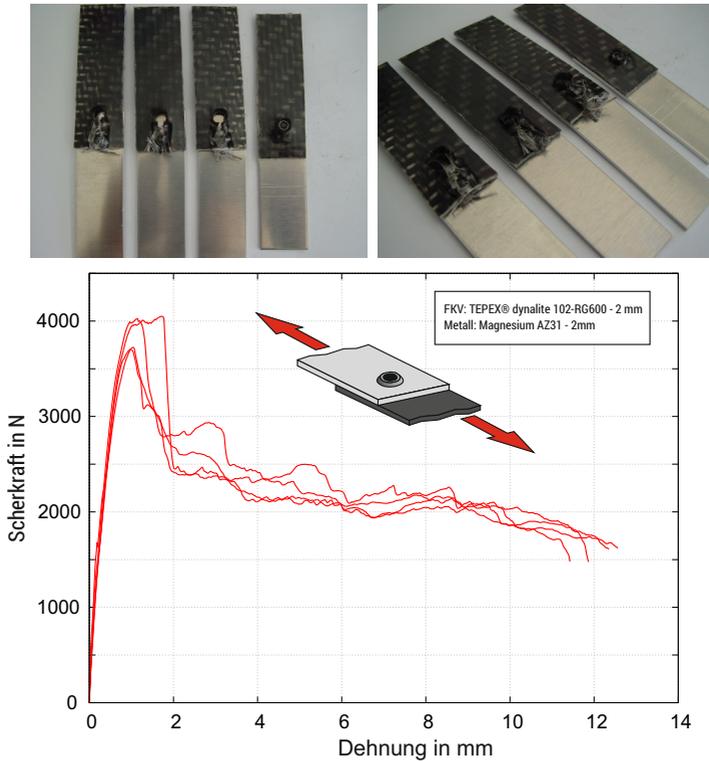


Abbildung 4.29: unten: Kraft-Dehnungs-Diagramm unter Scherung für die Materialkombination Al2G2; oben: Fotoaufnahmen dazugehöriger Proben

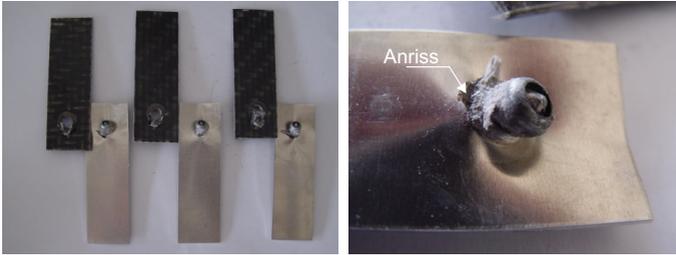


Abbildung 4.30: Versagen bei der Materialkombination Al1G2 mit Anrissen im Aluminiumblech

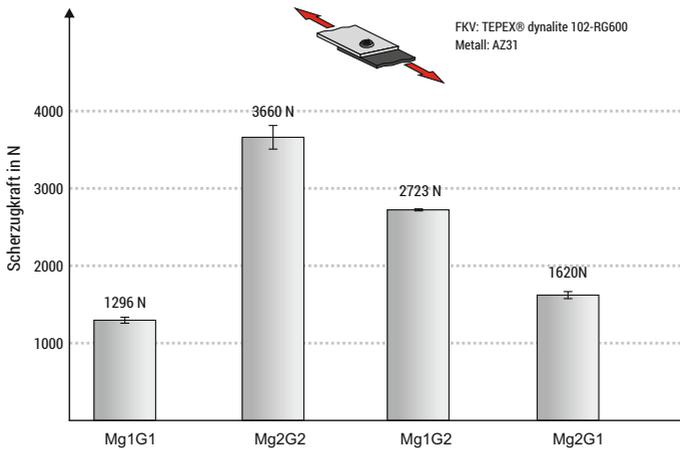


Abbildung 4.31: Erreichbare Scherzugkräfte für Verbindungen von Magnesium und GFK

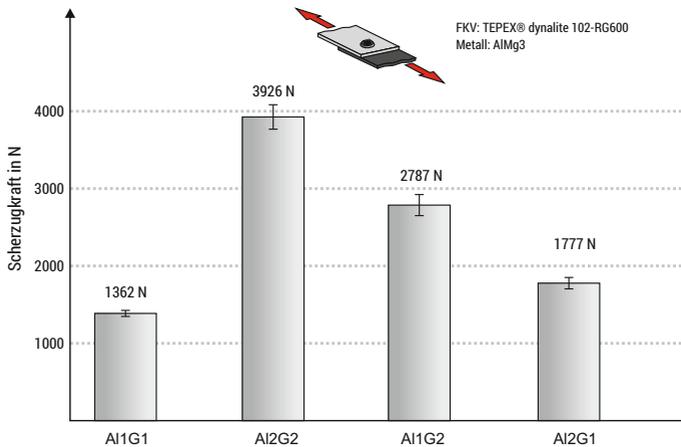


Abbildung 4.32: Erreichbare Schervzugkräfte für Verbindungen von Aluminium und GFK

Darüber hinaus konnten Unterschiede in den Maximalkräften zwischen Proben mit GFK und CFK festgestellt werden. Vergleichende Kraft-Weg Verläufe für die Kombinationen Al2G2 und Al2C2 sind in Abbildung 4.33 aufgetragen. Während die grundsätzliche Versagencharakteristik gleich ist, liegt das Kraftmaximum bei der Kombination mit CFK unter der mit GFK, das folgende Lastniveau beim Durcharbeiten des Niets durch die Bleche ist jedoch höher. Begründen lässt sich das geringere Kraftmaximum mit einer höheren Faserschädigung des CFK Blechs infolge des Nietprozesses durch eine geringere Bruchdehnung der Kohlefasern gegenüber Glasfasern. Sobald das Kraftmaximum überschritten ist, wirkt sich vor allem die Matrix auf den Widerstand gegen das Lochleibungsversagen aus. Das im CFK verwendete Polyamid 6.6 besitzt eine geringfügig höhere Festigkeit als das im GFK eingesetzte Polyamid 6.

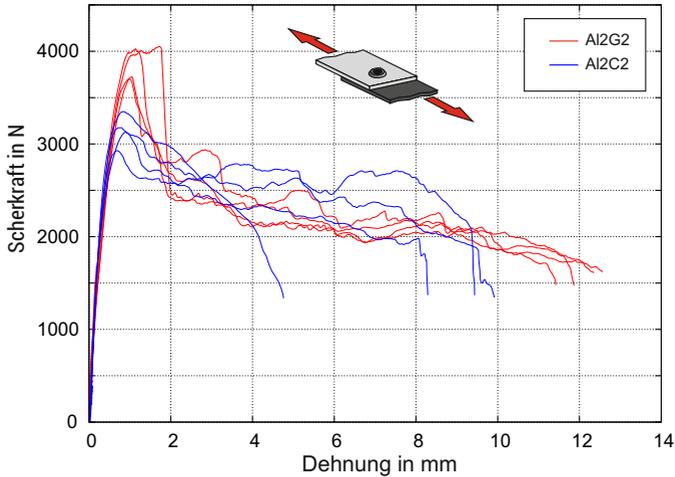


Abbildung 4.33: Vergleich der Kraft-Weg Verläufe für die Kombinationen Al2G2 und Al2C2

Sämtliche Kopfzugversuche zeigen ein Versagen im Faser-Kunststoff-Verbund (siehe Abbildung 4.34). Dabei zieht es die Niethülse durch das Blech, was im Vergleich zum Lochleibungsversagen recht plötzlich geschieht. Die maximal ertragbaren Kräfte sind in den Abbildungen 4.35 und 4.36 zu sehen. Im Gegensatz zum Scherzug kommt es hier zu einer höheren Streubreite der Ergebnisse im Bereich von drei bis neun Prozent. Die Werte zeigen, dass die ertragbaren Kopfzugkräfte ausschließlich von der Blechstärke des FKV abhängig sind. Die Blechstärke des Metalls hat keinen Einfluss, die Kombinationen Al1G1 und Al2G1, sowie die Kombinationen Al1G2 und Al2G2 liegen jeweils innerhalb der Streubreite gleichauf.

