

Neuartige Lösungen für den Multi-Material-Leichtbau in geschlossenen Stoffkreisläufen

Ressourceneffiziente Fertigung von Leichtbaustrukturen

D. Weck, M. Müller-Pabel, Th. Krampitz, C. Hecker, A. Selvaggio, J. Gilich, M. Gude, H. Lieberwirth, A. E. Tekkaya, G. Meschut

ZUSAMMENFASSUNG Zur Steigerung der Ressourceneffizienz technischer Komponenten sind neben dem Leichtbau insbesondere neuartige Fertigungstechnologien und Prozessketten mit geschlossenen Stoffkreisläufen von großer Bedeutung. Im Beitrag werden am Beispiel einer Demonstratorstruktur aus hybriden Leichtbauprofilen (Aluminium und faserverstärktes Polyamid) technisch-technologische Lösungsoptionen für die gesamte Prozesskette inklusive des Recyclings vorgestellt und in Pilotversuchen bewertet.

STICHWÖRTER

Recycling, Leichtbau, Fügetechnik

Resource-efficient production of lightweight structures

ABSTRACT Particularly important for increasing the resource efficiency of technical components are not only lightweight design but also innovative manufacturing technologies, and process chains with closed material cycles. Using the example of a demonstrator structure made of hybrid lightweight profiles (aluminium and fibre-reinforced polyamide), this paper presents technical and technological potential solutions for the entire process chain, including recycling, and evaluates them based on pilot tests.

1 Einleitung

Die Transformation industrieller Produktionsprozesse hin zu einer nachhaltigen und gleichzeitig wirtschaftlichen Fertigung gewinnt angesichts globaler Herausforderungen wie Rohstoffverknappung, Klimawandel und komplexer geopolitischer Rahmenbedingungen fortlaufend an Bedeutung [1]. Der Leichtbau gilt als Schlüsseltechnologie, um die eingesetzten Ressourcen zu minimieren, sowohl in der Herstellung eines Produktes als auch über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg [2]. Komplexe Multi-Material-Bauweisen, die für den Leichtbau häufig vorteilhaft sind, und die zunehmende Materialvielfalt erschweren die sortenreine Rückführung von Werkstoffen in den Stoffkreislauf am End-of-Life (EoL) [3]. Die Gestaltung kreislauffähiger Prozessketten und Produkte erfordert daher eine differenzierte und verknüpfte Betrachtung der eingesetzten Technologien und Bauweisen entlang der Wertschöpfungskette [4]. Dabei sind unter anderem die Einsatzbarkeit von Sekundärwerkstoffen zu evaluieren, effiziente und adaptive Prozesstechnologien zur Verarbeitung von Rezyklaten zu qualifizieren sowie Entfüge- und Identifikationsverfahren zu entwickeln, die sowohl eine effiziente Demontage der Produkte als auch eine sortenreine Trennung und Sortierung der Werkstoffe am EoL ermöglichen [4].

Dieser Beitrag adressiert die technologischen Herausforderungen sowie Potenziale einer ressourceneffizienten Fertigung technischer Produkte und präsentiert Lösungsansätze für eine geschlossene Prozesskette am Beispiel einer Rahmenstruktur aus hybriden Leichtbauprofilen.

2 Kreislaufwirtschaft: Potenziale und Herausforderungen

Die industrielle Fertigung technischer Produkte ist bislang überwiegend durch lineare Stoffströme geprägt. Materialien werden als Primärressourcen extrahiert, verarbeitet und am EoL des Bauteils deponiert oder thermisch verwertet [5]. Vor dem Hintergrund ökologischer und geopolitischer Herausforderungen wird die Transformation dieser Wirtschaftsweise hin zu einer Kreislaufwirtschaft vorangetrieben, um die verfügbaren Ressourcen nachhaltig einzusetzen. Die dafür notwendigen gesellschaftlichen und industriellen Transformationsprozesse werden sowohl durch verschiedene gesetzgeberische Initiativen auf nationaler und europäischer Ebene als auch durch den Handlungsdruck innerhalb der Wertschöpfungsketten forciert.

Als ein übergeordnetes theoretisches Framework für die Kreislaufwirtschaft haben sich die 9R-Strategien etabliert [6]. Diese lassen sich in drei übergeordnete Gruppen einteilen: die intelligenteren Produktherstellung und -nutzung (R0 bis R2), die Verlängerung der Produktlebensdauer (R3 bis R7) sowie die sinnvolle Wiederverwendung von Materialien (R8 und R9). Die Reduce-Strategie (R2) repräsentiert dabei den Grundgedanken des Leichtbaus, durch optimierte Produktdesigns und Fertigungsprozesse den mit dem Produkt verbundenen Ressourcenverbrauch zu minimieren. Ebenso in Ansätzen verfolgt wird die Recycle-Strategie (R8), bei der das Ziel die konsequente Wiederverwendung der eingesetzten Rohstoffe ist. Beide Strategien finden in diesem Beitrag Anwendung.

Gerade der Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau ist durch einen hohen Einsatz von energieintensiv erzeugten Werkstoffen

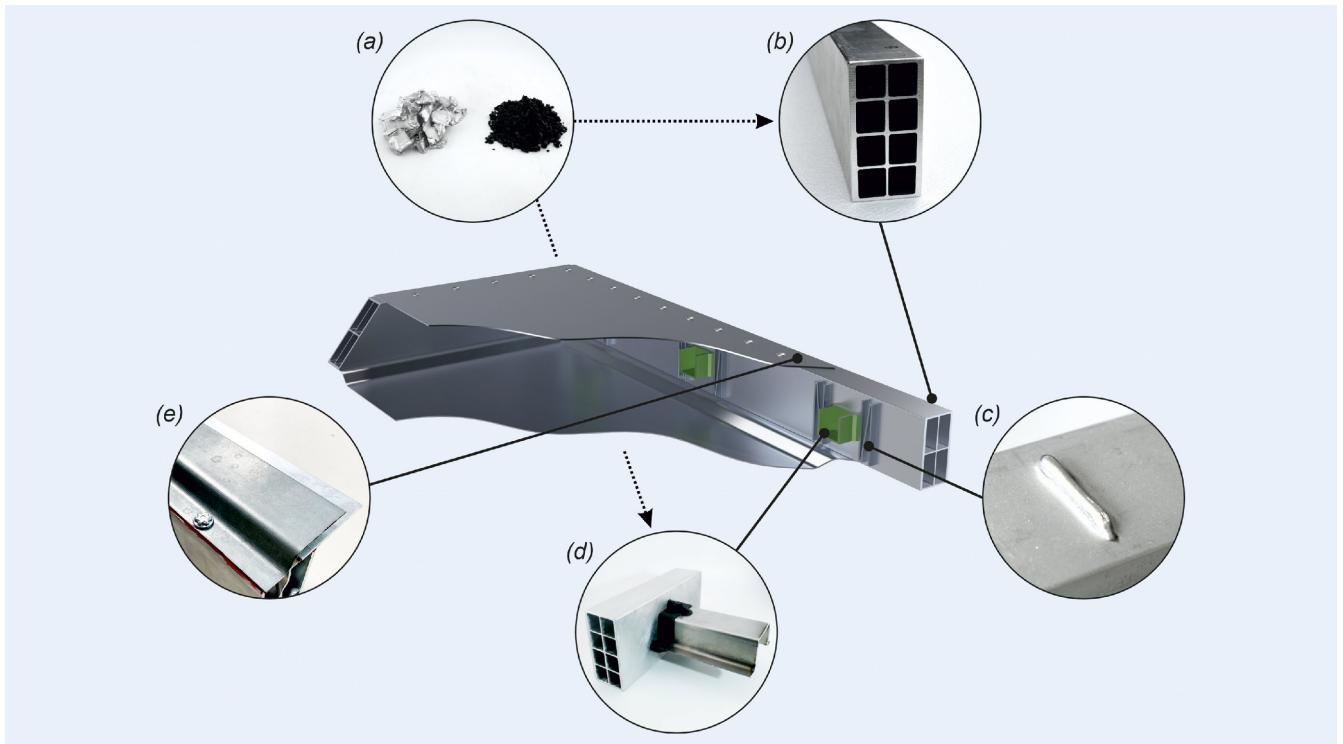


Bild 1 Generischer Demonstrator mit den Zwischenprodukten der Prozesskette: (a) mechanisch zerkleinertes Metall- und Kunststoffzyklat, (b) stranggepresste Aluminiumprofile, (c) additiv applizierte Aluminiumelemente, (d) spritzgusstechnisch applizierte Kunststoffelemente und (e) Aluminiumprofil mit hybridgefügten Blechen. *Grafik: ILK, TU Dresden*

gekennzeichnet. Deren Rückgewinnung aus Produktions- und EoL-Abfällen birgt ein erhebliches ökologisches und ökonomisches Potenzial, indem der Primärressourcenbedarf, die Prozessschritte und die Emissionen im Verarbeitungsprozess reduziert werden [7]. Die in diesem Zusammenhang zu bewältigenden Herausforderungen betreffen vor allem die anforderungsgerechte und wirtschaftliche Trennung, Identifikation und Sortierung von Werkstoffen aus werkstoffheterogenen Produkten sowie die für robuste Fertigungsprozesse erforderliche Qualifizierung von Sekundärmaterialien [8]. Die Substitution von Primärwerkstoffen durch Rezyklate erfordert material- und prozesseitige Anpassungen entlang der gesamten Fertigungskette [8]. Dabei müssen Bau- teildesign und Fertigungsprozess die dauerhafte Strukturintegrität sicherstellen und gleichzeitig die effiziente Demontage erlauben. Dies erfordert adaptive Fertigungs- und reversible Fügetechnologien [9]. Ebenso sind neue Recyclingverfahren zur Erzeugung reproduzierbarer Rezyklatqualitäten für die Direktverarbeitung von Aluminiumrezyklaten oder für den Einsatz von Sekundärkunststoffen in strukturellen Anwendungen erforderlich [7].

