

# Schlussbericht vom 21.04.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21048 N

# Thema

Linienförmiges Fügen von Profilverbundsystemen mit erhöhten Dichtheitsanforderungen

# **Berichtszeitraum**

01.04.2020 - 31.01.2023

# Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.

# Forschungseinrichtung(en)

Nr. 1: Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL), TU Dortmund Nr. 2: Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn





Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

1.	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtzeitraum
1.1.	Einleitung3
1.2.	Projektübersicht
1.3.	Arbeitspaket 1: Konzeptionierung und Bewertung fügegerechter Profilstrukturen 6
1.4.	Arbeitspaket 2: Simulationsgestützte Optimierung ausgewählter Konzeptvarianten 8
1.5.	Arbeitspaket 2a: Optimierung lokaler Profileigenschaften mittels FEM
1.6.	Arbeitspaket 2b: Optimierung der Verbindungsausbildung 12
1.7.	Arbeitspaket 3: Entwicklung und Auslegung eines Strangpresskonzeptes
1.8.	Arbeitspaket 4: Entwicklung und Aufbau eines Anlagenkonzeptes zum Fügen 16
1.9.	Arbeitspaket 5: Profilherstellung und -untersuchung
1.10. 1.1 1.1 1.1 1.1	Arbeitspaket 6: Verbindungsanalyse und Dichtheitsprüfung230.1. Ermittlung der Scherzugtragfähigkeit230.2. Ermittlung der Biegetragfähigkeit250.3. Ermittlung der zyklischen Tragfähigkeit260.4. Ermittlung der Dichtheitseigenschaften27
1.11. 1.1 1.1	Arbeitspaket 7: Benchmark und Potentialanalyse       30         1.1. Benchmark und Nutzwertanalyse       30         1.2. Anwendungspotenziale und weitere Optimierungsbedarfe       32
1.12.	Arbeitspaket 8: Dokumentation und Abschlussbericht
1.13.	Zusammenfassung
2.	Verwendung der Zuwendung
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit
4.	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse
5.	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

#### 1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtzeitraum

#### 1.1. Einleitung

Am 27.10.2022 hat sich die Europäische Union auf eine Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Flottenziele für neu zugelassene PKW geeinigt. Der Beschluss sieht vor, den durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß neu zugelassener PKW-Flotten bis 2035 sukzessive auf null zu senken. Ab 2035 ist damit die Neuzulassung herkömmlicher Verbrennungsmotoren untersagt.

Von den alternativen sogenannten klimaneutralen Antriebsarten hat sich in den vergangenen Jahren der Elektroantrieb mit Batterie am Markt etabliert. Mit dem EU-Beschluss wird die bereits in den vergangenen Jahren gestiegene Zahl neuer batterieelektrischer Fahrzeugmodelle weiter steigen. Um dem hohen Gewicht der Batteriespeicher entgegenzuwirken, wird damit auch der Leichtbautrend im Automobilbau fortgesetzt.

Aluminiumprofile finden eine breite Anwendung im modernen Fahrzeugleichtbau. In der Fahrzeugkarosserie wurden dabei bislang vorwiegend rechteckige oder rohrförmige Aluminiumprofile eingesetzt. Diese konnten mit konventionellen Schweißverfahren, klebtechnischen oder punktförmigen mechanischen Fügeverfahren gefügt werden. Mit der Einführung batterieelektrischer Fahrzeuge ist ein neues Anwendungsgebiet für Aluminiumprofile entstanden, das neue Anforderungen an die Profilverbindung stellt.

Bei reinelektrischen Fahrzeugmodellen, also solchen, deren Aufbau von Anfang an auf den elektrischen Antriebsstrang ausgelegt wurde, werden die Batteriezellen in der Regel in einem Batteriegehäuse im Unterboden des Fahrzeugs untergebracht. Obwohl dort nur ein begrenzter Platz zur Verfügung steht, werden hohe Anforderungen an den Schutz der empfindlichen Batteriezellen gestellt. Während eines Unfalls muss das Batteriegehäuse die Zellen vor mechanischen Beschädigungen aus allen Richtungen schützen. Um Beschädigungen des elektrischen Systems durch Feuchtigkeit zu vermeiden, werden außerdem hohe Dichtheitsanforderungen an das Batteriegehäuse gestellt. Um diese Anforderungen zu erfüllen und gleichzeitig eine hohe Packungsdichte und ein geringes Gewicht zu bieten, werden aktuelle Batteriegehäuse häufig in Aluminium-Bauweise ausgeführt. Bei dieser Bauart besteht das Batteriegehäuse aus einer aus verschiedenen Aluminiumteilen zusammengesetzten Batteriewanne und einem flachen oder gewölbten Deckel. Die Rahmenkonstruktion der Batteriewanne besteht meist aus Aluminium-Strangpressprofilen und für die Bodenplatte werden entweder flache Strangpressprofile oder Bleche verwendet. Flache Kammerprofile bieten einen zusätzlichen Schutz gegen Beschädigungen von unten sowie die Möglichkeit, die für die Temperierung der Zellen notwendige Kühlung direkt zu integrieren. Die langen Verbindungsnähte zwischen den Profilen stellen jedoch eine Herausforderung für herkömmliche Fügeverfahren dar. Dichte linienförmige Verbindungen können mit Laser- sowie Lichtbogenschweißverfahren hergestellt werden. Die hierbei induzierten Wärmemengen führen jedoch zu erheblichen Schweißverzügen. Dies führt dazu, dass eine ebene Auflage der Batteriezellen, die für ein gutes Wärmemanagement erforderlich ist, nicht gewährleistet werden kann. Bislang werden deshalb häufig Rührreibschweißverfahren (FSW) zur Herstellung dieser dichten linienförmigen Verbindungen eingesetzt. Das Rührreibschweißen ist ein langsames und daher teures Verfahren. Außerdem kann es auch hier noch durch die eingebrachte Wärme zu Verformungen der Bauteile kommen. Bekannte mechanische Fügeverfahren wie Clinchen oder Stanznieten beschränken sich auf eine örtlich begrenzte, meist punktförmige Fügeverbindung und können damit die Dichtheitsanforderungen nicht erfüllen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde deshalb ein neuartiges wirtschaftliches mechanisches Fügeverfahren entwickelt, dass eine dichte, linienförmige Verbindung von

Seite 4 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 21048 N

Aluminiumprofilen ermöglicht. Abbildung 1 zeigt das Modell eines nach dieser Idee konstruierten Batterieträgers. Die Verbindungsausbildung zwischen zwei oder mehr Profilen erfolgt dabei innerhalb eines Pressenhubs. Es wurde untersucht, auf welche Weise die Geometrie, der Prozess und die Eigenschaften der Aluminiumprofile modifiziert werden können, um eine Verbindung zu erhalten, die die Anforderungen an die Dichtheit erfüllt und gleichzeitig hohe Tragfähigkeiten erreicht. Ein zentraler Forschungsschwerpunkt lag auf der Entwicklung der Profilgeometrien. Hierzu wurden sowohl der Fügeprozess als auch verschiedene Prüfverfahren zunächst simulativ untersucht. Drei vielversprechende Profilgeometrien wurden anschließend hergestellt, gefügt und experimentell untersucht. Neben Scherzug- und Biegeprüfungen wurden auch Dichtheitsuntersuchungen sowie Dauerschwingversuche zur Analyse der Fügeverbindung durchgeführt. Darüber hinaus wurde in diesem Forschungsvorhaben untersucht, wie sich eine Festigkeitsgradierung der Strangpressprofile durch lokales Abschrecken nach dem Strangpressprozess auf die Verbindungsausbildung auswirkt. Abschließend wurde das linienförmige, mechanische Fügen mit den konkurrierenden Fügeverfahren verglichen und mithilfe der Rückmeldungen aus der Industrie das Anwendungspotenzial ermittelt.



Abbildung 1: Modell eines Batterieträgers mit linienförmigen, mechanischen Fügeverbindungen

# 1.2. Projektübersicht

Ziele	<ul> <li>Entwicklung eines neuartigen Profilverbundsystems mit erhöhten Dichtheitsanforderungen</li> </ul>										
	Optimierung der Profilherstellung und Fügetechnologie hinsichtlich einer										
	technologisch einfachen und wirtschaftlichen Umsetzung										
Vorgehen	Konzeptionierung und Bewertung fügegerechter Profilstrukturen unter Berückeichtigung erhöhter Dichtheiteenferderungen										
	Aufhau ainaa 2D planaran Simulatianamadalla										
	Autoau eines 2D-planaren Simulationsmodells										
	Simulationsgestutzte Optimierung der Profilgeometriekonzepte ninsichtlich der Fügbarkeit Wirtschaftlichkeit Esstigkeit und Dichtbeit										
	Auslogung des Strangprossprozossos für die simulationsoptimierten										
	Profilgeometrien										
	Konstruktion und Aufbau einer Vorrichtung zur Realisierung										
	unterschiedlicher, lokaler Abkühlraten über den Profilquerschnitt										
	• Konzeptionierung eines Anlagen- und Fügewerkzeugkonzepts auf Basis										
	eines einstufigen Pressenhubes										
	Strangpressen verschiedener Profilgeometrien unter Einhaltung festgelegter Toleranzen										
	Untersuchung des Einflusses einer Festigkeitsgradierung auf die Verbindungsausbildung										
	<ul> <li>Ermittlung von mechanischen Kennwerten Eigenspannungen und</li> </ul>										
	Geradheitsabweichungen										
	Fügen der Profilvarianten mit einer Universalprüfmaschine										
	Ermittlung der guasistatischen und zyklischen Tragfähigkeitskennwerte										
	Aufbau einer Dichtheitsprüfvorrichtung und Dichtheitsprüfung mit Helium-										
	Schnüffel-Test										
	Durchführung eines Benchmarks und einer Potentialanalyse										
Ergebnisse	<ul> <li>Validierte Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung drei verschiedener Profilgeometrien (V1: Nietgeometrie, V2: Stauchgeometrie und V6: Kniehenel)</li> </ul>										
	– Erfolgroiche Strangproceprofilherstellung unter Einhaltung erhöhter.										
	Formtoleranzen nach DIN EN 12020-2										
	• Erfolgreiche Verbindungsausbildung der einzelnen Profilgeometrien auf										
	einer Universalprüfmaschinen (Fügekräfte: 4 kN/mm für V1, 1,4 kN/mm für										
	V2, 0,45 kN/mm für V6)										
	• Steigerung der quasistatischen Tragfähigkeiten (Scherzug, Biegung) einer										
	Profilgeometrie (Kniehebelprinzip) im Vergleich zum Rührreibschweilsen										
	• Erfolgreiche Einhaltung der Grenzleckagerate (1*10 <sup>-3</sup> mbar*l/s) aller										
	Profilverbundsysteme auch unter mechanischer (quasistatisch und zyklisch)										
	A Deduzierung der fügekonzentenezifischen Eertigungekesten im Vergleich										
	zum MIG- und FSW-Verfahren (in Δhhängigkeit verschiedener										
	Stückzahlszenarien)										
	Eine Eestigkeitsgradierung durch lokale Kühlung wirkt sich negativ auf die										
	Verbindungs-Tragfähigkeiten aus.										

# 1.3. Arbeitspaket 1: Konzeptionierung und Bewertung fügegerechter Profilstrukturen (IUL/LWF)

In diesem Arbeitspaket sollten die fertigungs- und betriebsbedingten Anforderungen an die mechanische linienförmige Fügeverbindung festgelegt und anschließend drei vielversprechende Profilgeometrie- und Fügekonzepte ausgearbeitet werden.

In einem ersten Schritt wurde recherchiert, welche linienförmigen, mechanischen Fügeverbindung von Aluminiumprofilen bereits eingesetzt werden.

Die Verbindungkonzepte lassen sich in elastische und elastoplastische Verbindungen unterteilen. Elastische linienförmige mechanische Fügeverbindungen finden sich unter anderem im Bereich der Bau- und Konstruktionsprofile und erfüllen dort verschiedene Funktionen. Einschübe und Klipse werden z. B. genutzt, um Zierblenden zu fixieren und zur Verbindung von Hohlprofilen werden Nut-Feder-Verbindungen oder verspannte Verbindungen eingesetzt. Elastische sowie elastoplastische, linienförmige Verbindungen werden für Bordwände von Lastkraftwagen eingesetzt. Neben den bereits im Antrag aufgezeigten Fügekonzepten, gibt es ein Konzept, bei dem eine zapfenförmige Feder in eine Nut gepresst wird. Ein weiteres Fügekonzept nutzt einen Zugdorn, der mittig durch die Verbindung gezogen wird und so zu einer plastischen Verspannung der Fügegeometrie führt. Die Recherche hat jedoch keine Ergebnisse für linienförmige, mechanische Verbindungen ergeben, die für hohe Dichtungsanforderungen ausgelegt wurden, wie sie für Batteriegehäuse erforderlich sind.

Gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden die Anforderungen an das Grobkonzept des linienförmigen, mechanischen Fügens erarbeitet. Zwei oder mehr Aluminiumprofile sollen im kalten Zustand in einer Presse innerhalb eines Pressenhubs miteinander gefügt werden. Die sich ausbildende linienförmige Fügeverbindung soll möglichst hohe Tragfähigkeiten erzielen und ohne weitere Abdichtung die Dichtheitsanforderungen für Batterieträger erfüllen. Als Versuchswerkstoff wurde die Aluminiumlegierung EN AW-6060 gewählt, die häufig im Automobilbau eingesetzt wird. Die Chemische Zusammensetzung gemäß Abnahmeprüfzeugnis der Charge sowie die mechanischen Eigenschaften nach DIN EN 755-2 im Zustand T6 (lösungsgeglüht und warmausgelagert) sind in **Tabelle 1** und **Tabelle 2** angegeben.

Morketoff		Chemische Zusammensetzung in Gewichtsprozent									
WEIKSION		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	AI
EN AW-6060	Ges.	0,43	0,2	0,01	0,02	0,47	0	0,02	0,01	0,01	Rest

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffes EN AW-6060

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften EN AW-6060 T6 nach DIN EN 755-2

Werkstoffzustand	Wanddicke	R <sub>m</sub>	R <sub>p0,2</sub>	A	A <sub>50 mm</sub>	Härte
	t	MPa	MPa	%	%	Typischer Wert
	mm	min.	min.	min.	min.	HBW
Т6	≤ 5	190	150	8	6	70
	5 < t ≤ 25	170	140	8	6	70

Da das Warmauslagern vollständiger Batteriegehäuse nach dem Fügen hohe Ofenkapazitäten erfordert und weitere Nachteile wie z. B. Verzug mit sich führen würde, ist anzustreben die Profile nach der Auslagerung zu fügen.

Für die Entwicklung der Profilgeometrie wurden aktuelle Bodenstrukturen von Batterieträgern analysiert. Für das Forschungsvorhaben wurde als Basis ein Kammerprofil mit einer Höhe von 12 mm und Wandstärken von 3 mm gewählt. Die Profilbreite, die bei einigen Mehrkammerprofilen

für Batteriegehäusen 400 mm oder mehr beträgt, wurde aufgrund der Limitation durch die zur Verfügung stehende Strangpresse auf 100 mm reduziert. Die resultierenden Profildimensionen sind in **Abbildung 2** dargestellt.



Abbildung 2: Skalierung des Profilquerschnitts für das Forschungsvorhaben

In Anlehnung an den Aufbau rührreibgeschweißter Bodenplatten auf Strangpressprofilen wurde festgelegt, dass der Fügebereich auf eine Breite von maximal 22 mm beschränkt werden soll, um bei Integration der Kühlung eine möglichst gleichmäßige Kühlleistung über die Kontaktfläche zu den Zellen zu gewährleisten. Aus dem gleichen Grund ist eine Ebenheit der Aufstandsfläche von ± 1 mm nach dem Fügen der Profile anzustreben.

Neben der Konzeptionierung der Profilgeometrien wurde in diesem Arbeitspaket das Anlagenkonzept zum mechanischen, linienförmigen Fügen erarbeitet. Hierzu wurde in enger Zusammenarbeit mit den projektbegleitenden Firmen ein Anforderungskatalog erstellt und Randbedingungen definiert. Die Verbindungsausbildung sollte dabei auf Basis eines einstufigen Pressenhubes favorisiert werden. Dies ist darin begründet, dass die Wirtschaftlichkeit und der Technologietransfer in die industrielle Umsetzung mittels eines einfachen Pressenhubes im Vergleich zum Rollfügen als deutlich höher eingeschätzt werden. Das Rollfügen ist ein umformtechnisches, linienförmiges Fügeverfahren. Das kontinuierliche Fügen mittels Rollen ermöglicht die Herstellung von Profilen aus Flachmaterial. Ein kontinuierliches Fügen auf Grundlage des Rollfügens zieht aufwändige Werkzeugkonstruktionen nach sich und bedingt hohe Stützsteifigkeiten in der lokalen Fügezone. Die Anforderungen an die Fügeanlage wurden in die Untergruppen Antrieb, max. Hub und max. Kraft unterteilt. Durch die projektbegleitenden Unternehmen wurde über einen zuvor definierten Bewertungsmaßstab die Gewichtung hinsichtlich des Antriebkonzepts und des maximalen Hubs sowie der maximalen Fügekraft definiert. Die Bewertung wurde dabei von 1 (sehr gering) bis 5 (hoch) festgelegt. Es zeigte sich, dass die Unternehmen dem Anlagenkonzept nur eine untergeordnete Priorisierung bei der Konzeptionierung der Profilgeometrie zuordneten. Auf Grundlage dessen, wurde die Entwicklung der neuartigen Profilgeometrien nicht durch eine maximale Fügekraft oder eine Vorgabe für den Pressenhub eingeschränkt.

Die mechanischen Anforderungen der Fügeverbindung ergeben sich aus den Belastungen, die während der Fahrt auf die Struktur des Batterieträgers übertragen werden (z. B. Integrität, Vibrationen, Verwindungen der Karosserie und Fliehkräfte), sowie den Belastungen im Crashfall. Da die auftretenden Kräfte während eines Unfalls von der Struktur des gesamten Batterieträgers und auch von der umliegenden Fahrzeugstruktur abhängig sind, werden die dort auftretenden Belastung in der Regel simulativ und experimentell auf Komponentenebene oder in einem Gesamtfahrzeugmodell geprüft. Darüber hinaus gibt es für konventionelle Fügeverfahren standardisierte Anforderungen von den Automobilherstellern. Für das neue Fügeverfahren des linienförmigen mechanischen Fügens liegen solche Standards noch nicht vor.

Aus diesem Grund wurden Ersatzversuche abgeleitet, mit denen die verschiedenen Fügeverbindungen untersucht werden können. Zur Bestimmung der mechanischen Integrität werden die Tragfähigkeiten anhand von quasistatischen Scherzug- und 3-Punkt-Biegeversuche untersucht. Die Auswirkungen von Vibrationen und Belastungen durch Verwindungen der Karosserie werden über Dauerschwingversuche ermittelt.

Eine grundlegende Anforderung an den Strangpressprozess ist, dass die Profile mit einer hohen Genauigkeit hergestellt werden müssen. Zur Festlegung der Toleranzen wurde deshalb die DIN EN 12020 herangezogen.

Zur Prüfung der Wasserdichtigkeit nach IPX7 wurde eine Helium-Einzelleck-Schnüffelprüfung mit einer Grenzleckagerate von 1x10<sup>-3</sup> mbarl/s definiert.

Auf Grundlage der ermittelten Anforderungen wurden die in **Abbildung 3** dargestellten Profilgeometrie- und Fügekonzepte erarbeitet.

Der erste Ansatz verwendet eine Geometrie, die vom Halbhohlstanzniet inspiriert wurde. Die Verbindung wird durch plastische Verformung der Fußgeometrie erzeugt. Das zweite Profilkonzept verfolgt den Ansatz, einen Hinterschnitt durch Aufstauchen des inneren Fügepartners zu erzeugen. Die asymmetrische Geometrie hat den Vorteil, dass es weniger Passungen gibt und der Fügeprozess unempfindlicher gegenüber Fertigungsabweichungen ist. Das dritte Konzept arbeitet nach dem Kniehebelprinzip. Gegenläufige Kräfte verhindern ein Öffnen der Verbindung. Durch die ungleichmäßige Auflage der Profile vor dem Fügen kann bei dieser Variante in der Serienfertigung ein Mehraufwand für das Fügewerkzeug entstehen.



Abbildung 3: Profilgeometrie- und Fügekonzepte

# 1.4. Arbeitspaket 2: Simulationsgestützte Optimierung ausgewählter Konzeptvarianten (IUL/LWF)

Ziel dieses Arbeitspaketes war zunächst die Charakterisierung des Ausgangswerkstoffes für die Modellierung der Strangpresssimulation sowie die Charakterisierung der Strangpressprofile für den Aufbau des Materialmodells für die Füge- und Prüfsimulationen. Die entwickelten Simulationsmodelle sollten dann in den Arbeitspaketen 2a und 2b genutzt werden um die in Arbeitspaket 1 entwickelten Geometrie- und Fügekonzepte hinsichtlich ihrer Profileigenschaften und der Verbindungsausbildung zu optimieren.

In Absprache mit dem PA wurde auf die Durchführung von Warmzugversuchen zur Charakterisierung des Ausgangswerkstoffes verzichtet, da hier bereits umfassende Materialmodelle für die Strangpresssimulation zur Verfügung standen und der Mehrwert zusätzlicher Untersuchungen als gering eingeschätzt wurde. Um die zu erwartenden mechanischen Eigenschaften der Strangpressprofile zu bestimmen, wurden zunächst Strangpressversuche mit einem 48 mm x 3 mm Flachprofil durchgeführt. Entsprechend der Anforderung, die Profile im Forschungsvorhaben im warmausgelagerten Zustand (T6) fügen zu können, wurde mit den Profilen anschließend eine Versuchsreihe zur Bestimmung einer geeigneten Warmauslagerungsstrategie durchgeführt. Dazu wurden die Profilabschnitte zunächst für 2 Std. bei 510°C homogenisiert. Vorbereitend für Arbeitspaket 2a, in dem verschiedene Abkühlstrategien untersucht werden, wurde ein Teil der Profile nach der

Homogenisierung an stehender Luft abgekühlt und der andere Teil wurde im Wasserbad abgeschreckt. Die Profile wurden dann bei zwei verschiedenen Ofentemperaturen 160 °C und 190 °C zwischen 7 und 15 Stunden warmausgelagert. Anschließend wurden Härtemessungen durchgeführt sowie Zugproben entnommen und quasistatische Zugversuche auf einer Universalprüfmaschine durchgeführt.

Aus den Ergebnissen hat sich die in **Tabelle 3** dargestellte Wärmebehandlungsstrategie als geeignet herausgestellt, die im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens zur Warmauslagerung der Profile verwendet wurde. Die Profile wurden innerhalb von 2 Stunden von Raumtemperatur auf 190 °C erwärmt und dann 7 Stunden bei 190 °C gehalten. Mit dieser Warmauslagerung konnten die in der DIN EN 755-2 vorgegebenen mechanischen Eigenschaften der Legierung EN AW-6060 für den Zustand T6 erzielt werden.

Tabelle 3: Wärmebehandlungsstrategie für EN AW-6060 T6

Temperatur T	Haltezeit t
RT -> 190 °C	2 Std.
190 °C	7 Std.

Die Fließkurven, die für den Aufbau der Simulationsmodelle für den Fügeprozess sowie für die Simulation der Scherzug- und 3-Punkt-Biegeprüfungen verwendet wurden, sind in **Abbildung 4** dargestellt. Die Fließkurve der im Wasserbad abgeschreckten Profile liegt ca. 10 % oberhalb der Fließkurve der an stehender Luft ausgekühlten Proben.



Abbildung 4: Fließkurven aus Vorversuchen für EN AW-6060 T6

#### 1.5. Arbeitspaket 2a: Optimierung lokaler Profileigenschaften mittels FEM (IUL)

In diesem Arbeitspaket sollten die Profilgeometriekonzepte aus Arbeitspaket 1 in einem simulationsbasierten Entwicklungsprozess hinsichtlich ihrer Fügbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Festigkeit und Dichtigkeit optimiert werden. Darüber hinaus sollte der Einfluss einer Festigkeitsgradierung auf die Ausbildung der Fügeverbindung sowie deren Eigenschaften untersucht werden. Zudem sollten Strangpresssimulationen für die Festlegung der Strangpressparameter und zur simulationsbasierte Optimierungsprozess der Profilgeometrien ist parallel und in engem Austausch mit dem Arbeitspaket 2b erfolgt.