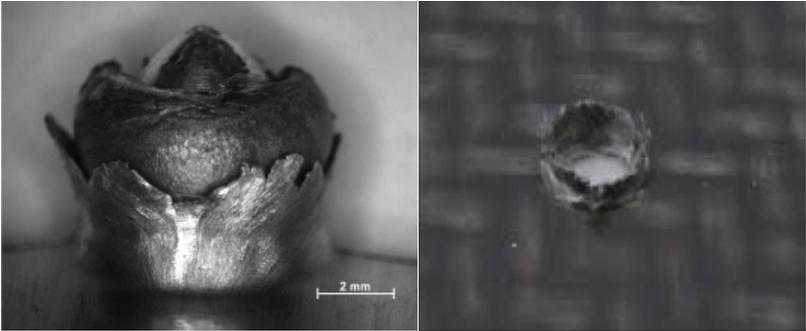


Abbildung 4.34: Versagen Kopfzug: linkes Bild: Metallpartner nach Kopfzug mit verbliebenen Niet; rechtes Bild: FKV Werkstoff mit durchgezogenen Fügebereich

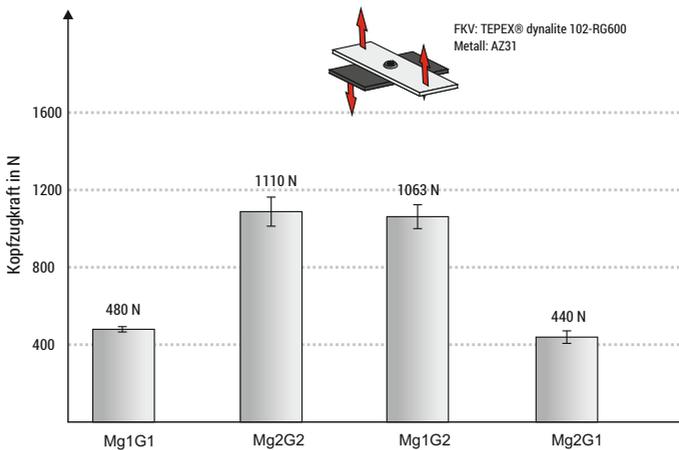


Abbildung 4.35: Erreichbare Kopfzugkräfte für Verbindungen von Magnesium und GFK

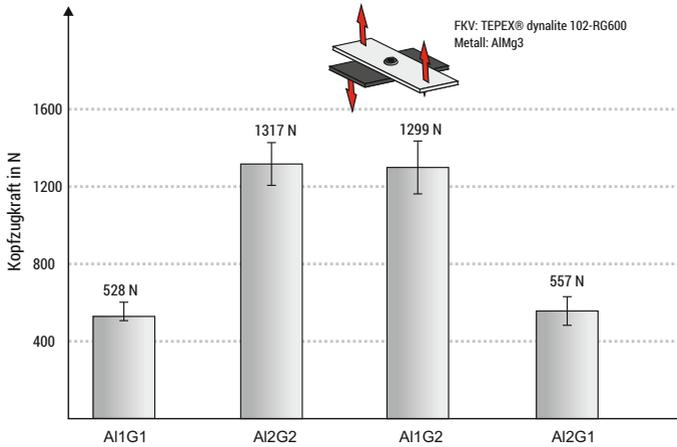


Abbildung 4.36: Erreichbare Kopfzugkräfte für Verbindungen von Aluminium und GFK

Anhand ausgewählter Materialkombinationen der Prioritätenklasse B wurden ebenso Metall/Metallverbindungen auf Scher- und Kopfzug geprüft. Je nach Blechdickenkombination können verschiedene Versagensarten auftreten. Bei 2 mm Aluminium mit 2 mm Aluminium (Al2Al2) kommt es zum Abscheren des Nietes. Bei anderen Materialkombinationen, wie Al1Al2 oder Al1Al1 kommt es zum Versagen im Blech. Dabei können sowohl Spaltbruch als auch Lochleibungsversagen nach Abbildung 2.37 auftreten. Beispielhafte Aufnahmen gezogener Proben sind in Abbildung 4.37 zu sehen.



Abbildung 4.37: Versagen unter Scherzug bei Metall/Metallverbindungen; links: Abscheren des Nietes; mitte: Lochleibung; rechts: Spaltbruch

4.9.3 Dynamische Festigkeit

Für die Kombination von 2 mm Aluminium mit 2 mm GFK (Al2G2) wurden Untersuchungen im Zeitfestigkeitsbereich nach dem Horizontverfahren durchgeführt. Lasthorizonte und die jeweilige Schwingspielzahl sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Es wurden 4 Lasthorizonte mit jeweils 8 Probenläufen durchgeführt. Dies ergibt eine gute statistische Absicherung. Die sich ergebende Wöhlerlinie ist in Abbildung 4.38 zu sehen. Aufgrund fehlender Vergleichswerte ist der Verlauf der Wöhlerlinie schwierig zu interpretieren. Es ergibt sich eine errechnete Formzahl k von 10. Es zeigt sich, dass bei höheren Lasten mit kurzer Lebensdauer das Versagen im Kunststoff, bei niedrigeren Lasten mit hoher Lebensdauer im Aluminium erfolgt. Es ist davon auszugehen, dass die ausgeformte Buchse im Bereich der höchsten Umformung eine Kerbe darstellt, die sich bei hohen Schwingspielzahlen auf die Lebensdauer auswirkt.

Tabelle 4.4: Lasthorizonte für Untersuchungen im Zeitfestigkeitsbereich für die Materialkombination Al2A12

Lasthorizont 1			Lasthorizont 2			Lasthorizont 3		
Lastfall: 20 %			Lastfall: 33 %			Lastfall: 40 %		
$F_a = 353 \text{ N}, F_o = 741 \text{ N}$			$F_a = 583 \text{ N}, F_o = 1224 \text{ N}$			$F_a = 707 \text{ N}, F_o = 1484 \text{ N}$		
m	N	P_U	m	N	P_U	m	N	P_U
1	10.000.000	8 %	1	517.488	8 %	1	39.555	8 %
2	10.000.000	20 %	2	316.802	20 %	2	18.473	20 %
3	5.447.995	32 %	3	159.068	32 %	3	17.526	32 %
4	4.998.554	44 %	4	123.000	44 %	4	16.383	44 %
5	3.394.268	56 %	5	97.746	56 %	5	10.548	56 %
6	3.300.132	68 %	6	74.718	68 %	6	8.111	68 %
7	2.412.390	80 %	7	72.540	80 %	7	7.611	80 %
8	947.371	92 %	8	70.242	92 %	8	7.182	92 %
P_U 10 %	10.887.777		P_U 10 %	351.609		P_U 10 %	28.171	
P_U 50 %	4.031.028		P_U 50 %	136.336		P_U 50 %	13.304	
P_U 90 %	1.492.424		P_U 90 %	52.864		P_U 90 %	6.282	

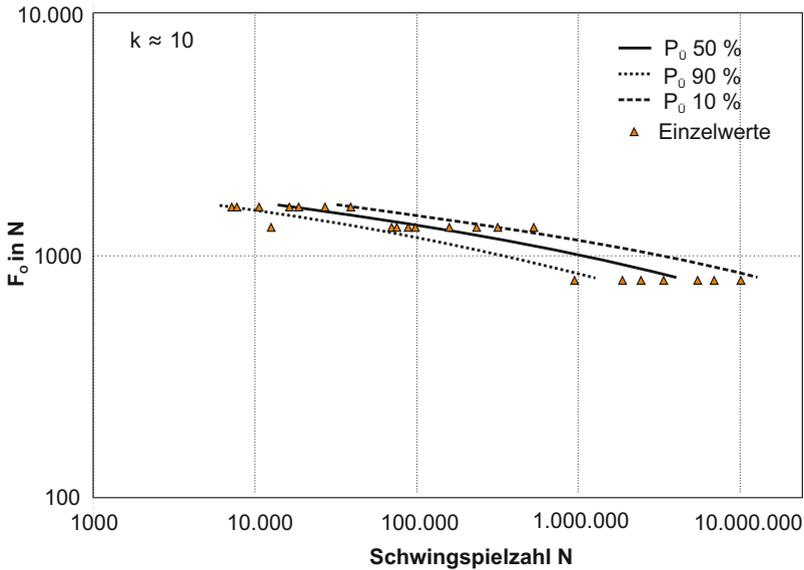


Abbildung 4.38: Wöhlerlinie für Al2G2 im Zeitfestigkeitsbereich (errechnete Lebensdauerlinien für 10 %, 50 % und 90 % Überlebenswahrscheinlichkeit)