3 Prozesskette und Stoffkreislauf

Im Beitrag werden anhand einer funktionsintegrativen Leichtbaustruktur in Mischbauweise technologische Lösungsansätze sowohl für die effiziente und ressourcenschonende Fertigung als auch für die Umsetzung eines geschlossenen Stoffkreislaufes vorgestellt. Eine aus fünf Teilprozessen aufgebaute Prozesskette wird etabliert und eine Reduzierung des Energiebedarfs sowie eine Steigerung der Ressourceneffizienz erzielt.

Ausgehend von vorsortierten Aluminiumschrotten erfolgt zunächst deren mechanische Zerkleinerung (IART, TU Freiberg).

Das gewonnene Rezyklat wird ohne Einschmelzen direkt im Strangpressprozess zur Fertigung von Aluminiumprofilen eingesetzt (IUL, TU Dortmund). Die Funktionalisierung dieser Strangpressprofile mit metallischen Funktionselementen erfolgt per drahtbasiertem Laserauftragschweißen (iwb, TU München). Für Funktionselemente aus rezykliertem Kunststoff kommt der mobile Kunststoff-Spritzguss zum Einsatz (ILK, TU Dresden). Über einen Hybridfügeprozess auf Basis von fließlochformendem Schrauben (FLS) und strukturellem Kleben werden die Strangpressprofile werkstoff- und demontagegerecht mit Blechen gefügt. Angepasste Entfügeverfahren erlauben zudem die schädigungsarme und sortenreine Demontage (LWF, Universität Paderborn). Die erhaltenen Metallschrotte und Kunststoffabfälle werden der Zerkleinerung zugeführt und für neue Fertigungszyklen aufbereitet. Das technologische Potenzial dieser Prozesskette wird am Beispiel eines generischen Demonstrators aufgezeigt, der an ein Batteriekastenmodul angelehnt ist, Bild 1.

Der Rahmen dieses Demonstrators besteht aus stranggepressten Aluminiumprofilen (EN AW-6060), die durch nachträglich applizierte Aluminiumelemente (EN AW-5087) und Kunststoff (PA 6 GF30) funktionalisiert werden. Die Strangpressprofile und zusätzliche Bleche werden mit einem Hybridfügeprozess verbunden. Die eingesetzten Metall- und Kunststoffwerkstoffe werden mit Demontage-, Zerkleinerungs- und Sortierprozessen zurückgewonnen und den urformenden Fertigungsverfahren Strangpressen und Spritzguss erneut zugeführt. Die hierfür entwickelten technologischen Lösungen und ihre substantiellen Beiträge zur Steigerung der Ressourceneffizienz insbesondere in der Herstellungsphase werden in den nachfolgenden Abschnitten, startend mit dem Schritt Zerkleinern, beschrieben.

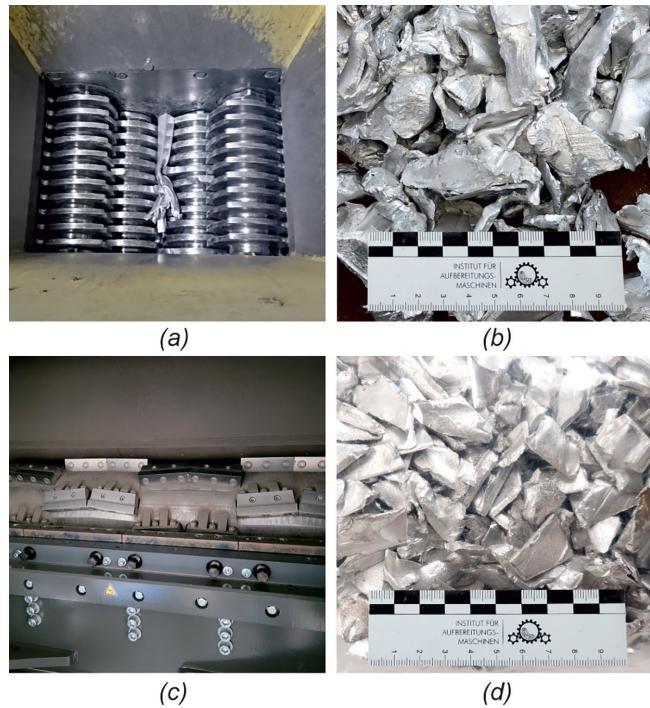


Bild 2 Zerkleinerung der Strangpressprofile: (a) Vorzerkleinerung mit Vierwellen-Axialschlitz-Rotorschere und (b) erhaltenes Zerkleinerungsprodukt, (c) einstufige Zerkleinerung mit Einwellen-Radialschlitz-Rotorschere und (d) erhaltenes Zerkleinerungsprodukt. Foto: IART, TU Bergakademie Freiberg

3.1 Zerkleinern

Ein wesentliches Ziel bei der Umsetzung der oben beschriebenen Prozesskette war es, insbesondere die Strangpressprofile und ihre Funktionselemente weitgehend auf Basis von Materialien aus Recyclingprozessen zu fertigen. Zunächst stand bei der Prozesskettenentwicklung der für die Fertigung der Strangpressprofile eingesetzte Werkstoff Aluminium im Fokus, da er den Hauptstoffstrom für die untersuchte Demonstratorstruktur bildet.

Die Herstellung von Primäraluminium gehört zu den energieintensivsten Prozessen in der Metallproduktion und benötigt ein Vielfaches der Energie, welche für die Herstellung der gleichen Menge Stahl erforderlich ist [10–12]. Durch das Recycling von Aluminiumschrott kann der Energiebedarf für die Produktion um bis zu 95 % gegenüber der Produktion aus Erzen wie Bauxit reduziert werden [13]. Bereits heute stammen daher etwa 32 % des weltweit produzierten Aluminiums aus dem Recycling [13]. Die konventionellen Recyclingrouten für Aluminium sind dennoch mit einem hohen Verbrauch an Energie verbunden, welche hauptsächlich für das Einschmelzen und die schmelzmetallurgische Verarbeitung aufgewendet wird. Zusätzlich ist das Einschmelzen mit einem Materialverlust durch Abbrand verbunden. Vor allem das Einschmelzen von Schrotten mit einem großen Verhältnis von Partikelloberfläche zu -volumen (Späne, Schredderzyklat) führt durch Abbrand an der Partikelloberfläche zu erheblichen Materialverlusten von bis zu 18 % [14].

Alternative Recyclingrouten für Aluminium, die ohne Einschmelzschnitt auskommen, erscheinen daher erstrebenswert und wurden in der Vergangenheit bereits erfolgreich umgesetzt. Dabei wurden aufbereitete, sortenreine Produktionsabfälle in Form von Frässpänen (Post-Industrial-Rezyklat: PIR) verwendet, zu spanbasierten Pressbolzen verpresst und anschließend erfolgreich zu

neuen Aluminiumbauteilen verarbeitet [15, 16]. Daraus wurde der Ansatz des Direktrecyclings von Aluminium aus aufbereiteten Post-Consumer-Schrotten (PCR) abgeleitet, bei dem ebenfalls auf das Einschmelzen des Aluminiumrezyklat verichtet wird.

Für den Strangpressprozess muss das Aluminiumrezyklat in Form zylindrischer Pressbolzen ($d = 95 \text{ mm}$, $l = 150 \text{ mm}$) zur Verfügung gestellt werden. Deren Fertigung stellt an den Zerkleinerungsprozess des Aluminiumschrotts spezielle Anforderungen. Eine stabile mechanische Verklammerung der Rezyklatpartikel im Pressprozess kann durch scharfkantige, plattige Partikel abgesichert werden, wodurch homogene Pressbolzen mit hoher Packungsdichte erzielt werden können. Für eine gute Kompaktierbarkeit waren weiterhin eine homogene Partikelgrößenverteilung von Partikeln mit einer Kantenlänge von mindestens 2 mm und maximal etwa 20 mm Kantenlänge gefordert. Um diese Ziele zu erreichen, wurden am IART unterschiedliche Zerkleinerungsaggregate und Zerkleinerungs-Kaskaden auf ihre Eignung untersucht. Im ersten Lebenszyklus wurden die Profile zunächst aus kompakten Aluminiumbolzen der Primärlegierung EN AW-6060 (AlMgSi0,5) gefertigt und anschließend für die Entwicklung des Zerkleinerungsprozesses sowie die Erzeugung legierungsortreiner Pressbolzen für das Strangpressen genutzt.