Zur Gewährleistung der Fügbarkeit wurden zunächst eine Toleranzanalyse vorgenommen. Die Fertigungstoleranzen wurden mit Hilfe der DIN EN 12020-2 "Aluminium und Aluminiumlegierungen – Stranggepresste Präzisionsprofile aus Legierungen EN AW-6060 und

EN AW-6063 – Teil 2: Grenzabmaße und Formtoleranzen" bestimmt und in Absprache mit den Strangpressexperten des projektbegleitenden Ausschusses vereinzelt weiter eingeschränkt. Als Ergebnis wurden die in **Abbildung 5** dargestellten Vorgaben an die Fügegeometrien abgeleitet und im weiteren Optimierungsprozess (AP2b) berücksichtigt. Unter anderem wurden die Anzahl der Auflageflächen auf maximal 2 beschränkt, Radien auf  $R \ge 0.2$  mm vergrößert und Fügewinkel (siehe **Abbildung 5b**) ergänzt. Außerdem wurde eine asymmetrische Variante entwickelt, die mit nur einer Fügestelle zusätzliche Robustheit gegenüber Fertigungstoleranzen bietet. Diese Variante bietet zudem den Vorteil, dass die innere und äußere Fügegeometrie im Profil örtlich deutlicher getrennt sind. Die im Projekt zu untersuchende Festigkeitsgradierung durch lokale Abkühlung muss somit weniger lokalisiert sein.



Abbildung 5: Designableitungen aus der Toleranzanalyse

Nach der Optimierung der Verbindungsausbildung in AP2b wurde untersucht, ob durch eine Festigkeitsgradierung über den Profilquerschnitt, hervorgerufen durch lokales Abschrecken nach dem Strangpressen, eine weitere Steigerung der Verbundeigenschaften erzielt werden kann.

Abbildung 6 zeigt das zugrundeliegende Verfahrensprinzip. Durch lokales Abschrecken sollten in dem Profilbereich, der die äußere Fügegeometrie darstellt, ein feinkörniges Gefüge mit feinverteilten Legierungselementen erzeugt werden, was höhere Festigkeiten zur Folge hat. Der Profilbereich mit der inneren Fügegeometrie sollte möglichst langsam gekühlt werden um gröbere Körner sowie Ansammlungen von Legierungselementen zu erhalten. Mit der sich hierbei einstellenden geringeren Festigkeit sollte die Umformung während des Fügens lokalisiert werden. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass sich für die verwendete Aluminiumlegierung EN AW-6060 durch Abschrecken im Wasserbad eine um 10 % höhere Zugfestigkeit gegenüber an stehender Luft abgekühlten Profilen einstellen lässt. Für abschreckempfindlichere Aluminiumlegierungen z. B. EN AW-6082 sollten wie sich hingegen größere Festigkeitsunterschiede ergeben.



Niedrige Festigkeit

Abbildung 6: Festigkeitsgradierung durch lokales Abschrecken (nach Totten GE, MacKenzie DS (2003) Handbook of aluminum.)

Der Einfluss einer Festigkeitsgradierung auf das lineare Fügen von Strangpressprofilen wurde zunächst mit Hilfe von Füge-, Scherzug- und 3-Punkt-Biegesimulationen der Profilvariante V2 untersucht, die eine asymmetrische Variante des Fügekonzepts "Stauchen" darstellt (siehe auch **Abbildung 10**). Hierzu wurde dem Profil mit der äußeren Fügegeometrie die vorab ermittelte Fließkurve für die verwendete Aluminiumlegierung zugeordnet. Die Fließkurve, die dem Profil mit der inneren Fügegeometrie zugeordnet war, wurde sukzessiv über einen Skalierungsfaktor auf bis zu 50 % heruntergesetzt. Der in **Abbildung 7** verwendete Festigkeitsgradient *G* stellt das Verhältnis der Anfangsfließspannungen der unskalierten und skalierten Fließkurven dar.

$$G = \frac{k_{f0,weich}}{k_{f0,fest}} \tag{1}$$

Obwohl sich mit zunehmender Festigkeitsgradierung nach der Fügesimulation ein größerer Hinterschnitt sowie längere Kontaktlinien in der Verbindung beobachten lassen, sinken sowohl die Scherzugtragfähigkeit (-30%) als auch die Biegetragfähigkeit von oben (-50%) deutlich. Die Biegetragfähigkeit von unten zeigt hingegen eine leichte Tragfähigkeitssteigerung. Die belastungsabhängigen Ergebnisse lassen sich dadurch erklären, dass die Verbindungen an unterschiedlichen Orten versagen. Bei der Scherzugprüfung sowie der 3-Punkt-Biegeprüfung von oben versagt das festigkeitsgradierte Profil. Die herabgesetzten Materialeigenschaften spiegeln sich direkt in den Tragfähigkeiten wider und übersteigen den positiven Effekt eines größeren Hinterschnitts. Bei der 3-Punkt-Biegeprüfung von unten versagt hingegen das Profil mit konstanter Festigkeit. Hier führt der größere Hinterschnitt zu leicht höheren Tragfähigkeiten.



Abbildung 7: Einfluss der Festigkeitsgradierung auf die Tragfähigkeiten

Die Festigkeitsgradierung hat somit einen negativen Effekt auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindung. Größere Hinterschnitte sowie längere Kontaktlinien in der Verbindung könnten sich jedoch positiv auf die Dichtheit auswirken. Da eine simulative Bestimmung von Dichtigkeiten mit den bekannten Modellen nicht möglich war, wurden im weiteren Verlauf des Projekts experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

Abschließend wurden in diesem Arbeitspaket Strangpresssimulationen mit Inspire Extrude Metal durchgeführt. anhand derer eine Blocktemperatur von 510 °C und 2022 eine Stempelgeschwindigkeit von 3 mm/s festgelegt, sowie ein gleichmäßiger Profilaustritt für die Konstruktion der Strangpresswerkzeuge vorausgesagt werden konnte. Außerdem wurde der Ausschuss im Bereich der Querpressnaht simulativ ermittelt. Die Querpressnaht beschreibt die Verschweißung des letzten Aluminiumblocks mit dem nächsten. Die Schweißnaht bildet sich nicht gleichmäßig über den Profilquerschnitt aus, sondern das Material des neuen Blocks verdrängt das Material des alten an verschiedenen Stellen eines komplexen Profils unterschiedlich schnell. In diesem Bereich können die mechanischen Eigenschaften beeinflusst sein.

Um diesen Einfluss zu vermeiden, wurde festgelegt, dass der Querschnitt des Profils zu 95 % aus neuem Material bestehen muss. Für die untersuchten Geometrien mussten deshalb 1500 mm der stranggepressten Profile nach Beginn jedes Strangpressvorgangs als Ausschuss angesehen werden.

#### 1.6. Arbeitspaket 2b: Optimierung der Verbindungsausbildung (LWF/IUL)

In diesem Arbeitspaket erfolgte die simulationsgestützte Optimierung der ausgewählten Profilgeometriekonzepte aus AP1. Hierzu wurden unter Verwendung der Software Simufact Forming Simulationsmodelle für den Fügeprozess und die nachgelagerten Prüfungen zur Analyse der Verbindungsausbildung erstellt.

Unter Ausnutzung der für Strangpressprofile typischen Symmetrieebene wurden die in **Abbildung 8** dargestellten 2D-planaren Simulationsmodelle mit ebenem Dehnungszustand für den Prozess des linienförmigen Fügens für zwei 1000 mm lange Profile, sowie für die Scherzugund 3-Punkt-Biegeprüfungen aufgebaut. Mit Hilfe dieser Simulationsmodelle, wurden aus den Profilgeometrie- und Fügekonzepte aus **Abbildung 3** die Profilvarianten V1, V2 und V6 (**Abbildung 10**) entwickelt.



Abbildung 8: Aufbau und Randbedingungen des Simulationsmodells

Um die Prognosegüte des Simulationsmodells zu prüfen, war eine Validierung der Simulationsergebnisse notwendig. Diese erfolgte mit Hilfe von Fügeversuchen, der den in AP1 ausgewählten Profilkonzepte. Die benötigten Probenkörper wurden hierzu zunächst mittels Drahterodieren hergestellt. Im weiteren Verlauf erfolgte die Validierung an den durch das IUL in AP5 hergestellten Profilgeometrien. Anhand der Prozesskurven des Fügeprozesses und der quasistatischen Scherzugprüfung sowie der geometrischen Verbindungsmerkmale im Querschliff erfolgte die Validierung des zugrundeliegenden Werkstoff- und Reibmodells (**Abbildung 9**). Die im weiteren Verlauf des Kapitels dargestellten Kraft-Weg-Verläufe sind ausschließlich mittels der am IUL hergestellten Strangpressprofile ermittelt worden.



Abbildung 9: Simulativ und experimentell ermittelte Fügekraft-Weg-Verläufe der Profilvarianten V1, V2 und V6

Es zeigte sich bereits eine gute Übereinstimmung der simulativ und experimentell ermittelten Fügekraft-Weg-Kurven. Für alle Varianten lassen sich die Fügekraftverläufe in zwei Bereiche unterteilen. Die Variante 1 weist zunächst einen linearen Kraftanstieg auf, bei dem sich die Fußgeometrie in den Hohlraum einformt. Nachdem die Fußgeometrie vollständig umgeformt ist. erfolgt ein Stauchen der Nietgeometrie, was durch einen steilen Kraftanstieg zu verzeichnen ist. Um die Verbindung vollständig auszuformen ist bei der Variante V1 eine Gesamtkraft pro Verbindungslänge von 4 kN/mm erforderlich. In der Simulation ist bei etwa 0.3 mm Verschiebung ein kleines Plateau zu beobachten. In diesem Bereich trat in der Simulation fast ausschließlich eine Biegung der Grundgeometrie auf. Die Ursache ist auf Fertigungstoleranzen und abweichende Reibungsverhältnisse zurückzuführen. Für die Variante 2 ist ein deutlich steilerer Fügekraftanstieg als im Vergleich zu V1 erkennbar. Anschließend steigt die Kraft linear mit geringerer Steigung an. Die erforderliche Fügekraft ist mit 1,4 kN/mm im Vergleich zu V1 deutlich geringer. Für die Variante V6 ist infolge der plastischen Umformung der Kniehebel zunächst ein langer und flacher Kraftanstieg zu beobachten. Anschließend werden die Kniehebel ineinander verpresst und die Verbindung gestaucht, wodurch ein Kraftanstieg auf 0,45 kN/mm zu beobachten ist. Die Variante V6 erfordert damit die mit Abstand geringsten Fügekräfte der untersuchten Verbindungen. Insgesamt lassen sich alle drei Varianten erfolgreich fügen und die erforderlichen Fügekräfte decken sich mit den Kräften aus dem Simulationsmodell.

Auch die Auswertung der Schliffbilder der Fügeverbindungen der jeweiligen Varianten zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (**Abbildung 10**). Bei Betrachtung der Variante 1 zeigt sich jedoch, dass die Nietfußgeometrie den Hohlraum nicht vollständig füllt. Dies ist ebenfalls auf Fertigungstoleranzen und abweichende Reibwerte im Vergleich zur Simulation zurückzuführen.



Abbildung 10: Simulativ und Experimentell ermittelte Schliffbilder der Profilvarianten V1, V2 und V6

Für die Simulationen wurde zunächst das Reibmodell nach Coulomb mit  $\mu = 0,2$  angenommen. Der Vergleich der numerischen Ergebnisse und der experimentellen Ergebnisse (aus **Kapitel 1.10.1**) für den Scherzugversuch von Profilvariante V2 in **Abbildung 11a** zeigt, dass so keine ausreichend Korrelation zum Experiment erzielt werden konnte. Während im Experiment eine maximale Scherzugtragfähigkeit von 2,9 kN pro mm Fügelänge nach einem Weg von 3,6 mm erreicht wird, erreicht die Kraft in der Simulation unter Verwendung des Reibmodells nach Coulomb bereits nach 1 mm ihr Maximum von 2,5 kN. Der Vergleich der Versagensbilder in **Abbildung 11b** zeigt, dass in der Simulation unter Verwendung des Reibmodells nach Coulomb ein Herausrutschen der Verbindung zu beobachten ist. Dieses Verhalten ließ sich für das Experiment nicht beobachten. Zur besseren Abbildung der experimentellen Ergebnisse wurde deshalb das Reibmodell nach Tresca verwendet, welches für hohe Kontaktdrücke entwickelt wurde. Der verwendete Reibfaktor m = 1 bildet dabei den Grenzfall der Haftreibung ab. Für die Simulation bedeutet Haftreibung, dass die Knoten haften, solange eine Normalkraft vorhanden ist. Die Simulation unter Verwendung des Tresca-Reibmodells mit Haftreibung stimmt auch für größere Verschiebungen sehr gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Das Versagensbild nach s = 2 mm ist ebenfalls identisch.



