

KOMPLEXITÄT BEHERRSCHEN

KREISLÄUFE SCHLIESSEN

Soziotechnische Systeme für ressourceneffiziente Leichtbautechnologien

The logo for KORESIL, featuring the word "KORESIL" in a bold, yellow, sans-serif font. The letter "O" is replaced by a green and black checkered sphere, resembling a ball of yarn or a complex molecular structure.

DAS INTERAKTIVE WHITEPAPER

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



Autoren

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

Dr.-Ing. Daniel Weck

Dr.-Ing. Michael Müller-Pabel

Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL), TU Dortmund

Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya

M.Sc. Joshua Grodotzki

Dipl.-Inform. Alessandro Selvaggio

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), TU München

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

M.Sc. Jan-Philipp Rammo

Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut

M.Sc. Julian Gilich

Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik (IART), TU Bergakademie Freiberg

Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth

Dr.-Ing. Thomas Krampitz

Dipl.-Ing. Christine Hecker

INHALT

Motivation und Einführung	1
Digitalisierung in Entwicklungs- & Fertigungsprozessen	5
KORESIL-Prozesskette	11
Ur- & Umformtechnik	13
Füge- und Entfügetechnologien	35
Demontage, Recycling, Stoffkreisläufe	47
Reifegradanalyse und Potentialbewertung	59
Vision 2024 & Handlungsempfehlungen	69
Literatur- und Quellenverzeichnis	73
Impressum	75

MOTIVATION



Der Multi-Material-Leichtbau zeichnet sich durch eine interdisziplinäre, werkstoff- und technologieübergreifende Denkweise aus, bei der Bauweise, Auslegung und Fertigungstechnologie ganzheitlich betrachtet und aufeinander abgestimmt werden. Dieser Ansatz ermöglicht substantielle werkstoffliche, energetische und wirtschaftliche Einsparungen, setzt aber eine Beherrschung der einzelnen Aufgabengebiete und deren Verknüpfung voraus. So wurde durch den kontinuierlichen Leichtbau-Technologietransfer in die Anwendung die vielzitierte Gewichtsspirale der Automobilindustrie angehalten und zum Teil sogar erfolgreich umgekehrt [1]. Dabei ist der durch den Leichtbau geleistete Beitrag zur Nachhaltigkeit bisher insbesondere in der Herstellungs- und der Nutzungsphase zu verorten. Bei der Transformation der Wirtschaft zu einer Circular Economy mit vollständig geschlossenen Stoffkreisläufen und zum nachhaltigen Einsatz der vorhandenen Ressourcen sind die Phasen der (Sekundär-)Rohstoffgewinnung, der kreislaufgerechten Bauteilgestaltung und der ressourcenschonenden Produktion stärker zu berücksichtigen. Für die Entwicklung und Fertigung von Multi-Material-Leichtbaustrukturen sind demnach komplexe multikriterielle Optimierungsaufgaben zu bewältigen.

Die steigenden Anforderungen im Bereich der Nachhaltigkeit werden begleitet durch eine zügig vorschreitende Digitalisierung, die unsere Arbeitswelt grundlegend verändert, gänzlich neue Industriezweige schafft, dabei aber auch bisherige Geschäftsmodelle und Berufsbilder infrage stellt. Die damit einhergehenden technologischen und gesellschaftlichen Veränderungen bieten insbesondere in den Bereichen Ressourceneffizienz und Arbeitsergonomie gleichermaßen Herausforderungen wie Potentiale. Als Beispiel sei hier die Verfügbarkeit von Fachkräften genannt. Einerseits steigen die Herausforderungen in Zeiten sich schnell wandelnder Qualifizierungsanforderungen, andererseits kann dem Fachkräftemangel in wandlungsfähigen soziotechnischen Systemen gerade mit digitalen Lösungen effektiv begegnet werden. Unternehmen und Angestellte sehen sich gleichermaßen mit der Fragestellung konfrontiert, wie sie auf die Digitalisierung reagieren sollen und welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um nachhaltiger zu arbeiten und gleichzeitig wettbewerbsfähig zu bleiben.

EINFÜHRUNG



Für ausgewählte Aspekte stehen vertiefte, webbasierte Inhalte zur Verfügung, die über die eingefügten QR-Codes erreicht werden können.

Das Projekt KORESIL

Die Leichtbaustrategie der Bundesregierung verdeutlicht, dass dem Leichtbau eine Schlüsselrolle bei der Erreichung der Nachhaltigkeitsziele zukommt [2]. Das vom BMBF geförderte und aus der Plattform FOREL hervorgegangene Projekt KORESIL führt die bisher getrennt betrachteten Domänen der Technosphäre und der Soziosphäre konsequent zusammen. Am Beispiel des Multi-Material-Leichtbaus wird aufgezeigt, wie verknüpfte flexible Prozessketten zur Ressourceneffizienz beitragen und wie digitale Methoden in zukünftigen soziotechnischen Systemen der Produktentwicklung und Produktion dabei unterstützen, Komplexität zu beherrschen sowie Kreisläufe zu schließen. Neben dem Aufbau einer Prozesskette mit geschlossenem Stoffkreislauf setzen die Partner ILK, IUL, *iwb*, LWF und IART in KORESIL digitale Zwillinge der einzelnen Technologien um und verknüpfen diese mit Extended-Reality-(XR-)Anwendungen. Begleitend werden gegenwärtige Technologietrends analysiert, um aktuelle Entwicklungen aufzugreifen und die Methoden auf die Bedarfe der Industrie abzustimmen.

Das Whitepaper

Das vorliegende interaktive Whitepaper dient als Handreichung für Entscheider:innen in Industrie, Wissenschaft und Politik. Es leitet unter Einbeziehung der technologischen und methodischen Projektergebnisse Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung soziotechnischer Systeme ab. Um der Vielfalt und dem Umfang der Themen gerecht zu werden und diese gleichzeitig möglichst greifbar zu machen, fasst das Whitepaper die wesentlichen Erkenntnisse des Projekts KORESIL zusammen. Die Inhalte sind dabei entlang der im Projekt KORESIL als Beispiel herangezogenen prototypischen Prozesskette dargestellt. Die Digitalisierung als zentraler Innovationstreiber unserer Zeit wird als übergreifendes Thema einleitend diskutiert. Disruptive Ansätze zum menschenzentrierten Einsatz digitaler Lösungen bei der Entwicklung und Fertigung von Leichtbaustrukturen fließen als wesentliche Komponenten exemplarisch in die einzelnen Kapitel des Whitepapers ein.

HANDLUNGSSPIELRÄUME ERWEITERN

DIGITALISIERUNG IN ENTWICKLUNGS- UND FERTIGUNGSPROZESSEN



„Unternehmen sollten sich die Frage stellen, für wen sie den Aufwand der Digitalisierung betreiben. Geht es nur darum, Kundenanforderungen zu erfüllen, oder auch darum, die eigenen Produkte gut zu dokumentieren, zu verstehen und nachhaltig aufzustellen?“

Alexander Pabst, Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG

Digitalisierung

umfasst die Implementierung von digitalen Methoden und Technologien in industrielle Prozesse und bestehende Geschäftsmodelle.

Die Digitalisierung verursacht einen grundlegenden Umbruch, der umfangreiche Veränderungen bewirkt und alle Lebensbereiche durchdringt.

Digitalisierung & Nachhaltigkeit

Um negative Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Umwelt zu reduzieren, müssen Nachhaltigkeitsaspekte im gesamten Produktlebenszyklus umfassend Berücksichtigung finden. Digitalisierte Entwicklungs- und Prozessketten bieten hier eine Vielzahl von Methoden und Technologien zur Unterstützung des Menschen.

Mehrwert der Digitalisierung

Der zunehmende Einsatz digitaler Methoden und Technologien erhöht die Vielfalt technisch-organisatorischer Lösungsmöglichkeiten und steigert sowohl die Fähigkeiten als auch die Flexibilität von Organisations- und Kommunikationsstrukturen. Die Digitalisierung unterstützt so bei der Beherrschung multidimensionaler Herausforderungen.

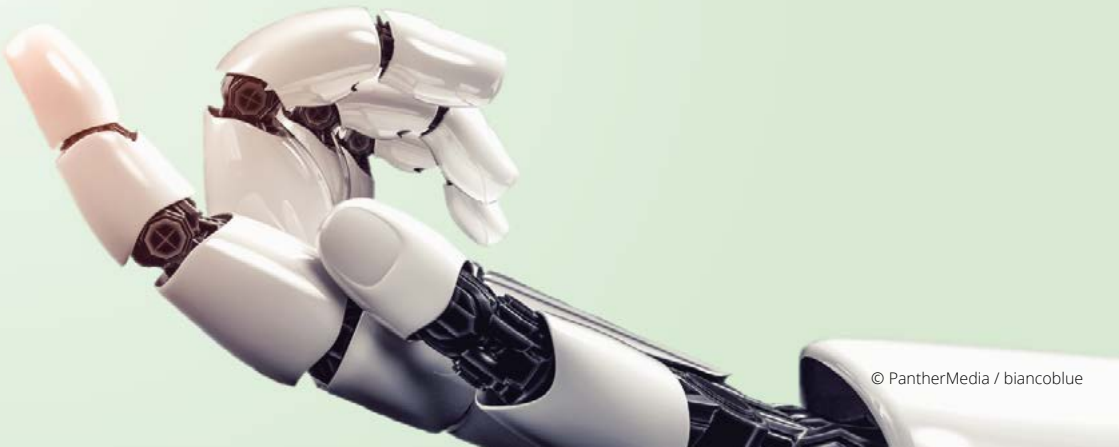


Potentiale der Digitalisierung

- Resilienz durch Datenanalyse & Prognose
 - Effizienz dank Automatisierung im Entwicklungsprozess
 - Durchgängige Entwicklungsketten mittels Vernetzung
 - Ressourceneffizienz infolge wandlungsfähiger Prozesse
 - Entlastung durch Assistenz- und Expertensysteme

- Ergonomische Arbeitsbedingungen
 - Lebenslanges Lernen sowie Re-/Upskilling
 - Produktivitätssteigernde Innovationen
 - Unterstützung bei komplexen Entscheidungen
 - Zugang zu validen, aufbereiteten Informationen

Bedarfe des Menschen



SYMBIOSE VON MENSCH & MASCHINE

SOZIOTECHNISCHE SYSTEME



An der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine sind soziotechnische Systeme als eben jene Strukturen definiert, bei denen es zu einer bilateralen Interaktion zwischen Mensch und Technik kommt. Sie sind in verschiedensten Bereichen wie Gesundheitswesen, Transport, Telekommunikation und insbesondere der Fertigung anzutreffen. Dabei definiert der Begriff im Kontext produzierender Unternehmen das zielführende Zusammenwirken von sozialen Systemen bzw. Individuen, z.B. der Fachkraft am Fließband, und technischen Systemen, wie dem Fließband selbst, einem Cobot oder Computern, welche die menschliche Arbeitsleistung unterstützen. Entsprechend zeichnen sich soziotechnische Systeme durch eine starke wechselseitige Abhängigkeit der beteiligten Personen und Technologien aus, was etwa für Entscheidungsfindungsprozesse in komplexen Aufgaben oder eine hohe Produktivität grundlegend ist. Dabei ist neben dem Individuum mit seinen Bedürfnissen, Wünschen und Forderungen auch der gesamtgesellschaftliche Kontext zum nachhaltigen Einsatz einer Technologie zu beachten.