Um flache, stückige Aluminiumpartikel zu erhalten, ist aufgrund der Duktilität des Aluminiums der Einsatz von primär schneidenden Zerkleinerungsmaschinen nötig. Dafür eignen sich Rotorscheren [17, 18]. Sie bestehen aus einem oder mehreren Rotoren, auf denen sich in bestimmten Abständen Schneidelemente befinden. Durch den Einzug der Al-Komponenten in den je nach Bauart radialen oder axialen Spalt erfolgt die Zerkleinerung mittels der in sich greifenden Schneidelemente.

Für die Zerkleinerung der hier betrachteten, stranggepressten Mehrkammerprofile wurden geeignete Rotorschertypen ausgewählt und das Zerkleinerungsverhalten untersucht. Die aufgegebenen Profile wiesen eine Länge von 400 mm auf. In Vorversuchen wurden die Profile zunächst in einer Vierwellen-Axialschlitz-Rotorschere mit eng ineinandergreifenden Haken grob vorzerkleinert, Bild 2 (a).

Beim Einzug der Profile in den Scherspalt kollabierten die Profilkammern, durch Stapelung der Kammerwände kam es dabei zu einer Erhöhung der zu durchtrennenden Wandstärke auf circa 10 mm. Die entstandenen Zerkleinerungsprodukte wiesen eine vorwiegend längliche Partikelform mit Partikellängen von deutlich über 20 mm auf, Bild 2 (b). Anschließend erfolgte daher in ersten Versuchen eine Nachzerkleinerung des Materials in einer Einwellen-Radialschlitz-Rotorschere. Dadurch wurde der mittlere Partikeldurchmesser auf 9 mm (Prüfsiebung nach DIN 66165) und die Partikellänge nahezu vollständig auf unter 20 mm reduziert. Zudem wurde eine scharfkantige, flache Partikelform realisiert. In der Folge konnten sowohl die Schüttdichte des Rezyklat als auch die Packungsdichte der Pressbolzen erhöht werden.

Zur Reduzierung des Zerkleinerungsaufwands erfolgte dann eine Optimierung der Technologie. Prinzipiell hatte sich die Einwellen-Radialschlitz-Rotorschere (auch als Granulator bezeichnet) zur Erzeugung der gewünschten Partikelformen als geeignet erwiesen. Für eine Zerkleinerung von ganzen Profilen war der für die Nachzerkleinerung verwendete Labor-Granulator aufgrund seiner Werkzeuggeometrien und seiner maximalen Leistung von 7,5 kW nicht geeignet. Basierend auf den vorangegangenen Un-

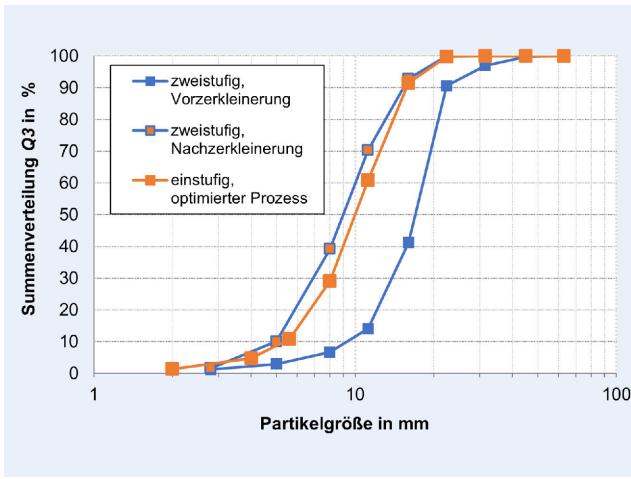


Bild 3 Ergebnisse der Siebanalysen zur Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerungsprodukte in Abhängigkeit der Zerkleinerungsbedingungen. Grafik: IART, TU Bergakademie Freiberg

tersuchungen erfolgten daher die Berechnung und Anpassung der Maschinenparameter für eine Einwellen-Radialschlitz-Rotorschere (maximale Leistung 110 kW, Bild 2 (c)). Dies betraf die Werkzeuggeometrien, Rostweiten und Spalteinstellung für die Profile, wodurch das Einzugsverhalten verbessert und die gewünschten Partikelgrößen und -formen mit einem einstufigen Zerkleinerungsvorgang erzielt werden konnten. Der so erzeugte mittlere Partikeldurchmesser betrug ohne notwendige Nachzerkleinerung 10 mm, Bild 3.

Der Feingutanteil (Partikel < 2 mm) lag bei 1,3 % und halbierte sich gegenüber dem zweistufigen Prozess. Die Partikel wiesen die gewünschte plattierte Partikelform bei einem Aspektverhältnis (Breite zu Länge) von 1 zu 2 auf, Bild 2 (d). Der spezifische Energiebedarf für die Zerkleinerung, der über eine elektrische Leistungsmessung ermittelt wurde, reduzierte sich von 55 kWh/t für den zweistufigen Prozess auf 22 kWh/t für den einstufigen Prozess.

Die erhaltenen Rezyklatpartikel wurden danach zunächst zu Pressbolzen und anschließend erneut zu Strangpressprofilen verarbeitet und dabei auf ihre Verarbeitungseigenschaften geprüft

(Kapitel 3.2). In weiteren Zyklen wurden die Strangpressprofile am IART wiederholt zerkleinert, ohne eine signifikante Veränderung des Zerkleinerungsverhaltens zu beobachten. Für das Verpressen der Rezyklate wurden circa 61,5 kWh/t benötigt [19]. In Summe ergab sich für die Herstellung der Pressbolzen ein Gesamtbetriebsbedarf von circa 83,5 kWh/t. Hier besteht weiteres Optimierungspotenzial, da die verfügbare und zum Verpressen verwendete hydraulische Presse für diesen Anwendungsfall überdimensioniert war.

Voraussetzung für das Direktrecycling von Aluminium ist die Bereitstellung und Verarbeitung von legierungssortenreinen Aluminiumschrotten, um definierte Sekundäreruminiumprodukte herstellen zu können. Derzeit existieren eine Vielzahl an Aluminiumlegierungen, welche auf die jeweiligen Formgebungsverfahren und Anwendungen zugeschnitten sind. Daher erfolgte am IART begleitend die Qualitätssicherung der Schrotte über eine Legierungsdetektion mittels Laser-Induced-Breakdown-Spectroscopy (LIBS)-Analyse. Dabei wurden die Legierungen auch für kleine Partikelgrößen sicher erkannt. Die Technik kann als Inline-Analyse integriert werden und so die Qualitätsanforderungen an das Rezyklat absichern.

3.2 Rezyklatbasiertes Strangpressen

Unter Verwendung der Rezyklatpartikel aus dem Zerkleinerungsprozess erfolgte danach die Herstellung der Aluminiumprofile des Demonstrators im Strangpressverfahren, Bild 4 (b).

Hier kann durch die direkte Wiederverwertung der Rezyklate aus Aluminium eine deutliche Reduktion des Energiebedarfs erzielt werden [20]. Allwood *et al.* belegen dieses Potenzial mit ihren Untersuchungen [21]. So konnte am Beispiel einer PIR-Route (Strangpressen mit spanbasierten Pressbolzen) im Vergleich zum konventionellen Recycling von Aluminiumspänen eine Reduktion des Energiebedarfs um circa 50 % und der Treibhausgasemissionen um 55 % bei der Herstellung von Aluminiumprofilen nachgewiesen werden [19, 21].

