

Plattform FOREL

---

# Ressourceneffiziente Füge- und Entfüge- technologien

Online-Content zum interaktiven Whitepaper KORESIL

*Autoren: Meschut, G.<sup>1</sup>; Gilich, J.<sup>1</sup>; Chudalla, N.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, Universität Paderborn*



DOI: 10.25368/2024.53

Dieses Whitepaper ist ein Ergebnis des Verbundvorhabens KORESIL. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderkennzeichen 02P20Z000 – 02P20Z004) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

BETREUT VOM



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**  
Karlsruher Institut für Technologie

[www.plattform-FOREL.de](http://www.plattform-FOREL.de)

---

# Inhalt

---

Einleitung.....	1
Fügen von Sekundärwerkstoffen.....	5
Entfügbarkeit von Verbindungen.....	13
Ergonomische Produktions- und Fügeprozessplanung.....	22
Entwicklung von Mixed-Reality-Technologien.....	26
Executive Summary .....	30
Handlungsempfehlungen .....	31
Literatur .....	32

---

# Einleitung

---

In der heutigen Zeit steht die Gesellschaft vor globalen Herausforderungen, die einen dringenden Wandel zu nachhaltigeren Technologien erfordern. Die wachsende Weltbevölkerung, der Klimawandel, die schwindenden Ressourcen und die steigenden Umweltauswirkungen haben deutlich gemacht, welche Bedeutung der Nachhaltigkeit sowie der Reduzierung von Emissionen im Alltag zukommt.

---

Trans-  
formation der  
Mobilität

Ein Bereich, in dem die Transformation zu nachhaltigeren Technologien und einer ressourcenschonenden Gesellschaft sichtbar wird, ist die Energiewende. Die Umstellung von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energien wie Solar- und Windenergie, Wasserkraft oder Geothermie ist von zentraler Bedeutung, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß deutlich zu reduzieren und negativen Auswirkungen durch den Klimawandel vorzubeugen. So können einerseits eine Unabhängigkeit von endlichen Ressourcen und andererseits neue wirtschaftliche Chancen für die Gesellschaft geschaffen werden.

Die Elektromobilität gilt hierbei als integraler Bestandteil der Energiewende im Verkehrssektor, da Elektrofahrzeuge in Verbindung mit regenerativ erzeugter elektrischer Energie das Potential zu einer deutlichen Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen haben. Die Elektrifizierung des Antriebsstranges und somit die Transformation eines fossilbasierten Mobilitätskonzeptes hin zu einem regenerativen gilt daher als Innovationsträger, der sich global vollziehenden Mobilitätswende [1, 2]. Eine bezahlbare, nachhaltige und klimafreundliche Mobilität rückt gemäß den Experten der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) zunehmend in den Vordergrund. So zeigen aktuelle Studien einen prognostizierten Anstieg der weltweiten jährlichen Produktion batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) auf ca. 30,4 Mio. Einheiten bis 2030 [3].

Vor dem Hintergrund der Dekarbonisierung aktueller Mobilitätskonzepte, nehmen die Anforderungen an die Nachhaltigkeit und Energieeffizienz von Elektrofahrzeugen stetig zu. Dies stellt insbesondere Automobilhersteller vor die Herausforderung den Werkstoff- und Energieeinsatz und somit auch die ausgestoßenen Emissionen im gesamten Produktlebenszyklus zu reduzieren. Der Leichtbau nimmt daher einen hohen Stellenwert in der Transformation zur Elektromobilität und der Herstellung von batterieelektrischen Fahrzeugen ein [4]. Denn einerseits wird der Rohstoffbedarf in der Produktion durch den effizienten Einsatz der richtigen Werkstoffe an der richtigen Stelle reduziert. Andererseits sind die Nutzungs- und Betriebskosten und somit auch die ausgestoßenen Emissionen im Produktlebenszyklus erheblich von der Masse abhängig [5]. Dabei ist der Hauptanteil des Fahrzeuggewichtes auf die Karosserie sowie die massereichen Hochvoltbatterien, die in einem Batteriegehäuse in der Regel im Fahrzeugunterboden integriert sind, zurückzuführen.

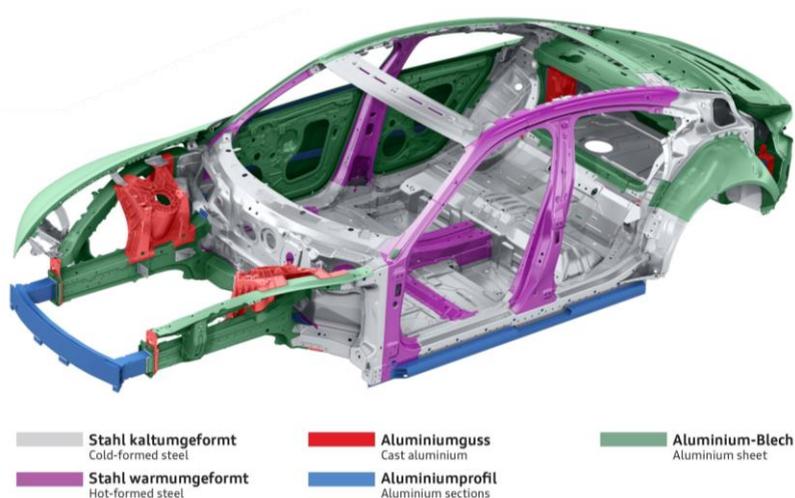


Abbildung 1: Werkstoffeinsatz in der Rohkarosserie des Audi e-tron GT (Typ FW) [6]

Neben einer direkten Reduktion der Bauteildicke durch gleichzeitige Erhöhung der Werkstoffgüte ist es vor allem die Mischbauweise, die ein hohes Leichtbaupotential bietet [7]. Der gezielte Einsatz unterschiedlicher Aluminium- oder Magnesiumwerkstoffe, Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sowie hoch- bzw. höchstfester Stahlegierungen ermöglicht es hierbei das Gewicht von Leichtbaustrukturen im Fahrzeug- und Schienenfahrzeugbau sowie in der Luft- und Raumfahrt erheblich zu reduzieren sowie die Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz deutlich zu verbessern (siehe Abbildung 1) [8].

Leichtbau-  
formen

Die Fügetechnik gilt dabei als Enabler moderner Hybridstrukturen und ermöglicht die anforderungsgerechte Verbindung artverschiedener Werkstoffe mit unterschiedlichen technisch-wirtschaftlichen Eigenschaftsprofilen. Hierbei werden in Abhängigkeit von den zu verbindenden Werkstoffen und der Anwendung mechanische, thermische oder klebtechnische Verfahren eingesetzt, um das optimale Verhältnis zwischen Gewicht, Tragfähigkeit und Kosten zu erreichen (siehe Abbildung 2).

Fügetechnik  
für den  
Leichtbau

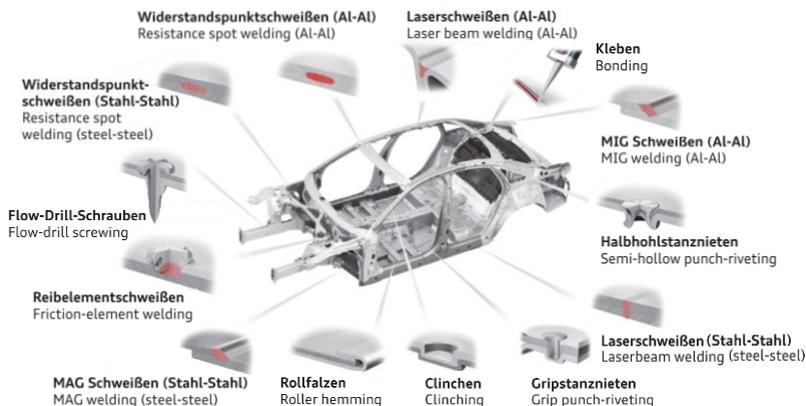


Abbildung 2: Fügeverfahren in der Rohkarosserie des Audi A8 (4N) [9]

Durch die zunehmende Produktvielfalt, die steigende Anzahl unterschiedlicher Werkstoffe und immer kürzere Modellzyklen stellt die Mischbauweise, neben den Vorteilen, gleichzeitig hohe Anforderungen an die Füge-  
technik [10]. So müssen fügetechnische Anlagen einen wirtschaftlichen, großserienfähigen und zunehmend wandelbaren Fügeprozess erlauben. Gleichzeitig müssen die Fügeverfahren eine dauerhafte und zuverlässige Verbindung artverschiedener Werkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften sowie den Ausgleich von Bauteil- und Prozesstoleranzen oder Wärmeausdehnungen ermöglichen. Weitere potentielle Herausforderungen, die in diesem Zusammenhang zu nennen sind, sind die

Herausforderungen in der Füge-technik

- eingeschränkte Zugänglichkeit der Fügestelle,
- reduzierte Umformbarkeit und Temperaturbeständigkeit,
- Dichtheitsanforderung an die Fügeverbindung,
- Inhibition von Korrosionsvorgängen
- sowie die elektrische oder thermische Konduktivität.

---

## Fügen von Sekundärwerkstoffen

---

Eine weitere, aktuell an Bedeutung gewinnende Herausforderung für die Füge-technik stellt die Materialvielfalt in Verbindung mit der zunehmenden Transformation von einer bisher linearen Wirtschaft hin zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft dar [11]. So werden Produkte am Ende des Lebenszyklus demontiert, sortiert und anschließend durch die Wiederaufbereitung erneut als Sekundärwerkstoff in den Produktionsprozess geführt. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist der Audi Q4 E-Tron (Typ F4), bei dem bereits 27 Fahrzeugkomponenten aus recycelten Kunststoffen und metallischen Werkstoffen hergestellt werden [12].