Bei konsequenter Implementierung und Anwendung ermöglichen Technologien wie Cobotik, cyber-physische Systeme, Industrial Internet of Things, Künstliche Intelligenz und XR signifikante Effizienz- und Qualitätssteigerungen, wodurch die Rückverlagerung von industrieller Produktion in Hochlohnländer ermöglicht und die Resilienz von Prozess- und Lieferketten gesteigert wird.

Mit Blick auf eine alternde Arbeitsbevölkerung können Belastungen durch den Einsatz entsprechender Technologien reduziert und zugleich gesundheitsgefährdende Tätigkeiten entschärft werden. Dies steigert die physische wie psychische Gesundheit der Arbeitskräfte nachhaltig. Ebenso können komplexe Arbeitsplatzaufgaben im Vorfeld mittels virtuellen oder augmentierten Trainingsumgebungen mit geringem Personal- und Kosteneinsatz erlernt werden. In der Produktionsumgebung selbst können digitale Assistenten mittels 3D-Visualisierungen, Projektionen und Audioanweisungen die Arbeitskräfte entlasten, vor Gefahren schützen und deren Produktivität steigern. Insbesondere hier erscheint die Augmented Reality (AR), bei der im Sichtfeld der Nutzenden Informationen eingeblendet werden, als effiziente und sichere Lösung.

KORESIL-PROZESSKETTE



Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sind Kernaspekte bei der Weiterentwicklung aktueller industrieller Prozessketten und der darin gefertigten Leichtbaustrukturen. Dies erfordert die Bewertung und Anpassung der Rohstoffe, Bauweisen und Prozesse sowie des gesamten Lebenszyklus von Produkten auch hinsichtlich ökologischer Aspekte. Hierfür sind die zielgerichtete Digitalisierung der Prozesskette und die Verfügbarkeit von aktuellen sowie historischen Daten wesentliche Bausteine. Diese ermöglichen die vergleichende Analyse verschiedener Prozesse und Prozessparameter. Gleichzeitig können die Daten durch digitale Methoden auch frühzeitig im Entwicklungsprozess für die Gestaltung nachhaltigerer Bauteile und Prozesse sowie die Planung der Kreislaufführung von Werkstoffen genutzt werden. Daher wurde im Projekt KORESIL die durchgängige Digitalisierung der betrachteten Prozesskette verfolgt, der Einsatz von neuartigen digitalen Lösungen wie etwa XR-Anwendungen analysiert und deren Verknüpfung mit Sensor-, Informations- und Kommunikationstechnologien erprobt. Ziel war die Bewertung des Potentials dieser Lösungen sowohl hinsichtlich der Unterstützung des Menschen bei der Arbeit als auch der Effizienzsteigerung von komplexen Prozessketten für Leichtbaustrukturen in Multi-Material-Bauweise.

Aus technologischer Sicht bestehen bei der Etablierung ressourceneffizienter Prozessketten Herausforderungen insbesondere hinsichtlich der adaptiven Prozessierung unterschiedlichster Materialien zu funktionsintegrativen Leichtbaustrukturen. Am Beispiel eines Leichtbauprofils wurde eine Prozesskette mit geschlossenem Stoffkreislauf erforscht, die fünf Technologien umfasst. Mittels direktem **Strangpressen** von Rezyklat, das aus der mechanischen Zerkleinerung von Aluminiumschrott stammte, wurden Aluminiumprofile ressourcenschonend hergestellt. **Laserauftragschweißen** und mobiles **Spritzgießen** erhöhten die Variabilität der Prozesskette zur Funktionalisierung der Strangpressprofile. Werkstoffgerechtes **Fügen** der hybriden Profile vervollständigte die Bauteilgenese. Entfügekonzpte und Recyclingverfahren ermöglichten schließlich die effiziente, sortenreine **Demontage und Aufbereitung** der eingesetzten Materialien. Entlang der Prozesskette wurden verschiedene Bereiche der Ingenieurwissenschaften verknüpft und so vorhandene Potentiale zur Ressourceneinsparung mit Hilfe kreativer Lösungen gehoben.

FORM GEBEN

UR- & UMFORMTECHNIK



Mehr zu



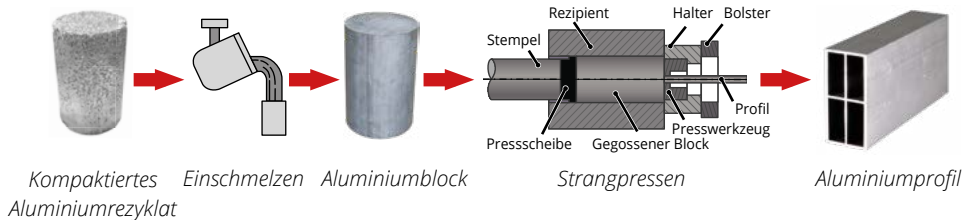
Ur- und Umformtechnik

Der Umgang mit dem komplexen wirtschaftlichen Umfeld und dessen aktive Gestaltung sind für produzierende Unternehmen von großer Bedeutung, wobei technologische Fragestellungen eine Schlüsselrolle spielen. Dabei sind insbesondere Produktionstechnologien ein entscheidender Wettbewerbsfaktor. Produktionstechnologien spielen in der deutschen Wirtschaft eine zentrale Rolle und sind als Taktgeber für die wirtschaftliche Entwicklung des Landes von großer Bedeutung. Auch deshalb zeichnet sich das Technologiefeld der Produktionstechnologien durch eine besonders hohe Innovationskraft aus.

Die Senkung des Energiebedarfs und die Steigerung der Ressourceneffizienz verbunden mit einer Reduzierung der Schadstoffemissionen sind in den letzten Jahrzehnten zu einer immer wichtigeren Aufgabe in der Industrie geworden. Um durch Gewichtsreduzierung zur effizienten Nutzung von Energie und Ressourcen beizutragen, werden in vielen industriellen Anwendungen Leichtbauwerkstoffe eingesetzt. Aluminium als Leichtmetall zeichnet sich vor allem durch seine geringe Dichte und relativ hohe mechanische Festigkeit aus.

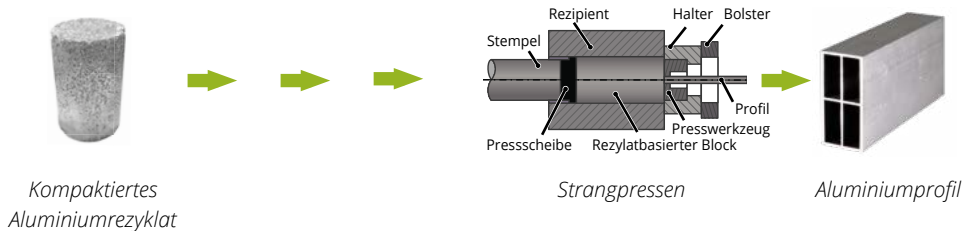
Das Strangpressen ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung von Profilen aus Aluminiumlegierungen. Dabei wird das Material unter hohem Druck und hohen Temperaturen durch eine Matrize gepresst, um komplexe Profile zu formen. Dies ermöglicht die effiziente Herstellung von Strukturen mit unterschiedlichen Querschnittsformen und Abmessungen. Der Prozess ist äußerst flexibel und kann an die spezifischen Anforderungen verschiedener Anwendungen angepasst werden.

Konventionelles Aluminiumrecycling



Energiebedarf: **30,4 GJ/t**; Teibhausgasemissionen: **1.520 kg CO₂-Äquiv./t**; Materialverlust: **≈ 18%**

Direktes Aluminiumrecycling



Energiebedarf: **16 GJ/t**; Teibhausgasemissionen: **680 kg CO₂-Äquiv./t**; Materialverlust: **≈ 0%**

Die Herstellung von Primäraluminium ist einer der energieintensivsten Prozesse in der Metallherzeugung. Der Prozess erfordert einen Energieeinsatz von bis zu 168 GJ/t, was dem Zehnfachen des Energiebedarfs für die Herstellung der gleichen Menge Stahl entspricht. Der sehr energieintensive Produktionsprozess verbraucht 3,5 % der weltweiten elektrischen Energie und verursacht 1 % der weltweiten CO₂-Emissionen. Zusätzlich weist der Prozess einen hohen Ressourcenverbrauch auf. Aus ca. 4,5 t Bauxit können ca. 2 t Aluminiumoxid gewonnen werden, das für die Herstellung von 1 t Primäraluminium benötigt wird. Durch den Einsatz von Sekundäraluminium, das heißt wieder eingeschmolzenem und aufbereitetem Aluminium, können im Vergleich zu Primäraluminium ca. 80 % des Energiebedarfs eingespart werden [3]. Die konventionellen Recyclingwege für Aluminium gehen jedoch mit einem Materialverlust nach dem Wiedereinschmelzen einher. Insbesondere das Wiedereinschmelzen von Recyclingmaterial, d. h. von Spänen aus Bearbeitungsprozessen oder Granulaten aus Zerkleinerungsprozessen, führt zu erheblichen Materialverlusten von ca. 18 % [3]. Dieser hohe Materialverlust und der damit einhergehende Energieverbrauch verursachen eine erhöhte Freisetzung von Treibhausgasen und tragen somit zum Klimawandel bei. Darüber hinaus kann der Schmelzprozess selbst zur Emission von Schadstoffen wie flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) und Stickoxiden führen. Diese Emissionen tragen zur Luftverschmutzung bei und können negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und Ökosysteme haben.