Diese direkte Verwendung von Rezyklaten ohne Einschmelzschritt führt zu zusätzlichen Herausforderungen bei der Bauteilfertigung, da vorhandene Prozessketten angepasst werden müssen und neue Prozessparameter einen Einfluss auf den Prozesserfolg

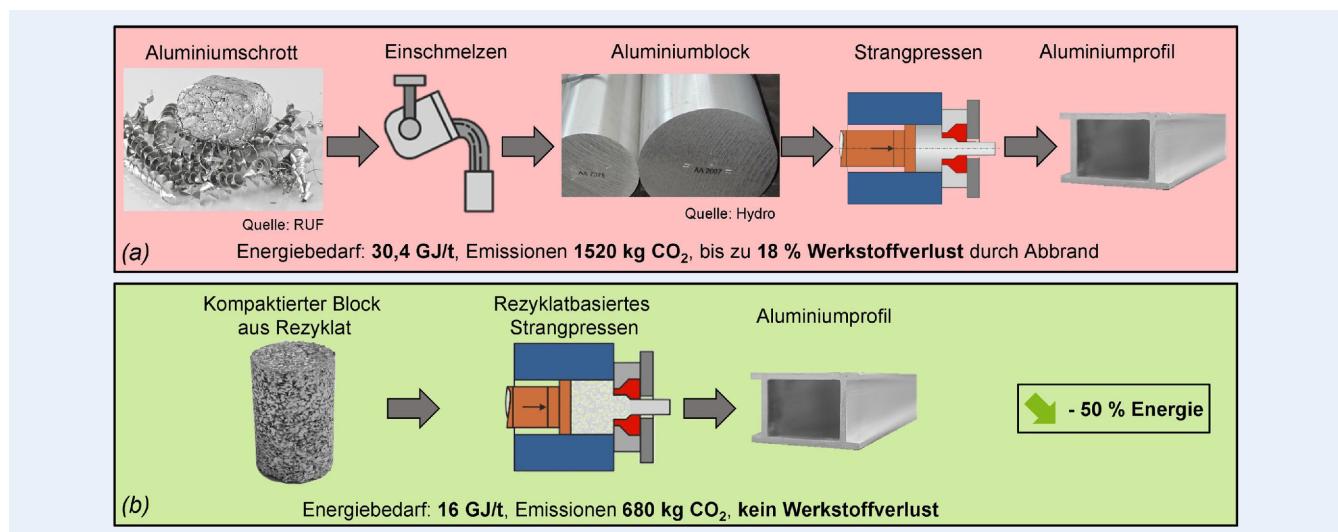


Bild 4 Vergleich der Prozessketten: (a) konventionelles und (b) rezyklatbasiertes Aluminiumrecycling [19, 21, 22]. Grafik: IUL, TU Dortmund

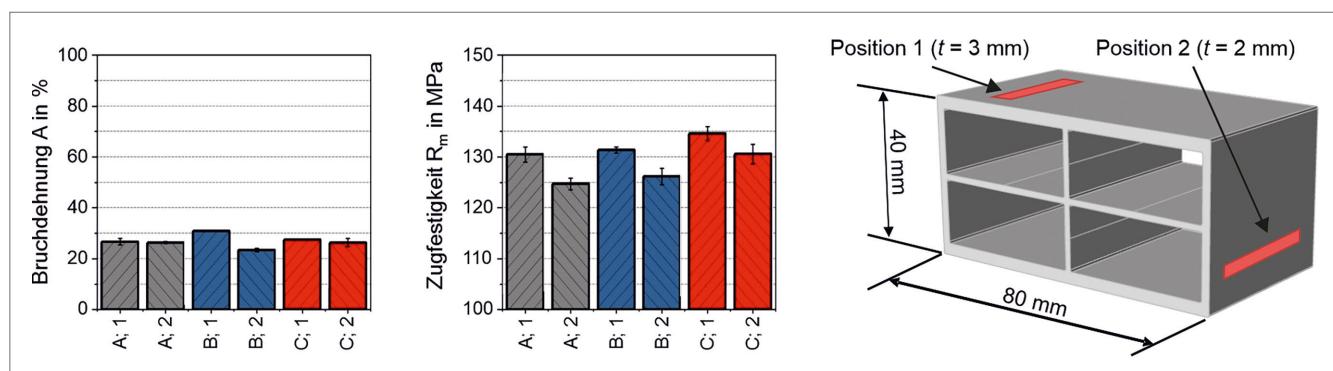


Bild 5 Charakteristische Werte aus dem Zugversuch, ermittelt an Prüfkörpern basierend auf Frässpänen (A), Schredderrezyklat (B) und Gussmaterial (C). Entnahmepositionen der Materialproben entsprechend 3D-Darstellung. Parameter Pressbolzen: KSS-benetzte Rezyklate, $\rho_{rel, Billet} = 71\% \pm 2\%$; Prozessparameter Strangpressen: $T_{Billet} = 550^\circ\text{C}$, $t_h = 2\text{ h}$, $v_{Ram} = 1\text{ mm/s}$ (nach [28]). Grafik: IUL, TU Dortmund

und die Qualität der hergestellten Produkte haben [22]. Hinzu kommt, dass die einzelnen Partikel im Rezyklat Oxidschichten aufweisen, die ein Verschweißen untereinander während des Strangpressprozesses erschweren. Diese müssen daher während der Umformung durch hohe Spannungen und hydrostatische Drücke aufgebrochen werden, um eine Verschweißung zu gewährleisten [23]. In numerischen Untersuchungen mit begleitenden Experimenten konnte gezeigt werden, dass ein modifiziertes Schweißnahtkriterium in Anlehnung an das Akeret-Kriterium die Qualität der Verschweißung realitätsnah vorhersagen kann [24]. Weitere Untersuchungen zum rezyklatbasierten Strangpressen in [25–27] zeigen, dass die Werkzeuggeometrie und das Pressverhältnis die Qualität der hergestellten Profile wesentlich beeinflussen. Die Ergebnisse weisen nach, dass Equal-Channel-Angular Pressing-Werkzeuge (ECAP-Werkzeuge) und Werkzeuge mit einem hohen Pressverhältnis aufgrund der daraus resultierenden höheren Dehnungen zu besseren Ergebnissen führen.

In weiteren Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Oberflächenqualität nach dem Strangpressen maßgeblich von der Stempelgeschwindigkeit und der Verunreinigung des Rezyklates beeinflusst wird. Es wurde festgestellt, dass eine niedrige Stempelgeschwindigkeit die Bildung von Lufteinschlüssen an der Profiloberfläche stark reduziert. Die Verwendung von Rezyklatpartikeln, die mit Kühlsmierstoffen (KSS) benetzt wurden, reduziert ebenso das Auftreten von Lufteinschlüssen. Der Grund kann in der höheren relativen Dichte der kompaktierten Pressbolzen (Quotient aus Pressbolzen- und Grundwerkstoff-Dichte) gesehen werden, welche durch die Verwendung von mit KSS-benetzten Partikeln möglich wird. Lufteinschlüsse können zudem in den gefertigten Profilen durch eine Entlüftungsstrategie während des Anpressvorgangs im Strangpressprozess signifikant reduziert werden.

Beim Einsatz von Rezyklaten, die nicht mit KSS benetzt wurden, kann in Zugversuchen eine höhere Zugfestigkeit, aber eine geringere Bruchdehnung ermittelt werden. Eine niedrigere Bolzentemperatur führt wiederum zu einer niedrigeren Zugfestigkeit.

Bei der konventionellen Route erfolgt vor dem Strangpressen üblicherweise ein Homogenisierungsschritt bei 500–600 °C, um ein homogenes Korngefüge mit gleichmäßig verteilten Legierungselementen einzustellen und so das Umformvermögen zu verbessern. Bei der direkten Verarbeitung von Rezyklat werden dabei zudem organische Verunreinigungen wie Kunststoff- und Klebstoffreste entfernt. In den Untersuchungen führte eine längere Homogenisierungszeit zu einer gleichmäßigeren Verteilung der

mechanischen Eigenschaften über den Profilquerschnitt. Zugleich verbesserten sich die mechanischen Eigenschaften hinsichtlich der Streckgrenze, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung (vergleiche [28]). Die besten Ergebnisse hinsichtlich der mechanischen Kennwerte sowie der Oberflächenqualität wurde für Bolzen mit einer hohen relativen Dichte ($\rho_{rel} = 70\%$), einer Homogenisierungszeit $t_h = 2\text{ h}$, einer Bolzentemperatur $T_{Billet} = 550^\circ\text{C}$ und einer Stempelgeschwindigkeit $v_{Ram} = 1\text{ mm/s}$ erzielt. **Bild 5** zeigt, dass bei diesen Prozessparametern die rezyklatbasierten Materialproben mindestens 94,5 % der Zugfestigkeit der gussbasierten Proben erreichen [28]. Insgesamt können mit der Direktverarbeitung Kennwerte erreicht werden, welche mit denen der konventionellen Route vergleichbar sind.

3.3 Funktionalisieren

Die rezyklatbasierten Profile aus dem Strangpressprozess wurden im nächsten Schritt zur Umsetzung kosten- und materialeffizienter Leichtbaulösungen durch geeignete Fertigungsverfahren funktionalisiert. So lassen sich die Profile gezielt mit zusätzlichen Eigenschaften versehen, um deren Leistungsfähigkeit und Anwendungsbreite zu erhöhen.

Das drahtbasierte Laserauftragschweißen erlaubt die Funktionalisierung der Strangpressprofile mit metallischen Strukturen. Unter Verwendung des Drahtmaterials EN AW-5087 wurden Formschluselemente (FSE) aus Aluminium auf die Strangpressprofile additiv appliziert. Die Technologie zeichnete sich in den Untersuchungen durch hohe erreichbare Auftragsraten und einen gezielt steuerbaren Energieeintrag aus. Sie besitzt somit großes Potenzial zur ressourceneffizienten, endkonturnahen Fertigung geometrisch komplexer Strukturen. Die erzielten prozesstechnischen Erkenntnisse umfassen die reproduzierbare Produktion auf Basis der Analyse von Prozessparametereinflüssen [29], die Entwicklung von Simulationsmodellen [30] sowie Konzepte für die sensorgestützte Prozessregelung [31].