---

Herausforderungen

Die Sekundärrohstoffe können aus verschiedenen Quellen gewonnen werden. Je nach Stoffstrom und Werkstoff variieren die Aufbereitungsschritte und können zum einen durch unzureichende Sortierung, Stoffstromtrennung und Reinigung zu einer Kontamination des Sekundärwerkstoffes führen [13]. Zum anderen treten durch die Wiederaufbereitung, insbesondere bei Kunststoffen, Degradationseffekte auf, welche die rheologischen und mechanischen Eigenschaften erheblich beeinflussen und so die Verarbeit- und Belastbarkeit in einem zweiten Produktleben verändern können [14].

Fügeverfahren müssen auf diese veränderten Werkstoffeigenschaften angepasst werden. So kann der Fügeprozess mithilfe mechanischer Hilfselemente, wie fließlochformender Schrauben (FLS) oder Halbhohlstanzierte durch Gefügeänderungen, Partikeleinschlüsse oder verringerte Warmformstabilitäten negativ beeinflusst werden. Einerseits führt der Einsatz von Sekundärwerkstoffen zu einem spröderen Werkstoffverhalten, was die Umformung in fließenden Fügeprozessen behindert. Andererseits kann eine, durch Fremdpartikel verursachte, verringerte Warmformbeständigkeit zu einer beeinträchtigten Verklammerung der Fügeelemente mit dem Werkstoff führen.

Die veränderten Eigenschaften können weiterhin eine verschlechterte Schweißbarkeit der Sekundärwerkstoffe, ein verkleinertes Prozessfenster und somit einen erhöhten Ausschuss beim Einsatz eines thermischen Fügeverfahrens, wie dem Widerstands-Punktschweißen oder dem Laserstrahlschweißen bedingen. In Kombination mit der erhöhten Kontamination durch andere metallische Werkstoffe werden ebenfalls das Risiko von Defekten in der Schweißverbindung sowie das Auftreten von Liquid Metall Embrittlement (LME) erhöht.

In klebtechnischen Anwendungen kann eine schlechter benetzbare und alterungssensitivere Oberfläche durch die mögliche Kontamination des Werkstoffes insbesondere in und unter der Grenzfläche entstehen. Diese kann bei Klebverbindungen zu einer verringerten Tragfähigkeit oder einer reduzierten Bauteillebensdauer führen [15]. In diesen Anwendungen sind insbesondere langzeitstabile Vorbehandlungs- und robuste Klebprozesse von essentieller Bedeutung, um eine hohe Verbindungsqualität gewährleisten zu können. Ebenfalls sind die Prognosefähigkeit, die Verbesserung der Langzeiteigenschaften sowie die Erweiterung der Prozessfenster, wichtige Herausforderungen zum Fügen von Sekundärwerkstoffen in der Kreislaufwirtschaft.

Durch erfolgreich abgeschlossene Forschungsvorhaben konnten bereits wichtige Erkenntnisse über die Materialeigenschaften in der Kreislaufwirtschaft gewonnen werden. So wurde der Einfluss von Rezyklatanteilen und Wiederaufbereitungszyklen auf die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen in [16] am Beispiel eines Polypropylens und in [17] an faserverstärktem Polyamid untersucht. Hier zeigt sich eine Abnahme der Zugfestigkeit bei gleichzeitig ansteigender Steifigkeit des Materials mit einer zunehmenden Anzahl an Wiederaufbereitungen. Diese Charakterisierung von Sekundärwerkstoffen wurde analog für metallische Werkstoffe durchgeführt. So wurden unterschiedliche Aluminiumlegierungen wie EN-AW-2007 [18], EN-AW-6060 [19], EN-AW-6082 sowie EN-AW-7075 [20] im Strangpress- und Sinterprozess untersucht. Hierbei wurde eine Verringerung der Werkstoffdichte in Verbindung mit einer Festigkeitszunahme durch die erhöhte Oxidationsneigung der vergrößerten Oberfläche im Vergleich zu Primärmaterial festgestellt.

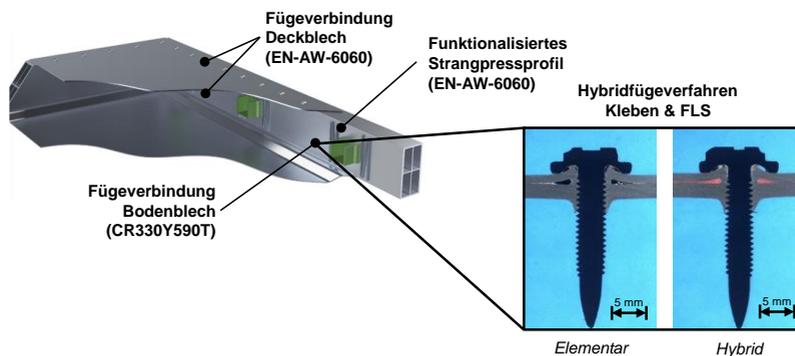
Die Evolution geeigneter Ansätze zur Vorbereitung von Sekundärwerkstoffen sowie die Entwicklung innovativer Fügeverfahren mit verbesserter Prozessrobustheit und Prognosefähigkeit bilden derzeit einen Forschungsschwerpunkt im Mobilitätssektor. Allgemein kann die Adhäsionsfähigkeit von Werkstoffen mithilfe geeigneter Vorbehandlungsverfahren gezielt gesteigert werden, um eine verbesserte Tragfähigkeit von Klebverbindungen zu erzielen. Industriell eingesetzte Prozesse zur Behandlung von Kunststoffen sind physikalische oder chemische Behandlungsverfahren, wie das Beflammen der Bauteiloberfläche, der Auftrag von Primer-Systemen zur Funktionalisierung der Oberfläche sowie die Oberflächenaktivierung mithilfe einer Atmosphären- oder Niederdruck-Plasmabehandlung [21]. Diese können neben der häufig verwendeten Laservorbereitung oder der Passivierung teilweise ebenfalls bei metallischen Werkstoffen eingesetzt werden.

Der erhöhte Kontaminationsgrad und Einschlüsse von Fremdpartikeln innerhalb der Werkstoff- und Grenzschichten der Sekundärwerkstoffe sowie die oft inhärente Abnahme der mechanischen Eigenschaften wirken sich jedoch auch auf die Vorbehandlungsprozesse und die Fügeignung aus [15]. Weitere Einflussfaktoren auf den Oberflächenvorbereitungs- und Fügeprozess bilden das Gefüge, die eingesetzten Additive, das Wiederaufbereitungsszenario sowie die Degradation in der vergangenen Nutzungsphase der Komponenten [22].

Einen Ansatz zur Steigerung der Fügbarkeit von Sekundärwerkstoffen stellt die wandlungsfähige Prozesskette dar. Hier werden Materialeigenschaften in der Prozesskette erfasst und die nachfolgenden Prozessschritte flexibel an entsprechende Abweichungen angepasst. So kann beispielsweise durch adaptive Fügeelemente oder Werkzeugmatrizen ein vergrößertes Prozessfenster erreicht und ein zuverlässiger Fügeprozess auch bei schwankenden Werkstoffeigenschaften sichergestellt werden [23]. Diese führen in Verbindung mit einer simulativen Abbildung der Prozesskette, wie nach BIELAK ET AL., zu einer Steigerung der Prognosesicherheit sowie einer Adaption der Prozesskette an innovative Werkstoffe in der Kreislaufwirtschaft [24].

Innerhalb des Verbundforschungsvorhabens „Konzepte für die ressourceneffiziente und sichere Produktion von Leichtbaustrukturen“ (KORESIL) konnte ein wichtiger Beitrag zur Qualifizierung geeigneter Fügeverfahren für die Verarbeitung von Sekundärwerkstoffen geleistet werden. Fokussiert wurde ein Hybridfügeprozess aus fließlochformendem Schrauben (FLS) und strukturellem Kleben am Beispiel eines Strangpressbauteils aus Aluminiumrezyklat in einer typischen Anwendung der Elektromobilität. Dieser ist in Abbildung 3 dargestellt und wurde mithilfe einer Analyse industriell eingesetzter Bauweisen und Werkstoffe mit besonderem Fokus auf Batteriekastensysteme, an einem profilbasierten Leichtbau-Hybriddemonstrator umgesetzt und untersucht. Zur Ableitung eines Anforderungsprofils aus Sicht der definierten Fügeverfahren wurden sowohl Batteriemodule von Automobilherstellern und -zulieferunternehmen, wie Audi, Tesla oder Kirchhoff Automotive als auch von Forschungseinrichtungen berücksichtigt.

Beitrag  
KORESIL

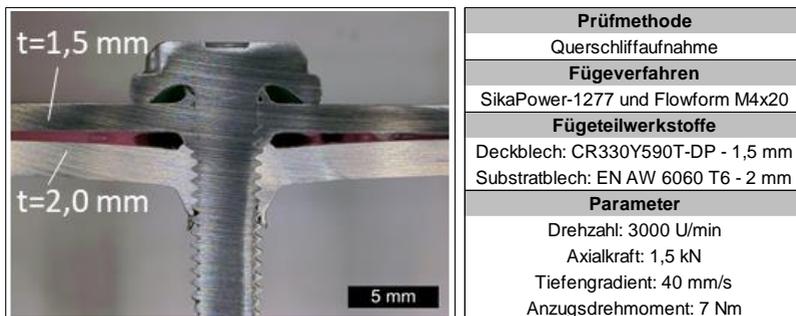


*Abbildung 3: Fügepunkte und Werkstoff- sowie Verbindungsausprägungen im untersuchten profilbasierten Leichtbau-Hybriddemonstrator*

Zur initialen Prozessauslegung wurden elementare und hybride Setzversuche an gewalzten Referenzwerkstoffen durchgeführt. Diese dienten der Verifikation von geeigneten Parametern für den Fügeprozess. In Abbildung 4 ist eine ausgebildete Hybrid-Fügeverbindung unter Berücksichtigung der festgelegten Fügeparameter dargestellt. Durch Setzversuche von primären sowie rezyklatbasierten strang-

Gültigkeit von  
Prozess-  
parametern

gepressten Werkstoffen längs sowie quer zur Fließrichtung wurde die Übertragbarkeit der identifizierten Parameterräume auf Strangpressprofile und Sekundärwerkstoffe nachgewiesen. Hierbei zeigten die Fügeversuche an den Sekundärwerkstoffen keine Erfordernis einer erneuten Prozessparametrierung, sodass für das ausgewählte Hybridfügeverfahren eine hohe Prozessrobustheit auch unter Verwendung rezyklatbasierter Aluminium-Strangpressprofile abgeleitet werden kann.