Vergleicht man das konventionelle Aluminiumrecycling mit dem direkten, also spänebasierten Aluminiumrecycling, so fällt bei Letzterem kein Materialverlust durch Abbrand an und eine Energieeinsparung von bis zu 50 % ist möglich [4]. Um die hohen Materialverluste zu kompensieren und eine bessere Energieeffizienz zu erreichen, werden daher direkte Recyclingwege von Aluminiumspänen und -rezyklaten erforscht und optimiert.

17 Herausforderungen

Abfallprodukte in Form von Spänen werden derzeit aufbereitet, eingeschmolzen und wieder der Produktion zugeführt. Die direkte Verarbeitung von Aluminium-Rezyklat zu Halbzeugen durch das Strangpressen ist ein vielversprechendes Verfahren für das energie- und ressourceneffiziente Recycling von Aluminium. Dabei können die für konventionelle Recyclingverfahren typischen Materialverluste beim Wiedereinschmelzen vermieden und Produktionskosten sowie Zykluszeiten reduziert werden. Verschiedene Studien haben den Einfluss unterschiedlicher Spanformen auf den Prozess des Spänestrangpressens untersucht. Dabei wird zwischen den Spangrößen sowie zwischen unge reinigten und gereinigten Spänen unterschieden. Die Untersuchungen zeigen, dass neben dem Rezyklat auch die eingesetzten Strangpresswerkzeuge einen signifikanten Einfluss auf die erreichbare Bruchdehnung und Zugfestigkeit der gefertigten Profile haben [5].

Ziel der Untersuchungen im Rahmen des Verbundprojektes KORESIL ist es primär, den Energieverbrauch durch Einsparung des Schmelzprozesses zu reduzieren, indem Recyclingprodukte direkt zur Herstellung von Strangpressprofilen eingesetzt werden. Sekundär soll der Energiebedarf durch eine lokale Kreislaufführung der Stoffströme reduziert werden (⇒ QR-Code-Link Seite 13).

Verunreinigte Späne aufgrund unterschiedlicher Bezugsquellen

1



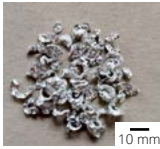
Hohe Pressverhältnisse werden benötigt, um ein Verschweißen der Späne während des Strangpressens zu gewährleisten

2

Kompaktieranlagen mit hohen Kräften sind erforderlich, um Pressbolzen mit einer hohen relativen Dichte zu fertigen

3

*Fräsprozess mit
Kühlschmierstoff*



Fräsprozess



Schredderprozess



Kompaktierte
Blöcke

Verarbeitung von Re-
zyklaten unterschied-
lichen Ursprungs [5]

1 Sortierung und Reinigung der Späne vor dem Kompaktieren

2 Numerische Optimierung der Werkzeuge

3 Anwendung alternativer Entlüftungsstrategien



19 Ur- & Umformtechnik

1 Sortierung und Reinigung der Späne vor dem Kompaktieren

Bei der spanenden Bearbeitung von Aluminiumbauteilen werden häufig Betriebsstoffe wie Kühlschmierstoffe (KSS) eingesetzt, die sich später an der Spanoberfläche wiederfinden. Des Weiteren werden Späne der gleichen Legierung aus verschiedenen Stoffströmen zusammengeführt, sodass in der weiteren Verwendung der Späne unterschiedliche Spangeometrien und Verarbeitungshistorien berücksichtigt werden müssen. Durch die Sortierung der Rezyklatströme und die Anwendung optimierter Prozessparameter sowohl beim Kompaktieren des Rezyklats zu Pressbolzen als auch im späteren Strangpressprozess können Fehler durch Verunreinigungen oder variierende Eigenschaften des Rezyklats minimiert werden [6].

2 Numerische Optimierung der Werkzeuge

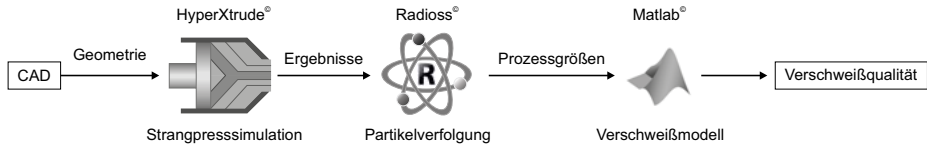
Im Strangpressprozess findet während der Umformung ein Verschweißen der einzelnen Rezyklatpartikel statt. Dabei bestimmen unter anderem die Drücke und Temperaturen in Kombination mit den Umformgraden die Qualität der Verschweißung. Um eine Vorhersage der Verschweißqualität treffen zu können, sind FE-Simulationen zur Bestimmung der Prozessgrößen notwendig. Unter Anwendung neu entwickelter Bewertungskriterien können auf Basis dieser Ergebnisse Strangpresswerkzeuge für das rezyklatbasierte Strangpressen ausgelegt werden [5], [6].

3 Anwendung alternativer Entlüftungsstrategien

Der Einschluss von Luft stellt beim rezyklatbasierten Strangpressen eine große Herausforderung dar, da sich größere Lufteinschlüsse negativ auf die Oberfläche der stranggepressten Profile auswirken. Durch den Einsatz optimierter Werkzeugdesigns kann dieser Einfluss reduziert werden. Darüber hinaus kann durch den gezielten Einsatz intelligenter Entlüftungsstrategien eine deutliche Verbesserung der Profileigenschaften hinsichtlich Oberflächenqualität und mechanischer Festigkeit erreicht werden.



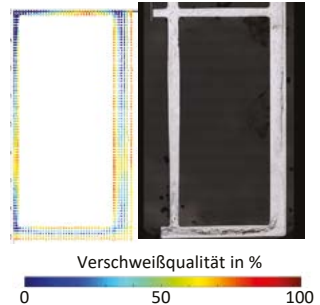
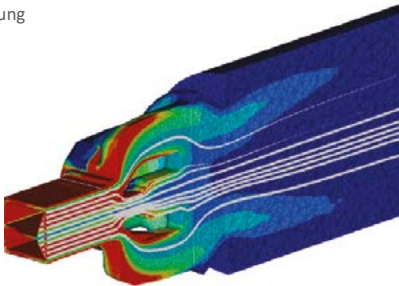
21 Lösungsansätze KORESIL



Prozessanalyse

Bewertung der Verbundqualität anhand eines am IUL entwickelten Verschweißkriteriums

Vergleichsdehnung

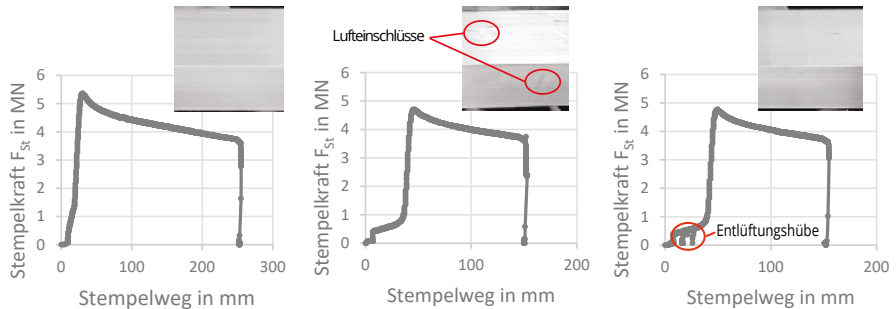


„Die Reduzierung von Primärrohstoffen in der Ur- und Umformtechnik ist ein notwendiger Schritt auf dem Weg zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft.“

Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya, IUL der TU Dortmund

Die angestrebte Prozesskette ist als geschlossener Stoff- und Informationskreislauf konzipiert. Dies ermöglicht eine gezielte Steuerung und Bewertung der Stoff- und Energieströme, wodurch der Gesamtenergiebedarf und der Ressourcenverbrauch der betrachteten Demonstratorstruktur bewertet werden kann. Ausgehend von Abfallprodukten in Form von am IART aufbereiteten Rezyklaten wurde am IUL ein modifizierter Strangpressprozess aufgebaut und für Parameterstudien eingesetzt, bei dem das Einschmelzen des Rezyklats entfällt.

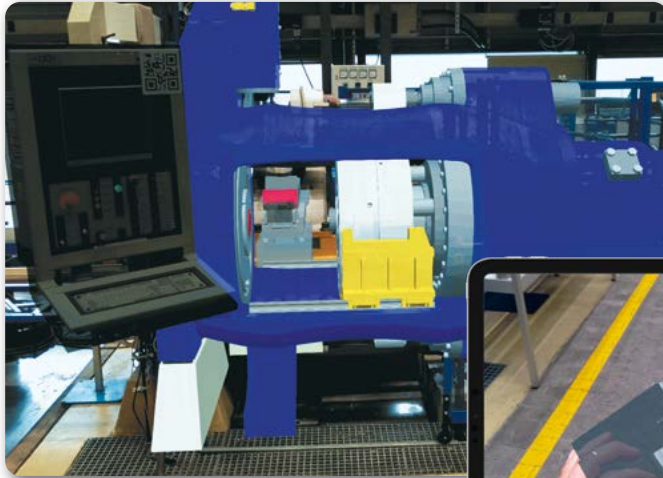
Der Einsatz von Rezyklaten bei der Herstellung von Aluminiumprofilen im Strangpressverfahren stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Reduzierung von CO_2 -Emissionen in der Produktion dar. In experimentellen und numerischen Untersuchungen hat sich die Bewertung und Optimierung der Verschweißqualität mittels FE-Simulation als notwendige Maßnahme zur Prozessauslegung erwiesen. Durch den Einsatz einer angepassten Entlüftungsstrategie während des Pressprozesses können Profile hergestellt werden, die hinsichtlich Festigkeit und Oberflächenqualität mit konventionell gefertigten Profilen vergleichbar sind.