Für Hybridstrukturen, die Metalle und Kunststoffe gewinnbringend kombinieren, wurde die Funktionalisierung der Strangpressprofile durch Kunststoffelemente untersucht. Dafür wurde die „Robin“-Technologie genutzt, die ein robotergestütztes Spritzgießen ermöglicht [32]. Das „Robin“-System besteht aus einer gewichtsoptimierten Schließeinheit und einem Spritzgussaggregat mit kolbenbasierter Spritzeinheit. Durch sein geringes Gewicht von circa 150 kg kann dieses System an Industrieroboter montiert und von diesen mitsamt dem Spritzgusswerkzeug zum

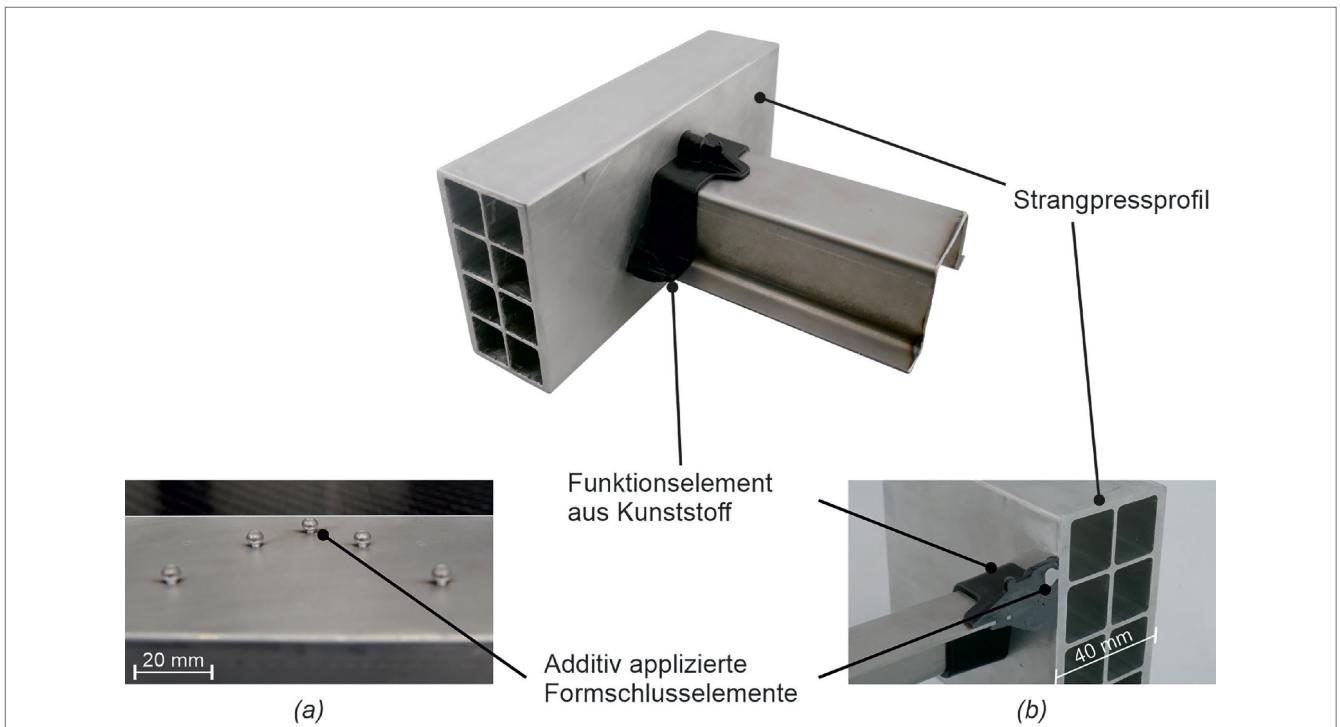


Bild 6 Demonstrator-Substruktur für den Montagespritzguss: (a) metallische Formschlusselemente (FSE) auf der Profiloberfläche, (b) Querschnitt des angespritzten Profils mit FSE. Foto: ILK, TU Dresden

Strangpressprofil bewegen werden, um lokal Kunststoffelemente anzuspritzen, **Bild 6**.

Diese Technologie erlaubt eine Erhöhung der Ressourceneffizienz durch die insgesamt geringen Investitionskosten und bedarfsgerechte, kleinvolumige Werkzeuge. Zudem kann die Technologie flexibel auch in kontinuierliche Fertigungslinien eingebunden werden.

Eine Herausforderung stellt hier die Fügeverbindung zwischen Substrat (Al-Strangpressprofil) und Fügepartner (Funktionselement aus PA 6 GF30) dar, insbesondere wenn kein Umspritzen des kompletten Profils möglich ist. Für derartige Anwendungsfälle wurden alternative Fügeoptionen bewertet. Für stoffschlüssige Verbindungen wurden Haftvermittlerfolien (Vestamelt Hylink & P1) auf das Al-Substrat aufgebracht und dann der Fügepartner in Form einer Kunststoff-Rippe angespritzt. Mit den Abmessungen des Rippenfußes von 7 mm x 36 mm ergab sich eine Fügefäche von 252 mm². Unter Zugbelastung senkrecht zur Fügefäche (Kopfzugversuch) konnten Maximalkräfte von 1,73 kN ($\square \sigma_z \approx 6,9 \text{ MPa}$) übertragen werden.

Da stoffschlüssige Verbindungen beim Recycling nur mit erhöhtem Aufwand sortenrein trennbar sind, wurden für eine verbesserte Wiederverwertbarkeit formschlüssige Fügevarianten untersucht. Das im Blechbereich häufig angewendete Hinterspritzen von Durchbrüchen birgt für Hohlprofile große Herausforderungen in der Werkzeug- und Prozessgestaltung und wurde daher nicht verfolgt. Vielmehr wurden neben Oberflächenstrukturiierungen (Strahlen, Hobeln, Nadeln) vor allem additiv aufgebrachte FSE untersucht. Hierfür wurden pinförmige FSE mit kugelförmigem Kopf ($h = 4,7 \text{ mm}$, $d_{\text{Schaft}} = 3,0 \text{ mm}$, $d_{\text{Kopf}} = 5,2 \text{ mm}$) per Laserauftragschweißen reproduzierbar auf den Strangpressprofilen appliziert (Bild 6 (a)). Für Kopfzugversuche wurden auf dem Substrat drei derartige FSE linienförmig (Abstand 10 mm) angeordnet und mit Kunststoffrippen umspritzt,

Bild 6 (b). Bereits diese einfache Gestaltungsvariante erzielte Maximalkräfte, welche mit der stoffschlüssigen Fügevariante vergleichbar sind ($F_{z,\max} = 1,71 \text{ kN}$). Da das Versagen durch Ausknöpfen des FSE ausgelöst wurde, lassen die Erhöhung der Restwanddicken des Kunststoffs im Bereich des FSE-Kopfes und die flächige Verteilung der FSE höhere Tragfähigkeiten erwarten. Prozesseitig können derartige Fügeverbindungen durch eine konstruktive Anpassung der Werkzeugkavität erreicht werden. Für die FSE werden Aussparungen vorgesehen, die während des Spritzgießens die FSE aufnehmen und deren Umspritzen mit Kunststoff ermöglichen.

Im Hinblick auf die Kreislaufführung von Kunststoffen, gerade bei Multi-Material-Bauweisen mit unterschiedlichen Polymeren, sind das Erkennen und Sortieren wesentliche Herausforderungen. Hierfür bietet das Tracer-Based-Sorting (TBS) einen innovativen Lösungsansatz, bei dem bereits während der Bauteilherstellung fluoreszierende anorganische Partikel (Tracer) in den Werkstoff eingebracht oder auf das Bauteil appliziert werden [33, 34].

Voraussetzung für die Anwendbarkeit materialintegrierter Tracer sind Werkstoffe, die sowohl das für die Fluoreszenzanregung genutzte Licht als auch das von den Tracern emittierte Licht nicht vollständig absorbieren. Während des Recyclingprozesses erkennen optische Sensoren die Tracer beziehungsweise deren bauteilspezifisches Verteilungsmuster. Als zusätzliche Sortiereigenschaft unterstützen die Tracer so eine sichere Sortierung und damit die Umsetzung von geschlossenen Stoffkreisläufen.