Abbildung 11: a) Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den Scherzugversuche und b) Versagensbilder bei s = 2 mm unter Verwendung verschiedener Reibmodelle.

Zur weiteren Untersuchung des Haftverhaltens wurde eine Fügverbindung der Variante V2 aufgetrennt und es wurden 3D-Oberlächenscans der Kontaktflächen mit einem Keyence VR-5200 3D-Profilometer aufgenommen. Die in **Abbildung 12** dargestellten Aufnahmen zeigen, dass sich auf beiden Kontaktflächen identische Bereiche mit einer rauen Oberfläche finden lassen, die auf Mikroformschlüsse zwischen den beiden Fügepartnern hindeuten. Die gemittelten Rautiefen  $R_z$ sind in diesen Bereichen bis zu 3-mal größer als auf den umliegenden Profiloberflächen.



Abbildung 12: 3D-Aufnahmen und Rauheitsmessungen der Kontaktflächen von Profilvariante V2

In **Abbildung 13** sind die Kraft-Weg-Verläufe der Profilvarianten V1, V2 und V6 unter Verwendung des überarbeiteten Reibmodells dargestellt und mit den experimentellen Ergebnissen aus **Kapitel 1.10.1** gegenübergestellt.



Abbildung 13: Simulativ und Experimentell ermittelte Scherzugkraft-Weg-Verläufe der Profilvarianten V1, V2 und V6

Es zeigt sich, dass die Verläufe der Variante 2 und 6 zu Beginn und bis zur maximalen Scherzugtragfähigkeit eine hohe Übereinstimmung aufweisen. Im weiteren Verlauf weichen die simulativen Ergebnisse von den experimentellen ermittelten Verläufen ab. Die Ursache liegt darin, dass es im Experiment zum Materialversagen kommt, welches in der Simulation nicht abgebildet wird. Aufgrund einer zu geringen Prüfaufbausteifigkeit wichen die simulativ und experimentell ermittelten Kraft-Weg-Verläufe der Variante 1 deutlich voneinander ab. Da die maximalen Scherzugtragfähigkeiten aller Profilvarianten jedoch eine sehr hohe Übereinstimmung aufwiesen, wurde das Simulationsmodell als ausreichend valide angenommen.

Die Analyse der resultierenden Spannungsverteilung und des Werkstoffflusses diente als Ausgangspunkt für die Optimierung der Verbindungsausbildung und somit der entsprechenden geometrischen Anpassung des Strangpresserzeugnisses aus AP2a. Hinsichtlich der fügegerechten Optimierung wurden charakteristische Zielgrößen ausgewertet. Hierzu zählen der Hinterschnitt, die Kontaktspannung in der Verbindungsebene, die Relativbewegung zwischen den Fügepartnern, die resultierenden Fügekräfte sowie die entstehende Bauteildeformation.

Die vielversprechendsten Varianten wurden anschließend in einem Bewertungskatalog bewertet. Der Bewertungskatalog wurde in enger Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss entwickelt. Auf Basis dessen wurde anschließend in AP3 der Strangpressprozess für die jeweils besten Varianten ausgelegt.

# 1.7. Arbeitspaket 3: Entwicklung und Auslegung eines Strangpresskonzeptes (IUL)

Ziel diese Arbeitspaketes war die Auslegung des Strangpressprozesses sowie die Konstruktion und der Aufbau einer Vorrichtung zur Realisierung unterschiedlicher, lokaler Abkühlraten über den Profilquerschnitt.

Die Strangpressversuche wurden auf der 10 MN-Strangpresse (direkt) des IUL durchgeführt. Die Strangpresse nutzt einen Rezipienten mit einem Durchmesser von 146 mm. Rezipient und Werkzeug wurden auf die Maximaltemperatur von 450 °C vorgeheizt. Zur Warmauslagerung wurde ein elektrischer Ofen der Firma Nabertherm verwendet.

Zur weiteren Auslegung des Strangpressprozesses wurden die zuvor experimentell und simulativ ermittelten Parameter verwendet. Alle Parameter sind in **Tabelle 4** aufgelistet.

Tabelle 4: Prozessparameter Strangpressen

ľ							
Werkstoff und Geometrie			Strangpressparameter:	Wärmehehandlung:			
		5010.	Ollangpressparameter.		wannebenanalang.		
	Legierung: Homogenisierung: Bolzendurchmesser: Blocklänge: Pressverhältnis:	EN AW-6060 510 °C, 6 h $D_{\rm B}$ = 140 mm $L_{\rm B}$ = 300 mm $R \approx 26$	Blockeinsatztemperatur: Temperatur Rezipient: Werkzeugtemperatur: Durchmesser Rezipient: Stempelgeschwindigkeit: Profilaustrittstemperatur:	$T_{\rm B} = 510 ^{\circ}{\rm C}$ $T_{\rm R} = 450 ^{\circ}{\rm C}$ $T_{\rm W} = 450 ^{\circ}{\rm C}$ $D_0 = 146 ^{\circ}{\rm mm}$ $v_{\rm St} 3 ^{\circ}{\rm mm/s}$ $T_{\rm A} \approx 510 ^{\circ}{\rm C}$	<ol> <li>Kaltauslagerung bei RT: ca. 12 h</li> <li>Warmauslagerung:         <ul> <li>a. 0 → 190 °C, 2 h</li> <li>b. 190 °C, 7 h</li> </ul> </li> </ol>		

Zur schnellen Kühlung der Profile nach dem Strangpressen und zur Realisierung einer lokalen Abkühlung, wurde die in **Abbildung 14** dargestellte Vorrichtung zur variablen Sprühnebelkühlung konstruiert und aufgebaut.



Abbildung 14: Modell der Sprühnebelkühlung (links) und Strangpressversuche mit Sprühnebelkühlung (rechts).

Als Unterkonstruktion wurde eine am IUL verfügbare Wanne genutzt, die zuvor auch bereits für eine Wasserkühlung verwendet wurde. Der neuentwickelte Aufbau im inneren der Wanne besteht aus Aluminium-Systemprofilen, Edelstahlblechen und einer Acrylglas-Abdeckung. Im inneren befinden sich 4 separat positionierbare Stränge mit jeweils 5 Zweistoffdüsen. Die 20 extern mischenden Vollkegeldüsen (SCHLICK-Mod.940, Form 0 Version 1.0, D 4.349, Bohrung 1,0 mm) mit einem variabel einstellbaren Sprühwinkel von 10° bis 40° können einzeln zu- und abgeschaltet werden. Unter Berücksichtigung der Düsenkennlinien vom Hersteller, wurde ein Wasserdruck von 2 bar und ein Luftdruck von 3 bar eingestellt.

# 1.8. Arbeitspaket 4: Entwicklung und Aufbau eines Anlagenkonzeptes zum Fügen (LWF)

Im Arbeitspaket 1: Konzeptionierung und Bewertung fügegerechter Profilstrukturen (Kapitel 1.3) wurde bereits darauf eingegangen, dass Aufgrund komplexer Werkzeugkonstruktionen beim Rollfügen eine Verbindungsausbildung auf Basis eines einstufigen Pressenhubes favorisiert wurde. In **Kapitel 1.6** konnte dann, zur Validierung der Simulation, die Fügbarkeit der entwickelten Profilgeometrien an der Universalprüfmaschine Zwick Z 100 erprobt werden. Die technischen Daten der Anlage sind der **Tabelle 5** zu entnehmen. Die Profile wurden auf ebenen

Stahlwerkzeugen positioniert und gefügt. Die Profile konnten ohne zusätzliche Positionierungshilfen wie Anschläge oder Spannwerkzeugen gefügt werden. Die Fügewerkzeuge sind in **Abbildung 15** dargestellt.



Abbildung 15: Aufbau der Fügewerkzeuge

Die Prozessüberwachung war über die interne Kraft- und Wegmessung der Universalprüfmaschine gegeben. Die Implementierung zusätzlicher Sensorik war somit nicht notwendig.

In Abstimmung mit dem PA sollte ein einfaches Werkzeugkonzept für den Technologietransfer in die industrielle Umsetzung konzipiert werden. Das Werkzeugkonzept für die Variante 6 ist in **Abbildung 16** dargestellt.



Abbildung 16: Werkzeugkonzepts für die Profilvariante V6 für die industrielle Umsetzung

Das Werkzeug ist für das Fügen von zwei Profilen auf Pressen mit geringer Pressenkraft ausgelegt. Durch Skalierung des Werkzeugs in Y-Richtung ist auch der Einsatz auf großen Pressen gegeben, wodurch das sukzessive Fügen mehrerer Profile ermöglicht wird. Die Montage kann pressenunabhängig über Nutensteine oder über die vorgesehenen Verschraubungspunkte realisiert werden. Für die Variante 6 muss zusätzlich eine Aussparung zur Aufnahme, des nicht am Fügeprozess beteiligten, Kniehebels eingebracht werden. Des Weiteren sind seitliche Anschlagsflächen für eine optimale Positionierung vorgesehen.

#### 1.9. Arbeitspaket 5: Profilherstellung und -untersuchung (IUL)

In diesem Arbeitspaket sollten zunächst die drei in Arbeitspaket 2 ausgearbeiteten Profilgeometrien hergestellt werden. Dabei sollten zusätzlich 3 Abkühlstrategien und 3 Oberflächenstrukturierungen untersucht werden. Die hergestellten Strangpressprofile sollten anschließend hinsichtlich ihrer Geometrie, Mikrostruktur und anhand der mechanischen Eigenschaften analysiert werden.

Entsprechend der Ergebnisse der Strangpresssimulationen aus AP2a konnten mit den zuvor festgelegten Prozessparametern mit allen drei Werkzeugen die entsprechenden Profile hergestellt werden. **Abbildung 17** zeigt Profilabschnitte der drei hergestellten Profilgeometrien. Die Profile wurden anschließend auf die durch den Ofen begrenzte maximale Länge von 600 mm zugesägt und warmausgelagert. Es wurden drei Abkühlstrategien untersucht. Zunächst wurden Profile auf dem Auslauf der Presse langsam an der Luft abgekühlt. Um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern, wurden alle drei Profilquerschnitte außerdem sprühnebelgekühlt hergestellt. An Variante V2 wurden zusätzlich Gradierungsversuche durchgeführt. Da unterschiedliche Oberflächenstrukturen nur mit hohem Aufwand durch das Strangpresswerkzeug erzeugt werden können, wurde festgelegt, dass im weiteren Projektverlauf zur Untersuchung des Einflusses der Oberfläche Fügeversuche mit Öl und mit Beizpassivierten Profilen durchgeführt werden sollen.



Abbildung 17: Stranggepresste Profilabschnitte V2, V1 und V6 (links) und 600 mm lange Profile V6 (rechts)

Die Querschnitte der Profile wurde nach dem Warmauslagern mit Hilfe des Keyence VR-5200 3D-Profilometers vermessen. Alle zuvor auf Grundlage der DIN EN 12020-2 festgelegten und zum Teil weiter eingeschränkten Profiltoleranzen konnten eingehalten werden. Außerdem wurde die Geradheit und Verwindung von 600 mm langen Profilen ermittelt. Exemplarisch sind die Ergebnisse für die Geradheit "links" und "rechts" für Variante V2 in **Abbildung 18** dargestellt. Bei langsamem Abkühlen auf dem Auslauf der Presse lagen die Geradheitsabweichungen unter 0,1 mm. Erwartungsgemäß steigen die Geradheitsabweichungen durch Verwendung der Sprühnebelkühlung und besonders bei gradierter Kühlung. Mit 0,55 mm auf 600 mm Profillänge, können die Geradheitsabweichungen jedoch auch für die gradiert Sprühnebelgekühlten Profile als gering eingeschätzt werden. Dies ist auf die hohe Profilsteifigkeit in diese Richtung zurückzuführen.