*Abbildung 4: Ausgeformter Durchzug einer hybriden FLS-Verbindung mit den definierten Prozessparametern im Querschliff*

Die Änderungen des Tragverhaltens der Verbindungen aus Aluminiumrezyklat wurden im Vergleich zu den branchenüblich eingesetzten Werkstoffen aus konventionellen Walz- und Strangpressprozessen ermittelt. Hierzu dienen Zugprüfungen in Anlehnung an DIN EN 6892-1 zur Charakterisierung der Werkstoffe sowie Kopfzug- (DIN EN 15870) und Scherzugprüfungen (DIN EN 14869-2) zur Identifizierung der Klebstoffeigenschaften. Die Tragfähigkeiten und das Bruchverhalten der elementaren und hybriden Verbindungen konnten durch Scherzugprüfungen nach DVS/EFB 3480-1 ermittelt werden.

Einfluss auf das Tragverhalten

Durch die Untersuchungen konnte der Einfluss einer direkten Verwendung von Aluminium-Rezyklaten in den Verarbeitungsprozessen auf die Verbindungseigenschaften identifiziert werden. Hierbei zeigt sich bei Betrachtung der Strangpresswerkstoffe in den Kraft-Weg-Verläufen aus Abbildung 5 sowohl eine Abnahme der maximalen Scherzugfestigkeit zum Versagenszeitpunkt der Klebschicht als auch ein früheres

Ausknöpfen des FLS-Elementes am Prüfungsende. Kombiniert wird somit eine reduzierte Tragfähigkeit und eine geringere Energieaufnahme im Belastungsfall erreicht.

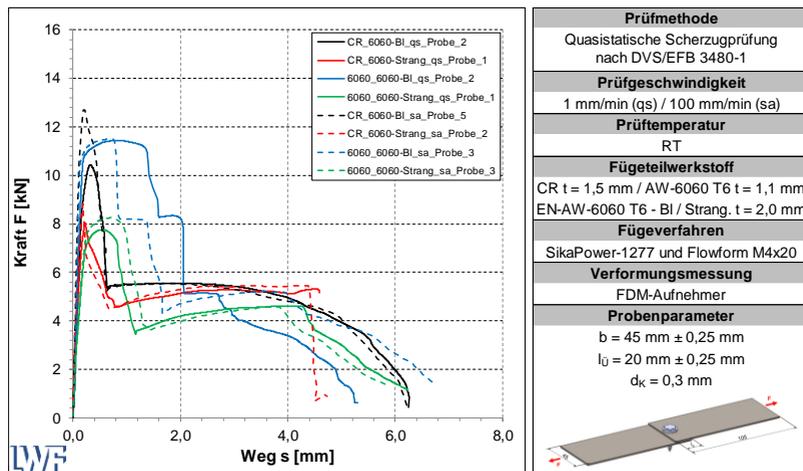


Abbildung 5: Ermittelte Kraft-Weg-Verläufe der Hybridverbindungen unter Scherzugbelastung für unterschiedliche Werkstoffkombinationen und Belastungsgeschwindigkeiten

Durch die Berücksichtigung quasistatischer sowie schlagartiger Prüfungen konnte weiterhin der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit differenziert betrachtet werden. Diese zeigt im Vergleich zur Werkstoffwahl einen geringen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Verbindungen. Die bereits beschriebenen Festigkeits- und Oberflächen-eigenschaften der rezyklatbasierten Aluminium-Strangpressprofile [25] zeigen in den Untersuchungen somit einen Einfluss auf die resultierenden Verbindungseigenschaften.

Innerhalb der Versuchsreihen wurden neben dem Tragfähigkeitsverhalten die erzielbaren Dichtigkeitseigenschaften der erzeugten Hybridfügeverbindungen ermittelt. Diese bilden insbesondere in der Herstellung von batterieelektrischen Speichern eine wichtige Anforderung zum medialen Schutz der Batteriezellen und sind in

Einfluss auf die Dichtigkeit der Verbindung

Abbildung 6 unter Vorgabe einer branchenüblichen Grenzleckagerate für eine dampfdichte Verbindung dargestellt.

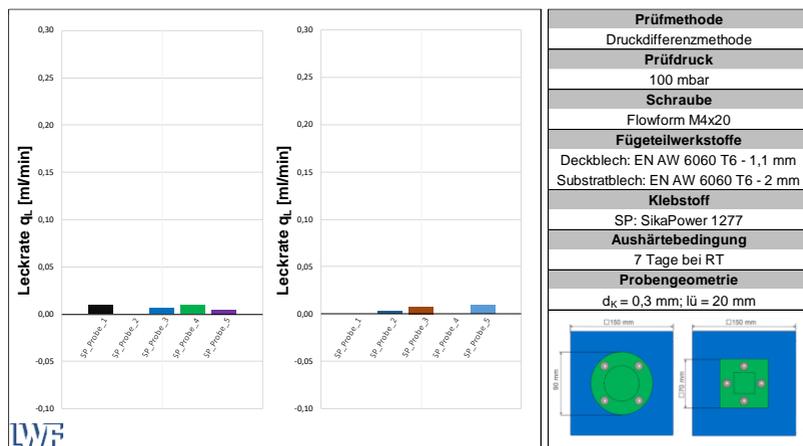


Abbildung 6: Leck- und Grenzleckagerate einer artgleichen hybridgefügten Aluminium EN AW 6060-Verbindung

So konnte ein zuverlässiger FLS-Prozess erzielt sowie ein zugehöriges Prozessfenster zur Verarbeitung des Sekundärwerkstoffes identifiziert werden. Für den klebtechnischen Fügeprozess konnte mithilfe des Laserreinigungsprozesses ein stabiles Vorbehandlungsverfahren zur Vorbereitung der Bauteiloberfläche qualifiziert und die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung charakterisiert werden. Durch das Hybridfügeverfahren konnten ausreichend dichte Verbindungen auch unter Verwendung der rezyklatbasierten Strangpressprofile erzielt und die Anforderungen an ein Batteriegehäuse erfüllt werden.

Aktuell werden Sekundärwerkstoffe hauptsächlich in Anwendungen mit geringen Anforderungen eingesetzt. Um Rezyklate ebenfalls für hochbeanspruchte Strukturbauteile im „Body-in-White“ oder in Batteriegehäusen in der Fahrzeugindustrie einsetzen zu können, bedarf es zunächst umfassender Materialmodelle und Prognoseansätze, die eine effiziente Prozessauslegung sowie den anforderungsgerechten Einsatz der Werkstoffe im Produkt sicherstellen können. Insbesondere der Informationsmangel zu bestehenden Einflussfaktoren und deren

Forschungsbedarf

Auswirkungen auf wichtige rheologische, morphologische und mechanische Eigenschaften hemmt Unternehmen derzeit den Anteil der Sekundärwerkstoffe in ihren Produkten zu erhöhen [26]. Dies gilt ebenfalls für geeignete Vorbehandlungs- und Klebprozesse sowie angepasste mechanische und thermische Fügeverfahren zur anforderungsgerechten Verbindung von Komponenten. So sollten insbesondere die Eigenschaftserfassung und die Wandlungsfähigkeit in Prozessketten automatisiert und optimiert werden, um die industrielle Fertigung auf eine Transformation zur Kreislaufwirtschaft vorzubereiten. Hierbei unterstützt auch die Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien zur Verarbeitung, Verbindungsauslegung sowie zum Fügen von Sekundärwerkstoffen dabei, die Akzeptanz von Unternehmen und Konsumenten zu steigern [27].

---

## Entfügbarkeit von Verbindungen

---

Eine weitere Herausforderung für die Füge-technik stellt die Trennbarkeit der Komponenten im Reparatur- oder Recyclingfall dar. So wird bereits in der Richtlinie 2000/53/EG durch die europäische Union eine Altfahrzeug-Verwertungsquote von mindestens 95 % gefordert [28]. Weiterhin wurden im Rahmen der End of Life (EoL)-Richtlinie klare Vorgaben für den Einsatz von Rezyklaten im Automobilsektor definiert. So müssen zukünftig mindestens 25 % der Kunststoffe in Fahrzeugen aus Post-Consumer-Rezyklat bestehen und wiederum 25 % dieses Anteils aus Altfahrzeugen stammen [29]. Eine Weiter- bzw. Wiederverwendung der eingesetzten Werkstoffe ist aufgrund der zunehmenden Materialvielfalt und Anzahl unterschiedlicher Füge-technologien im Fahrzeug derzeit in vielen Fällen jedoch nicht gegeben [30].

---

Heraus-  
forderungen

In diesem Zusammenhang gewinnt die Entwicklung effizienter und werkstoffgerechter Entfügetechnologien zunehmend an Bedeutung [31]. So kann durch die Berücksichtigung eines Entfügeprozesses bereits in der Produktentwicklungsphase einerseits die Verwertungsquote von Sekundärwerkstoffen gesteigert und so mittelbar die Werkstoffreinheit und -qualität erhöht werden. Andererseits wird die Nutzungsdauer von Produkten durch Reparaturleitfäden und vordefinierte Trennverfahren gezielt verlängert. Hierbei ist zwischen einem für die Wiederverwendung vorgesehenen Reparaturfall von Strukturen und einem zur Rückführung der Werkstoffe eingesetztem Recyclingfall zu unterscheiden.