Entlüftungsstrategien

Berücksichtigung neuer Entlüftungsstrategien; links: Vollmaterial; Mitte: Rezyklat ohne Entlüftung; rechts: Rezyklat mit Entlüftungsstrategie

23 Soziotechnische Systeme



© IUL



Prozessverständnis

*Direkte Beobachtung von Maschinen
und internen Prozessgrößen in XR*



„Wenn man nach anfänglichem Widerstand den Menschen eine komfortable und intuitive Brille einfach aufsetzt, überzeugt die Technologie von ganz alleine.“

Dr.-Ing. Oliver Napierala, Miebach GmbH

Aufgrund stetig wachsender Anforderungen hinsichtlich Produktivität und Qualität sind im Bereich hochvolumiger Produktionsverfahren wie etwa der Umformtechnik kontinuierliche Innovationen im Bereich der Digitalisierung unerlässlich. Daher wurde im Projekt KORESIL die Integration von XR-Anwendungen zur Prozessüberwachung, -analyse und -steuerung vorangetrieben, dabei konnten technologische Grenzen erforscht werden (⇒ QR-Code-Link Seite 9). Die entwickelten Lösungen bieten der Arbeitskraft während der laufenden Produktion einen dreidimensionalen Einblick in die Maschine und die Möglichkeit zur Analyse aktueller Prozessparameter. Die Arbeitskraft kann in der Folge Entscheidungen gezielter treffen, da ihr signifikant mehr Informationen zur Verfügung stehen. Zusätzlich konnten erstmals dynamische Ergebnisse von numerischen Simulationen holografisch projiziert werden, was die Überwachung nicht direkt messbarer Größen erlaubt. Basieren diese Simulationen auf aktuellen Sensordaten, können die zur aktuellen Situation passenden Zustandsgrößen, z.B. mit Hilfe Künstlicher Intelligenz, abgeleitet und angezeigt werden.

Das aktuell reichhaltige Erfahrungswissen unter den langjährigen Fachkräften vieler Unternehmen kann dank solcher Technologien weiterhin einen wertvollen Beitrag in der Prozesssteuerung leisten. Werden entsprechende Vorfälle dokumentiert, kann dieses Wissen digitalisiert und langfristig für das Unternehmen zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus eignen sich XR-Endgeräte für die Aufzeichnung spezieller Reparatur- und Wartungsarbeiten, welche als Schulungsinhalte für zukünftige Generationen genutzt werden können.

Zur weiteren Entlastung von Arbeitskräften finden oftmals Coboter Anwendung. Insbesondere in kleinen und mittelständischen Unternehmen sind autonome, mobile Coboter jedoch noch nicht weit verbreitet. Offensichtlich verhindert die aktuell aufwendige Planung von oftmals nur einmalig auftretenden Ereignissen und Aufgaben die wirtschaftlich sinnvolle Integration. Im Projekt wurde daher eine Schnittstelle entwickelt, mit welcher mobile Coboter, z.B. als Lastenträger, per Gestensteuerung aus der XR-Brille zielgerichtet bewegt werden können. Hierdurch entfallen zeit- und kostenaufwendige Routenplanungen.

LEICHTER WIRD'S MIT KUNSTSTOFF

KUNSTSTOFFSPRITZGUSS FÜR MULTI-MATERIAL-BAUWEISEN



Das Spritzgießen ist ein in der Kunststoffverarbeitung weitverbreitet eingesetztes Urformverfahren, das die wirtschaftliche Herstellung von Formteilen in großer Stückzahl ermöglicht. In der Spritzgießmaschine wird der Kunststoff zunächst plastifiziert und anschließend unter Druck in das Spritzgießwerkzeug eingepresst. Durch Abkühlen (Thermoplast) bzw. Vernetzen (Duroplast) des Kunststoffs erhält der Werkstoff eine feste Struktur und das Formteil kann nach dem Öffnen des Werkzeuges als Fertigteil entnommen werden.

Bauteile mit Gewichten von weniger als einem Gramm bis zu mehr als 100 kg sind mit dieser Technologie fertigbar. Besondere Vorzüge des Verfahrens sind seine hohe Effizienz gerade im Hinblick auf die Serienfertigung, die Möglichkeit zur Herstellung komplexer Bauteilstrukturen, die Variabilität hinsichtlich Materialien und Gestaltung, die Qualität und Haltbarkeit der gefertigten Bauteile sowie der bei Einsatz entsprechender Werkzeugtechnologien geringe Fertigungsabfall. Die umfangreichen Konzepte zur Funktionsintegration runden das Verfahrensportfolio ab. Dementsprechend finden im Spritzgießverfahren gefertigte Produkte in allen Lebensbereichen Anwendung.

Innerhalb des letzten Jahrzehnts konnten mittels der Vernetzung der Fertigungs- und Entwicklungsebene sowie der Digitalisierung von Prozessüberwachung und -regelung die Transparenz des Produktionsprozesses deutlich erhöht und der Produktionsablauf wirtschaftlich optimiert werden. Hierbei kommen verschiedene, teils werkzeugintegrierte Sensorikkonzepte zum Einsatz, die den Verfahrensablauf aufzeichnen und den aktuellen Prozessstatus in der Kavität in Echtzeit sichtbar machen. Zugleich ermöglichen diese Maßnahmen eine zentrale Produktionsüberwachung mit sofortigem Überblick zu allen Anlagen und ihrem Wartungszustand, eine lückenlose Prozessdokumentation und die Inanspruchnahme von Fernwartungs-Services. Infolge dieser Digitalisierungsmaßnahmen können Produktivität, Reproduzierbarkeit und Effizienz der Prozesse deutlich gesteigert werden. Gleichzeitig unterstützen diese Lösungen die Mitarbeiter:innen bei der Erledigung ihrer Aufgaben und tragen auf diese Weise zu ergonomischen Arbeitsbedingungen sowie zur Abschwächung der Auswirkungen des Fachkräftemangels bei.

27 Herausforderungen

Bei der Verarbeitung von Kunststoffen im Spritzgießprozess fallen Energiekosten an, die in einem typischen Kunststoffspritzgießbetrieb vergleichbar mit den Arbeitskosten sind [8]. Die Steigerung der Energieeffizienz ist daher sowohl unter ökonomischen als auch unter ökologischen Gesichtspunkten eine anhaltende Herausforderung.

Ein weiterer Baustein für die nachhaltige Fertigung ist die Fähigkeit zur Verarbeitung von biogenen und rezyklierten Kunststoffen. Hierbei sind neben der möglichst schonenden Verarbeitung auch Lösungen für den Umgang mit schwankenden Materialeigenschaften sowie Konzepte für die Verwertung von Rezyklaten mit reduzierter Materialgüte gefragt.

Im Hinblick auf moderne Multi-Material-Bauweisen, die hohe Leichtbaugrade ermöglichen, ist die Funktionalisierung von metallischen Komponenten sowie von Großstrukturen in flexiblen Prozessketten Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Hier entstehen neue Lösungsansätze wie etwa das mobile Spritzgießen (vgl. Abbildung rechts).

Ressourceneffiziente Fertigung von Spritzgießteilen

1

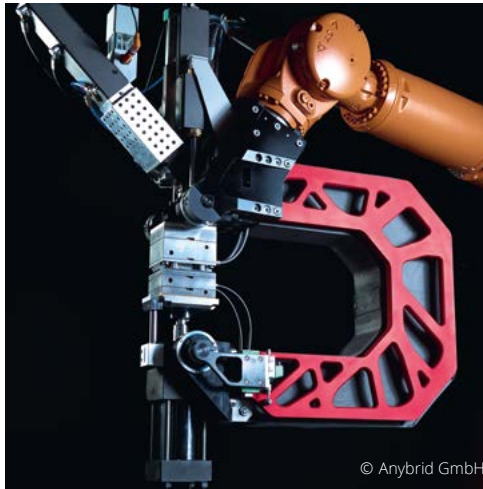


Kompatibilität mit den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft

2

Technologien und Bauteilkonzepte für Multi-Material-Bauweisen für die Kreislaufwirtschaft

3



Mobiles Spritzgießen

Robotergetstütztes Spritzgießsystem mit minimalistischem Werkzeugkonzept

1

Steigerung der Energieeffizienz etwa durch kleinere Maschinen, verbesserte Antriebe und eine Optimierung des Prozessablaufs

2

Schonende Verarbeitung der Kunststoffe sowie Fähigkeit zur **Verwendung von Rezyklaten** und Materialien biogenen Ursprungs

3

Anforderungsgerechte Interfacekonzepte für **Mischbauweisen** sowie deren flexible Kombination mit kontinuierlichen Fertigungsverfahren wie Extrusion oder Pultrusion



29 Kunststoffspritzguss für Multi-Material-Bauweisen

1 Steigerung der Energieeffizienz

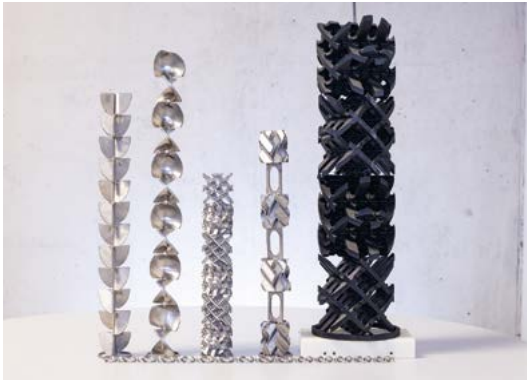
Die Kombination von modernen Antriebslösungen in der Spritzgießanlage mit optimierten Temperierkonzepten für das Kühlsystem (vgl. Abbildung rechts) helfen, den Energieverbrauch von Spritzgießanlagen zu senken. Weitere vielversprechende Forschungsansätze zielen auf die Reduktion der erforderlichen Verarbeitungstemperaturen, indem die Schmelzeviskosität etwa durch Gasbeladung oder induzierte Schereffekte reduziert wird [9].