Zusammen mit der Polysecure GmbH wurden drei PA-6-Rezepturen mit unterschiedlichem Gesamttraceranteil TA (Mischung aus drei Tracern im Verhältnis 1:1:1) und Fasermassenanteil ψ angefertigt (R1: $\psi = 0\%$, TA = 10 ppm; R2: $\psi = 25\%$, TA = 5 ppm und R3: $\psi = 25\%$, TA = 10 ppm). Diese wiesen im Ausgangszustand eine gelblich-weiße Färbung auf. Sie wurden fünf Zerkleinerungs- und Verarbeitungszyklen (V1 bis V5)

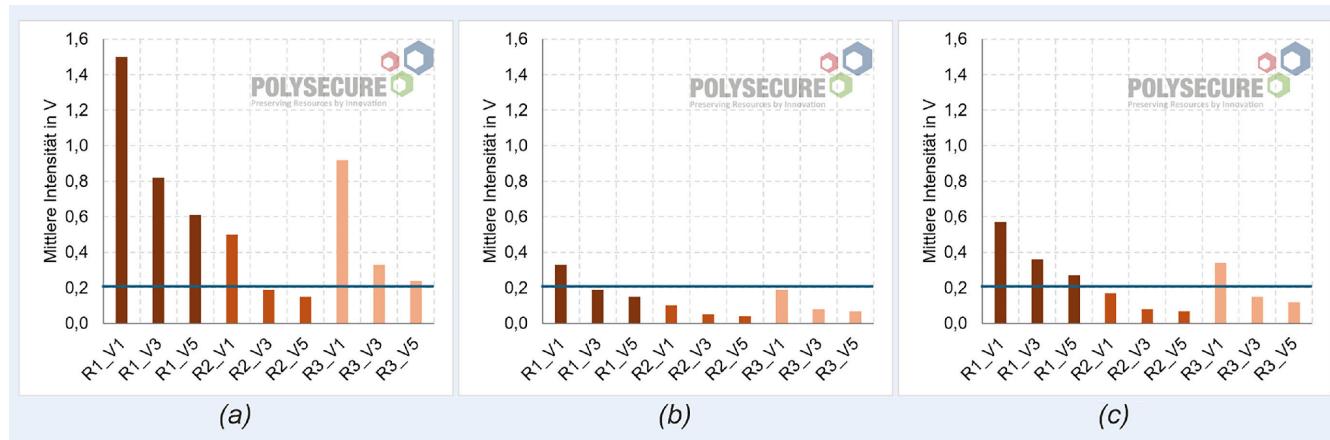


Bild 7 Gemessene mittlere Fluoreszenzemission für die Rezepturen R1, R2 und R3 nach dem ersten (V1), dritten (V3) und fünften (V5) Verarbeitungsschritt: (a) grünes Signal, (b) rotes Signal und (c) infrarotes Signal. Grafik: Polysecure GmbH

unterworfen (Spritzguss: „Robin“-System, Zerkleinerung: Wanner Granulator C-Series) und zerstörungsfrei sowie zerstörend experimentell analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass die Tracer keine Verschlechterungen der mechanischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften hervorrufen. Wie zu erwarten zeigten Rezepturen mit höheren Tracer-Anteilen (R1, R3) eine stärkere Fluoreszenzemission, Rezepturen mit Glasfaseranteil (R2, R3) emittierten schwächer, **Bild 7**.

Gemäß den Erfahrungen der Polysecure GmbH ist ein Signalfwert von 0,2 V für das Hochgeschwindigkeits-Sortieren ausreichend (Hinweis: Ein Signal von 0,2 V ist einen Faktor 10 höher als das Rauschen und damit eindeutig detektierbar). Somit erlaubten alle Rezepturen vor der ersten Verarbeitung die Detektion der Tracer und damit der Kunststoffe auch in herausfordernden Anwendungen. Infolge der Zyklierung veränderten sich die Fluoreszenzeigenschaften der Tracer nicht, jedoch verfärbte sich das Polyamid alterungsbedingt hin zu einem leicht grauen Farbton. In der Folge sank die Fluoreszenzemission für die Rezeptur mit geringem Tracer-Anteil (R2) unter die Detektionsschwelle von 0,2 V. Auch zeigte sich, dass wegen der Eigenfarbe des Polyamids Tracer im grünen Farbspektrum besser detektierbar waren als die im roten oder im infraroten Bereich. Auf Basis der Ergebnisse erscheint die Verwendung eines Anteils von 7 ppm pro Tracer (TA: 21 ppm) für die dauerhaft sichere Erkennung ausreichend. Für diesen erhöhten TA sind die Auswirkungen auf die mechanischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften in zukünftigen Untersuchungen zu prüfen.

3.4 Fügen & Entfügen

Die funktionalisierten, rezyklatbasierten Profile der vorangegangenen Prozessschritte wurden zuletzt durch geeignete Fügeverfahren mit anwendungstypischen Boden- (CR330Y590T-DP: 1,5 mm) und Deckblechen (EN AW-6060: 2,0 mm) aus einer Primärlegierung gefügt. Die etwaige Werkstoffinhomogenität der Rezyklate ist dabei eine signifikante Herausforderung für die Fügetechnik [35]. So kann der Fügeprozess durch Kontaminationen oder ein verändertes Gefüge der Sekundärwerkstoffe negativ beeinflusst werden [36]. Anhand der funktionalisierten Strangpressprofile wurde daher der Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf den Fügeprozess und die relevanten Verbindungseigenschaften untersucht. Fokussiert wurde ein Hybridfügeprozess aus

fließlochformendem Schrauben (FLS) und strukturellem Kleben. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Benetzbarkeit der Werkstoffe wurde ein Laserreinigungsverfahren zur Vorbereitung der Bauteiloberflächen der Strangpressprofile sowie der Boden- und Deckbleche qualifiziert und angewendet. Die Laserreinigung ermöglicht eine Ablation der organischen und anorganischen Kontaminationen auf den Fügeflächen, ohne den Grundwerkstoff zu schädigen und stellt ein industrienahes, automatisierbares Oberflächenvorbehandlungsverfahren dar.

Durch elementare und hybride Setzversuche an gewalztem Referenz- sowie strang gepresstem Primär- und Sekundär aluminium wurde die Übertragbarkeit von konventionellen Parameterräumen auf den Fügeprozess der rezyklatbasierten Strangpressprofile nachgewiesen. In **Bild 8** sind eine Elementar- und eine Hybrid-Fügeverbindung unter Verwendung der festgelegten Prozessparameter im Querschliff dargestellt.

Die Fügeversuche zeigten, dass keine erneute Parametrierung infolge der Verwendung von Sekundärwerkstoffen erforderlich war. Somit konnte eine hohe Prozessrobustheit für das ausgewählte Hybridfügeverfahren nachgewiesen werden.

Die Tragfähigkeiten und das Bruchverhalten der elementaren und hybriden Fügeverbindungen wurden im Vergleich zu Verbindungen aus branchenüblich eingesetzten Werkstoffen aus konventionellen Walz- und Strangpressprozessen durch Scherzugprüfungen nach DVS/EFB 3480-1 ermittelt und sind in **Bild 9** dargestellt.

In den Kraft-Weg-Verläufen wird sowohl eine Abnahme der maximalen Scherzugfestigkeit zum Versagenszeitpunkt der Klebschicht als auch ein früheres Ausknöpfen des FLS-Elementes unter Verwendung der rezyklatbasierten Strangpressprofile deutlich. Kombiniert wird somit eine reduzierte Tragfähigkeit und eine geringere Energieaufnahme der Fügeverbindung im Belastungsfall erreicht. Versuche mit quasistatischer sowie schlagartiger Belastung erlaubten weiterhin, den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit differenziert zu betrachten. Diese zeigte im Vergleich zur Werkstoffauswahl einen geringen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Fügeverbindung.

Im klebtechnischen Fügeprozess wurden die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung charakterisiert. Durch das Hybridfügeverfahren konnten ausreichend dichte Verbindungen unter Verwendung der rezyklatbasierten Strangpressprofile realisiert und typische Anforderungen an eine Fügeverbindung erfüllt