In der Fahrzeuginstandsetzung führen steigende Anforderungen an Sicherheit und Komfort zu der Forderung nach praktikablen Reparaturkonzepten mit mechanischen Eigenschaften, die den ursprünglichen Anforderungen entsprechen. Grundlage einer fachgerechten Instandsetzung bildet der vorgelagerte Prozessschritt des werkstoffschonenden und an das jeweilige Fügeverfahren angepassten Entfügens bestehender Verbindungen. So besteht in der Karosserieinstandsetzung die Notwendigkeit, beschädigte Bauteile gezielt aus dem Verbund zu

trennen, ohne angrenzende Strukturen zu schädigen. Insbesondere bei geklebten Verbindungen ist die Wiederklebbbarkeit auf der instandgesetzten Oberfläche ein relevanter Aspekt. Ansätze wie das Design-for-Debonding oder das Debonding-on-Demand beschreiben dabei die frühzeitige Auslegung von gefügten Verbindungen auf die bedarfsgerechte Trennbarkeit ohne negative Beeinflussung der Verbindungseigenschaften in der Nutzungsphase.

In der Werkstoffaufbereitung und Rückführung hingegen werden insbesondere die Zerteilung und der Werkstoffaufschluss fokussiert. Hier gelten geringere Anforderungen an die Wiederverwendung von Bauteilen. Anstelle dessen gewinnen die Identifizierung, Sortierung und Zuordnung der aufgeschlossenen Werkstoffe zu einem geeigneten Stoffstrom an Bedeutung. Ein wichtiger Aspekt sind Fügehilfselemente, wie Schrauben, Bolzen oder der zur Verbindung eingesetzte Klebstoff. Um Kontaminationen des Sekundärwerkstoffes zu vermeiden und eine eindeutige Zuordnung der Werkstoffe zu ermöglichen, müssen diese möglichst umfangreich entfernt werden bevor das Material aufbereitet wird. Daher etablieren sich in Abhängigkeit von der Zielsetzung unterschiedliche Verfahren zur gezielten Trennung und Rückführung von Bauteilen in den Stoffkreislauf.

Elementare mechanische und thermische Verbindungen können oft durch Ausdrücken der mechanischen Verbindungselemente oder durch Aufbohren und -fräsen der Schweißpunkte getrennt werden. Ebenfalls ermöglichen einige mechanische Fügeverfahren, wie das fließlochformende Schrauben (FLS) das manuelle Lösen der Verbindungselemente im Bedarfsfall. Hierbei erfolgt der Fügevorgang in einem kombinierten Umform- und Einschraubprozess sodass Prozessschritte wie Vorlochen und Gewindeformen entfallen können. Die Demontage erfolgt in Umkehr durch das Herausschrauben der loch- und gewindeformenden Schraube. Bei anderen mechanischen Fügeverfahren, wie dem Bolzensetzen, bei dem ein profilierter, nagelförmiger Bolzen durch die Fügepartner getrieben wird, bildet sich eine form- und kraftschlüssige Verbindung aus. Hierdurch entsteht ein erhöhter Entfugeaufwand im Vergleich zum fließlochformenden Schrauben. In

---

Innovationen

Forschungsarbeiten wie [32] oder [33] wurden ebenfalls Trennverfahren für die Reparatur von hybridgefügt Strukturen untersucht.

Das Lösen von mittels (semi-)strukturellem Klebstoff elementar oder hybridgefügt Strukturen stellt hingegen eine große Herausforderung im Entfügeprozess dar. So bieten klebtechnische Fügeverfahren unter anderem die Vorteile artfremde Werkstoffe stoffschlüssig zu fügen und eine hohe Werkstoffausnutzung bei gleichmäßiger Spannungsverteilung zu gewährleisten [34]. Im automobilen Leichtbau werden strukturelle Klebstoffe seit Jahrzehnten eingesetzt und weiterentwickelt. Mittlerweile summiert sich die Menge an Klebstoffen in einem Fahrzeug auf etwa 15 bis 20 kg [35]. In Kombination mit punktuellen thermischen oder mechanischen Fügeverfahren entstehen zwischen den Bauteilen der Fahrzeugkarosserie sogenannte Hybridverbindungen. Was für den Betrieb und den Crash vorteilhaft ist, zeigt sich in der Karosserieinstandsetzung als großes Problem. So stellen (semi-)strukturelle Klebverbindungen, als nicht-lösbare Verbindungen, immer wieder Herausforderungen hinsichtlich ihrer Trennbarkeit dar.

In der Vergangenheit wurden Klebverbindungen mithilfe von mechanischen Verfahren durch schneidende oder schälende Zerstörung des Klebstoffes, anschließende Entfernung der Klebstoffreste durch Schleifen oder Bürsten und die Verwendung von Reparaturklebstoffen instandgesetzt [36]. Um heutigen Klebstoffen mit zunehmender Festigkeit zu begegnen, müssen hingegen neue Ansätze zur Schwächung der Klebschicht und zum anschließenden Entfügen entwickelt werden. Diese können nach DIN/TS 54405 den folgenden Wirkkategorien zugeordnet werden.

-  Mechanisch
-  Physikalisch
-  Chemisch

Bei strukturellen Klebstoffen können physikalische oder chemische Verfahren eingesetzt werden, um die Klebverbindung gezielt zu schwächen. Hier sind insbesondere die folgenden Wirkmechanismen zu unterscheiden.

- 🌐 Temperaturerhöhung und Erweichung
- 🌐 Temperatursenkung und Versprödung
- 🌐 Integration von Bläh- und Treibmitteln
- 🌐 Chemische Zersetzung des Klebstoffes

Um das Trennen zu erleichtern, kann die Klebschicht erwärmt werden [35]. So ist nach LU et. al. eine Erwärmung des Klebstoffes bis zum Erreichen der Glasübergangstemperatur möglich. Dies führt zu einer temporären Erweichung und der damit verbundenen Reduktion der Klebstofffestigkeit [31]. Das Verfahren kann in aktuellen Fahrzeugstrukturen eingesetzt werden, wird allerdings durch die zunehmend komplexen und mehrlagigen Verbindungen erschwert. Zusätzlich ist die Kontrolle der eingebrachten Wärmeenergie aufgrund der kaum umsetzbaren Temperaturmessung in der Klebschicht nur aufwendig zu realisieren. So besteht die Gefahr, umliegende Bauteile und Klebschichten durch eine zu hohe zugeführte Wärmeenergie dauerhaft zu schädigen und die mechanischen Eigenschaften im Betrieb zu beeinflussen.

---

Temperatur-  
erhöhung

Weiter wurden in direkter Ableitung aus der Temperaturerhöhung ebenfalls Verfahren untersucht, die eine gezielte Abkühlung der Klebschicht vorsehen und somit zu deren Versprödung führen sollen. So wurden in [46] geeignete Verfahren zur Instandsetzung von Hybridstrukturen im Automobilbau untersucht. Angelehnt an die etablierten Verfahren der Wärmeeinbringung wurde die gezielte Kühlung der Klebschicht mithilfe flüssigen Stickstoffs und die anschließende mechanische Trennung verfolgt. Durch das Verfahren konnte ein im Vergleich zur Temperaturerhöhung verringerter Kraftaufwand zum Entfügen der Verbindung nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurde die Bauteilverformung minimiert und die Rissfortschrittskraft verringert, was zu einer deutlichen Minderung der erforderlichen Entfügeenergie führte. Aufbauend auf den Ergebnissen konnte DITTER die Wiederklebbarkeit ohne eine Nachbearbeitung der Oberfläche nachweisen [47].

---

Temperatur-  
senkung

Eine Möglichkeit zum Lösen von Klebverbindung mittels eingebrachter Additive ist das Auslösen einer physikalischen Reaktion. Dabei handelt es sich in der Regel um Mikrokapseln, die ein Kohlenwasserstoff-Treibmittel mit einem niedrigen Siedepunkt enthalten. Beim Erwärmen können sich diese Füllstoffe, auch „Thermally Expanding Particles“ (TEP) genannt, auf das 50- bis 100-fache ihres ursprünglichen Volumens ausdehnen und die Klebschicht schädigen [40]. Sowohl chemisch als auch physikalisch funktionelle Zusatzstoffe wurden von mehreren Unternehmen patentiert und sind derzeit im Handel erhältlich [41, 42]. Im Rahmen des X-Bond-Projektes wurden verschiedene Arten solcher Additive in Strukturklebstoffen untersucht und die entsprechenden Reaktionen durch die Erregung mittels Konvektion, Induktion oder Mikrowellenerwärmung ausgelöst. So konnte eine starke Verringerung der Verbindungsfestigkeit nach der Aktivierung festgestellt werden, ohne die Ausgangseigenschaften des Klebstoffs wesentlich zu beeinflussen [43]. McCURDY ET AL. wiesen hierbei eine Funktion bei Epoxidharzklebstoffen, hingegen keine Wirkung bei Polyurethan-klebstoffen nach. Ein weiteres Ergebnis war, dass der Zusatz von geringen Mengen von Additiven bereits zu einer Reduzierung der Bruch-zähigkeit der Klebverbindungen führte [44]. Eine weitere Art von Füllstoffen, die für "Debonding on demand" verwendet werden, sind magnetische Nanopartikel, die entweder direkt im Klebstoff oder in einem Primer enthalten sind [45]. Wenn diese Partikel einem elektro-magnetischen Feld ausgesetzt werden, erzeugen sie eine lokale Erwärmung, die entweder zur Unterstützung der Aushärtung des Klebstoffs oder seiner Ablösung genutzt werden kann. Aufgrund vorliegender Bedenken hinsichtlich der Verbindungseigenschaften im Betrieb und einer möglichen unbeabsichtigten Schwächung werden diese Verfahren im Automobilbau hingegen derzeit nicht eingesetzt.