2 Verarbeitung von Rezyklaten

Schwankenden Eigenschaften von biogenen und rezyklierten Ausgangsmaterialien kann durch eine Inline-Messung der Verarbeitungseigenschaften, eine durchgängige Prozessüberwachung und eine adaptive Prozessregelung begegnet werden. Hierfür können Simulationstools und Methoden der Künstlichen Intelligenz wertvolle Unterstützung bei der Dateninterpretation liefern. Für Rezyklate, welche nicht den höchsten Ansprüchen etwa an Oberflächenqualität und Erscheinungsbild genügen, kann das Mehrkomponenten-Spritzgießen Lösungen bieten, um auch diese Materialqualitäten gewinnbringend in den Stoffkreislauf einzubinden.

3 Multi-Material-Bauweisen

Mit dem Spritzgießverfahren können Basisstrukturen aus Metall oder Faser-Kunststoff-Verbunden lokal und anforderungsgerecht funktionalisiert werden. Für derart gestaltete Leichtbaustrukturen können mit der flexiblen Integration des Spritzgießens in bestehende Prozess- und Fertigungsketten vorhandene Potentiale in Bezug auf den Leichtbau und die Prozesseffizienz gehoben werden. Hierfür werden neuartige Ansätze benötigt wie etwa die Technologie des robotergestützten Spritzgießens, die durch das mobile und minimalistische Werkzeugkonzept die Fertigung von hybriden Leichtbaustrukturen erleichtert. So lassen sich Großstrukturen ebenso funktionalisieren wie sich bewegende Halbzeuge und Bauteile in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess.



Effektive Kühlvorgänge

*Statische Mischer im Kühlkanal
erhöhen die Turbulenz des
Kühlmediums [10]*



Multi-Material-Bauweisen

*Funktionalisierung von
Profilen aus Faser-Kunststoff-
Verbunden mittels Spritzgießen*

31 Lösungsansätze KORESIL



„Die Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz im Leichtbau gelingt nur mit lebenszyklusübergreifend gedachten Multi-Material-Bauweisen und zugehörigen Fertigungstechnologien.“

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude, ILK der TU Dresden

Im Rahmen von KORESIL bewerteten die Partner ILK, *iwb* und LWF verschiedene Varianten der Interface-Gestaltung für spritzgießtechnisch funktionalisierte Mischbauweisen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Einfluss auf das Substratmaterial, mechanische Belastbarkeit sowie Recyclingfreundlichkeit. Formschlüssige Konzepte bieten dabei Vorteile durch den in der Regel geringen Wärmeeintrag in das zu bearbeitende Werkstück und den Verzicht auf artfremde Zusatzmaterialien. Darüber hinaus ermöglichen diese Lösungen häufig eine vereinfachte Entfügbareit von Multi-Material-Strukturen mittels trennender Verfahren. Mittels subtraktiver, additiver sowie umformender Verfahren wurden daher Hinterschnitte auf Metalloberflächen erzeugt, welche die mechanische Verklammerung des Kunststoffes im Spritzgießprozess ermöglichten. Vielversprechende Lösungsansätze lieferte hier die Technologie des Nadelprägens, die flexible und effiziente Bearbeitungsmöglichkeiten mit geringen Investitionen und einfacher Handhabbarkeit kombiniert. Weitere positive Resultate konnten mit Formschlusselementen erzielt werden, die per Laserauftragschweißen aufgebracht wurden.

Im Hinblick auf die Kreislaufführung von Kunststoffen sind das Erkennen und Sortieren einzelner Werkstoffe stetige Herausforderungen. Gerade für Multi-Material-Bauweisen mit unterschiedlichen Polymeren bietet die Technologie des Tracer-Based-Sorting (TBS) einen neuartigen Lösungsansatz. TBS verwendet fluoreszierende Partikel, die bereits bei der Bauteilherstellung in dieses integriert oder auf dieses aufgebracht werden. Diese werden im Zuge der Aufbereitung durch entsprechende Detektoreinheiten erkannt und ermöglichen die sichere Identifikation von Bauteilen sowie die Kennzeichnung komplexer Materialsysteme. Dies liefert wertvolle Unterstützung für die weiteren Schritte des Identifizierens und Sortierens von Werkstoffen mit Verfahren wie etwa Nah-Infrarot- oder Laserspektroskopie. In Kooperation mit der Polysecure GmbH wurden Tracerpartikel in Polyamid-Compounds eingebracht und innerhalb von insgesamt fünf Verarbeitungszyklen der Einfluss der Tracer auf Verarbeitbarkeit und mechanische Materialeigenschaften sowie deren Detektierbarkeit bewertet. In begleitenden zerstörenden und zerstörungsfreien experimentellen Analysen konnten keine negativen Einflüsse auf die mechanischen und technologischen Eigenschaften festgestellt werden. Gleichzeitig blieben die Fluoreszenzeigenschaften der Partikel erhalten.

33 Lösungsansatz



© ILK

Maschinenbedienung

XR-Anwendungen bieten Unterstützung beim Trainieren und Ausführen der Maschinenbedienung



„Digitalisierte Mensch-Maschine-Interaktionen sind sowohl für die Integration von Arbeitnehmer:innen in Arbeitsprozesse als auch für das lebenslange Lernen sowie den Kompetenztransfer von zunehmender Bedeutung.“

Prof. Shu-Chen Li, LifeLab der TU Dresden

XR-Anwendungen besitzen für die moderne Aus- und Weiterbildung ein immenses Potential, da mit ihnen ganze Fertigungsanlagen realitätsnah abgebildet werden können. Als typisches Anwendungsbeispiel für ein produktionsnahes Training wurde eine XR-Anwendung für Maschineneinweisungen am Beispiel einer Spritzgießanlage umgesetzt. Die Nutzer:innen werden mit optischen Hinweisen durch den Startprozess der Anlage geleitet und können die erfolgreiche Bearbeitung der Teilschritte über eine digitale Checkliste prüfen. Die Wiederholung der Arbeitsschritte bei zunehmender Reduktion der unterstützenden Informationen hilft den Teilnehmer:innen, die Inhalte des Trainings zu festigen. Mit derartigen Anwendungen können neue Mitarbeiter:innen selbstständig die Bedienung und Wartung von Anlagen und Prozessen zeit- und ortsflexibel sowie gefahrenfrei kennenlernen. Ebenso besteht die Möglichkeit, Fachkräfte bereits im Vorfeld gezielt auf neue Anlagen und Prozesse vorzubereiten. Die realen Fertigungsanlagen bleiben dabei für die Produktion verfügbar, wodurch Stillstandszeiten und damit verbundene Kosten signifikant reduziert werden.

Bei der Gestaltung der XR-Anwendungen ist darauf zu achten, dass Zusammenhänge authentisch vermittelt und Kompetenzen nachhaltig aufgebaut werden. Insbesondere ist auf eine kritische Auseinandersetzung mit den Aufgabeninhalten hinzuwirken, um Unabhängigkeit und Kreativität zu fördern. Dies ist bei Arbeitsaufgaben mit Gefahrenpotential besonders bedeutsam, da ansonsten Mitarbeiter:innen virtuell nicht abgebildete Gefahren unter Umständen in der Realität nicht rechtzeitig erkennen. Das KORESIL-Konsortium hat als unterstützendes Element hierfür ein neuartiges kollaboratives XR-Feature entwickelt, welches Trainer:innen und Auszubildenden die zeitsynchrone und ortsunabhängige Interaktion in der gleichen XR-Umgebung ermöglicht.

Um die Immersivität der Anwendungen, also die Qualität des digitalen Erlebens, zu steigern, besteht aktuell noch Verbesserungspotential bei den Endgeräten, insbesondere im Hinblick auf die Sichtfeldgröße, die Abbildungsgenauigkeit und das haptische Feedback. Um die XR-Technologie einer breiten Anwendung zuzuführen, werden weiterhin intuitive Software-Tools zur effizienten Erstellung von XR-Anwendungen benötigt (⇒ QR-Code-Link Seite 9).

VERBINDEN & LÖSEN

RESSOURCENEFFIZIENTE FÜGE- & ENTFÜGETECHNOLOGIEN



Fügeverfahren stellen für viele Produkte die Schlüsseltechnologie bei der Herstellung moderner Hybridstrukturen dar und ermöglichen die anforderungsgerechte Verbindung artfremder Werkstoffe mit unterschiedlichen technisch-wirtschaftlichen Eigenschaftsprofilen.

Die Innovation neuer und die Weiterentwicklung bereits etablierter Verfahren wird in der heutigen Zeit insbesondere durch die steigende Komplexität hochlegierter und aufbereiteter Werkstoffe im Multi-Material-Design, eine zunehmende Produktvielfalt und verkürzte Modellzyklen vorangetrieben. Dies lässt sich besonders in der Mobilitätsbranche beobachten. In den letzten Jahrzehnten stiegen die Materialvielfalt und die Anzahl eingesetzter Fügeverfahren, wie unten dargestellt, gleichermaßen an, um das hohe Leichtbaupotential des Multi-Material-Designs auszuschöpfen. Der gezielte Einsatz unterschiedlicher Aluminium- oder Magnesiumwerkstoffe, Faser-Kunststoff-Verbunde sowie hoch- bzw. höchstfester Stahlegierungen ermöglicht es hierbei, das Gewicht von Leichtbaustrukturen im Fahrzeug- und Flugzeugbau erheblich zu reduzieren und die Energieeffizienz und Reichweite von Fahrzeugen deutlich zu steigern.