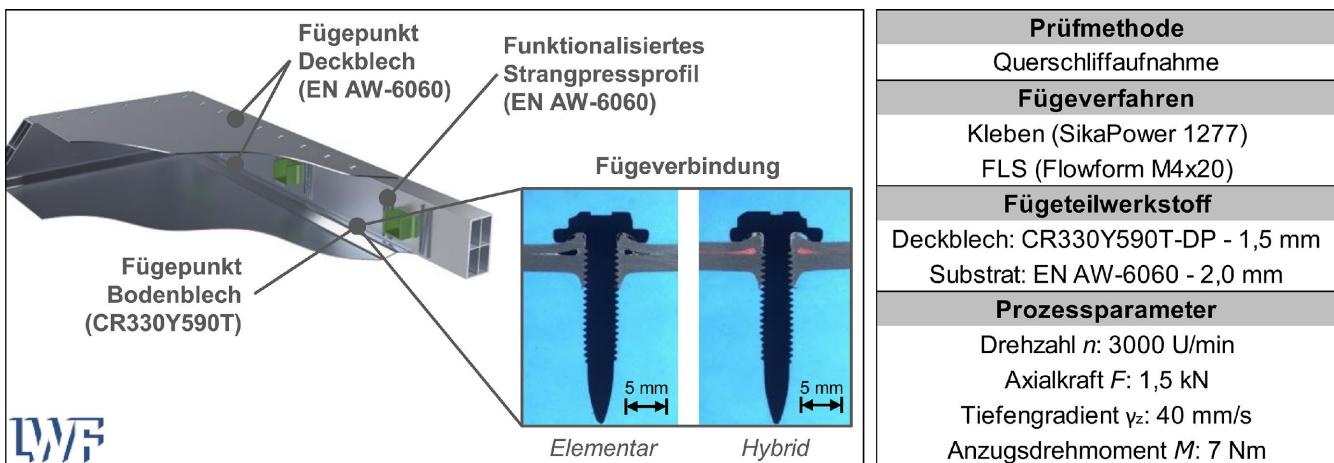


Bild 8 Fügepunkte, Werkstoffe und Querschliffe einer elementar und einer hybridgefügten Fügeverbindung für die definierten Prozessparameter im untersuchten Leichtbau-Hybriddemonstrator. Grafik: LWF, Universität Paderborn

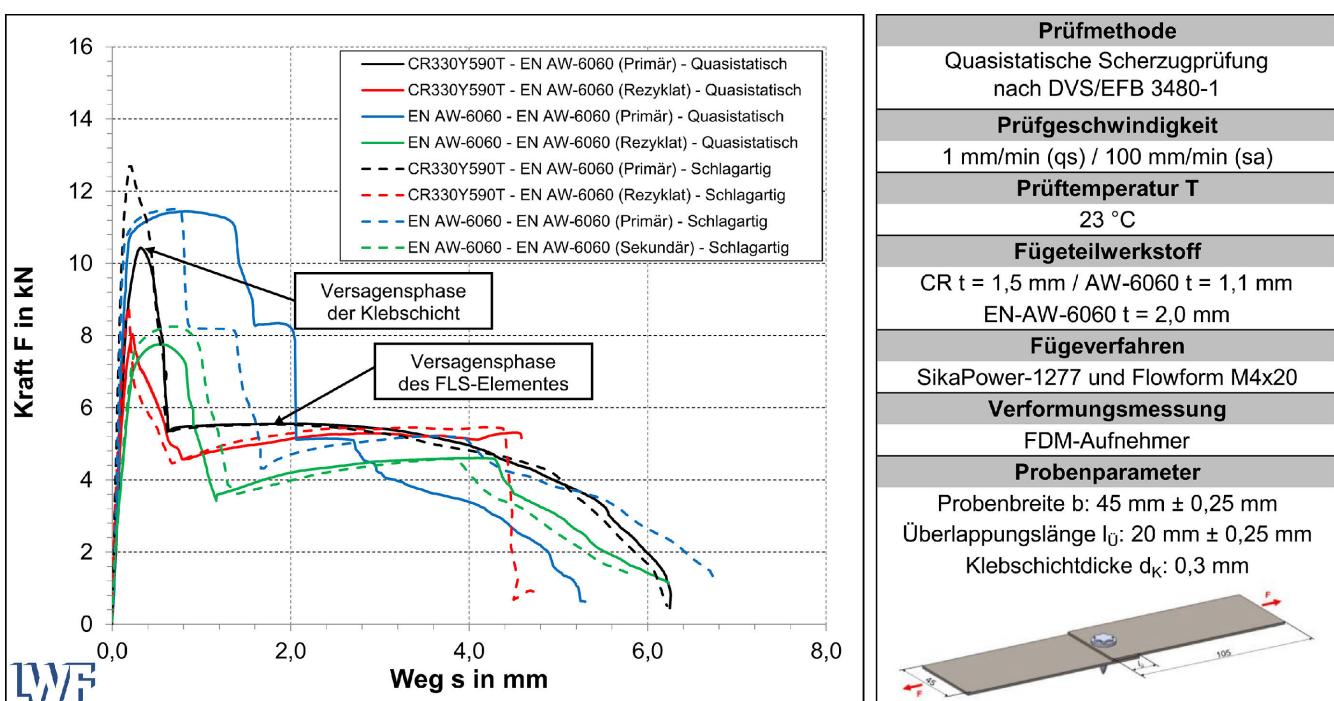


Bild 9 Kraft-Weg-Verläufe von Hybridverbindungen unter Scherzugbelastung für unterschiedliche Werkstoffkombinationen und Belastungsgeschwindigkeiten. Grafik: LWF, Universität Paderborn

werden. Innerhalb der Prozesskette wurde ein zuverlässiger Hybridfügeprozess erzielt und ein Prozessfenster zur Verarbeitung des Sekundärwerkstoffes identifiziert.

Die Trennbarkeit von Komponenten im Reparatur- oder Recyclingfall ist eine weitere Herausforderung für Fügetechnologien. In der Prozesskette wurden geeignete Entfügestrategien und -prozesse für den gewählten Hybridfügeprozess abgeleitet und auf die untersuchte Leichtbau-Hybridstruktur angewendet. So wird eine ausreichende Demontagefähigkeit der Verbindung von Strangpressprofil und Blech im Reparaturfall gewährleistet.

Die FLS-Elemente können in dem definierten Hybridfügeverfahren zunächst mechanisch gelöst und dem Stoffstrom sortenrein zugeführt werden. Die Verwendung von strukturellen

Klebstoffen erschwert hingegen ein effizientes Entfügen der Fügepartner bei Raumtemperatur. Daher wurde der Ansatz nach Ditter angewendet und die Klebschichten bis zur Glasübergangstemperatur der enthaltenen zähelastifizierenden Partikel (etwa -67 °C) abgekühlt [37]. Dies erlaubte eine kraftarme Spaltung der Klebverbindungen im Entfügeprozess ohne Schädigung der Strangpressprofile, eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der R-Strategien Repair, Refurbish, Remanufacture oder Repurpose. Im Kontext der hier diskutierten Untersuchungen wurden die rezyklatbasierten Strangpressprofile mit den anhaftenden Kunststoff- und Klebstoffresten (Kapitel 3.2 und 3.3) am Ende der Prozesskette dem Recyclingschritt übergeben und damit in den Stoffkreislauf zurückgeführt.

4 Zusammenfassung

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf technisch-technologischen Untersuchungen zur nachhaltigen Fertigung und Kreislaufführung von hybriden Leichtbaustrukturen. Auf Basis von Pilotversuchen wurden folgende Ergebnisse und Erkenntnisse erzielt:

- Sofern legierungsortenreine Schrotte in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, kann die Direktverarbeitung von Aluminiumrezyklat einen signifikanten Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten.
- Die Inline-Qualitätssicherung für sortenreine Rezyklate kann mittels des LIBS-Verfahrens (Metall) oder auf Basis von Tracerpartikeln (Kunststoff) erfolgen.
- Zur Einführung in den Markt bedarf es gesetzlicher Regelungen zur Beendigung der Abfalleigenschaft und zur Gewährleistung von Qualitätsstandards.
- Die Verwendung von Rezyklatpartikeln im Strangpressverfahren ermöglicht eine deutliche Reduktion des Energiebedarfs (bis zu 50 %) und der Treibhausgasemissionen (bis zu 55 %) im Vergleich zum konventionellen Recycling.
- Bei der Direktverarbeitung von Aluminiumrezyklaten im Strangpressprozess haben Werkzeuggeometrie, Stempelgeschwindigkeit, Bolzentemperatur und Rezyklatverunreinigungen einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächenqualität des Produkts.
- Die lokale Funktionalisierung metallischer Halbzeuge kann über Verfahren wie das Laserauftragschweißen (Metall) oder den mobilen Spritzguss (Kunststoff) effizient und ressourcenschonend erfolgen.
- Ein Hybridfügeprozess kann mit einer hohen Prozessrobustheit auch ohne eine erneute Parametrierung für rezyklatbasierte Strangpressprofile realisiert werden.
- Das Entfügen der hybridgefügten Komponenten kann effizient durchgeführt werden und ermöglicht so das Rückführen der Werkstoffe in den Stoffkreislauf.

Die untersuchten Technologien stehen direkt für die Fertigung und Kreislaufführung entsprechender Hybridstrukturen zur Verfügung.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Ressourceneffizienz bestehender Prozessrouten mit neuartigen Denkansätzen und technologischen Lösungen deutlich gesteigert werden kann.

FÖRDERHINWEIS

Die präsentierten Ergebnisse sind im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts „KORESIL“ entstanden. Koresil wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ (Förderkennzeichen 02P20Z000 bis 02P20Z004) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt der Polysecure GmbH und ihrem Mitarbeiter Dr. Christof Strohhöfer für die fachliche und technische Unterstützung bei den Versuchen mit Tracerpartikeln.