---

Integration  
von Bläh- und  
Treibmitteln

Eine weitere Methode zur effizienten Trennung von Klebverbindungen ist die gezielte Anpassung der Klebstoffformulierung. So wurden Forschungsarbeiten zur Entwicklung sogenannter „reversibler Klebstoffe“ durchgeführt. Diese enthalten sowohl kovalente als auch nicht kovalente chemische Bindungen, die bei einem äußeren Impuls in Form von beispielsweise Wärme oder UV-Strahlung zerfallen und sich

---

Chemische  
Zersetzung  
des  
Klebstoffes

bei Impulsende erneut verbinden. Eine häufig untersuchte Lösung ist die Verwendung von Diels-Alder Addukten. Oberhalb einer bestimmten Temperatur öffnen sich die Addukte und der Elastizitätsmodul des Klebstoffs fällt stark ab. Hierdurch wird ein kräftearmes Lösen ermöglicht [37]. Eine weitere Vorgehensweise ist die Entwicklung supramolekularer Klebstoffe [38]. Diese zeichnen sich durch nicht kovalente Bindungen, wie beispielsweise Wasserstoffbindungen aus, die bei erhöhten Temperaturen abgebaut werden können. Unter dem Namen „Elect Release“ wurde zuletzt ein Ansatz verfolgt, bei dem die adhäsiven Bindungen zwischen Klebstoff und Substrat mithilfe einer niedrigen elektrischen Spannung gezielt geschwächt werden [39].

Innerhalb des Verbundforschungsvorhabens KORESIL wurden geeignete Entfügestrategien und -prozesse abgeleitet und an einem Demonstratorsystem untersucht. Einerseits sollte hierdurch eine ausreichende Demontagefähigkeit der innenliegenden Batteriezellen im Reparaturfall gewährleistet werden. Andererseits wurde der effiziente Aufschluss hochwertiger Werkstoffe im End-of-Life-Zustand fokussiert.

---

Beitrag  
KORESIL

Bei dem für die Demonstratorstruktur definierten Hybridfügeverfahren aus Kleben und Fließlochformendem Schrauben (FLS) kann das gefügte FLS-Element zunächst mechanisch entgegen der Eindrehrichtung gelöst werden. Die Fügehilfselemente des FLS-Prozesses können dem Stoffstrom anschließend sortenrein zugeführt werden.

Durch die hybride Einbringung von strukturellen Klebstoffen, die in Batteriekästen primär eine Struktursteifigkeit herstellen und die Zellen sekundär gegen medialen Eintritt abdichten sollen, ist ein effizientes Entfügen der Klebschicht bei Raumtemperatur ohne die Beschädigung der Bauteile hingegen nahezu ausgeschlossen. Ein effizienter Entfügeprozess kann durch Anwendung der bereits aufgezählten Ansätze zur gezielten Schwächung der Klebschicht ermöglicht werden. In dem betrachteten Anwendungsfall eines batterieelektrischen Speichers sind dabei unterschiedliche Anforderungen zu beachten. So muss das Verfahren einerseits auf bereits im Umlauf befindliche Strukturen und andererseits auf neue Produkte angewendet werden können. Sowohl

die Anpassung der chemischen Formulierung als auch eine Integration von funktionellen Additiven ist somit nicht immer möglich.

Um eine thermische Schädigung umliegender Bauteile, wie den Batteriezellen oder strukturellen Komponenten zu vermeiden, wurde daher der Ansatz nach DITTER ET AL. verfolgt und die Klebschicht auf Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur der zähelastifizierenden Partikel im Klebstoff abgekühlt. Dies ermöglichte eine kraftarme Spaltung der Klebverbindung sowie eine bauteilschonende Trennung. Hierzu wurden zunächst die Prozessparameter zur Entziehung der thermischen Energie bis in einen glasartig spröden Zustand des Klebstoffes identifiziert und die Scherzugfestigkeiten des verwendeten 2K-Epoxidharzklebstoffes in unterschiedlichen Temperaturbereichen untersucht (siehe Abbildung 7).

Ansatz zum Entfügen struktureller Klebverbindungen

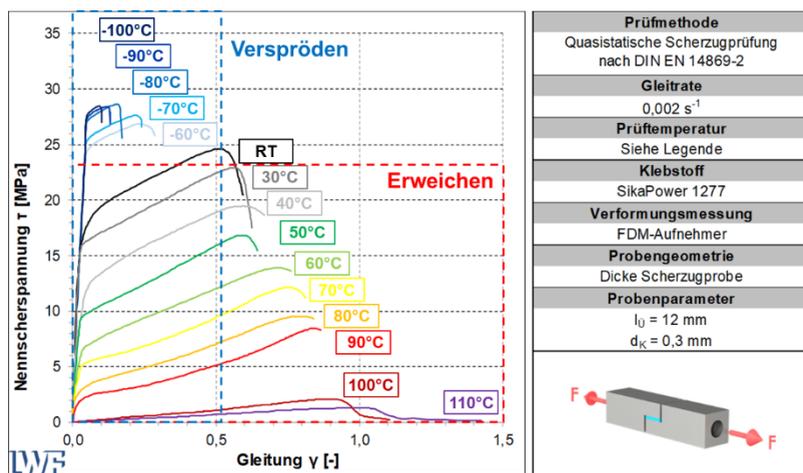


Abbildung 7: Schubspannung-Gleitungsverhalten des 2K-EP SikaPower 1277 bei unterschiedlichen Prüftemperaturen [46]

Weiterhin wurden die Entfügeeigenschaften des Klebstoffsystems durch elektrodynamische Prüfung sowie die Ermüdungsfestigkeiten der Verbindung unter typischen Belastungsszenarien charakterisiert. Die anhaftenden Klebstoffreste konnten in den folgenden Schritten des Stoffkreislaufes im Verpress- und Normalglühprozess, der dem Strang-

pressprozess vorgelagert ist, vollständig entfernt werden. Somit entfielen zusätzliche Prozessschritte zur Aufbereitung der aufgeschlossenen Werkstoffe.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte so anhand des definierten Demonstratorsystems gezeigt werden, dass das Entfügen von Bauteilen durch eine gezielte Klebstoffversprödung sowohl bauteilschonend als auch effizient durchgeführt werden kann. Die durch den Ansatz erzielte geringe Bauteilverformung und die Erhaltung der Integrität von angrenzenden Komponenten und Verbindungen eröffnen dabei neue Möglichkeiten für eine Instandsetzung und Wiederaufbereitung von Produkten sowie eine Wiederverwendung oder -verwertung hochwertiger Bauteile insbesondere in der Elektromobilität und Leistungselektronik.

Das Entfügen von Klebverbindungen stellt jedoch trotz der innerhalb von Forschungsprojekten entwickelten Vielzahl an Ansätzen zur effizienten Trennung von Fügeverbindungen weiterhin eine Herausforderung dar. So führen Ansätze einer Klebstoffmodifikation durch chemische Zusätze oder Additive bisher meist zu einer Reduzierung der mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen im Betrieb. Diese bedingen einerseits einen höheren Materialverbrauch, um eingeschränkte Eigenschaftsprofile an die Anforderungen anzupassen, und führen andererseits zu einer reduzierten Werkstoffausnutzung. In weiteren Ansätzen zur Klebstoffeweichung oder -versprödung ist hingegen ein tiefgehendes Verständnis der physikalischen Vorgänge im Klebstoff in Zusammenhang mit dem Einfluss des Fügeartikelwerkstoffs während der Entfügeoperation notwendig. Nur so ist ein effizientes Lösen von Klebverbindungen und die Entwicklung neuer Werkstoffe und Klebstoffe für das gezielte Entfügen zukünftig möglich.

---

Forschungs-  
bedarf

Zusätzlich müssen vielversprechende Ansätze im Technology-Readiness-Level (TRL) gesteigert werden. Ein Einsatz im industriellen Maßstab ist nur dann möglich, wenn die Phänomene ausreichend bekannt sind, der Prozess zuverlässig eingesetzt und automatisiert werden kann. Zuletzt sind effiziente Ansätze erforderlich, um Strukturen bereits in der Entwicklungsphase auf die spätere Zerlegung auszulegen und so nicht

nur ein geeignetes Füge- sondern ebenfalls ein assoziiertes Entfügeverfahren für unterschiedliche Zielsetzungen, wie dem Reparatur- oder Recyclingfall, zu definieren.

---

# Ergonomische Produktions- und Fügeprozessplanung

---

Ein weiterer Schwerpunkt des Verbundvorhabens lag in der Entwicklung soziotechnischer Anwendungen, die eine gezielte Unterstützung des Menschen in der Fertigung und die Optimierung der Ergonomie manueller Arbeitsschritte in der Prozesskette ermöglichen. So führen geforderte Taktzeitreduzierungen sowie der vermehrte Einsatz höherfester Werkstofflegierungen in Fügeprozessen zu einem stetigen Anstieg von Anlagen- und Werkzeuggewichten und folglich einer erhöhten Arbeitsbelastung. Die Berücksichtigung der Ergonomie innerhalb der Arbeitsprozesse gewinnt daher für den Erhalt der Arbeitsfähigkeit an Bedeutung.

---

Beitrag  
KORESIL

Einen Lösungsansatz zur gezielten Steigerung der Ergonomie stellt die Integration von kooperierenden Coboter-Systemen in den Fügeprozess dar. Der Fokus dieser Technologie liegt einerseits in der Steigerung der Produktivität von Arbeitsstationen und der Senkung der erforderlichen Taktzeiten. Andererseits ermöglicht die interaktive Unterstützung im Handling von Komponenten und Werkzeugen durch die Coboter eine gezielte körperliche Entlastung des Menschen.