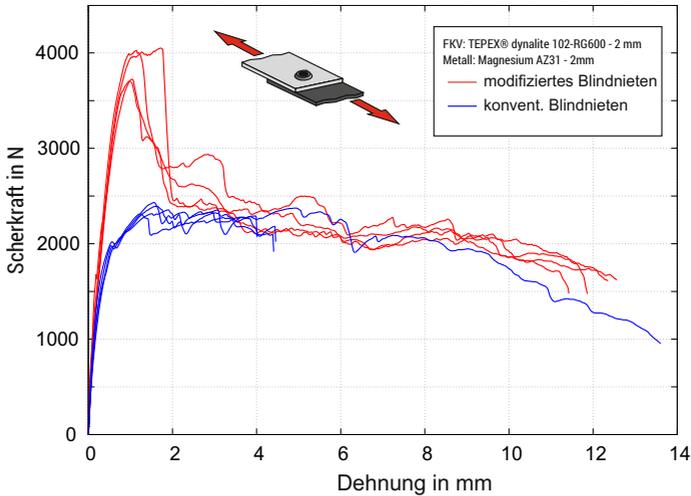


Abbildung 4.39: Schervorgangskurve von konventionellen und modifizierten Blindnietverbindungen für die Materialkombination Al2G2

4.10 Vergleich zum konventionellen Blindnieten

Für ausgewählte Metal/FKV Materialkombinationen wurden zum Vergleich ebenfalls konventionell blindgenietete Verbindungen hergestellt. Dazu wurde der gleiche Blindniet mit einem Außendurchmesser von 4,8 mm verwendet. Die Proben wurden mit einem 5 mm Bohrer gelocht, wie es vom Blindniethersteller vorgegeben ist. Die genieteten Proben wurden anschließend auf Scher- und Kopfzug geprüft. In Abbildung 4.39 sind Zugversuchsverläufe für die Materialkombination Al2G2 aufgetragen. Es sind sowohl Verläufe von konventionellen Blindnietverbindungen als auch von modifizierten Blindnietverbindungen zu sehen. Auffällig ist, dass beim konventionellen Blindnieten kein ausgeprägtes Kraftmaximum auftritt. Dadurch verringert sich die maximale aufnehmbare Scherlast signifikant.

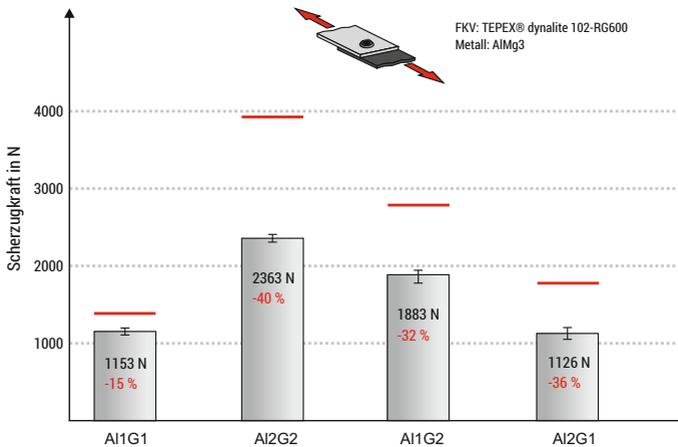


Abbildung 4.40: Erreichbare Scherzugkräfte für Verbindungen von Aluminium und GFK mittels konventionellem Blindnieten. Als horizontale Linien sind die Werte für das modifizierte Blindnieten dargestellt.

Die Ergebnisse für Scherzugversuche sind in den Abbildungen 4.40 und 4.41 zu sehen. Die erreichten Kraftwerte liegen beim konventionellen Blindnieten deutlich unter denen beim modifizierten Prozess. Als Grund dafür dient hauptsächlich die beim modifizierten Blindnieten ausgebildete Buchse, die einen größeren Querschnitt zur Kraftübertragung ermöglicht. Das wird insbesondere dadurch deutlich, dass der Unterschied bei Materialkombinationen mit dicken Metallblechen am größten ist, da dort eine stärkere Buchse ausgebildet wird. Die Versagensart im Scherzug gleicht den Versuchen beim modifizierten Blindnieten.

In den Kopfzugversuchen hat sich kein Unterschied in den Maximalkräften zwischen den Verfahren gezeigt (siehe Abbildung 4.42). Die festgestellten Differenzen liegen im Streubereich der Ergebnisse. Die ausgebildete Buchse stellt bei dieser Belastungsart kein Verstärkungselement dar, da der größte kraftübertragende Querschnitt die ausgeformte

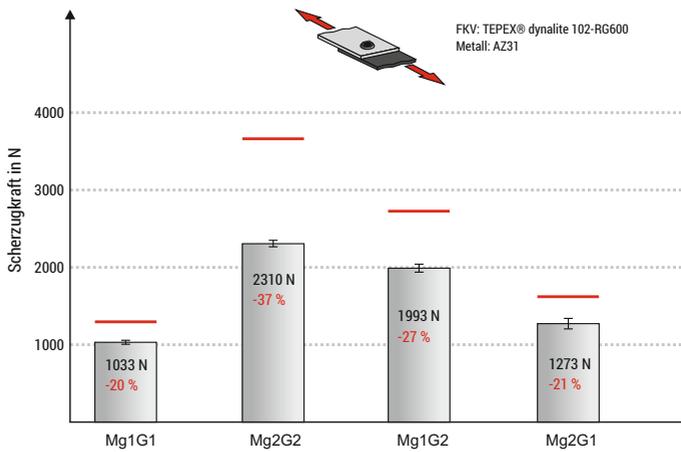


Abbildung 4.41: Erreichbare Scherzugkräfte für Verbindungen von Magnesium und GFK mittels konventionellem Blindnieten. Als horizontale Linien sind die Werte für das modifizierte Blindnieten dargestellt.

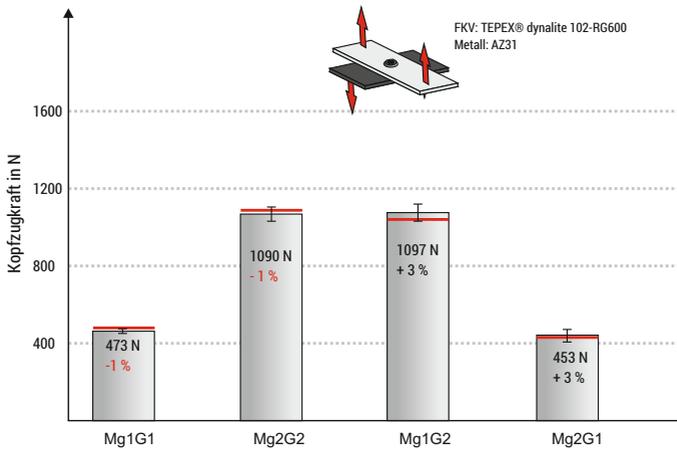


Abbildung 4.42: Erreichbare Kopfzugkräfte für Verbindungen von Magnesium und GFK mittels konventionellem Blindnieten. Als horizontale Linien sind die Werte für das modifizierte Blindnieten dargestellt.

Niethülse darstellt. Auch die Anhaftungskräfte zwischen Kunststoffmatrix und Metall können die Kopfzugkraft nicht steigern.

4.11 Vergleich zu anderen Verfahren

Basierend auf Veröffentlichungen ist der direkte Vergleich des modifizierten Blindnietens mit anderen Verfahren schwierig, da sich die Untersuchungen in den verwendeten Probenmaterialien und Abmessungen stets unterscheiden. Vor allem die FKV Werkstoffe kommen in einer großen Varianz an Faserwerkstoffen, Bindungsart und Matrixwerkstoff vor, dass vergleichbare Untersuchungen selten sind. Bei den Metallen unterscheiden sich die Arbeiten meist in der Wahl der Legierung.