Abbildung 18: Geradheitsabweichungen für Profil V2 ohne Kühlung, sprühnebelgekühlt und gradiert sprühnebelgekühlt

An den Profilen V2 wurden außerdem für die drei genannten Kühlstrategien Eigenspannungsmessungen längs und quer zur Extrusionsrichtung mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) durchgeführt. Die Ergebnisse in Strangpressrichtung (**Abbildung 19**) zeigen, dass Druck-Eigenspannungen in den Bereichen auftreten, die schnell gekühlt werden. Eigenspannungen in Strangpressprofilen führen in der Regel zu Verzug nach der Wärmebehandlung. Da diese Eigenspannungen nach der Wärmebehandlung gemessen wurden, konnte bestätigt werden, dass der Verzug aufgrund der Profilsteifigkeit eingeschränkt wurde.



Abbildung 19: Eigenspannungsmessungen in Extrusionsrichtung für Profilvariante V2

Aus den hergestellten und warmausgelagerten Profilen wurden Flachzugproben entnommen und in quasistatischen Zugversuchen geprüft. Exemplarisch konnten für Profilvariante V2 durch Sprühnebelkühlung 17 % höhere Streckgrenzen und 10 % höhere Zugfestigkeiten erzielt werden (**Abbildung 20**). Die Bruchdehnung ist gleichzeig um 3 % gesunken.

Da die Streckgrenze und die Zugfestigkeit der auf dem Auslauf der Presse an Luft abgekühlten Profile an der unteren Normgrenze und teilweise auch darunter lagen, wurde die Sprühnebelkühlung als primäre Abkühlstrategie festgelegt. Die Profile der Variante V2 zeigen für beide Kühlstrategien höherer Werte als die Varianten V1 und V6. Dies ist wahrscheinlich auf eine abweichende Temperaturführung bei den unterschiedlichen Presschargen zurückzuführen.



Abbildung 20: Mechanische Kennwerte der drei Profilvarianten ohne Kühlung und mit Sprühnebelkühlung

Aus den Kraft-Weg-Verläufen der Zugversuche wurden außerdem Fließkurven für alle drei Profilvarianten ohne Kühlung und mit Sprühnebelkühlung abgeleitet. Analog zu den mechanischen Kennwerten liegen die Fließkurven der Variante V2 in **Abbildung 21** etwas höher. Für die Simulationsmodelle wurde auf Grundlage der Fließkurven von V1 und V6 (jeweils Sprühnebelgekühlt) eine Fließkurve mit Hilfe des Ansatzes nach Voce extrapoliert.



Abbildung 21: Fließkurven der drei Profilvarianten ohne Kühlung und mit Sprühnebelkühlung

Für Profilvariante V2 wurde zusätzlich die Härte nach Vickers (HV10) ermittelt. Die sprühnebelgekühlten Profile erzielen entsprechend der Ergebnisse aus den Zugversuchen um 15 % höhere Härtewerte (**Abbildung 22**). Die gewünschte Festigkeitsgradierung konnte nicht

erzielt werden. Die Härtewerte für die sprühnebelgekühlten Profile sind über den Profilquerschnitt konstant. Dies ist vermutlich auf die Kombination der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium, der geringen Abschreckempfindlichkeit von EN AW-6060 und dem in der Vorrichtung angestauten Nebel zurückzuführen.



Abbildung 22: Mikrohärtemessungen an Profilvariante V2 ohne Kühlung, sprühnebelgekühlt und gradiert Sprühnebelgekühlt bei unterschiedlichen Profilgeschwindigkeiten

Die in **Abbildung 23** dargestellten Streckgrenzen aus Stauchproben der Profilvariante V2 bestätigen die Ergebnisse aus Zugversuchen und Härtemessungen. Die zylinderförmigen Stauchproben wurden jeweils aus den Bereichen der Nut und der Feder entnommen. Die Höhe der Stauchproben war dabei in Extrusionsrichtung orientiert. Auch hier konnte durch Sprühnebelkühlung die Streckgrenze bis zu 14 % erhöht werden. Eine Festigkeitsgradierung wurde ebenfalls nicht erzielt. Die Ergebnisse zeigen sogar eine etwas höhere Streckgrenze der ungekühlten "Feder".



Abbildung 23: Streckgrenze aus Stauchversuchen für Profilvariante V2 ohne Kühlung, sprühnebelgekühlt und gradiert Sprühnebelgekühlt

Um die Abkühlgeschwindigkeiten der sprühnebelgekühlten und gradiert sprühnebelgekühlten Profile zu ermitteln wurden Profilabschnitte der Variante V2 mit Thermoelementen an Nut und Feder versehen, im Ofen auf 510 °C erwärmt und anschließend durch die Sprühnebelkühlung geschoben. Bei den gradiert gekühlten Proben war entsprechend die Hälfte der Düsen ausgeschaltet. Die Ergebnisse in **Abbildung 24** zeigen, dass die vollständig sprühnebelkühlten

Proben beidseitig innerhalb von 20 Sekunden unter die kritische Temperatur von 200 °C gekühlt werden konnten. Bei den gradiert gekühlten Profilen lässt sich der gewünschte Temperaturgradient beobachten. Die gekühlte Nut kühlt ebenfalls in unter 20 Sekunden auf eine Temperatur unterhalb von 200 °C ab. Jedoch sinkt auch die Temperatur der ungekühlten Feder schnell ab, sodass diese ebenfalls nach 60 Sekunden eine Temperatur von 200°C erreicht. Für die gewählte Aluminiumlegierung EN AW-6060 T6 werden bei diesen Abkühlgeschwindigkeiten weiterhin hohe Festigkeitswerte erreicht.



Abbildung 24: Abkühlkurven der Profilvariante V2 Sprühnebelgekühlt und gradiert Sprühnebelgekühlt

Für alle drei Profilvarianten wurde die Mikrostruktur durch Schliffbilder nach Barker-Ätzung aufgenommen. Die Schliffbilder "Quer" und "Längs" in Abbildung 25 wurden aus dem mittleren Teil des Profils entnommen. Entsprechend der niedrigen realisierbaren Unterschiede bei den mechanischen Kennwerten, konnte in den Schliffbildern bereits bei den langsam gekühlten Profilen ein feines Gefüge festgestellt werden.



Abbildung 25: Mikrostrukturaufnahmen nach Barker-Ätzung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die zuvor festgelegten Strangpressprozessparameter gemeinsam mit der Kühlstrategie "Sprühnebelkühlen" und der festgelegten Warmauslagerungsstrategie zu einem Prozesserfolg für alle drei Varianten geführt haben. Die angestrebte Festigkeitsgradierung durch gradiertes Sprühnebelkühlen konnte jedoch nicht erzielt werden.

#### 1.10. Arbeitspaket 6: Verbindungsanalyse und Dichtheitsprüfung (LWF)

In diesem Abschnitt wurden die Scherzug- und Biegetragfähigkeiten der einzelnen Profilvarianten ermittelt. Die Tragfähigkeiten wurden anschließend mit der rührreibgeschweißten Referenzprobe, im weiteren Verlauf als FSW-Probe bezeichnet, verglichen. Anschließend folgten Untersuchungen zur Dauerfestigkeit und Dichtheitsprüfungen der verschiedenen Profilverbunde. Zur Ermittlung der quasistatischen und zyklischen Tragfähigkeiten der einzelnen Profilvarianten wurden Profile mit einer Länge von 50 mm (in Extrusionsrichtung) gefügt. Anschließend wurden Probenkörper mit einer Länge von 20 mm mittig aus dem Profilverbund herausgetrennt. Mögliche entstehende Randeinflüsse wurden somit beseitigt.

Die Universalprüfmaschinen Zwick Z100 und Z1484 der Firma Zwick GmbH & Co und die Shimadzu AGS-10kNX der Firma Shimadzu Europa GmbH dienten der Ermittlung der quasistatischen, mechanischen Kennwerte. Zur Anpassung an unterschiedliche Bedingungen verfügen die Prüfmaschinen über austauschbare Kraftmessdosen mit integriertem Kraft-Weg-Messsystem. Zug- sowie Druckbelastung ermöglichen das Fügen der Profilverbunde sowie Tragfähigkeitsuntersuchungen. Die technischen Daten der Prüfmaschine können der **Tabelle 5** entnommen werden. Die Wegmessung erfolgte über externe Feindehnmessaufnehmern.

	Universalprüfmaschine										
Hersteller	Zwick GmbH	1 & Co. KG	SHIMADZU Europa GmbH								
Bezeichnung:	Z 100	Z 1484	AGS-10kNX								
Antrieb		elektrisch	•								
Zulässige Prüfkraft	100 kN	200 kN	10 kN								
	Klasse 1	Klasse 0,03	Klasse 0,5								
Kennwerttoleranz	≤ ±0,2 %	≤ ±0,1 %	≤ ±0,1 %								
Traversengeschwindigkeit	0,001 – 200 mm/min	Max. 200 mm/min	0,001 – 1000 mm/min								

Tabelle 5: Technische Daten der quasistatischen Universalprüfmaschinen

#### 1.10.1. Ermittlung der Scherzugtragfähigkeit

Zur Ermittlung der maximalen Scherzugtragfähigkeit wurde die quasi-statische Universalprüfmaschine Z100 mit einem hydraulischen Spannwerkzeug ausgerüstet. Die hydraulische Spannung gewährleistet, dass die Proben während der Prüfung nicht innerhalb der Werkzeuge rutschen. Um eine plastische Verformung der Profile durch das Spannwerkzeug zu verhindern, wurden die Profile zusätzlich mit Stahlplatten innerhalb des Kühlkanals fixiert. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,167 mm/s. In **Abbildung 26** ist der Versuchsaufbau der Scherzugprüfung dargestellt.



Abbildung 26: Versuchsaufbau der quasi-statischen Scherzugprüfung

**Abbildung 27** zeigt die Scherzugkraft-Weg-Kurven für die Profilvarianten V1, V2, V6 und der FSW-Probe. Die Scherzugkraft wurde auf die Fügelänge von 1 mm normiert. Es zeigt sich, dass die Scherzugkraft der FSW-Probe (schwarz) mit 440 N/mm durch die Profilgeometrien V1 (blau) und V2 (grün) mit 350 N/mm und 290 N/mm unterschritten wurden. Einzig die Variante V6 (rot) weist mit einer maximalen Kraft von 470 N/mm eine höhere Scherzugfestigkeit als die Referenzprobe auf.



Abbildung 27: Darstellung der Kraft-Weg-Kurven der auf Scherzug beanspruchten Profil- und Referenzverbindungen

Im Weiteren sind in **Abbildung 28** die Versagensbilder der auf Scherzug beanspruchten Verbindungen dargestellt. Es ist zu beobachten, dass durch die Krafteinleitung während der Prüfung die Fügezone der Varianten V1 und V2 deformieren. Infolgedessen und aufgrund der geringen Hinterschnittausbildung gleiten die Profile auseinander. Die Folge ist eine geringe Scherzugtragfähigkeit. Aufgrund der asymmetrischen Geometrie hat V1 einen größeren Fügebereich und damit eine größere Kontaktfläche, was zu einer höheren Scherzugfestigkeit gegenüber der Variante V2 führt.



Abbildung 28: Versagensbilder der auf Scherzug belasteten Profilvarianten V1, V2 und V6

#### 1.10.2. Ermittlung der Biegetragfähigkeit

Die Biegetragfähigkeit wurde mit Hilfe des 3-Punkt-Biegeversuchs bestimmt. Dazu wurden die Proben mittig auf zwei zylindrischen Lagern mit einem Durchmesser von 30 mm in einem Abstand von 80 mm zueinander positioniert. Analog zum Scherzugversuch wurden aus 50-mm-Abschnitten 20-mm-Abschnitte herausgeschnitten. Der Stempel war mittig zwischen den Kontaktflächen positioniert und hat einen Durchmesser von 20 mm. **Abbildung 29** stellt den Versuchsaufbau dar.



Abbildung 29: Versuchsaufbau der quasi-statischen 3-Punkt-Biegeprüfung

Die Kraft-Weg-Kurven der Profilvarianten unter Biegebelastung sind in **Abbildung 30** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Referenzprobe, die mittels einseitigem Rührreibschweißen (FSW) gefügt wurde, eine Biegefestigkeit von 85,2 N/mm Fügelänge aufweist. Betrachtet man jedoch die Ergebnisse der Variante V6, so kann man feststellen, dass die Biegefestigkeit der Probe 129,3 N/mm beträgt und diese damit eine deutlich höhere Tragfähigkeit als die Referenzprobe aufweist. Im Gegensatz dazu sind die Biegefestigkeiten der Varianten V1 und V2 mit 52,25 N/mm bzw. 72,15 N/mm niedriger als die der Referenzprobe.