Um eine ergonomische Produktions- und Prozessplanung zu fokussieren, wurden daher kollaborative Arbeitsplätze zur Herstellung einer hybriden Leichtbaustruktur untersucht. So wurden die Prozessschritte zum Fügen und Entfügen einer Batteriekastenstruktur identifiziert und in Zusammenarbeit mit Fügehilfsmittel- und Anlagelieferanten sowie Unternehmen aus der anwendenden Industrie ergänzt. Die Analyse berücksichtigt dabei sowohl manuelle und teilautomatisierte als auch vollautomatisierte Prozesse zum Hybridfügen und Entfügen von Bauteilen.

---

Belastungen  
in Füge- und  
Entfüge-  
prozessen

Eine Erkenntnis stellt die vorrangig physische Belastung innerhalb der manuellen Handlingprozesse von Komponenten dar. Diese werden

unter anderem durch die hohen Bauteilgewichte und eine Verletzungsgefahr in den Prozessen beeinflusst. Psychische Belastungen wurden primär in den manuellen Verarbeitungsprozessen, wie dem Klebstoffauftrag oder dem Entfügen der Verbindung, identifiziert. Maßgeblicher Einflussfaktor ist hier der erhöhte Druck auf den Mitarbeiter durch vorgegebene Taktzeiten und eine erhöhte Fehleranfälligkeit.

Zur Identifikation relevanter Stressoren und damit einhergehender Belastungen in Arbeitsprozessen, wurden Modelle zu Auswirkungen auf unterschiedlichen Wahrnehmungsebenen analysiert. So können Stressoren, wie in Abbildung 8 dargestellt, in physische, kognitive, soziale oder chemisch induzierte Belastungsarten untergliedert werden. In Abhängigkeit von der menschlichen Verhaltensweise können durch diese Belastungen kurz- bis langfristige Schäden auf körperlicher, kognitiv-emotionaler oder Verhaltensebene resultieren. So kann über die Zeit eine aktive Reaktion auf äußere Störfaktoren iterativ von einer passiv reagierenden zu einer passiv ertragenen Reaktion abgelöst werden und eine Akzeptanz der Belastungssituation bei dem Mitarbeitenden eintreten.

Auswirkungen von Arbeitsbelastungen

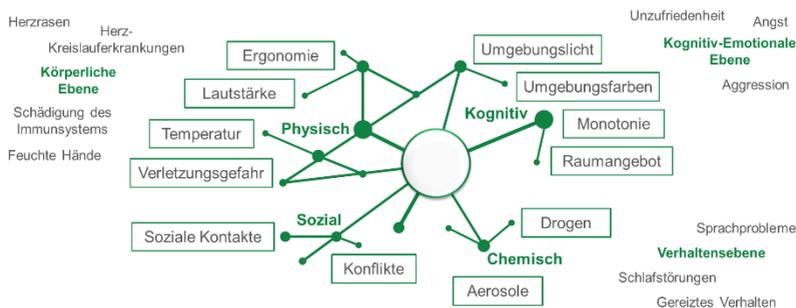


Abbildung 8: Auszug und Auswirkungen kognitiver, physischer und sozialer Belastungen im Prozess in Anlehnung an DIN EN ISO 10075

Neben den potentiell auftretenden Belastungsarten wurden Modelle zur Bewertung der Belastungsintensität angewendet. Zur Analyse der physischen Belastungen kann unter anderem das ergonomische Bewertungsmodell „Rapid Upper Limb Assessment“ (kurz: RULA)

Bewertung von Arbeitsbelastungen

genannt werden [48]. Um eine Gesamtbelastung zu quantifizieren werden sowohl die Gelenkhaltungen einzelner körperlicher Extremitäten als auch die Belastungsart und -intensität mithilfe eines definierten Punktesystems bewertet und zusammengefasst. Psychische Belastungen hingegen können durch etablierte Konzepte aus der Arbeitspsychologie, wie dem Belastungs-Beanspruchungs-Modell, dem Demand-Control-Support-Modell oder dem Effort-Reward-Modell bewertet werden. Ergänzend umfasst die DIN EN ISO 10075 ergonomische Grundlagen und Auswirkungen von Arbeitsbelastungen auf unterschiedlichen Ebenen sowie Präventionsmaßnahmen.

Innerhalb des Verbundvorhabens wurden sowohl das RULA als auch das Belastungs-Beanspruchungs-Modell für die Bewertung der physischen und psychischen Belastungen eines Mitarbeitenden im Fügeprozess eingesetzt. Hierdurch konnten Verbesserungspotentiale identifiziert werden. So führt die Unterstützung durch einen Coboter, insbesondere in den physisch belastenden Handlingprozessen, zu deutlich schonenderen Gelenkhaltungen und geringeren Belastungsintensitäten im Fügeprozess. Ergänzende Hilfselemente, wie eine Greifhilfe zur Optimierung der Gelenkwinkel oder eine Traghilfe zur Unterstützung des Komponententransportes bis zum Cobotergreifer ermöglichen eine weitere Senkung der potentiellen Arbeitsbelastung. Insgesamt führen die eingeführten Verbesserungsmaßnahmen im Fügeprozess auf eine RULA-Bewertung von 2,4 und somit zu einer Halbierung des RULA-Score ausgehend von den in Unternehmen etablierten manuellen Fügeprozessen.

---

Ergonomische Optimierung von Füge- und Entfügeprozessen

Analog konnten Einflussfaktoren auf die psychische Belastung verbessert werden. Hier sei unter anderem die gruppierte Arbeitsplatzanordnung sowie die Förderung einfacher Arbeitsplatzwechselintervalle durch intuitivere Aufgabengestaltungen zu nennen. Diese tragen zu einer höheren sozialen Identifizierung mit der eigenen Arbeit bei und fördern die Resilienz der Mitarbeitenden in belastenden Arbeitssituationen. Zuletzt kann durch die Erfassung relevanter Vitalwerte ein Echtzeit-Belastungs-Controlling von Mitarbeitenden implementiert werden, das es bereits in einer frühen Phase ermöglicht, geeignete Präventivmaßnahmen zu definieren und die Arbeitsplatzgestaltung auf

die aufgetretenen Belastungsfälle hin zu optimieren. Relevante Schlüsselkennwerte sind hierbei unter anderem die Herzschlagfrequenz oder die Herzschlagvariabilität. Einen weiteren messbaren Faktor stellt die Lidschlagfrequenz dar, die beispielsweise durch Einbindung virtueller Technologien, wie einer Mixed-Reality-Brille erfasst und analysiert werden kann. Abbildung 9 fasst dazu sowohl die die physischen Verbesserungsmaßnahmen zur Optimierung des RULA-Scores als auch ergänzende Handlungsempfehlungen zur Senkung der psychischen Belastungen zusammen.



*Abbildung 9: Handlungsempfehlungen zur Entlastung des Werkers am Beispiel des cobotergestützten Hybridfügeprozesses eines Batteriekastenprofils mit einem Deckblech*

---

# Entwicklung von Mixed-Reality-Technologien

---

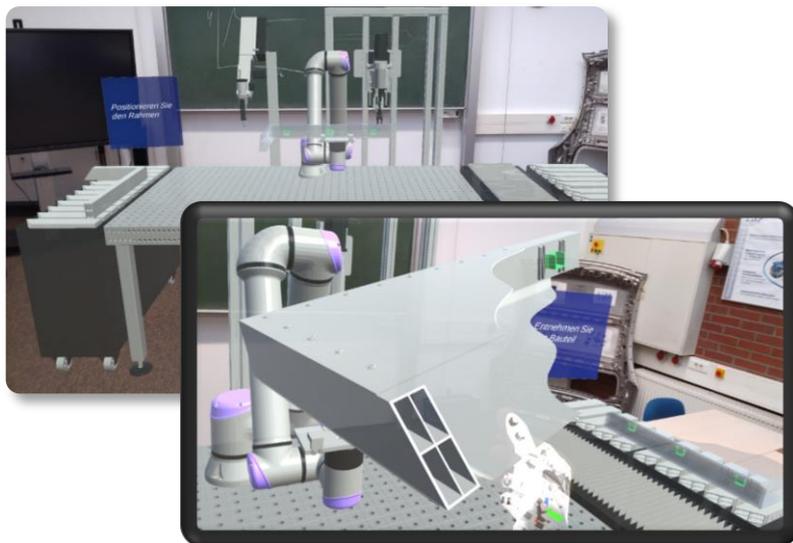
Die Kombination der genannten kooperativen Systeme mit weiteren Technologien wie der Extended Reality (XR) kann auf diese Weise zu wichtigen Skaleneffekten führen. Im Rahmen des Verbundvorhabens KORESIL wurden daher unterschiedliche Lösungsansätze zur gezielten Unterstützung des Menschen in der Fertigung erarbeitet [49]. Hierzu wurden die Herstellungsschritte und Anlagenbewegungen der technologisch realisierten Prozesskette zunächst identifiziert. Die Prozessanlagen wurden anschließend virtuell in einer VR-Anwendung abgebildet, um eine digitale Interaktion mit den Modellen zu ermöglichen. Ergänzend wurden Konzepte zur intuitiven Vermittlung von Informationen zu den berücksichtigten Fügeoperationen implementiert. Diese ermöglichen es den Ablauf innerhalb der Prozesskette sowie die Abfolgen und Funktionen von einzelnen Prozessschritten ohne Vorkenntnisse in einer standort- und plattformunabhängigen VR-Umgebung nachvollziehen zu können. Hierdurch soll einerseits ein Gesamtüberblick über den Kreislaufprozess des Verbundvorhabens und andererseits ein tieferes Prozessverständnis vermittelt werden. Eine Modellsteuerung über virtuelle und reale Bauteilbewegungen sowie funktionsbasierte Schaltflächen dienen zuletzt der Bedienung der Anlagen in Analogie zu realen Fügeprozessen.