In mehren Artikeln lassen sich Festigkeits- oder Kraftwerte zur Scherzugbelastung von punktförmigen oder flächigen Verbindungen von Metallblechen und FKV finden [11, 74, 37, 75]. In [11] wurde das Stanznieten, das Kleben sowie die Kombination von beiden zum Fügen eines Kohlefaserverstärkten Faser-Kunststoff-Verbundes mit einem Aluminiumblech untersucht. Probenabmessungen und Materialstärken sind den Untersuchungen innerhalb der Dissertation sehr ähnlich, wodurch sich die Verfahren gut vergleichen lassen. Der Stanzniet besitzt mit einem Durchmesser von 5 mm die gleichen Abmessungen wie der modifizierte Blindniet. Stanzgenietete Proben haben in der Veröffentlichung Scherlasten zwischen 3200 und 4000 N bei einer Materialstärke des FKV von 1,5 mm ertragen. Aus den Einzelergebnissen lässt sich eine recht große Streubreite der Festigkeitswerte entnehmen. Insgesamt zeigt sich beim Stanznieten eine Scherbelastbarkeit, die dem des modifizierten Blindnietens entspricht. Lediglich die Versagensart ist anders, da es beim Stanznieten zum Zugbruch und nicht zum Lochleibungsversagen kommt. Trotzdem ermöglicht die Stanznietverbindung vor dem Bauteilversagen eine recht große Dehnung von über drei Millimetern. Bei gleichen Probenabmessungen halten geklebte Proben eine leicht höhere Last von 3500 bis 4600 N unter Scherung stand. Allerdings ist dazu eine zeitaufwändige thermische Nachbehandlung notwendig. Außerdem ergeben sich geringe Bruchdehnungswerte, so dass die Proben beim Versagen lediglich um ca. 0,3 mm gedehnt wurden. Bei Versuchen mit einer Kombination aus Kleben und Stanznieten konnte keine höhere Festigkeiten erreicht werden. Es kann lediglich die Scherbelastbarkeit der Klebung mit der höheren Bruchdehnung der Stanznietverbindung kombiniert werden.

Das Thermomechanische Ausformfügen (TAF) wurde ebenfalls mit ähnlichen Abmessungen und Materialkombinationen in [74] und [37] untersucht, lediglich mit dem Unterschied, dass es sich beim Metall um eine Aluminiumlegierung und um einen Stahl (DC04) handelt. Der Fügepunktdurchmesser ist mit 5,3 mm etwas größer als beim modifizierten Blindnieten. Die Ergebnisse in den Veröffentlichungen zeigen deutlich, dass die Festigkeitswerte hauptsächlich vom metallischen Werkstoff abhängen, da dieser durch eine ausgebildete Buchse das Fügeelement darstellt. Während die Stahlproben Scher- und Kopfgzugkräfte auf den

Niveau des modifizierten Blindnietens mit Aluminiumblechen liegen, können TAF Proben mit einem Aluminiumblech als metallische Komponente nur sehr geringe Scherkräfte übertragen. Ein Nachteil des Thermo-mechanischen Aufformfügens besteht derzeit noch in der relativ langen Prozesszeit, die durch eine Heizzeit von mindestens acht Sekunden oder mehr bedingt ist.

Für das Wärmeleitungsfügen können verschiedene Festigkeitswerte aus Veröffentlichungen entnommen werden. In [75] wurde das Rührreibschweißen als Wärmequelle verwendet und damit ein kreisförmiger Fügepunkt mit einem Durchmesser von acht Millimetern hergestellt. Hier konnten Scherkräfte von 1200 N erreicht werden.

Untersuchungen zum Thermoclinchen (siehe Kapitel 2.2.9) bei einem Fügepunktdurchmesser von 15 mm und Materialstärken von vier Millimetern weisen maximale Scherkräfte von 2000 bis 3000 N auf. In Anbetracht des großen Fügepunktes liegt die Festigkeit damit deutlich niedriger als beim modifizierten Blindnieten. Der Grund für die geringen Kraftwerte liegt darin, dass das Verbindungselement aus dem FKV besteht, welcher für diese Belastungsart nicht ausgelegt ist. Ein Fügepunkt mit metallischer Komponente, wie bei Bolzenverbindungen oder dem TAF Verfahren führt zu größeren übertragbaren Kräften.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Verbindungen mit dem modifizierten Blindnieten mindestens die gleichen Kraftwerte erreichen, wie andere Bolzenverbindungen. Gegenüber anderen mechanischen Fügeverfahren, wie dem TAFen werden höhere Kraftwerte erreicht.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Mischbauweise stellt eine Möglichkeit dar, insbesondere im Automobilbau, aber auch in anderen Industriezweigen Leichtbau zu betreiben. Dazu werden verschiedenartige Werkstoffe miteinander kombiniert. Vorzugsweise handelt es sich um Kombinationen aus faserverstärkten Kunststoffen und Leichtmetallen. Nach dem Motto “Jeder Werkstoff am richtigen Ort” können so belastbare und gleichzeitig leichte Konstruktionen realisiert werden. Eine große Herausforderung besteht dabei jedoch im Fügen solcher unterschiedlicher Werkstoffe. Aufgrund großer Unterschiede in Bindungsart und Schmelztemperatur sind klassische Fügeverfahren nicht anwendbar. Zum Verbinden von Metallen mit Faser-Verbund-Werkstoffen (FKV) wurden deswegen vorhandene Technologien adaptiert oder neue entwickelt. Neben Klebeverfahren gibt es zahlreiche Entwicklungen im Bereich des Schmelzklebens, der mechanischen und der hybriden Verfahren. Es zeigt sich, dass jeder dieser Prozesse individuelle Vor- und Nachteile besitzt, so dass es kein generell einsetzbares Fügeverfahren gibt. Für jede Konstruktion kann so ein anderer Prozess geeignet sein. Während Klebe- und Schmelzklebeverbindungen große Überlappflächen benötigen, um hohe Festigkeiten zu übertragen, verursachen mechanische Fügeverfahren häufig Schäden am FKV. Es kann zu Faserbrüchen oder Delaminationen kommen und so das Bauteil ge-

schwächt werden. Aktuelle Forschungsthemen befassen sich mit hybriden Verfahren, wie dem Thermomechanischen Ausformfügen. Dabei werden mechanische und thermische Prozesse kombiniert, so dass Faserschädigungen minimiert werden. Hier besteht jedoch eine große Problematik in langen Prozesszeiten und relativ geringen Festigkeitswerten. Im Rahmen dieser Dissertation wurde mit dem modifizierten Blindnieten ein neuer Lösungsansatz entwickelt, der sowohl mechanische als auch thermische Fügeverfahren miteinander kombiniert. Dazu wird ein rotierender Blindniet in sich überlappende Bleche getrieben und das darunter liegende Material unter Ausbildung einer Hülse aus dem Oberblech verdrängt. Anschließend wird der Niet ausgeformt und der Prozess ist abgeschlossen. Durch die Reibwärme wird die thermoplastische Matrix des FKV geschmolzen und die Fasern werden beweglich und können verdrängt werden. Dadurch kommt es zu einer geringeren Faserschädigungen und es können Delaminationen komplett vermieden werden. Untersuchungen wurden vorzugsweise an Materialkombinationen in Mischbauweise durchgeführt. Es wurden Aluminium- und Magnesiumbleche mit verschiedenen FKV mit Glas- oder Kohlefaserverstärkung gefügt. Für eine große Anwendungsbreite wurden ebenso Verbindungen von mehreren Metallblechen untersucht. Alle Kombinationen konnten so gefügt werden, dass in relativ kurzer Prozesszeit eine qualitativ hochwertige Verbindung entsteht. Mit einer geeigneten Parameterwahl sind Fügezeiten unter drei Sekunden möglich. Sensordaten sowie Makroschliffe konnten verwendet werden, um die Größenordnung der notwendigen Umformarbeit für einen Fügevorgang zu bestimmen. Dies ist für die Auslegung späterer Anwengergeräte von großer Bedeutung. Untersuchungen zu mechanisch-technologischen Eigenschaften der hergestellten Verbindungen haben gezeigt, dass das Verfahren durchaus eine ähnliche Kerbwirkung auf die gefügten Lamine besitzt, wie das konventionelle Blindnieten. Die übertragbaren Scherlasten sind jedoch bis zu 68 % höher, was sich mit der gebildeten Metallbuchse begründen lässt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass das modifizierte Blindnieten in allen Eigenschaften dem konventionellen Blindnieten mindestens ebenbürtig ist, jedoch eine Vielzahl an zusätzlichen Vorteilen bietet. Neben höheren Lasten unter Scherbeanspruchungen wird der FKV im Gegensatz zum Bohren weniger geschädigt. Es fallen keine Spanabfälle an und ein Vorlochen ist nicht notwendig. Insbesondere in der automatisierten Montage ist das von