37 Ressourceneffiziente Füge- & Entfügetechnologien



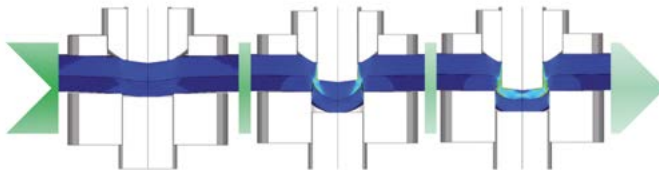
Im Zuge der Digitalisierung nimmt die Steigerung der Fügbarkeit und der Wandlungsfähigkeit von Fügeverfahren insbesondere in Prozessketten eine entscheidende Rolle in der ressourceneffizienten Herstellung von Leichtbaustrukturen ein. So treffen manuelle Fügeprozesse mit hoher Flexibilität bei KMU auf statische und hochautomatisierte Prozesse in der Serienfertigung der Automobilindustrie.

Einzelne Prozessschritte können dabei bereits mit einer hohen Prognosegüte virtuell abgebildet und der Prozess vor Produktionsbeginn digital ausgelegt werden. Gleichzeitig nimmt die Entwicklung von Sensorik, Aktorik, Datenverarbeitung und virtueller Prozessabbildung einen zunehmenden Stellenwert zur Steigerung der Prozesseffizienz und Produktqualität ein. Dieses ermöglicht eine verbesserte Datenbasis und -zugänglichkeit auf Organisations- und Prozessebene sowie eine engere Vernetzung innerhalb von Produktionssystemen unabhängig von der Unternehmensgröße.

Weiterhin nimmt der Einsatz Künstlicher Neuronaler Netze und Machine Learning-basierter Methoden mit der Verbreitung universell einsetzbarer Algorithmen beispielsweise in der adaptiven Lageregelung von Fügwerkzeugen oder der initialen Prozessparametrierung zu und kann einen Beitrag zur effizienten Prognose von datenbasierten Fragestellungen und der Generierung von Lösungsansätzen leisten.

Prognosefähigkeit

*Numerische Berechnung
des Werkstoffverhaltens
im Clinch-Prozess*



39 Herausforderungen

Die Fügbarkeit gilt häufig als Schlüssel effizienter Produktionsprozesse. Füge Technologien müssen dabei hochflexibel auf Veränderungen in der Produktionsumgebung reagieren können, um auch zukünftig technologische, ökonomische und nicht zuletzt ökologische Anforderungen erfüllen zu können. So müssen fügetechnische Anlagen einen wirtschaftlichen, serien- und wandlungsfähigen Fügeprozess erlauben, ohne die menschliche Belastbarkeit im Prozess zu überschreiten.

Ein Werkzeug zur Verbesserung von Fügeprozessen stellt die durchgängige Prozessvirtualisierung dar. Heutigen Simulations- und Prognosemodellen fehlt es jedoch an Lösungen zur Modularisierung, Standardisierung und Verknüpfung, um nicht nur Einzelumgebungen, sondern vielmehr Prozessketten mit vor- und nachgelagerten Prozessschritten prognostizieren und adaptiv auslegen zu können.

Ebenso müssen zukünftig an Bedeutung gewinnende Herausforderungen, wie die Steigerung der Ressourceneffizienz in Prozessketten oder die effiziente Demontagefähigkeit von gefügten Bauteilen im Sinne einer verbesserten Rückführbarkeit in den Werkstoffkreislauf, in den Fokus rücken.

Zunehmende Vielfalt an Werkstoffen, Reduzierung der Modellzykluszeiten und steigende Anforderungen an Leichtbaustrukturen

1

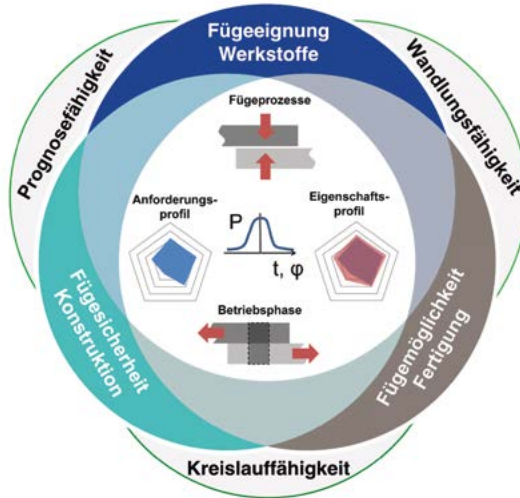


Ganzheitliche Abbildung der Prozesskette zur gezielten Parametrisierung von Verarbeitungsprozessen und der Prognose von Produkteigenschaften

2

Steigender Bedarf an geeigneten Prozessketten zur Weiter- und Wiederverwendung von Bauteilen und Werkstoffen in einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft

3



Fügarkeitsanforderung

*Spannungsfeld zur
Bewertung der Fügarkeit
[in Anlehnung an den
SFB/Transregio 285]*

1

Etablierung adaptiver Prozesse in **einer wandlungsfähigen Prozesskette** zur Flexibilisierung und Steigerung der Robustheit sowie der Ergonomie des Fügeprozesses

2

Durchgängige, multilaterale **Verknüpfung von Datenstrukturen und Simulationsmodellen in Prozessketten** zur Erhöhung der Prognosefähigkeit



3

Entwicklung effizienter, werkstoffgerechter und **serienfähiger Demontage- und Entfügeprozesse** zur Steigerung der Verwertungsquote und -qualität von Sekundärwerkstoffen

41 Ressourceneffiziente Füge- & Entfügetechnologien

1 Die wandlungsfähige Fügeprozesskette

Durch eine Erweiterung der Fokussierung auf die Füge Technik sowie vor- und nachgelagerte Herstellungsschritte kann mittels Digitalisierung, Vernetzung und gezielter Datenverarbeitung eine methodische Verknüpfung in der Fertigung erfolgen. Prozesse können auf diese Weise adaptiv angepasst werden und auf Schwankungen in Werkstoffeigenschaften und Zwischenprodukten reagieren [12]. So kann die Flexibilität und die Robustheit des Fügeprozesses in der Prozesskette gezielt gesteigert und die erforderliche Verfahrens- und Anlagenvielfalt zur Erfüllung neuer Anforderungen weiter reduziert werden [13]. Unter Berücksichtigung weiterer soziotechnischer Teilsysteme wie etwa Cobotern kann darüber hinaus die Ergonomie gesteigert werden.

2 Die durchgängige virtuelle Prozessabbildung

Der Einsatz intelligenter Methoden und Künstlicher Neuronaler Netze kann sowohl zur Effizienzsteigerung in der Prozessauslegung als auch zur breiteren Anwendbarkeit von Prognosemodellen unabhängig von unternehmensspezifischen Ressourcen beitragen. So bildet das Life-Cycle-Engineering als soziotechnische Methode in Verbindung mit der simulativen Prozesskettenauslegung einen wichtigen Bestandteil zur ganzheitlichen Auslegung künftiger technischer Produkte [14].

3 Serienfähige Demontage- und Entfügeprozesse

Fügeverfahren stellen teilweise hohe Anforderungen an einen werkstoffgerechten Entfügeprozess. Während mechanische und thermische Fügeverbindungen durch Prozesse wie das Stanzen und Spanen getrennt werden können, stellen Klebverbindungen eine Herausforderung dar. In Forschungsarbeiten werden bereits Ansätze wie die Klebstoffverweichung durch Temperaturerhöhung oder die Integration funktioneller Additive zum gezielten Trennen der Verbindung vorgestellt [15]. Insbesondere die Versprödung von (semi-)strukturellen Klebstoffen durch starke Abkühlung bietet eine bedeutsame Chance, bauteilschonend zu entfügen und einen hohen Ressourcenaufwand durch effiziente Reparaturprozesse zu vermeiden [16].



43 Lösungsansätze KORESIL



*„Demontagegerechte Fügetechnologien bilden einen Grundstein in der zukünftigen
Entwicklung kreislauffähiger Leichtbaustrukturen.“*

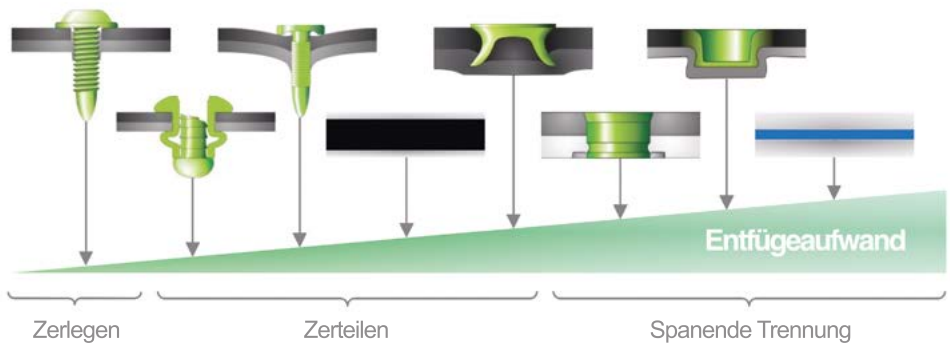
Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut, LWF der Universität Paderborn

Innerhalb des Verbundforschungsvorhabens KORESIL konnte ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung geeigneter Fügeverfahren für die Verarbeitung von Sekundärwerkstoffen sowie zum werkstoffschonenden Entfügen von hybridgefügten Komponenten geleistet werden (⇒ QR-Code-Link Seite 35).

Fokussiert wurde insbesondere ein Hybridfügeprozess aus fließlochformendem Schrauben (FLS) und strukturellem Kleben am Beispiel eines Strangpressbauteils aus Aluminiumrezyklat in einer typischen Anwendung der Elektromobilität. Ebenso wurde gezeigt, dass das Entfügen von Bauteilen zur Wiederverwendung sowie zur Verwertung und Rückführung der Werkstoffe in den Stoffkreislauf durch eine gezielte Klebstoffversprödung sowohl bauteilschonend als auch effizient durchgeführt werden kann. Die geringe Bauteilverformung und die Erhaltung der Integrität von angrenzenden Komponenten und Verbindungen stellen dabei einen bedeutenden Meilenstein für eine Instandsetzung und Wiederaufbereitung von Produkten sowie eine Wiederverwendung von Altstrukturen dar.