---

Beitrag  
KORESIL

Eine weitere entwickelte Augmented Reality (AR)-Applikation zur modularen, flexiblen Arbeitsplatzgestaltung in einem typischen teilautomatisierten Fügeprozess zeigt das Potential der XR in der Produktionsplanung auf und ist in Abbildung 10 dargestellt. Fokussiert wird die Analyse von Arbeitsumgebungen unter Berücksichtigung der menschlichen Anforderungen. Die Anwendung erlaubt die individuelle Anpassung der implementierten digitalen Prozesselemente. So kann die Ergonomie unterschiedlicher Arbeitsplatzszenarien virtuell getestet, verglichen und optimiert werden. Die immersive XR-Umgebung

ermöglicht dabei eine gefahrlose und intuitive Interaktion mit den digitalen Anlagen und Komponenten.



*Abbildung 10: Modifizierte virtuelle Abbildung der realisierten Anzeige zum cobotergestützten Fügen eines Batteriekasten-Demonstratorbauteils*

Komponenten mit integrierten Codes lassen ebenfalls die Nutzung realer Bauteile innerhalb der virtuellen Umgebung und eine damit verbundene Bedienung der Anlage zu. Hierdurch wird der Übergang von einer real-intuitiven über eine teil-virtualisierte zu einer voll-digitalisierten Umgebung unterstützt und die Hemmschwelle von Personen ohne Vorerfahrungen mit der Technologie gezielt reduziert. Ein Trainingstutorial zu typischen Bedienelementen des Devices, einer kompakten Erklärung der Arbeitsumgebung und dem Arbeitsprozess sowie einer Beschreibung der vom Bediener geforderten Aufgabenschritte verbessert zuletzt die Orientierung in der eingesetzten Microsoft Holens 2. Dies führt sowohl zu einer gesteigerten Intuitivität in den Arbeitsschritten als auch einer Reduzierung der psychischen Belastung.

Die abschließende Identifikation aktueller Potentiale und Grenzen von XR-Anwendungen sowie der wirtschaftlichen und bildungswissenschaftlichen Anwendbarkeit erfolgte durch eine Anwenderbefragung von insgesamt 95 Teilnehmenden. Nach Abbildung 11 wurden insbesondere Personen der Fachrichtung Maschinenbau, jedoch ebenfalls der Kultur-, Bildungs- und Geisteswissenschaften ausgewählt. Diese wurden im Anschluss an eine etwa 15-minütige Testphase der Anwendung an unterschiedlichen Orten mit vergleichbaren Umgebungseinflüssen, wie beispielsweise Innentemperaturen, Lichtverhältnissen, Uhrzeiten, Lautstärken und Ablenkungsgraden durch Personen in der Nähe befragt.

Usability-Score der AR-Anwendung

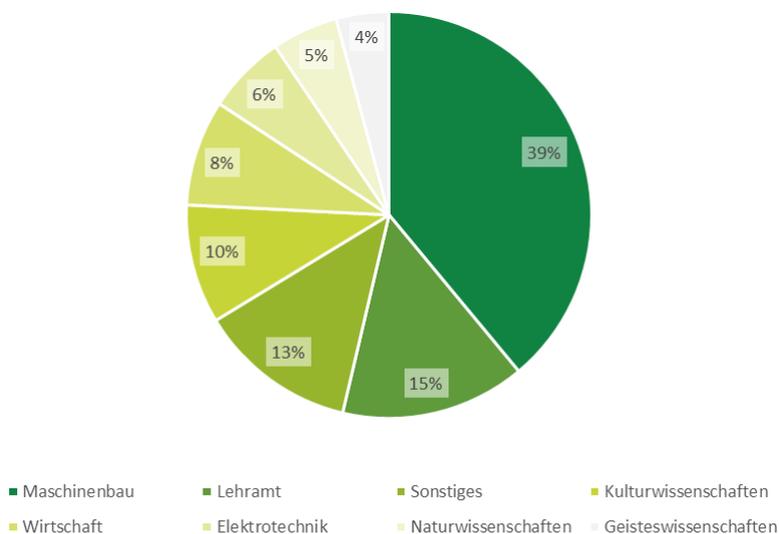
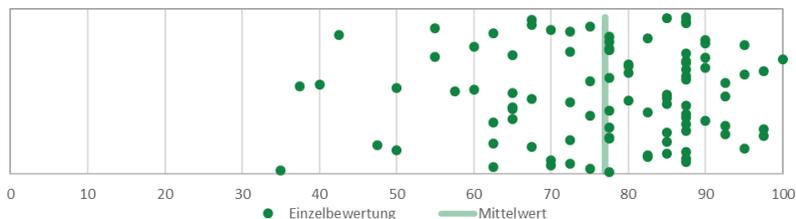


Abbildung 11: Fachlicher Hintergrund der TeilnehmerInnen innerhalb der durchgeführten Befragung

Die Auswertung der gesammelten Daten erfolgte durch Berechnung eines Usability-Scores unter Anwendung der DIN EN ISO 9241-11. Hierzu wurde ein Punktestand zwischen null und hundert ermittelt, der für eine grundlegende Bewertung der Technologie herangezogen sowie für einen Vergleich mit anderen Technologien und ähnlichen Anwendungen genutzt werden konnte. Für die Anwendung ergibt sich so der in

Abbildung 12 dargestellte Gesamtscore von 77 Punkten mit einer Standardabweichung von 14,3 Punkten. Dies stellt die AR-Anwendung als Technologie mit einem überdurchschnittlichen Score von über 68 Punkten dar. So zeigt sich ab einem Score von 82 ( $\pm 5$ ) Punkten ein Networking-Effekt, der die Chance einer Produktempfehlung signifikant anhebt.



*Abbildung 12: Streudiagramm der Usability-Scores des AR-Devices in Verbindung mit der Anwendung „Ergonomische Produktions- und Prozessplanung“*

Durch die gezielte Einbindung in eine frühe Phase der Produktionsplanung und den potentiellen Wegfall einer kostenintensiven Prüfung, kann der finanzielle und personelle Aufwand zur Gestaltung von Arbeitsplätzen daher deutlich reduziert werden. Diese Vorteile qualifizieren die XR-Technologie insbesondere für die menschorientierte Fabrikplanung.

---

## Executive Summary

---

Die Fügetechnik gilt als Enabler moderner Hybridstrukturen und ermöglicht die anforderungsgerechte Verbindung artverschiedener Werkstoffe mit unterschiedlichen technisch-wirtschaftlichen Eigenschaftsprofilen. Aktuelle Herausforderungen umfassen insbesondere die zunehmende Materialvielfalt aus Primär- und Sekundärwerkstoffen im Zuge der Transformation zu einer kreislaufigen Gesellschaft sowie das gezielte Entfügen von Leichtbaustrukturen in Instandsetzungs- oder Recyclingprozessen. So bedarf der stetige Umstieg auf Sekundärwerkstoffe die Evolution bekannter sowie die Entwicklung innovativer Fügeverfahren, die eine gesteigerte Prozessrobustheit, Prognosefähigkeit und Wandlungsfähigkeit aufweisen, um auch auf veränderte Prozessumgebungen und Materialeigenschaften effizient reagieren zu können. Entsprechend verhält es sich mit der Entwicklung geeigneter Entfügeverfahren zur Instandsetzung oder Rückführung von Werkstoffen in den Stoffkreislauf. So können Produkte erst wirtschaftlich und nachhaltig hergestellt und recycelt werden, wenn auftretende Phänomene ausreichend erforscht, Prozesse zuverlässig weiterentwickelt und automatisiert eingesetzt werden können. Virtuelle Anwendungen ermöglichen hierbei eine frühe und menschenzentrierte Produktions- und Prozessplanung und können hierdurch auch unter dem aktuell zu verzeichnenden Fachkräftemangel zu einem Transformationsprozess beitragen.

---

## Handlungsempfehlungen

---

Die Transformation der bisher linearen Wirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft und einer möglichst emissionsneutralen Herstellung und Verwendung von Produkten bedarf einer ganzheitlichen Forschung und Entwicklung in allen Bereichen der Prozesskette. Hierbei sind sowohl neue Prognoseansätze zur effizienten Auslegung von Produkten, geeignete Produktionsprozesse sowie anwendbare Rückführungs- und Aufbereitungskonzepte zu entwickeln. Insbesondere betrifft dies:

- 🌐 Die Etablierung adaptiver Prozesse in einer wandlungsfähigen Prozesskette zur Flexibilisierung und Steigerung der Robustheit sowie der Ergonomie des Fügeprozesses
- 🌐 Die durchgängige, multilaterale Verknüpfung von Datenstrukturen und Simulationsmodellen in Prozessketten zur Erhöhung der Prognosefähigkeit
- 🌐 Die Entwicklung effizienter, werkstoffgerechter und serienfähiger Demontage- und Entfügeprozesse zur Steigerung der Verwertungsquote und -qualität von Sekundärwerkstoffen