Bedeutung, da Toleranzen bei der Bohrlochpositionierung zu Problemen führen. Der Prozess läuft sehr schnell ab und durch Anhaftungen der FKV Matrix am Metall ist die Verbindung geringfügig verdrehsicher. Der Niet sitzt zudem komplett spielfrei in der Verbindung, was eine höhere Lebensdauer des Bauteils zur Folge hat. Anhand einer ausgewählten Materialkombination konnte nachgewiesen werden, dass die Verbindung auch unter dynamischer Scherbeanspruchung gute Eigenschaften besitzt, wobei konkrete Vergleichszahlen für Metall/FKV Verbindungen zur Einordnung nicht zu finden sind. Gegenüber vergleichbaren Verfahren, wie dem TAFen, dem FDS Schrauben oder dem Bolzensetzen besitzt das modifizierte Blindnieten bei gleichen Verbinderabmessungen mindestens die gleichen Festigkeitswerte. Zudem ist der Prozess aufgrund der Einfachheit weniger anfällig, als zum Beispiel beim FDS Schrauben. Dort ist eine hochkomplexe Steuerung notwendig, um die Funktionen der Lochbildung, des Gewindeformens und des Einschraubens zu ermöglichen. Das modifizierte Blindnieten benötigt weniger Schritte und dadurch eine einfachere Steuerung. Darüber hinaus besitzt eine Blindnietverbindung auf der Blechunterseite einen deutlich geringeren Überstand, als eine FDS Schraube. Dadurch entstehen weniger Verbauprobleme und das Gewicht pro Verbinder kann reduziert werden. Dem Nutzer entstehen dadurch Vorteile im Prozess, dem Gewicht und der Einsetzbarkeit des Verfahrens. Gegenüber TAFen, dem Clinchen oder Stanznietverfahren kommen die Vorteile der einseitigen Zugänglichkeit zum Tragen. Da kein Gegenstempel benötigt wird, können insbesondere im Karosseriebau sonst nicht fügbare Verbindungen realisiert werden. Vor allem in der Montage von Aluminiumhohlprofilen kann das modifizierte Blindnieten so eingesetzt werden. Nicht geeignet ist das Verfahren für den Einsatz an Sichtflächen, da auf der Blechoberseite der Setzkopf und auf der Blechunterseite der Schließkopf zu sehen sind. Andere Verfahren, wie das Flachpunktclinchen oder das Kleben ermöglichen zumindest auf einer Fügeseite eine ebene Fläche. Mit dem modifizierten Blindnieten steht somit ein Verfahren mit vielen Vorteilen und wenigen Einschränkungen zur Verfügung, das nicht alle anderen mechanischen Fügeverfahren ablösen kann, aber in vielen Bereichen eine wirtschaftliche Alternative darstellt. Das größte Einsatzpotential ist vor allem im Karosseriebau zu sehen. Da es sich hier um vollautomatisierte Prozesse handelt, lässt sich die neue Technologie in die Abläufe integrieren und der zunehmende

Mischbau verlangt nach neuen mechanischen Fügeverfahren mit einseitiger Zugänglichkeit, aber ohne Vorlochen. Zusammengefasst sind folgende Vorteile aufzuzählen:

- Kein Vorloch notwendig, dadurch verringerter Aufwand bei der Herstellung der Vormaterialien
- Robust gegenüber Maß- und Lagetoleranzen, durch das Wegfallen der Vorlöcher müssen diese nicht positioniert werden. Das führt zu verringertem Vorbereitungs- und Verarbeitungsaufwand.
- Keine Lochfindung notwendig, was die Automatisierbarkeit vereinfacht.
- Formschlüssige Verbindung, im Gegensatz zu kraftschlüssigen Verbindungen (z.B. Schrauben) lassen sich auch dünne Bleche oder Kunststoffe auf der Unterseite verbinden.

Kapitel 6

Ausblick

Die Untersuchungen zum modifizierten Blindnieten haben ein großes Potential des Verfahrens für die industrielle Anwendung aufgezeigt. Neben hohen übertragbaren Kräften handelt es sich um einen einfach zu handhabenden und schnellen Prozess. Die Versuche fanden jedoch allesamt an einer eigens entwickelten Versuchsanlage statt, bei der die Probe, nicht der Niet rotiert wurde. Im nächsten Schritt ist es notwendig, ein entsprechendes Nietgerät zu entwickeln, das sämtliche Prozessschritte selbst ausführt. Aufgrund der festgestellten Prozesskräfte sollte der Fokus im ersten Schritt auf den automatisierten oder mechanisierten Bereich liegen. Denkbar sind Adaptionen an 3-Achs Portalen oder Industrierobotern, die für bohrende Anwendungen ausgelegt werden. Der Einsatz eines speziellen Nietgeräts hat überdies den Vorteil einer geringeren rotierenden Masse. An der Versuchsanlage wurde der gesamte Probenhalter rotiert, was die Masse entsprechend erhöht. So ist die maximale Drehzahl auf 4200 Umdrehungen pro Minute begrenzt. Mit einem Nietgerät lassen sich deutlich höhere Drehzahlen erreichen. Die eigenen Untersuchungen, aber auch Veröffentlichungen zu verwandten Verfahren zeigen, dass sich mit einer höheren Drehzahl bessere Prozesseigenschaften und geringere Axialkräfte realisieren lassen. Es ist davon auszugehen, dass der Prozess so noch stabiler und schneller realisiert werden kann. Im Anschluss an die hier dargestellten Untersuchungen wurde basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen ein seriennaher Prototyp entwickelt, der sich derzeit in der Erprobungsphase befindet.

Dieser kann, wie vermutet an einem Industrieroboter mit hohem Lastaufnahmevermögen installiert werden. Die maximale Drehzahl liegt hier bei 6500 Umdrehungen pro Minute.

Es muss jedoch auch noch tiefgehend auf mögliche Deformationen von gefügten Blechen infolge der wirkenden Prozesskräfte eingegangen werden. Dazu sind entsprechende Untersuchungen notwendig, die sich mit der Blechsteifigkeit und konstruktiver Randbedingungen beschäftigt. Gegebenenfalls muss der Prozess dadurch auf bestimmte Werkstoffkombinationen beschränkt, oder durch die Verwendung von Gegenstempel oder durch eine Bügelbauweise angepasst werden.

Darüber hinaus sollten die Untersuchungen auf weitere Materialkombinationen, wie FKV mit duroplastischer Matrix oder andere Metallegierungen erweitert werden. Derzeit sind Verbindungen mit Stahlwerkstoffen nicht möglich, da der Niet keine ausreichend hohe Festigkeit besitzt und beim Fügevorgang zerstört werden kann. Die Weiterentwicklung des Verbindungselements in Form einer beständigeren Stahllegierung am Nietkopf ist dafür ein Lösungsweg. Durch eine Änderung der Nietkopfgeometrie kann das Verfahren für Metall/Metall Verbindungen optimiert werden. Da der untere Werkstoff erst durchdrungen wird, wenn die Buchse des oberen durchbrochen ist, kommt es derzeit zur Bildung von Spalten zwischen Ober- und Unterblech. Durch einen spitzeren Nietkopf könnte das Durchbrechen der Buchse eher geschehen, so dass das Unterblech weniger verformt wird. Es lassen sich auch aus diesem Verfahren weitere Prozessmöglichkeiten ableiten. So ist es möglich, dass die Erkenntnisse auf Blindnietmuttern angewandt werden und so ein modifiziertes Blindnietmutternsetzen entwickelt wird. Das hätte gegenüber den modifizierten Blindnieten den Vorteil eines nicht verlorenen Dorns, was auch die Anwendungen an Stahlblechen in den Fokus rückt.