LITERATUR

- [1] Chang, M.; Ong, S. K.; Nee, A.: Approaches and Challenges in Product Disassembly Planning for Sustainability. *Procedia CIRP* 60 (2017), pp. 506–511
- [2] Bader, B.; Türck, E.; Vietor, T.: Multi material design. A current overview of the used potential in automotive industries. In: Dröder, K.; Vietor, T. (eds): *Technologies for economical and functional lightweight design. Zukunftstechnologien für den multifunktionalen Leichtbau*. Heidelberg: Springer Vieweg, pp. 3–13
- [3] König, K.; Mathieu, J.; Vielhaber, M.: Resource conservation by means of lightweight design and design for circularity—A concept for decision making in the early phase of product development. *Resources, Conservation and Recycling* 201 (2024), #107331
- [4] Germani, M.; Mandolini, M.; Marconi, M. et al.: An Approach to Analytically Evaluate the Product Disassemblability during the Design Process. *Procedia CIRP* 21 (2014), pp. 336–341
- [5] European Environment Agency: Circular economy in Europe. Developing the knowledge base. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2016
- [6] Kupfer, R.; Schilling, L.; Spitzer, S. et al.: Neutral lightweight engineering: a holistic approach towards sustainability driven engineering. *Discover Sustainability* 3 (2022), #17
- [7] El Mehedi, M.; Buonadonna, P.; Carta, M. et al.: Sustainability Study of a New Solid-State Aluminum Chips Recycling Process: A Life Cycle Assessment Approach. *Sustainability* 15 (2023) 14, #11434
- [8] Jacobs, C.; Soulliére, K.; Sawyer-Beaulieu, S. et al.: Challenges to the Circular Economy: Recovering Wastes from Simple versus Complex Products. *Sustainability* 14 (2022) 5, #2576
- [9] Banea, M. D.: Debonding on Demand of Adhesively Bonded Joints. In: *Progress in Adhesion and Adhesives*. Hoboken, New Jersey/USA: John Wiley & Sons 2020, pp. 33–50
- [10] Schmitz, C. (ed.): *Handbook of aluminium recycling. Mechanical preparation, metallurgical processing, heat treatment*. Essen: Vulkan-Verlag 2014
- [11] Hübner, T.; Gumiński, A.; Rouyrre, E. et al.: Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Projektnummer: SiSDE17915). Stand: 2019: Internet: www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2b-executive-summary.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am 08.10.2025
- [12] Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.): Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. Stand: 2024. Internet: www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Daten-und-Fakten-2024_RZ-Web.pdf. Zugriff am 08.10.2025
- [13] The International Aluminium Institute (ed.): *Aluminium Recycling Factsheet*. Stand: 2020. Internet: international-aluminium.org/wp-content/uploads/2024/03/wa_factsheet_final.pdf. Zugriff am 08.10.2025
- [14] Grayson, J.: Reducing Melt Loss and Dross Generation. *Light Metal Age*, pp. 32–35. Stand: 23.02.2017. Internet: www.lightmetalage.com/news/industry-news/casthouse/article-reducing-melt-loss-dross-generation/. Zugriff am 08.10.2025
- [15] Tekkaya, A. E.; Güley, V.; Haase, M. et al.: Hot Extrusion of Aluminum Chips. In: Weiland, H.; Rollett, A. D.; Cassada, W. A. (Edit.): ICAA13 Pittsburgh. *Proceedings of the 13th International Conference on Aluminum Alloys*. Cham: Springer 2016, pp. 1559–1573
- [16] Altharan, Y. M.; Shamsudin, S.; Al-Alimi, S. et al.: A review on solid-state recycling of aluminum machining chips and their morphology effect on recycled part quality. *Helix* 10 (2024) 14, #e34433
- [17] Woldt, D.; Schubert, G.; Jäckel, H.-G.: Size reduction by means of low-speed rotary shears. *International Journal of Mineral Processing* 74 (2004) Supplement, pp. S405–S415
- [18] Woldt, D.: Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotscherben und -reißen. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2004
- [19] Schulze, A.: Bleche aus stranggepressten Aluminiumspänen. Dissertation, TU Dortmund, 2022
- [20] Duflou, J. R.; Tekkaya, A. E.; Haase, M. et al.: Environmental assessment of solid state recycling routes for aluminium alloys:

- Can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling? CIRP Annals 64 (2015) 1, pp. 37–40
- [21] Allwood, J. M.; Cullen, J. M.; Cooper, D. R. et al.: Conserving our metal energy. Avoiding melting steel and aluminium scrap to save energy and carbon. Stand: 2010. Internet: www.uselessgroup.org/files/well_metal2050-conserving-our-metal-energy-sept-2010-web.pdf. Zugriff am 08.10.2025
- [22] Güley, V.: Recycling of aluminum chips by hot extrusion. Dissertation, TU Dortmund, 2013
- [23] Tekkaya, A. E.; Schikorra, M.; Becker, D. et al.: Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips. Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 7, pp. 3343–3350
- [24] Akeret, R.: Strangpressnähte in Aluminiumprofilen. Teil I: Technologie. Aluminium 68 (1992), S. 877–887
- [25] Haase, M.; Ben Khalifa, N.; Tekkaya, A. E. et al.: Improving mechanical properties of chip-based aluminum extrudates by integrated extrusion and equal channel angular pressing (iECAP). Materials Science and Engineering: A 539 (2012), pp. 194–204
- [26] Güley, V.; Güzel, A.; Jäger, A. et al.: Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion. Materials Science and Engineering: A 574 (2013), pp. 163–175
- [27] Misiolek, W. Z.; Haase, M.; Ben Khalifa, N. et al.: High quality extrudates from aluminum chips by new billet compaction and deformation routes. CIRP Annals 61 (2012) 1, pp. 239–242
- [28] Selvaggio, A.; Tekkaya, A. E.: Identification of factors influencing the quality of extruded profiles using aluminum Recyclate-Based billets. Manufacturing Letters 35 (2023), pp. 1326–1335
- [29] Zapata, A.; Bernauer, C.; Celba, M. et al.: Studies on the Use of Laser Directed Energy Deposition for the Additive Manufacturing of Lightweight Parts. Lasers in Manufacturing and Materials Processing 11 (2024) 1, pp. 109–124
- [30] Zapata, A.; Zhao, X. F.; Li, S. et al.: Three-dimensional annular heat source for the thermal simulation of coaxial laser metal deposition with wire. Journal of Laser Applications 35 (2023) 1, #012020
- [31] Bernauer, C.; Zapata, A.; Zaeh, M. F.: Toward defect-free components in laser metal deposition with coaxial wire feeding through closed-loop control of the melt pool temperature. Journal of Laser Applications 34 (2022) 4, #042044
- [32] Stegelmann, M.; Krah, M.; Al-Sheyyab, A. et al.: Wie sich durch das mobile Spritzgießen neue Chancen in der Kabelkonfektionierung und der Montagetechnik ergeben. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): PIAE EUROPE 2025. VDI Verlag 2025, S. 629–638
- [33] Hoffeins, P.; Spitzer, S.; Gude, M. et al.: Fluorescent Marking of Fiber Reinforced Polymer for Component and Material Identification in the Context of Material Flow Canalization. Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials, ECCM20, pp. 14–21
- [34] Howard, I. A.; Busko, D.; Gao, G. et al.: Sorting plastics waste for a circular economy: Perspectives for lanthanide luminescent markers. Resources. Conservation and Recycling 205 (2024), #107557
- [35] Statistisches Bundesamt: Abfallaufkommen in Deutschland 2018 bei 417,2 Millionen Tonnen. Internet: www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html.
- Zugriff am 08.10.2025
- [36] Amberg, M.; Höhener, M.; Rupper, P. et al.: Surface modification of recycled polymers in comparison to virgin polymers using Ar/O₂ plasma etching. Plasma Processes and Polymers 19 (2022) 12, doi.org/10.1002/ppap.202200068
- [37] Ditter, J.: Methodenentwicklung zum Entfernen von Stahl-Kleverbindingen bei tiefen Temperaturen. Dissertation, Universität Paderborn, 2020
-
- Dr.-Ing. Daniel Weck**  daniel.weck@tu-dresden.de
- Dr.-Ing. Michael Müller-Pabel**  Prof. Dr.-Ing. Maik Gude  Technische Universität Dresden
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik ILK
Holbeinstr. 3, 01307 Dresden
tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ilk
- Dr.-Ing. Thomas Krampitz**  Dipl.-Ing. Christine Hecker  Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth  TU Bergakademie Freiberg
Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik IART
Lampadiusstr. 4, 09599 Freiberg
tu-freiberg.de/fakult4/iart
- Dipl.-Inform. Alessandro Selvaggio**  Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya  Technische Universität Dortmund
Institut für Umformtechnik und Leichtbau IUL
Baroper Str. 303, 44227 Dortmund
iul.mb.tu-dortmund.de
- Julian Gilich, M.Sc.**  Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut  Universität Paderborn
Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik LWF
Warburger Str. 100, 33100 Paderborn
mb.uni-paderborn.de/lwf

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)