Demontierbarkeit

*Einteilung unterschiedlicher
Fügeverfahren*

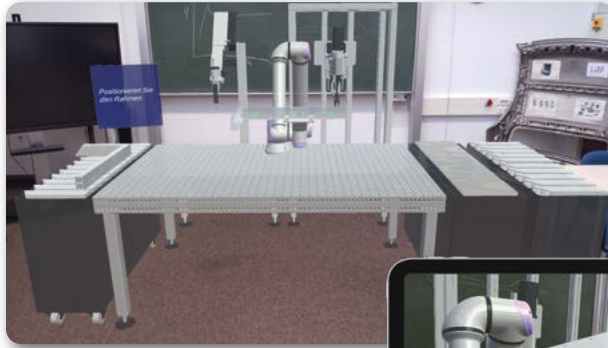


45 Ergonomische Produktions- & Prozessplanung

Ein 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 die Verbesserung der Arbeitsbedingungen an Bedeutung.

Einen Lösungsansatz zur gezielten Verbesserung 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 Entlastung des Menschen.

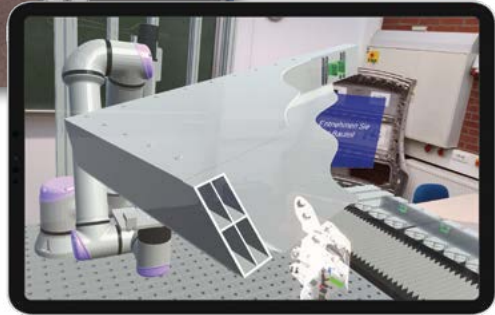
Die Kombination mit weiteren Technologien wie der XR kann darüber hinaus zu wichtigen Skaleneffekten führen. So zeigt die entwickelte Applikation zur modularen, flexiblen Arbeitsplatzgestaltung in einem typischen teilautomatisierten Fügeprozess das Potential der XR in der frühen Produktionsplanung auf. Fokussiert wird die Analyse von Arbeitsumgebungen unter Berücksichtigung der menschlichen Anforderungen. Die Anwendung erlaubt die individuelle Anpassung der implementierten digitalen Prozesselemente. So können in Abhängigkeit von den Zielsetzungen unterschiedliche Arbeitsplatzszenarien vorgegeben und verglichen oder die Ergonomie einer bereits definierten Arbeitsumgebung getestet und optimiert werden. Die immersive XR-Umgebung ermöglicht dabei eine gefahrlose und intuitive Interaktion mit den digitalen Anlagen und Komponenten. 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 deutlich reduziert werden. Diese Vorteile qualifizieren die XR-Technologie insbesondere für die menschenorientierte Fabrikplanung.



© LWF

Arbeitsplatzgestaltung

*Erprobung unterschiedlicher
Arbeitsplatzszenarien in
der XR*



*„Even over this short period of time, I have learned more than I
ever have by studying a written manual.“*

Studierender und Teilnehmer eines Workshops zu XR-Anwendungen



AUS ALT MACH NEU

DEMONTAGE, RECYCLING, STOFFKREISLÄUFE

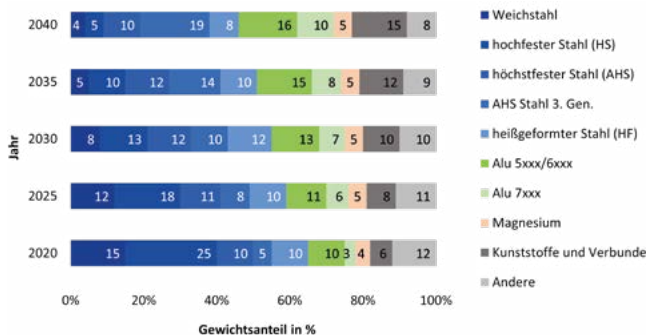


Die regenerative Abfallverwertung, das Recycling, dient der Rückgewinnung von Materialien und Produkten aus Produktions- und End-of-Life-Abfällen, wodurch natürliche Ressourcen geschont und Emissionen reduziert werden. Für einige Produkte und Materialien, wie beispielsweise Glas, Papier und Metalle, existieren aufgrund ihrer guten Recyclingfähigkeit und großen Rückflussmengen bereits ausgereifte Recyclingrouten.

In den letzten Jahrzehnten ist jedoch eine zunehmende Komplexität und Vielfalt der Materialien und Produkte zu verzeichnen, wodurch die Herausforderungen und Aufwendungen für das Recycling steigen. Insbesondere im Verkehrssektor werden verstärkt komplexe, hochfeste Leichtbauwerkstoffe für gewichtssparende Konstruktionen eingesetzt. Das spiegelt sich im zunehmenden Einsatz von Leichtmetallen, insbesondere von Aluminium, von hochfesten Stahllegierungen sowie von Faser-Kunststoff-Verbunden wider [17]. Hierfür wurden effiziente Bauweisen und Fertigungstechnologien entwickelt, aktuell steht nun die Nachhaltigkeit verstärkt im Zentrum der Entwicklungsarbeiten. Maßnahmen sind hier bspw. die Verwendung nachhaltiger Materialien, die Gestaltung recyclingfähiger Produkte sowie die Transformation vom linearen zum zirkulären Wirtschaften.

Materialmix in Fahrzeugkarosserien

Prognose zu Materialanteilen in Rohkarosserien bis 2040 [17]



49 Demontage, Recycling, Stoffkreisläufe



Während auf der einen Seite durch den Einsatz von Leichtbaumaterialien das Gewicht von Fahrzeugen reduziert werden kann, stellen Materialverbunde wie Glasfaser- und Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe, aber auch eine steigende Zahl an hochfesten Metalllegierungen, die Recyclingindustrie vor hohe Herausforderungen [18]. Die Trennung von Faserverbundbauteilen, welche häufig in Hybridbauweise hergestellt werden, erfordert neue kosteneffiziente Technologien für die Demontage, Trennung und Entklebung [19]. Hochfeste Metalllegierungen verursachen zusätzlichen Aufwand bei der Sortierung, erhöhen die Anforderungen an den Verbundaufschluss und bewirken einen höheren Verschleiß der Werkzeuge.

Bei den Metallen, welche derzeit etwa 75 % der Masse eines PKW ausmachen, ist zu beachten, dass diese in Form unterschiedlicher Legierungen eingesetzt werden. Aus Aluminiumlegierungen können aufgrund der hohen Sauerstoffaffinität des Aluminiums und seines unedlen Charakters die Legierungselemente durch pyrometallurgische Verfahren nur sehr eingeschränkt entfernt werden. Deshalb wird Recyclingaluminium häufig entweder zu höher legierten Gusslegierungen verarbeitet oder durch Zugabe von Primäraluminium aufgewertet. Für ein hochwertiges Recycling ist eine legierungssortenreine Sammlung, Sortierung und Aufbereitung erforderlich, was Informationen zu den verarbeiteten Werkstoffen und den anzuwendenden Demontagemethoden voraussetzt.

Noch größere Herausforderungen verursachen Komponenten aus Kunststoffen aufgrund der Vielzahl an Kunststoffarten, des Zusatzes diverser Füllstoffe und Additive wie etwa Flammenschutzmittel, des Einsatzes von Faserverstärkungen sowie durch altersbedingte Eigenschaftsdegradationen. Das werkstoffliche Kunststoffrecycling ist daher aktuell nur in begrenztem Umfang möglich.

Darüber hinaus werden zunehmend kritische Rohstoffe wie etwa Seltenerdmetalle eingesetzt, welche für elektronische Komponenten zur Erhöhung des Komforts und der Sicherheit sowie für die Elektromobilität benötigt werden. Für die Rückgewinnung dieser hochwertigen Rohstoffe aus Batterien und Elektronikkomponenten ist ebenfalls die Entwicklung von innovativen Recyclingtechnologien notwendig.

51 Herausforderungen

Die Recyclingbranche wird aufgrund der zunehmenden Vielfalt und Komplexität der Materialien des Multi-Material-Leichtbaus vor neue Herausforderungen gestellt. Für die Erzeugung von hochwertigen Rezyklaten ist es unter anderem erforderlich, die Materialverbunde möglichst sortenrein zu demontieren oder aufzuschließen. Hierzu sind in der Konstruktionsphase neben werkstofflichen und technologischen auch ökologische und kreislaufwirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Da komplexe Produkte systemisch wirken, sind die Einflussgrößen vielfältig und die Wirkung auf das Gesamtsystem und das Recycling schwer abschätzbar. Bezüglich der Sortierung von gemischten Stoffströmen existieren zwar auf bestimmte Stoffgruppen zugeschnittene, automatisierte Sortierverfahren, diese bedingen aber teilweise eine spezielle Aufbereitung sowie entsprechende Materialmengen, um wirtschaftlich zu sein [20, 21]. Um die Einsatzmöglichkeiten von Rezyklaten zu erhöhen, sind außerdem neuartige Recyclingverfahren notwendig, sei es bspw. zur Gewinnung von Pulvern für den 3D-Druck [22], zur Erzeugung definierter, störstofffreier Rezyklatqualitäten für die rezyklatbasierte Direktverpressung von Aluminium oder zur Steigerung des Einsatzes von Rezyklaten in Sekundärkunststoffmaterialien und Faser-Kunststoff-Verbunden.