Literaturverzeichnis

- [1] *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile*. VDMA Verlag Frankfurt, 2012.
- [2] Ruge, Jürgen und Helmut Wohlfahrt: *Technologie der Werkstoffe*. Springer Vieweg, 2012, ISBN 978-3-658-01880-1.
- [3] Schmidt, Alexandra Priska: *Faserverbundwerkstoffe im Automobilbau: Methodischer Ansatz zur Analyse von Schäden*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.
- [4] Nestler, Daisy: *VERBUNDWERKSTOFFE - WERKSTOFFVERBUNDE Status quo und Forschungsansätze*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2013.
- [5] Mücklich, Silke: *Leichtbaupotenziale durch Einsatz von Leichtmetallen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2008.
- [6] Chemical, DOW: *DOW Chemical: Fabricating Magnesium*. DOW Chemical Company, 1984.
- [7] Mordike, B.L und T Ebert: *Magnesium: Properties - applications - potential*. Materials Science and Engineering: A, 302(1):37 – 45, 2001, ISSN 0921-5093.
- [8] Staeves, Dr. J.: *Zukünftige Magnesium-Anwendungen im Automobilbereich*. 13th Magnesium Automotive and End User Seminar, 2005.

- [9] Kerz, P: *Entwicklungshelfer. Werk- und Rohstoffe als Triebfeder des automobilen Fortschritts*. Giesserei, 93:58 – 63, 2006.
- [10] Min, Junying, Yongqiang Li, Jingjing Li, Blair E. Carlson und Jianping Lin: *Friction stir blind riveting of carbon fiber-reinforced polymer composite and aluminum alloy sheets*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Seiten 1–8, 2014, ISSN 0268-3768.
- [11] Franco, G. Di, L. Fratini und A. Pasta: *Analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single-lap joints between CFRP panels and aluminum blanks*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 41(0):24 – 32, 2013, ISSN 0143-7496.
- [12] Franco, Giuseppe Di, Livan Fratini und Antonino Pasta: *Influence of the distance between rivets in self-piercing riveting bonded joints made of carbon fiber panels and AA2024 blanks*. Materials & Design, 35(0):342 – 349, 2012, ISSN 0261-3069. New Rubber Materials, Test Methods and Processes.
- [13] Georgi, Wolf: *Beitrag zum mechanischen Fügen von Metall-Kunststoff-Mischverbindungen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2014.
- [14] Tassone, Raffaele: *Fügetechnik für CFK-Bauteile - Anwendung im Automotivebereich*. Composites effizient verarbeiten, 2012.
- [15] Irisarri, F. X., F. Laurin, N. Carrere und J. F. Maire: *Progressive damage and failure of mechanically fastened joints in CFRP laminates - Part I: Refined Finite Element modelling of single-fastener joints*. Composite Structures, 94(8):2269 – 2277, 2012, ISSN 0263-8223.
- [16] Yao, Yuan: *Polymerwerkstoff-Direktverschraubung: Einsatz von Experiment und Simulation zur Analyse des Vorspannkraftverlaufs*. Dissertation, Technischen Universität Kaiserslautern, 2011.

- [17] Amancio-Filho, S.T., C. Bueno, J.F. dos Santos, N. Huber und E. Hage Jr.: *On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures*. Materials Science and Engineering: A, 528(10):3841 – 3848, 2011, ISSN 0921-5093.
- [18] Amancio-Filho, S. T. und J. F. dos Santos: *Entwicklung des Reibnietens als neues Fügeverfahren für Kunststoff und Leichtbaulegierungen*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 39(11):799–805, 2008, ISSN 1521-4052.
- [19] Fiore, V., F. Alagna, G. Di Bella und A. Valenza: *On the mechanical behavior of BFRP to aluminum AA6086 mixed joints*. Composites Part B: Engineering, 48(0):79 – 87, 2013, ISSN 1359-8368.
- [20] Döhler, Claudia, Andre Hälsig, Frank Podlesak und Peter Mayr: *Dissimilar joints between metal- and fibre-reinforced plastics*. In: *19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Karlsruhe*, 2013.
- [21] Seidlitz, Holger: *Verbindungstechnik für belastungsgerechte Hochleistungsbauteile in Mischbauweise*. In: *9. Wissenschaftstage an der Hochschule Lausitz*, 2009.
- [22] Wagner, Julia, Maximilian Wilhelm, Horst Baier, Uwe Füssel und Thomas Richter: *Experimental analysis of damage propagation in riveted CFRP-steel structures by thermal loads*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75(5-8):1103–1113, 2014, ISSN 0268-3768.
- [23] Mucha, Jacek: *The effect of material properties and joining process parameters on behavior of self-pierce riveting joints made with the solid rivet*. Materials & Design, 52(0):932 – 946, 2013, ISSN 0261-3069.
- [24] Duan, Hongyan, Gaokun Han, Mingxing Wang, Xinglu Zhang, Zhongxia Liu und Zhiyong Liu: *Rotation friction pressing riveting*

- of AZ31 magnesium alloy sheet*. *Materials & Design*, 54(0):414 – 424, 2014, ISSN 0261-3069.
- [25] Settineri, L., E. Atzeni und R. Ippolito: *Self piercing riveting for metal-polymer joints*. *International Journal of Material Forming*, 3(1):995–998, 2010, ISSN 1960-6206.
- [26] Fratini, Livan und Vincenzo Fortunato Ruisi: *Self-piercing riveting for aluminium alloys-composites hybrid joints*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(1-2):61–66, 2009, ISSN 0268-3768.
- [27] Hewitt, R.: *11 - Self-piercing riveting (SPR) in automated vehicle construction*. In: Chrysanthou, Andreas und Xin Sun (Herausgeber): *Self-Piercing Riveting*, Seiten 181 – 207. Woodhead Publishing, 2014, ISBN 978-1-84569-535-4.
- [28] Mallick, P.K.: *8 - Joining for lightweight vehicles*. In: Mallick, P.K. (Herausgeber): *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Seiten 275 – 308. Woodhead Publishing, 2010, ISBN 978-1-84569-463-0.
- [29] Lee, Chan Joo, Jung Min Lee, Ho Yeon Ryu, Kyung Hun Lee, Byung Min Kim und Dae Cheol Ko: *Design of hole-clinching process for joining of dissimilar materials – Al6061-T4 alloy with DP780 steel, hot-pressed 22MnB5 steel, and carbon fiber reinforced plastic*. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(10):2169 – 2178, 2014, ISSN 0924-0136.
- [30] Miller, Scott F., Jia Tao und Albert J. Shih: *Friction drilling of cast metals*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12):1526 – 1535, 2006, ISSN 0890-6955.
- [31] Gleich, Henning: *Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von*

- PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004.
- [32] al, Eggers et: *Werkstoff- und Halbzeugtechnologien für Leichtbau-Anwendungen.* In: Friedrich, Horst E. (Herausgeber): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch, Seiten 443–726. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, ISBN 978-3-8348-1467-8.
- [33] Sonstabo, Johan Kolsto, Petter Henrik Holmstrom, David Morin und Magnus Langseth: *Macroscopic strength and failure properties of flow-drill screw connections.* Journal of Materials Processing Technology, 222:1 – 12, 2015, ISSN 0924-0136.
- [34] Hufenbach, W, R Gottwald und R Kupfer: *BolDED joints with moulded holes for textile thermoplastic composites.* In: *18th International Conference on Composite Materials*, 2009.
- [35] Hufenbach, W., F. Adam, Olaf Helms und Robert Kupfer: *Gestaltung von textilverbundgerechten Fügezonen mit warmgeformten Bolzenlöchern.* Zeitschrift Kunststofftechnik, 6:255 – 269, 2010.
- [36] Seidlitz, Holger: *Entwicklung von kraftflussgerechten Verbindungstechniken für Mischbauweisen mit thermoplastischen Faserverbinden und Metallen.* Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2013.
- [37] Seidlitz, Holger, Colin Gerstenberger und Lothar Kroll: *High-performance lightweight structures with Fiber Reinforced Thermoplastics and Structured Metal Thin Sheets.* Journal of Materials Science Research, 4, 2015.
- [38] Gude, Maik, Werner Hufenbach, Robert Kupfer, Andreas Freund und Christian Vogel: *Development of novel form-locked joints for textile reinforced thermoplastics and metallic components.* Journal of Materials Processing Technology, 216:140 – 145, 2015, ISSN 0924-0136.