Die Versagensbilder der auf Biegung beanspruchten Profilverbunde sind in **Abbildung 31** dargestellt. Bei Begutachtung der Profilgeometrien V1 und V2 ist zu erkennen, dass der Fügebereich der Varianten V1 und V2 nach der Biegeprüfung weiterhin intakt ist. Die Krafteinleitung erfolgt in den Randbereichen der Fügezone mit der geringsten Materialdicke. Dies hat zur Folge, dass nur das Aluminium-Grundmaterial auf Biegung beansprucht wird und somit nur geringe Biegefestigkeiten erreicht werden. Die intakte Fügezone hat den Vorteil, dass die Dichtheit auch nach der Prüfung oder im Crashfall gewährleistet wäre.



Abbildung 30: Darstellung der Kraft-Weg-Kurven der auf Biegung beanspruchten Profil- und Referenzverbindungen



Abbildung 31: Versagensbilder der auf Biegung belasteten Profilvarianten V1, V2 und V6

# 1.10.3. Ermittlung der zyklischen Tragfähigkeit

Es wurde eine Ermüdungsanalyse durchgeführt, um die Festigkeit der Verbindungen unter zyklischer Belastung zu ermitteln. Die Versuche wurden auf einer servo-hydraulischen Prüfmaschine durchgeführt. Dies ist eine dynamische Prüfmaschine, die bei Vollresonanz arbeitet. Die technischen Daten der Prüfmaschine können der **Tabelle 6** entnommen werden.

Resonanzprüfmaschine Mikroton 20 kN								
Hersteller	Russenberger Prüfmaschinen AG	-						
Max. Scheitelwert der Kraft	20 kN Zug oder Druck							
Max. Schwingkraft	20 +/- 10 kN							
Genauigkeit der Kraftmessung	Statisch $\leq$ 0,5 % / Dynamisch $\leq$ 0,5 %							
Arbeitsfrequenzbereich	65 – 220 Hz	-						

Die Prüfung erfolgte an Profilabschnitten mit einer Länge von 20 mm (in Extrusionsrichtung). Für alle Prüfungen wurden die Prüffrequenz f = 50 Hz und das Lastverhältnis R = 0,1 konstant gehalten. Die Anzahl der Zyklen für Prüfungen mit niedriger Schwingspielzahl wurde zwischen N =  $1*10^4$  und  $1*10^5$  und für Prüfungen mit hoher Schwingspielzahl im Bereich von N =  $1*10^6$  bis

2\*10<sup>6</sup> festgelegt. Für jede Kraftamplitude wurden jeweils fünf Probekörper geprüft. Aus den Versuchsergebnissen wurden für die Profilvarianten V1 und V6 Wöhlerkurven erstellt und die jeweiligen k-Faktoren (Steigungsexponent der Wöhlerkurve) bestimmt. Aufgrund den geringsten quasi-statischen Tragfähigkeiten alle Profilgeometrien, wurde die Variante V2 bei der Dauerfestigkeitsanalyse nicht berücksichtigt. **Abbildung 32** zeigt die Wöhler-Kurven für die Profilvarianten V1 und V6.



Abbildung 32: Wöhlerdiagramm der Profilvarianten V1 und V6 unter zyklischer Belastung

Es ist zu erkennen, dass V6 bei gleicher Schwingspielzahl eine höhere Ermüdungsfestigkeit aufweist als die Variante V1. Für die Variante V1 betragen die Ermüdungsfestigkeiten im Bereich der Kurzzeitfestigkeit 45,0 N/mm und im Bereich der Dauerfestigkeit 27,0 N/mm. Bei der Variante V6 hingegen liegen die Ermüdungsfestigkeiten im Bereich der Kurzzeitfestigkeit 103,5 N/mm und im Bereich der Dauerfestigkeit 103,5 N/mm und im Bereich der Steigerung von 130,0 % bzw. 86,6 %. Die Fügezone ist auch nach dem Versagen des Profilverbundes weiterhin intakt. Die Probe versagt im Randbereich der Fügezone mit der geringsten Materialdicke.

# 1.10.4. Ermittlung der Dichtheitseigenschaften

Batteriegehäuse unterliegen erhöhten Dichtungsanforderungen. Zum einen muss das Eindringen von schädlichen Medien aus der Umgebung in das Hochspannungsgehäuse verhindert werden, um elektrische Kurzschlüsse oder die Bildung von Flusssäure zu vermeiden. Zum anderen muss das Auslaufen von Elektrolyten in die Umgebung verhindert werden. Für die Prüfung der Dichtheit von Batteriesystemen gibt es verschiedene Normen, in denen unterschiedliche Methoden und Verfahren zur Dichtheitsprüfung beschrieben sind. Diese können in Vakuum- und Überdruck-verfahren unterteilt werden. Die Prüfverfahren werden zusätzlich nach ihrer Empfindlichkeit unterschieden. Zur Dichtheitsprüfung der Profilverbunde wurde in diesem Forschungsprojekt die Heliumprüfung mit Helium- und Wasserstoff-Schnüffel-Leckprüfgerät verwendet.

Für die Helium-Schnüffellecksuche wurde der XL3000flex der INFICON GmbH eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein hochpräzises Schnüffelleckprüfgerät. Das Messprinzip basiert auf einem resistiven Sektorfeld-Massenspektrometer, das Helium und Wasserstoff nachweisen kann. Auf diese Weise lassen sich auch kleinste Lecks zuverlässig aufspüren und lokalisieren. Die technischen Daten des Dichtheitsprüfgerät können der **Tabelle 7** entnommen werden.

Tabelle 7: Technische Daten des Helium- und Wasserstoff-Schnüffel-Leckprüfgerät XL3000flex

Um die Profilverbundsysteme auf Dichtheit zu prüfen, wurde eine Spannvorrichtung entwickelt. Über einen Kniehebel wird eine Dichtglocke mit Dichtring vorgespannt. Über ein Ventil wird die Dichtglocke mit dem Prüfgas befüllt und ein definierter Prüfdruck von 100 mbar aufgebaut. Mit dem Heliumschnüffler kann nun die Leckagerate des ausströmenden Prüfgas ermittelt werden. Die Probenkörper werden in Extrusionsrichtung (in X-Richtung) mit Dichtstoff abgedichtet, um ein Ausströmen des Heliums an den Stirnflächen zu verhindern. Das Prüfverfahren ist in **Abbildung 33** schematisch dargestellt.



Abbildung 33: Schematische Darstellung der Helimum-Schüffel-Leckprüfung

Der Grenzwert für die Leckagerate wurde auf 1\*10<sup>-3</sup> mbar\*l/s festgelegt, was der Grenze der Dampfdichtheit entspricht. Die Prüfung erfolgte dabei an den Profilvarianten V1, V2 und V6 die unter verschiedenen Einflussfaktoren gefügt worden sind (Abkühlstrategien, Oberflächenzuständen, Fügegeschwindigkeiten). Abschließend wurden Dichtheitsprüfungen an mechanisch und thermisch vorbelasteten Prüfkörpern durchgeführt. Für die mechanische Vorbelastung wurden Proben zunächst quasistatisch vorbelastet. Hierzu wurden Kräfte aus dem elastischen Bereich des Scherzugversuchs gewählt. Im nächsten Schritt wurden Proben zyklisch vorbelastet. Dabei wurden die maximalen Kräfte aus dem Ermüdungsbereich des Dauerschwingversuchs gewählt. Darüber hinaus wurde der Einfluss einer nachgeschalteten Überschweißung auf die Dichtheit des Profilverbundes untersucht. Zu diesem Zweck wurden Schweißraupen längs und quer zur Fügezone aufgebracht. Weiterhin wurde in Stichpunktversuchen, die Dichtheit an Proben in realer Bauteilgröße gemessen. Dazu wurden Profile mit einer Länge von 600 mm gefügt und anschließend 20 mm Proben aus der Mitte entnommen. Die Ergebnisse der Dichtheitsprüfung in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren für die Profilgeometrien V1 und V6 sind in der **Tabelle 8** dargestellt.

#### Seite 29 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 21048 N

Profilvariante	Abkühlstrategie	Öl	Fügegeschwindigkeit	Grenzleckagerate	Leckagerate	Besonderheit
V1	Luft		3 mm/s	1*10-3	2,25*10 <sup>-5</sup>	
V1	Wasser		3 mm/s	1*10-3	2,13*10 <sup>-6</sup>	
V1	Wasser	x	3 mm/s	1*10-3	2,60*10 <sup>-5</sup>	
V1	Wasser		0,16 mm/s	1*10-3	3,70*10 <sup>-5</sup>	
V1	Wasser		3 mm/s	1*10-3	3,15*10 <sup>-5</sup>	Realbauteil
V1	Wasser		3 mm/s	1*10-3	2,06*10 <sup>-6</sup>	Passiviert
V6	Luft		3 mm/s	1*10-3	3,96*10 <sup>-5</sup>	
V6	Wasser		3 mm/s	1*10-3	2,76*10 <sup>-5</sup>	
V6	Wasser	x	3 mm/s	1*10-3	4,80*10 <sup>-5</sup>	
V6	Wasser		0,16 mm/s	1*10-3	4,50*10 <sup>-5</sup>	
V6	Wasser		3 mm/s	1*10-3	4,62*10 <sup>-6</sup>	Realbauteil
V6	Wasser		3 mm/s	1*10-3	<b>4,77*10</b> <sup>-5</sup>	statisch
V6	Wasser		3 mm/s	1*10-3	3,40*10 <sup>-5</sup>	zyklisch
V6	Wasser		3 mm/s	1*10-3	4,74*10 <sup>-5</sup>	thermisch

Tabelle 8: Auswertung der Dichtheitsprüfung unter verschiedenen Einflussfaktoren der Profile V1 und V6

Es zeigte sich, dass die Profilvarianten V1 und V6 unabhängig von den verschiedensten Einflussfaktoren auf den Fügeprozess keine Undichtheiten oberhalb der Grenzleckagerate aufweisen. Sowohl Realbauteile oder auch mechanisch und thermisch vorbelastete Probenkörper wiesen keine Erhöhung der Leckagerate auf. Die Profilgeometrien V1 und V6 wiesen somit eine vollständige technische Dichtheit gegenüber Wasser und Wasserdampf auf.

Die Ergebnisse der Dichtheitsprüfung in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren für die Profilgeometrie V2 ist in der **Tabelle 9** dargestellt.

Profilvariante	Abkühlstrategie	Öl	Fügegeschwindigkeit	Grenzleckagerate	Leckagerate	Besonderheit
V2	Luft		3 mm/s	1*10-3	5,05*10 <sup>-5</sup>	
V2	Wasser		3 mm/s	1*10-3	2,04*10 <sup>-2</sup>	
V2	Wasser		0,16 mm/s	1*10-3	2,56*10 <sup>-2</sup>	
V2	Wasser	x	3 mm/s	1*10-3	2,38*10 <sup>-2</sup>	
V2	Wasser/Luft		3 mm/s	1*10-3	6,45*10 <sup>-3</sup>	
V2	Luft/Wasser		3 mm/s	1*10-3	1,34*10 <sup>-2</sup>	
V2	Wasser		3 mm/s	1*10-3	2,88*10 <sup>-2</sup>	F = 2,2 kN/mm
V2	Wasser		3 mm/s	1*10-3	2,81*10 <sup>-3</sup>	F = 1,6 kN/mm + Stempel
V2	Wasser		3 mm/s	1*10 <sup>-3</sup>	3,26 <sup>*</sup> 10 <sup>-4</sup>	F = 2,0 kN/mm + Stempel
V2	Wasser		3 mm/s	1*10 <sup>-3</sup>	4,42*10 <sup>-5</sup>	F = 2,6 kN/mm + Stempel

Tabelle 9: Auswertung der Dichtheitsprüfung unter verschiedenen Einflussfaktoren des Profils V2

Im Gegensatz zu den Varianten V1 und V6 wies die Geometire V2 erhöhte Leckageraten von bis zu 1,34\*10<sup>-2</sup> mbar\*l/s auf, womit die Grenzleckagerate überschritten wurde.