---

# Literatur

---

- [1] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: Die Zukunft der Mobilität. Online, verfügbar unter: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/>, Abruf: 08.08.2023
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Elektromobilität in Deutschland. Online, verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html>, Abruf: 08.08.2023
- [3] International Energy Agency: Global Electric Vehicle Outlook 2022. Securing supplies for an electric future. Online, verfügbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e0d2081d-487d-4818-8c59-69b638969f9e/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>, Abruf: 08.08.2023
- [4] Köth, C.-P.: Elektromobilität funktioniert nur mit Leichtbau. Online, verfügbar unter: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/elektromobilitaet-funktioniert-nur-mit-leichtbau-a-908391/>, Abruf: 08.08.2023
- [5] Kopp, G. et al.: Mit Konzeptleichtbau ungenutzte Potenziale heben: Ökonomischer und ökologischer Nutzen. Online, verfügbar unter: [https://www.dlr.de/fk/PortalData/40/Resources//PlainEdition\\_MIT\\_KONZEPTLEICHTBAU\\_UNGENUTZTE\\_POTENZIALE\\_HEBEN.pdf](https://www.dlr.de/fk/PortalData/40/Resources//PlainEdition_MIT_KONZEPTLEICHTBAU_UNGENUTZTE_POTENZIALE_HEBEN.pdf), Abruf: 08.08.2023
- [6] Audi AG: Leidenschaft für Qualität und Progressivität: Der neue Audi e-tron GT. Online, verfügbar unter <https://www.audi-mediacycenter.com:443/de/hightech-trifft-handarbeitdie-produktion-des-audi-e-tron-gt-in-den-boellinger-hoefen-13242/leidenschaft-fuer-qualitaet-und-progressivitaet-der-neue-audi-e-tron-gt-13243>, Abruf: 21.02.2024
- [7] Bader, B. et al.: Technologies for economical and functional lightweight design - Multi material design - A current overview of the used potential in automotive industries. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg-Verlag, 2020, ISBN: 978-3-662-62926-0
- [8] Hasenpusch, J.: Methodik Zur Beurteilung Eigenschaftsoptimierter Karosseriekonzepte in Mischbauweise. Wiesbaden: Springer Fach-medien Wiesbaden, 2018, ISBN: 978-3-658-22226-0
- [9] Audi AG: Der neue A8 – Verbindungstechnik. Online, verfügbar unter: <https://www.audi-mediacycenter.com/de/fotos/detail/der-neue-audi-a8-43909>, Abruf: 08.08.2023
- [10] Stauber, R.: Kunststoffe im Automobilbau, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Jg. 109, Nr. 3, S. 202-209, 2007, DOI: 10.1007/BF03221872
- [11] Statistisches Bundesamt: Abfallaufkommen in Deutschland 2018 bei 417,2 Millionen Tonnen. Online, verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html), Abruf: 08.08.2023
- [12] Bechlarz, D.: Wie steht es um den Einsatz von Rezyklaten im Automobilbau? Online, verfügbar unter: <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/wie-steht-es-um-den-einsatz-von-rezyklaten-im-automobilbau-984.html>, Abruf: 13.03.2023

- [13] Deußing, G.: Fehlgerüche in Polymeren identifizieren - Geruchsbelastung limitiert die Recyclingchance von Altkunststoffen. Online, verfügbar unter: [https://www.k-online.de/de/Media\\_News/News/Fehlgerüche\\_in\\_Polymeren\\_identifizieren/](https://www.k-online.de/de/Media_News/News/Fehlgerüche_in_Polymeren_identifizieren/), Abruf: 15.03.2023
- [14] Ronkay, F.: Effect of Recycling on the Rheological, Mechanical and Optical Properties of Polycarbonate, *Acta Polytechnica Hungarica*, Jg. 10, Nr. 1, S.209-220, 2013, DOI: 10.12700/APH.10.01.2013.1.12
- [15] Amberg, M. et al.: Surface modification of recycled polymers in comparison to virgin polymers, *Plasma Processes and Polymers*, Jg. 19, Nr. 12, S. 1-14, 2022, DOI: 10.1002/ppap.202200068
- [16] Bahlouli, N. et al.: Recycling effects on the rheological and thermomechanical properties of polypropylene-based composites, *Materials & Design*, Nr. 33, S. 451-458, 2012, DOI: 10.1016/j.matdes.2011.04.049
- [17] Gorbach, G. et al.: Fertigungs- und Recyclingstrategien für die Elektromobilität zur stofflichen Verwertung von Leichtbaustrukturen in Faserkunststoff-Verbund-Hybridbauweise. Projektabschlussbericht ReLei, BMBF, Bonn, 2018
- [18] Behrens, B. A. et al.: Reprocessing of AW2007, AW6082 and AW7075 aluminium chips by using sintering and forging operations, *Production Engineering*, Jg. 8, Nr. 4, S. 443-451, 2014, DOI: 10.1007/s11740-014-0542-2
- [19] Haase, M. et al.: Recycling of aluminum chips by hot extrusion with subsequent cold extrusion, *Procedia Engineering*, Nr. 81, S. 652-657, 2014, DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.055
- [20] Schikorra, M. et al.: Re-use of AA6060, AA6082, and AA7075 aluminum turning chips by hot extrusion, *The 9th International Conference on Technology of Plasticity*, S. 902-907, 2008
- [21] Wilken, R. et al.: Kunststoffe richtig vorbehandeln. In: *Kunststoffe erfolgreich kleben*. In: Doobe, M. (Hg.), Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2018, ISBN: 978-3-658-18444-5
- [22] Hahladakis, J. N.: An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling, *Journal of Hazardous Materials*, Nr. 380, S. 1-10, 2019, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120887
- [23] Wischer, C. et al.: Further Development of an Adaptive Joining Technique Based on Friction Spinning to Produce Pre-Hole-Free Joints, *Key Engineering Materials*, Nr. 926, S. 1468-1478, 2022, DOI: 10.4028/p-1n6741
- [24] Bielak, C. R. et al.: Development of a Numerical 3D Model for Analyzing Clinched Joints in Versatile Process Chains, *Proceedings of the 12th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*, S. 165-172, 2022, DOI: 10.1007/978-3-031-06212-4\_15
- [25] Tekkaya, A. E. et al.: Ur- & Umformtechnik. In: Gude, M. et al. (Hrsg.): *Komplexität beherrschen, Kreisläufe schließen. Soziotechnische Systeme für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen: Das interaktive Whitepaper*. Dresden, 2024, DOI: 10.25368/2024.50

- [26] Carey, J.: News Feature: On the brink of a recycling revolution? Proceedings of the National Academy of Sciences, Jg. 114, Nr. 4, S. 612-616, 2017, DOI: 10.1073/pnas.1620655114
- [27] European Commission: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. Online, verfügbar unter <http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy.pdf>, Abruf: 13.03.2023
- [28] Richtlinie 200/53/EG, Richtlinie über Altfahrzeuge, Europäisches Parlament und Rat, Brüssel, September 2000
- [29] Europäische Kommission: Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG. Online, verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/transparency/documentsregister/detail?ref=COM\(2023\)451&lang=en](https://ec.europa.eu/transparency/documentsregister/detail?ref=COM(2023)451&lang=en), Abruf: 08.03.2024
- [30] Bogue, R.: Design for disassembly: A critical twenty-first century discipline, Assembly Automation, Jg. 27, Nr. 4, S. 285-289, 2007, DOI: 10.1108/01445150710827069
- [31] Lu, Y. et al.: A review of innovations in disbonding techniques for repair and recycling of automotive vehicles. International Journal of Adhesion and Adhesives, Nr. 50, S. 119-127, 2014, DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2014.01.021
- [32] Hahn, O. et al.: Werkstatt-Reparaturkonzept für Kfz-Strukturen aus höchfesten Stahlwerkstoffen im Automobilkarosseriebau. In: Forschung für die Praxis P 617, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 2006
- [33] Hahn, O. et al.: Optimierung des Hybridfügeverfahrens Blindnietkleben zum Verbinden von Feinblechwerkstoffen. In: EFB-Forschungsbericht 283, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover, 2008
- [34] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-8348-1467-8
- [35] Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials IFAM: Kreislaufwirtschaft und Klebtechnik. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2020, ISBN: 978-3-8396-1636-9
- [36] Merkblatt DVS 2519-2, Kleben in der Karosserie-Reparatur, DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Düsseldorf, Juli 2012
- [37] Aubert, J. H.: Thermally removable epoxy adhesives incorporating thermally reversible diels-alder adducts, The Journal of Adhesion, Jg. 79, Nr. 6, S.609-616, 2003, DOI: 10.1080/00218460309540
- [38] Heinzmann, C. et al.: Supramolecular polymer adhesives: Advanced materials inspired by nature, Chemical Society Reviews, Jg. 45, Nr. 2, S. 342-358, 2016, DOI: 10.1039/c5cs00477b
- [39] Leijonmarck, S. et al.: Electrolytically assisted debonding of adhesives: An experimental investigation, International Journal of Adhesion and Adhesives, Nr. 32, S. 39-45, 2012, DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2011.09.003

- [40] Banea, M. D.: Debonding on Demand of Adhesively Bonded Joints: A Critical Review, *Reviews of Adhesion and Adhesives*, Jg. 7, Nr. 1, S. 33-50, 2019, DOI: 10.7569/RAA.2019.097304
- [41] Alcorta, J. et al.: Destructuring agent for an adhesive composition, and glue and primer forming said composition, WIPO (PCT) WO2005028583A1, Deutschland, 31.03.2005
- [42] Friese, C. et al.: Lösbare Klebeverbindungen, DE19961940A1, Deutschland, 02.08.2001
- [43] Sims, S. et al.: Durch exotherme Reaktionen schnell entkleben, *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, Jg. 60, Nr. 12, S. 34–37, 2016
- [44] McCurdy, R. H. et al.: The mechanical performance of adhesive joints containing active disbonding agents, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Nr. 46, S. 100-113, 2013, DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2011.09.003
- [45] Kirsten, C.: Process for adhesive separation of bonded joints. US20050039848A1, Vereinigte Staaten von Amerika, 24.02.2005
- [46] Meschut, G. et al.: Entfüge- und Fügekonzepte von Leichtbaustrukturen in der Karosserieinstandsetzung. In: *Forschung für die Praxis P 1030*, Forschungsvereinigung Stahl-anwendung e. V., Düsseldorf, 2020
- [47] Ditter, J.: Methoden zum Entfügen von Stahl-Klebeverbindungen bei tiefen Temperaturen. Dissertation, Universität Paderborn, 2020
- [48] McAtamney, L. et al.: RULA: a survey method for the investigations of work-related upper limb disorders, *Applied Ergonomics*, Nr. 24 (2), S. 91-99, 1993, DOI: 10.1016/0003-6870(93)90080-S
- [49] Tekkaya, A. E. et al.: Soziotechnische Systeme. In: Gude, M. et al. (Hrsg.): *Komplexität beherrschen, Kreisläufe schließen. Soziotechnische Systeme für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen: Das interaktive Whitepaper*. Dresden, 2024, DOI: 10.25368/2024.49