- [39] Schricker, Klaus, Martin Stambke, Jean Pierre Bergmann, Kevin Bräutigam und Philipp Henckell: *Macroscopic Surface Structures for Polymer-metal Hybrid Joints Manufactured by Laser Based Thermal Joining*. Physics Procedia, 56:782 – 790, 2014, ISSN 1875-3892. 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2014.
- [40] Amend, P., S. Pfindel und M. Schmidt: *Thermal Joining of Thermoplastic Metal Hybrids by Means Of Mono- and Polychromatic Radiation*. Physics Procedia, 41:98 – 105, 2013, ISSN 1875-3892. Lasers in Manufacturing (LiM 2013).
- [41] Huang, Zhequn, Sumio Sugiyama und Jun Yanagimoto: *Applicability of adhesive-embossing hybrid joining process to glass-fiber-reinforced plastic and metallic thin sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 214(10):2018 – 2028, 2014, ISSN 0924-0136.
- [42] Liu, F.C., J. Liao und K. Nakata: *Joining of metal to plastic using friction lap welding*. Materials & Design, 54:236 – 244, 2014, ISSN 0261-3069.
- [43] Esteves, J.V., S.M. Goushegir, J.F. dos Santos, L.B. Canto, E. Hage Jr. und S.T. Amancio-Filho: *Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide): Effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength*. Materials & Design, 66, Part B:437 – 445, 2015, ISSN 0261-3069. Lightweight Materials and Structural Solutions for Transport Applications.
- [44] C. Bischof, W Possart: *Adhäsion - Theoretische und experimentelle Grundlagen*. C. Bischof, W Possart, 1983.
- [45] Bischof, C., A. Bauer, W. Possart, R. Kapelle und R. D. Schulze: *Zur Adhäsion in Metall-Polymer-Grenzschichten und ihrer praktischen Nutzung*. Acta Polymerica, 40(3):214–221, 1989, ISSN 1521-4044.

- [46] Habenicht, Gerd: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer Science and Business Media, 1983.
- [47] Schimanski, K., A. von Hehl und H. W. Zoch: *Failure Behavior of Diffusion Bonded Transition Structures for Integral FRP-Aluminum Compounds*. Procedia Materials Science, 2:189 – 196, 2013, ISSN 2211-8128. Materials Science Engineering, Symposium B6 - Hybrid Structures.
- [48] Flock, Dustin: *Wärmeleitungsfügen hybrider Kunststoff-Metall-Verbindungen*. Dissertation, RWTH Aachen, 2011.
- [49] Parkes, P.N., R. Butler, J. Meyer und A. de Oliveira: *Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement*. Composite Structures, 118:250 – 256, 2014, ISSN 0263-8223.
- [50] Matsuzaki, Ryosuke, Motoko Shibata und Akira Todoroki: *Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 39(2):154 – 163, 2008, ISSN 1359-835X.
- [51] Gao, Dalong, Ugur Ersoy, Robin Stevenson und Pei Chung Wang: *A New One-Sided Joining Process for Aluminum Alloys: Friction Stir Blind Riveting*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 131:1087–1357, 2009.
- [52] Francis, Roger: *Galvanic Corrosion - a practical guide for engineers*. Materials and Corrosion, 2002.
- [53] Schreckenberger, Harald: *Risiko der Kontaktkorrosion bei CFK-Bauteilen*. Womag, 2013.
- [54] Khashaba, U.A.: *Delamination in drilling GFR-thermoset composites*. Composite Structures, 63(3–4):313 – 327, 2004, ISSN 0263-8223.

- [55] Qi, Zhenchao, Kaifu Zhang, Yuan Li, Shunuan Liu und Hui Cheng: *Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks*. Composite Structures, 107:604 – 609, 2014, ISSN 0263-8223.
- [56] Reinstettel, Marc: *Laboruntersuchung zur Prozessstabilität beim Niet-Clinchen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2007.
- [57] T Spittel, A Hensel und: *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986.
- [58] HONSEL: *HAndbuch der Knetwerkstoffe*. In: *HAndbuch der Knetwerkstoffe*. HONSEL, 2010.
- [59] Kretschmer, Günter: *Ein Beitrag zum Fließlochformen von Blechdurchzügen*. Dissertation, Universität Siegen, 1980.
- [60] Min, Junying, Jingjing Li, Yongqiang Li, Blair E. Carlson, Jianping Lin und Wei Ming Wang: *Friction stir blind riveting for aluminum alloy sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 215:20 – 29, 2015, ISSN 0924-0136.
- [61] AVK: *AVK Werkstoffe*. In: *Handbuch Faserverbundkunststoffe/-Composites*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [62] Wiedemann, Johannes: *Werkstoffe und Bauweisen*. In: *Leichtbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [63] Gies, Christian: *Evaluation der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen mittels DoE*. Dissertation, Universität Kassel, 2005.
- [64] *EN ISO 14589:2000 Blindniete - Mechanische Prüfung*.
- [65] Heiler, R.: *Fließlochformen und Gewindefurchen auf NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen*. In: *Fortschrittberichte VDI*. VDI, 1999.

- [66] Sayir, Mahier: *Ingenieurmechanik 2: Deformierbare Körper*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [67] *ASTM D5961/D5961M-05e1 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer–Matrix Composite Laminates*.
- [68] Caprino, G., G. Giorleo, L. Nele und A. Squillace: *Pin-bearing strength of glass mat reinforced plastics*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(6):779 – 785, 2002, ISSN 1359-835X.
- [69] Wilmes, H., A. Herrmann und B. Kolesnikov: *Festigkeitsanalysen von Bolzenverbindungen für CFK-Bauteile mit dem Ziel der Erstellung von Dimensionierungsrichtlinien*. DGLR-Jahrestagung 1999, 1999.
- [70] Sandner, T. und R. Hornfeck: *Experimentelle Untersuchung von Spannungen und Festigkeitseigenschaften an bauteilnahen CFK-Proben und Abgleich mit numerischen Berechnungsverfahren*. Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg, 2009.
- [71] Kittner, Kay: *Integrativer Modellansatz bei der Co-Extrusion von Aluminium Magnesium Werkstoffverbunden*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2011.
- [72] Droeder, Georg: *Untersuchungen zum Umformen von Feiblechen aus Magnesiumknetlegierungen*. Dissertation, Universität Hannover, 1999.
- [73] Liu, J. und H. Zenner: *Berechnung von Bauteilwöhlerlinien unter Berücksichtigung der statistischen und spannungsmechanischen Stützziffer*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 26(1):14–21, 1995, ISSN 1521-4052.
- [74] Seidlitz, Holger, Lars Ulke Winter und Lothar Kroll: *New Joining Technology for Optimized Metal/Composite Assemblies*. Journal of Engineering, 11, 2014.