Durch eine Erhöhung der Fügekraft von 1,6 kN/mm auf 2,6 kN/mm und einer angepassten Fügestempelgeometrie, welche die Fügekraft ausschließlich in die Fügezone einleitet, konnten Leckageraten unterhalb von 1\*10<sup>-3</sup> mbar\*l/s erreicht werden. Somit wies auch die Profilgeometrie V2 eine vollständige Dichtheit gegenüber Wasser und Wasserdampf auf.

#### 1.11. Arbeitspaket 7: Benchmark und Potentialanalyse (IUL/LWF)

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Gegenüberstellung der entwickelten linienförmigen mechanischen Fügeverbindungen mit den konkurrierenden Fügeverfahren. Hierbei sollten unter anderem die Formgenauigkeit, die Tragfähigkeiten und die erzielbaren Dichtigkeiten diskutiert werden. Damit verbunden sollte eine Nutzwertanalyse für die Herstellung von Aluminium-Batteriegehäusen durchgeführt werden. Abschließend sollte das Anwendungspotenzial und weitere Optimierungsbedarfe ermittelt werden.

#### 1.11.1. Benchmark und Nutzwertanalyse

Unter Berücksichtigung der Projektergebnisse und in enger Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss, wurden die entwickelten linienförmigen mechanischen Fügeverbindungen anhand verschiedener Bewertungskriterien mit den Schweißverfahren MIG und FSW gegenübergestellt. Die Ergebnisse wurden in der Nutzwertanalyse in **Tabelle 10** zusammengefasst.

Tabelle	10:	Nutzwertanalyse	für	die	linienförmigen	mech	anischen	Fügeverbindungen	sowie	MIG-	und	FSW-
Schweißverbindungen												
							Linio	nförmiges Fügen				
-					<b>a</b>			inonniges i ugen			_	0144

Rowertungskriterion	Gewichtung	Linienförmiges Fügen			MIC	
Deweitungskiltenen		V1	V2	V6	WIG	F3W
Formgenauigkeit	15 %	3	2	2	1	2
Scherzugtragfähigkeit	20 %	2	1	2	3	2
Pressenkraft	5 %	1	2	2	3	3
Breite der Fügezone	5 %	1	2	2	3	3
Nacharbeit	10 %	2	2	2	3	1
Platzbedarf Anlagen	5 %	3	3	3	2	2
Fertigungskosten (50.000 p.a.)	20 %	1	3	3	1	2
Fertigungskosten (200.000 p.a.)	20 %	1	3	3	1	3
Gewichtete Gesamtwertung		1,7	2,25	2,45	1,85	2,2

Für jedes Bewertungskriterium wurden zwischen 1 und 3 Punkten vergeben. Die Erläuterungen der Bewertung sind nachfolgend aufgeführt. In der gewichteten Gesamtwertung zeigt das linienförmige Fügen in den Varianten V2 und V6 mit 2,25 und 2,45 von 3 Punkten den größten Nutzen, gefolgt von FSW mit 2,2 von 3 Punkten. Für Variante V2 ist hierbei jedoch die geringe Scherzugtragfähigkeit hervorzuheben, die je nach Anwendungsfall ggf. höher gewertet werden könnte.

Das schlechteste Ergebnis zeigt die Variante V1, was besonders auf die hohen Kosten aufgrund des hohen Materialeinsatzes in der Fügezone zurückzuführen ist.

#### Formgenauigkeit:

Die Bewertung der Formgenauigkeit setzt sich aus dem durch das Fügeverfahren induzierten Verzug und der Ebenheit des Fügebereichs zusammen. Bei den Schweißverfahren kommt es aufgrund von Wärme zu Schweißverzügen, die für MIG stärker ausgeprägt sind als für FSW. Dazu führen die Schweißnähte zu Unebenheiten im Fügebereich, die aufwendig nachgearbeitet werden müssen. Für das Linienförmige Fügen ist der Gesamtverzug in den Varianten V1 und V6 gering. Variante V2 zeigte durch die asymmetrische Fügegeometrie beim Aufbau eines Demonstrators einen etwas höheren Verzug. Die Fügebereiche sind bei den Varianten V1 und V2 eben, während bei V6 leichte Unebenheiten auftreten.

#### Scherzugtragfähigkeit:

Die Scherzugtragfähigkeiten wurden bereits in Arbeitspaket 6 (**Kapitel 1.10**) diskutiert. Für MIG-Schweißverbindungen wird von einer hohen Scherzugtragfähigkeit ausgegangen.

#### Pressenkraft:

Die Pressenkräfte, die für das Fügen benötigt werden, wurden bereits in Arbeitspaket 2b (**Kapitel 1.6**) diskutiert. Die Schweißverfahren wurden mit 3 von 3 Punkten bewertet, da keine Pressen erforderlich sind.

#### Breite der Fügezone:

Hier wurde die zusätzlich notwendige Breite für die Fügestelle gegenüber eines einfachen 3 mm breiten Stegs bewertet, die sich auf die Temperaturverteilung bei einer in die Profile integrierten Kühlung der Batterie und auf das Gewicht der Batterieträger auswirkt. Für MIG ist kein zusätzliches Material notwendig, FSW benötigt ca. 7 mm zusätzliche Breite der Fügezone und die linienförmigen Fügeverfahren weisen mit 12,25 mm (V6), 15 mm (V2) und 23 mm (V1) zusätzlicher Breite die größten Fügezonen auf.

#### Nacharbeit:

Bei der Bewertung der Nacharbeit wurden mit geringer Gewichtung der erforderliche Prüfaufwand im Serienprozess sowie mit hoher Gewichtung die Nacharbeitsmöglichkeit berücksichtigt. Beim MIG-Schweißen ist eine automatisierte Nahtprüfung oder eine Sichtprüfung notwendig und in vorgegebenen Abständen müssen Schliffe angefertigt werden. Fehlstellen können hier meist nachgeschweißt werden. Beim FSW können die Fertigungsparameter überwacht werden, es können ergänzend Sichtprüfungen durchgeführt werden und es müssen ebenfalls regelmäßig Schliffe gemacht werden. Bei einem Prozessfehler gibt es hier keine Nacharbeitsmöglichkeit.

Für das linienförmige Fügen wird zum aktuellen Zeitpunkt von einem robusten Prozess ausgegangen, für den der Prüfaufwand geringer ist. Da eine Sichtprüfung nicht möglich ist, sollten ebenfalls regelmäßig Schliffe angefertigt werden, deren Anzahl aber wahrscheinlich gegenüber den Schweißverfahren reduziert werden kann.

#### Platzbedarf Anlagen:

Hier wurde der Platzbedarf der Anlagentechnik abgeschätzt. Insbesondere bei hohen Stückzahlen ist der Platzbedarf für das linienförmige Fügen geringer, da aufgrund der kurzen Taktzeit eine Presse ausreicht und der Aufwand für die Nachbearbeitung geringer ausfällt als bei den Schweißverfahren. Bei den Schweißverfahren sind bei höheren Stückzahlen mehrere Anlagen notwendig.

#### Fertigungskosten:

Die fügekonzeptspezifischen Fertigungskosten für die Stückzahlszenarien 50.000 p.a. und 200.000 p.a. wurden anhand einer Kostenkalkulation ermittelt, in der die nachfolgenden Produktionskosten berücksichtigt wurden:

- Abschreibung der Investitionskosten und Zinskosten
- Betriebskosten (Instandhaltung, Hilfs- und Betriebsstoffe)
- Kosten für geometriespezifisches zusätzliches Material
- Materialkosten für Schrott, der bei der Nacharbeit anfällt (Fräsen der Außenkontur)
- Geometriespezifische Mehrkosten beim Strangpressen

Für die Kalkulation wurde ein fiktiver Batteriekasten mit einer Größe von 1500 mm x 1000 mm angenommen, dessen Boden aus 5 Profilen besteht. Daraus ergeben sich 4 Pressenhübe, in denen das linienförmige Fügen durchgeführt wird, bzw. 4 Meter Schweißnaht. Es wurde von einem Abschreibungszeitraum von 6 Jahren sowie von einem 3-Schichtmodell mit 250 Arbeitstagen ausgegangen. Die Anlagenkosten für die Presse für das linienförmige Fügen wurden nur anteilig entsprechend der Auslastung angerechnet, da davon ausgegangen wird, dass die Presse auch für andere Projekte genutzt werden kann. Eine entsprechende Rüstzeit wurde berücksichtigt.

Da beide Schweißverfahren einen Kantenabstand benötigen, können die Profile nicht vollständig gefügt werden und die gefügte Bodenplatte muss nachträglich an den Stirnflächen um 10 mm gekürzt werden (z. B. durch Fräsen). Aufgrund der Projektergebnisse, wird davon ausgegangen, dass auch die linienförmigen Fügeverbindungen aufgrund von Randeffekten gekürzt werden müssen, jedoch nur um 3 mm. Zur Berechnung der Materialkosten wurde ein Materialpreis von 3.000 € angenommen. Dieser setzt sich aus dem Aluminiumpreis von ca. 2.300 €/t (Q1/2023) und einer Bolzenprämie von ca. 700 €/t zusammen.

Die Ergebnisse der Kostenkalkulation sind in **Tabelle 11** aufgeführt. Das MIG-Schweißen und das linienförmige Fügen in der Variante V1 weisen die höchsten Fertigungskosten auf. Beim linienförmigen Fügen in der Variante V1 ist hierfür besonders das zusätzliche Material im Fügebereich sowie Mehrkosten beim Strangpressen aufgrund der feinen Geometrie verantwortlich. Beim MIG-Schweißen entstehen dagegen hohe Kosten für Schweißdraht- und Schutzgas sowie durch den Materialverlust bei der Nachbearbeitung der Stirnflächen. In beiden Stückzahlszenarien weist das linienförmige Fügen in der Variante V2 die geringsten Fertigungskosten auf. Gegenüber V1 ist der Fügebereich kleiner und der zusätzliche Materialaufwand somit geringer. Außerdem fallen für die einfache Profilgeometrie keine signifikant höheren Kosten beim Strangpressen an. Bei einer Stückzahlszenario 50.000 p.a. ergeben sich für FSW ebenfalls niedrige Fertigungskosten. Im Stückzahlszenario 50.000 p.a. sind die hohen Fertigungskosten auf eine geringe Auslastung der Anlage zurückzuführen.

Stückzoblazonaria	Linienförmiges Fügen			MIC	ES/M
Stuckzaniszenano	V1	V2	V6	IVIIG	FOW
50.000 p.a.	10,05 €	6,99€	7,96€	10,00 €	9,05€
200.000 p.a.	8,67 €	5,62€	6,58 €	7,85€	6,09€

Tabelle 11: Fügekonzeptspezifische Fertigungskosten für 50.000 und 200.000 Batterieträger pro Jahr

#### 1.11.2. Anwendungspotenziale und weitere Optimierungsbedarfe

Zur Ermittlung der Anwendungspotenziale und des weiteren Optimierungs-/Forschungsbedarfs, wurde eine Umfrage im projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt. Nach deren Einschätzung eignet sich das linienförmige mechanische Fügen von Aluminiumprofil für das Verbinden von großflächigen Bauteilen mit flacher Grundfläche wie z. B.: Kühlkörper, Umrichtergehäuse, Wannen für Batteriegehäuse. Auch ein Einsatz im Containerbau (z. B. Luftfracht), im Schienenfahrzeugbau und für die Abdeckung von Drehgelenken in Bussen ist denkbar.

Nach Einschätzung des projektbegleitenden Ausschusses besteht für das linienförmige mechanische Fügen folgender weiterer Forschungsbedarf:

- Systematische Untersuchung der Ebenheit nach dem Fügen
- Simultanes Fügen mehrerer Profile und eine damit verbundene Untersuchung des Einflusses der Position in der Presse

Seite 33 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 21048 N

- Untersuchung der Eignung bestimmter Pressentypen
- Ermittlung der maximal, gleichzeitig fügbaren Länge
- Erprobung der mechanischen Festigkeiten gemäß Kundenvorgabe.