- [75] Goushegir, S.M. und J.F. dos Santos: *Friction Spot Joining of aluminum AA2024 carbon-fiber-reinforced polyphenylene sulfide composite single lap joints: Microstructure and mechanical performance*. *Materials & Design*, 54, 2014.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 : Gewichtseinsparung durch Leichtbauwerkstoffe	2
Abbildung 1.2 : Prinzip des Modifizierten Blindnietens	4
Abbildung 2.1 : Bruchdehnung AZ31	10
Abbildung 2.2 : Legierungsentwicklung Magnesium	12
Abbildung 2.3 : Kunststoffe	16
Abbildung 2.4 : Fügeverfahren für die Mischbauweise	17
Abbildung 2.5 : Delamination Blindniet	19
Abbildung 2.6 : Stanznieten	20
Abbildung 2.7 : Delamination beim Stanznieten	20
Abbildung 2.8 : Prinzip Clinchen	21
Abbildung 2.9 : Clinchen von FKV und Metall	22
Abbildung 2.10 :Prinzip der Buchsenausbildung beim Fließlochformen	23
Abbildung 2.11 :Vergleich Niet und Fließlochformer	23
Abbildung 2.12 :Fließlochformendes Schrauben	25
Abbildung 2.13 :Fließlochformendes Schrauben Prinzip	25
Abbildung 2.14 :Prinzip des Warmformens	26
Abbildung 2.15 :Thermomechanisches Ausformfügen	27
Abbildung 2.16 :Thermoclinchen	28
Abbildung 2.17 :Oberflächenvorbehandlungen	30
Abbildung 2.18 :Polarisationsmodell	31
Abbildung 2.19 :Elektrostatisches Modell	32
Abbildung 2.20 :Thermodynamische Adhäsionstheorie	34
Abbildung 2.21 :Chemisches Adhäsionsmodell	35
Abbildung 2.22 :Friction Stir Riveting	37
Abbildung 2.23 :Friction Pressing Riveting	37

Abbildung 2.24 :Delamination beim Bohren	39
Abbildung 2.25 :Aufbau eines Blindnietes	40
Abbildung 2.26 :Prinzip des Modifizierten Blindnietens	41
Abbildung 2.27 :Fließkurve für AlMg3	43
Abbildung 2.28 :Röhrenmodell	44
Abbildung 2.29 :Ergebnisse Friction Stir Riveting	45
Abbildung 2.30 :Faserumlenkung	46
Abbildung 2.31 :Faserumlenkung Schema	47
Abbildung 2.32 :Bereich zerstörter Fasern	49
Abbildung 2.33 :Ausformen eines Blindnietes	51
Abbildung 2.34 :Faserumlenkung Schema	53
Abbildung 2.35 :Bolzen unter Scherbeanspruchung	55
Abbildung 2.36 :Kerbwirkung Bolzenverbindung	56
Abbildung 2.37 :Versagensarten bei Lochleibung	57
Abbildung 2.38 :Randabstände	58
Abbildung 3.1 : Blindniet	63
Abbildung 3.2 : Nietdorn	64
Abbildung 3.3 : Nietgerät	70
Abbildung 3.4 : Anlagenkonzept	71
Abbildung 3.5 : Versuchsanlage	72
Abbildung 3.6 : Nietfixierung	73
Abbildung 3.7 : Ablaufdiagramm	75
Abbildung 3.8 : Fließkurven für AZ31 und AlMg3	77
Abbildung 3.9 : Nomenklatur Materialkombinationen	79
Abbildung 3.10 : Versuchsplan	80
Abbildung 3.11 : Temperaturmessung	82
Abbildung 3.12 : Geometrische Kennwerte	84
Abbildung 3.13 : Prozess ohne Nietausformen	87
Abbildung 3.14 : Probenformen	87
Abbildung 3.15 : Bezugssysteme für Festigkeitswerte	88
Abbildung 3.16 : Wöhlerlinie	89
Abbildung 3.17 : Wöhlerlinie	90
Abbildung 3.18 : Horizontverfahren	92
Abbildung 4.1 : Prozessablauf modifiziertes Blindnieten	96
Abbildung 4.2 : Prozessablauf bei niedriger Drehzahl	97

Abbildung 4.3 : Schliffbild bei niedriger Drehzahl	98
Abbildung 4.4 : Geschädigter Niet bei niedrigen Drehzahlen	99
Abbildung 4.5 : Buchsenbildung Aluminium	101
Abbildung 4.6 : Aufgestiegenes Material	101
Abbildung 4.7 : Anhaftung von FKV an Metall	101
Abbildung 4.8 : Buchsenbildung im FKV	102
Abbildung 4.9 : Buchsenbildung im FKV Aufsicht	102
Abbildung 4.10 : Buchsenbildung Magnesium	103
Abbildung 4.11 : Rissbildung im Magnesium	103
Abbildung 4.12 : Schliffbilder Metall/FKV Verbindungen	104
Abbildung 4.13 : Buchsenbildung bei Metall/Metallverbindungen	105
Abbildung 4.14 : Eindringverhalten bei einstufigem Kraftverlauf	107
Abbildung 4.15 : Eindringzeit bei Mg2G2	108
Abbildung 4.16 : Deformation	109
Abbildung 4.17 : Eindringverhalten bei gestuftem Kraftverlauf	110
Abbildung 4.18 : Temperaturverlauf	113
Abbildung 4.19 : Fließkurven	114
Abbildung 4.20 : Buchsen	116
Abbildung 4.21 : Buchsen	117
Abbildung 4.22 : Buchsen	117
Abbildung 4.23 : Mikroschliff einer AlMg3 Buchse	119
Abbildung 4.24 : Mikroschliffe im Vergleich	120
Abbildung 4.25 : Faserschädigung CFK	120
Abbildung 4.26 : Faserschädigung GFK	121
Abbildung 4.27 : Umformgrad AZ31 1 mm	122
Abbildung 4.28 : Umformgrad AlMg3 2 mm	123
Abbildung 4.29 : Scherzugversuch Al2G2	127
Abbildung 4.30 : Scherzugversuch Al1G2	128
Abbildung 4.31 : Scherzugversuche Magnesium und GFK	128
Abbildung 4.32 : Scherzugversuche Aluminium und GFK	129
Abbildung 4.33 : Scherzugversuch Al2G2 und Al2C2	130
Abbildung 4.34 : Versagen Kopfzug	131
Abbildung 4.35 : Kopfzugversuche Magnesium und GFK	131
Abbildung 4.36 : Kopfzugversuche Aluminium und GFK	132
Abbildung 4.37 : Versagen unter Scherzug	133
Abbildung 4.38 : Wöhlerlinie für Al2G2	134
Abbildung 4.39 : Scherzugverläufe konventionell und modifiziert	135

Abbildung 4.40 :Scherzugversuche Aluminium und GFK kon- ventionell	136
Abbildung 4.41 :Scherzugversuche Magnesium und GFK kon- ventionell	137
Abbildung 4.42 :Kopfzug Magnesium und GFK konventionell	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 : Magnesiumlegierungen	12
Tabelle 2.2 : Legierungssysteme für Aluminium	13
Tabelle 2.3 : Bruchdehnung verschiedener Fasertypen	47
Tabelle 2.4 : Parameter für das Fließlochformen und Thermo- mechanische Ausformfügen (TAF)	52
Tabelle 2.5 : Bewertungsgruppen für die Qualität fließlochge- formter Buchsen	54
Tabelle 3.1 : Eigenschaften des eingesetzten Nietes	63
Tabelle 3.2 : Auszug aus dem Werkstoffdatenblatt Magnesi- umlegierung AZ31	76
Tabelle 3.3 : Auszug aus dem Werkstoffdatenblatt Alumini- umlegierung AlMg3	76
Tabelle 3.4 : Fließkurvenparameter	77
Tabelle 3.5 : Werkstoffdaten FKV	78
Tabelle 3.6 : Materialkombinationen	80
Tabelle 4.1 : Parameter für die untersuchten Materialkombi- nationen	111
Tabelle 4.2 : Umformgrad	124
Tabelle 4.3 : Relative Umformarbeit	125
Tabelle 4.4 : Lasthorizonte für Untersuchungen im Zeitfestig- keitsbereich für die Materialkombination Al2Al2	134

Wissenschaftliche Schriftenreihe CHEMNITZER FÜGETECHNIK

(1) Georgi, Wolf (2014)

Beitrag zum mechanischen Fügen von Metall-Kunststoff-Mischverbindungen
ISBN 978-3-944640-15-0

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-138534>

(2) Hälsig, André (2014)

Energetische Bilanzierung von Lichtbogenschweißverfahren
ISBN 978-3-944640-10-5

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-140249>

(3) Alaluss, Khaled Ahmed (2017)

Modellbildung und Simulation des Plasma-Schweißens zur Entwicklung innovativer Schweißbrenner
ISBN 978-3-96100-007-4

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-216002>

(4) Podlesak, Frank (2017)

Entwicklung und Verifizierung eines vorlochfreien mechanischen Fügeverfahrens zum Verbinden von Leichtmetallen und Faser-Kunststoff-Verbunden
ISBN 978-3-96100-016-6

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-220249>