Darüber hinaus ist für die weitere Absicherung des Fügeverfahrens noch der Lastfall zu untersuchen, bei dem die Profile in Richtung der Fügelinie zueinander verschoben werden. Anschließend sollte ein Forschungsprojekt durchgeführt werden, in dem ein Batteriegehäuse entwickelt wird, das aus linienförmig gefügten Strangpressprofilen aufgebaut ist. Mit diesem Batteriegehäuse sollten dann typische Lastfälle entsprechend den Anforderungen der OEMs simulativ und experimentell geprüft werden. Hierbei sollte auch eine Gesamtfahrzeug-Crashsimulation durchgeführt werden.

# 1.12. Arbeitspaket 8: Dokumentation und Abschlussbericht (IUL/LWF)

Im Rahmen dieses Arbeitspakets ist der vorliegende Abschlussbericht erarbeitet worden.

Zusammenfassend können nachfolgende Konstruktionsempfehlungen zur Profil- und Fügestellengestaltung gegeben werden:

- Die Vorauslegung kann anhand von Simulationen, z. B. mit Simufact Forming, erfolgen.
- Fügebereich möglichst klein gestalten zur Reduzierung des Materialeinsatz (Kostenfaktor)
- Plastische Verformung des Fügebereichs ist anzustreben
- Gewährleistung der Dichtheitseigenschaften über hohe Flächenpressung
- Symmetrische Geometrie verbessert Tragfähigkeitseigenschaften und Ebenheit
- Komplexe Profilgeometrien sind mit höheren Strangpresskosten verbunden
- Profiltoleranzen müssen gegenüber der DIN 12020-2 weiter eingeschränkt werden (Toleranzanalyse erforderlich)
- Fügen sollte nach der Wärmebehandlung erfolgen
- Komplexe Fügewerkzeuggeometrien sind in der Regel nicht nötig

Der wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Nutzen der erzielten Ergebnisse wird in Abschnitt 4 dargelegt.

# 1.13. Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine dichte linienförmige Fügeverbindung entwickelt. Zu Projektbeginn wurden hierzu in Abstimmung mit dem PA die fertigungs- und betriebsbedingten Anforderungen an die Fügeverbindung festgelegt. Anhand einer Marktrecherche aktueller Bodenstrukturen von Batterieträgern wurden die Profildimensionen definiert. Anschließend wurden drei vielversprechende Profilgeometrie- und Fügekonzepte ausgearbeitet. Nachfolgend erfolgte die simulationsgestützte Optimierung der Konzeptvarianten. Hierzu wurde zunächst der Ausgangswerkstoff umfassend charakterisiert und eine geeignete Wärmebehandlungsstrategie erarbeitet. Mit dieser Warmauslagerung konnten die in der DIN EN 755-2 vorgegebenen mechanischen Eigenschaften erzielt werden. Anschließend erfolgte die Optimierung der Profilgeometriekonzepte in einem simulationsbasierten Entwicklungsprozess und die Strangpressprozesssimulation. Um die Fügbarkeit zu gewährleisten, wurde eine Toleranzanalyse durchgeführt. In Abstimmung mit dem PA mussten die Fertigungstoleranzen aus der DIN EN 12020-2 vereinzelt weiter eingeschränkt werden. Des Weiteren wurde untersucht, ob durch eine Festigkeitsgradierung über den Profilguerschnitt, hervorgerufen durch lokales Abschrecken nach dem Strangpressen, eine weitere Steigerung der Verbundeigenschaften erzielt werden kann. Die Festigkeitsgradierung führte zu einer Reduzierung der mechanischen Eigenschaften der Verbindung. Gleichzeitig wurden aber eine Vergrößerung der Hinterschnitte sowie längere Kontaktlinien in der Verbindung erzielt, die sich positiv auf die

Dichtheitseigenschaften auswirken können. Die simulationsgestützte Optimierung der ausgewählten Profilgeometriekonzepte wurde mit der Software Simufact Forming durchgeführt. Unter Ausnutzung der für Strangpressprofile typischen Symmetrieebene wurden 2D-planare Simulationsmodelle mit ebenem Dehnungszustand für den Prozess des linienförmigen Fügens sowie für die Scherzug- und 3-Punkt-Biegeprüfungen aufgebaut. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung der simulativ und experimentell ermittelten Fügekraft-Weg-Kurven. Gleiches konnte bei der Auswertung der maximalen Scherzugtragfähigkeiten beobachtet werden. Im weiteren Verlauf wichen die simulativen Ergebnisse von den experimentell ermittelten Verläufen ab. Die Ursache lag darin, dass es im Experiment zum Materialversagen kam, welches in der Simulation nicht abgebildet wurde. Aufgrund der hohen Übereinstimmung der maximalen Scherzugtragfähigkeiten aller Profilvarianten wurde die Simulation als ausreichend valide angenommen. Am IUL erfolgte die Auslegung des Strangpressprozesses sowie die Konstruktion und der Aufbau einer Vorrichtung zur Realisierung unterschiedlicher lokaler Abkühlraten über den Profilquerschnitt. Anschließend wurden die ausgearbeiteten Profilgeometrien hergestellt und wärmebehandelt. Die Profile wurden anschließend umfassend charakterisiert. Es wurden Geradheitsabweichungen, Eigenspannungen und die mechanischen Kennwerte ermittelt. Dabei konnten keine Abweichungen zu den verschiedenen Normen oder Anforderungen des PA's ermittelt werden.

Am LWF wurde das Anlagenkonzept aufgebaut und ein Werkzeugkonzept für den Technologietransfer in die industrielle Umsetzung konzipiert. Als Fügeanlage diente die Universalprüfmaschine Zwick Z100 mit integrierter Kraft- und Wegmessung. Mittels Scherzugund Biegeversuchen sowie Dauerfestigkeitsprüfungen erfolgte die Verbindungsanalyse der Profilvarianten. Dabei zeigte sich, dass ausschließlich die Variante V6 (Knickhebelprinzip) höhere Tragfähigkeiten als die rührreibgeschweißte Referenzprobe aufwies. Des Weiteren wurden Dichtheitsuntersuchungen an unbelasteten und mechanisch sowie thermisch vorbelasteten Proben durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass alle Profilvarianten keine Undichtheiten oberhalb der Grenzleckagerate von 1\*10<sup>-3</sup> mbarl/s aufwiesen.

Abschließend wurden die entwickelten linienförmigen mechanischen Fügeverbindungen in enger Abstimmung mit dem PA anhand verschiedener Bewertungskriterien mit den Schweißverfahren MIG und FSW bewertet. Dabei erzielte die Variante V6 die beste Gesamtwertung.

# Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

# 2. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
- 1. FE (IUL): 28,5 PM
- 2. FE (LWF): 28 PM
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): keine
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): keine

# 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit war zur Vorbereitung und Durchführung der in den einzelnen Arbeitspaketen aufgeführten Untersuchungen erforderlich. Die geleistete Arbeit entspricht mit geringen Abweichungen dem begutachteten und bewilligten Antrag und war für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde auf die Durchführung von Warmzugversuchen aus den genannten Gründen verzichtet. Demgegenüber wurde bei der Prozessauslegung zusätzlicher Aufwand für die Ermittlung der Wärmebehandlungsstrategie betrieben. Alle Versuche und Analysen erfolgten ergebnisorientiert in notwendigem Umfang durch das notwendige wissenschaftliche sowie technische Personal. Insgesamt waren die durchgeführten Arbeiten zur Erreichung der einzelnen Ziele innerhalb der Arbeitspakete wie auch zur Erreichung der übergeordneten Ziele des Forschungsprojektes erforderlich.

#### 4. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass mehrere Ansätze von neuen Profilverbundsystemen mit integrierten Funktionsabschnitten zum mechanischen Fügen zielführend sind, um eine wirtschaftliche Herstellung von Profilverbundsystemen mit erhöhten Dichtheitsanforderungen zu ermöglichen. Insbesondere die guten Dichtheitsergebnisse zeigen das Potential dieses Fügeverfahrens. Durch die ganzheitliche Betrachtung des Herstellungsprozesses konnte ein umfangreiches Verständnis zur Entwicklung von mediendichten Fügestellen für Strangpressprofile erarbeitet werden. Eine hohe Wirtschaftlichkeit ergibt sich insbesondere für hohe Stückzahlen. Da das Fügeverfahren auf üblichen Pressen bei geringen Werkzeugkosten umgesetzt werden kann, bieten sich für KMU Potentiale, die bereits über entsprechende Anlagen verfügen. Bei produktübergreifender Nutzung der Pressen, lassen sich auch mittlere Stückzahlen wirtschaftlich herstellen. Für die adressierten Unternehmen und insbesondere KMU aus den Bereichen Automobilbau, Pressen- und Fügesystemhersteller sowie Konstruktions- und Ingenieursbüros ergibt sich aus den Erkenntnissen eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. KMU mit entsprechender Anlagentechnik werden in die Lage versetzt, in die Fertigung von Batterieträgern einzusteigen, wofür bislang hochspezialisierte Anlagen mit hohem Anlageninvestment erforderlich waren.

Für die Unternehmen können sich durch Kenntnisse über linienförmige Fügeverbindung von Strangpressprofilen zudem neue Geschäftsfelder, z. B. in den Bereichen Behälter- und Schienenfahrzeugbau sowie Aufbauten von Kühlwägen, ergeben. Durch die Entwicklung der Profilverbundsysteme mit Auslegungshinweisen für den Einsatz von tragfähigen und dichten Verbindungen in Batteriekästen, kann eine effizientere Markteinführung erreicht werden, die zur Erfüllung gesetzlicher Auflagen, wie der Erreichung von Klimazielen beiträgt. Gleichzeitig können Sicherheitsanforderungen bei Crashbeanspruchung sichergestellt werden.

#### 5. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
"Kick-Off"- Veranstaltung	Festlegung zentraler Randbedingungen, Abstimmung des weiteren Vorgehens	Web-Konferenz	19.08.2020
Sitzungen des PA	Präsentation und Diskussion der Zwischenergebnisse, Abstimmung des Weiteren Vorgehens	Web-Konferenzen und Präsenzveranstaltungen am IUL und LWF	01.10.2020 03.03.2021 25.05.2021 03.02.2022 15.09.2022 23.01.2023

#### Durchgeführte Transfermaßnahmen

Projektvorstellung im Industriebeirat des IUL	Kurzvorstellung der Projektziele und -partner	Industriebeirat des IUL	28.10.2020
Veröffentlichung im Tätigkeitsbericht des IUL	Kurzvorstellung der Projektziele und -partner	Tätigkeitsbericht des IUL	2021 2022 2023
Einbringen der Ergebnisse in die Lehre	Präsentation des Projektes und der Zwischenergebnisse, Nachwuchsförderung	Universität Paderborn / Fügen von Leichtbauwerkstoffen	Sommer Semester 2021
Teilnahme an internationalen Konferenzen	Präsentation und Diskussion des Projektes und der Zwischenergebnisse	Sintra / Advanced Joining Processes 2021	22.10.2021
Projektvorstellung	Übersichtliche Darstellung von Zielen, Projektergebnissen und Publikationen	Messe BLECHexpo 2021 Stuttgart	2629.10.2021
Teilnahme an internationalen Konferenzen	Präsentation und Diskussion des Projektes und der Zwischenergebnisse	Enschede / Forming Technology Forum 2022	21./22.09.2022
Abschlussbericht	Präsentation des Projektes und der Ergebnisse	Unternehmen, beteiligte Institute, Geldgeber, andere Forschungs- gesellschaften und Fachverbände	nach der Projektlaufzeit
Veröffentlichung in Fachzeitschrift	Präsentation des Projektes und der Ergebnisse	Automotive Innovation Special Issue on Environmentally Benign Automotive Lightweighting	Eingereicht am 15.12.2022

# Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Fachkonferenzen	Projektvorstellung, Ergebnispräsentation und Wissenstransfer	Nationale und internationale Tagungen und Konferenzen (z. B. ET 2024 oder ICTP 2023)	Nach Projektende
DGM- Fachausschuss Strangpressen	Abschließende Präsentation des Projektes und der Ergebnisse	Unternehmen der Strangpressindustrie	Im Jahr nach Projektende
Projekt- und Ergebnisbericht	Präsentation des Projektes und der Ergebnisse	Internetseiten von IUL und LWF	bis 12 Monate nach Projektende
Ergebnispräsentation (print + online) Übersichtliche Darstellung von, Projektergebnissen und Publikationen		Internetseiten von IUL und LWF und im jährlichen Tätigkeitsbericht	Im Jahr nach Projektende