Steigende Produkt- und Materialvielfalt, fehlende Produktinformationen, kreislauffähige Gestaltung von Produkten mit Eingriff in die frühzeitige Konstruktionsphase

1

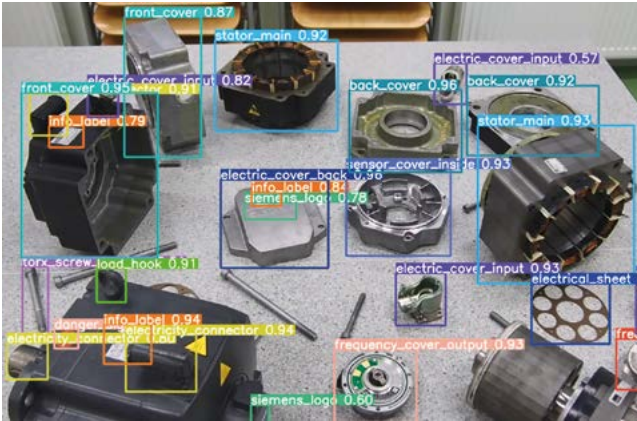


Senken der Recyclingkosten, Qualitätsanforderungen an die Recyclingprodukte, Eigenschaftsgarantien durch Rezyklatanbieter

2

Steigerung der Recyclingquoten, Mengenverfügbarkeit, Kreislaufführung von Werkstoffen über das „Ende der Abfalleigenschaft“

3



KI-gestützte, dynamische Bildererkennung

Automatisierte Detektion
von Bauteilen in Sortier-
anlagen oder in roboterge-
stützten Anwendungen [23]

- 1 **Design for Recycling, Produktdatenkennzeichnung** in Kombination mit digitalem Produktpass, genormte Datenbanken zu Rezyklateigenschaften, Erhöhung der Demontagetiefe
- 2 **Entwicklung von effizienten Recyclingtechnologien**, Materialpass basierend auf genormten Analysemethoden, KI-gestützte Sortierprozesse
- 3 **Umsetzung gesetzlicher Rahmenbedingungen** durch die zuständigen Behörden, Schaffung finanzieller Anreize, Lizenzgebühren, Aufklärungsarbeit



53 Demontage, Recycling, Stoffkreisläufe

1 Design for Recycling

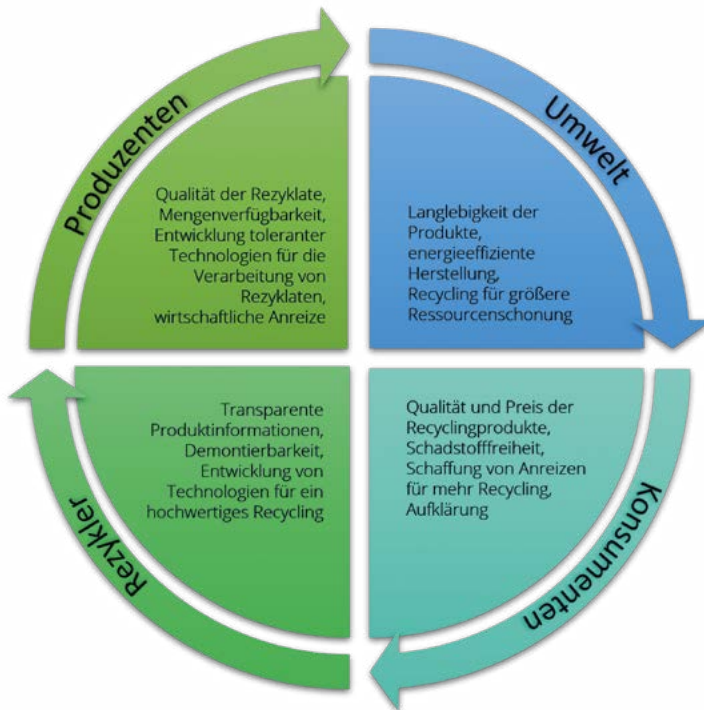
Die Kreislauffähigkeit von Produkten ist eine Produkteigenschaft, die einen zunehmenden Widerhall bei Produzenten und Konsumenten findet. Durch Umsetzung eines Design for Recycling lässt sich die Kreislauffähigkeit steigern, indem Materialien und Fertigungstechnologien ausgewählt werden, die sowohl die Langlebigkeit der Produkte, ihre Reparaturfähigkeit als auch ihre Demontierbarkeit für ein hochwertiges Recycling mit der Rückführung von Werkstoffen gewährleisten. Durch die Hinterlegung von Materiallandkarten oder Demontageanleitungen in einem Digitalen Produktpass können die Prozesse effizienter gestaltet werden, indem beispielsweise der Einsatz von digitalen Assistenzsystemen oder automatisierten Demontage- und Aufbereitungsprozessen ermöglicht wird.

2 Entwicklung von effizienten Recyclingtechnologien

Entscheidend für die Akzeptanz von Recyclingprodukten sind deren Eigenschaften, Kosten und Verfügbarkeit. Nur durch die Entwicklung von effizienten Recyclingtechnologien zur Bereitstellung von definierten, zertifizierten Recyclingrohstoffen und von angepassten, neuartigen Technologien zu deren Verarbeitung können sowohl die Recyclingquoten als auch die Produktqualitäten verbessert werden. Hierzu bedarf es neben der Entwicklung von speziellen Aufschlusszerkleinerungs- und Demontageprozessen insbesondere einer Weiterentwicklung von automatisierten, multisensorischen Sortierprozessen unter Einsatz Künstlicher Intelligenz.

3 Umsetzung gesetzlicher Rahmenbedingungen

Für eine Steigerung der Zirkularität sind ganzheitliche Lösungsansätze erforderlich. Diese betreffen auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die eine stoffliche Verwertung wirtschaftlich ermöglichen, als auch eine Produktgestaltung, die eine Produkt- und Materialidentifizierung erlaubt. Materialflüsse sind zukünftig schon beim Inverkehrbringen zu planen, wie dies bereits bei Verpackungen oder Elektrogeräten praktiziert wird. Zudem sollten Lizenzgebühren von der Recyclingfähigkeit der Produkte abhängig gemacht werden.



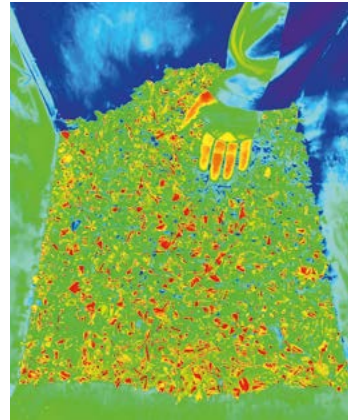
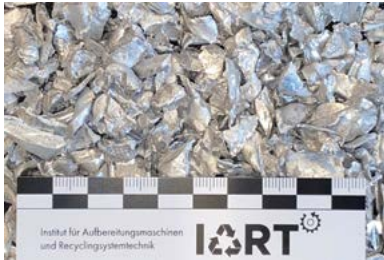
Kreislaufwirtschaft

Motivation und Lösungsansätze für das Schließen von Stoffkreisläufen nach Interessengruppen

55 Lösungsansätze KORESIL



Demontage, Zerkleinerung und Sortierung
von Multi-Material-Verbunden



Zerkleinerung der Profile

Ein zu hoher Energieeintrag bei der Zerkleinerung bewirkte eine starke Erwärmung und erforderte eine Anpassung der Werkzeuge und Prozesse.



„Sind Recyclingquoten von über 90 % erreicht, lassen sich neue Erlöspotentiale nur über höhere Rezyklatqualitäten erreichen.“

Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth, IART der TU Bergakademie Freiberg

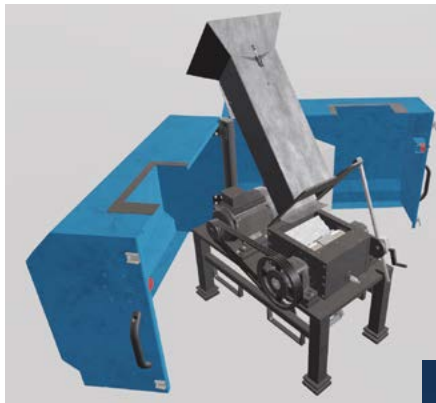
Innerhalb des Projekts KORESIL wurde mit den Projektpartnern ein demontagegerechtes Produktdesign im Hinblick auf die Gewinnung von sortenreinen und störstofffreien Aluminiumrezyklaten aus Materialverbunden erarbeitet. Hierzu erfolgte etwa die Gestaltung kreislauffähiger Fügeverbindungen sowie eine entsprechende Werkstoffauswahl und -kombination für einen Demonstrator.

Technologien für die lebensübergreifende Markierung von Produkten mit der Möglichkeit zur Produktauthentifizierung sind für die Erzeugung qualitativ hochwertiger Rezyklate unverzichtbar. Zur Identifizierung der Komponenten des Demonstrators wurde eine neuartige, tracerbasierte Produktmarkierung ausgewählt. Diese ermöglicht in Kombination mit einem digitalen Produktpass die sensorgestützte Detektion und Identifizierung eines Produktes. Weiterhin wurde eine multisensorgestützte Sortieranlage entwickelt, mit der es möglich wird, Materialien und Komponenten in Stoffströmen auch nach optischen Merkmalen zu sortieren [23].

Gegenüber der Herstellung von Profilen aus metallurgisch aufbereitetem Sekundäraluminium kann durch das direkte, rezyklatbasierte Strangpressverfahren weitere Energie eingespart werden. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass dafür definierte Rezyklate, zugeschnitten auf die Anforderungen des Strangpressverfahrens, benötigt werden. Da in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Legierung bei duktilen Werkstoffen wie Aluminium bei der Zerkleinerung weitgehend verkugelte bzw. abgerundete Granulate entstehen, musste die Zerkleinerungstechnologie angepasst werden. Unter Einsatz einer relativ schnell laufenden Radialspalt-Rotorschere mit angepassten Werkzeugen konnten entsprechende scharfkantige „Chips“ passender Partikelgröße hergestellt werden.

Mit der Einsparung des Zwischenschrittes der metallurgischen Verarbeitung stellt sich bei der Direktverpressung die Frage nach dem „Ende der Abfalleigenschaft“. Für die Wiedereinführung der Produkte in den Markt sind Deklarationen und Genehmigungen nach Abfallrecht einzuholen, um diese nach REACH-Verordnung wieder zulassen zu können. Weiterhin besteht die Problematik der Produkthaftung sowie der richtigen Kennzeichnung auf Basis des Verbraucherschutzes. Hierzu wurde im Rahmen des Vorhabens eine Studie angefertigt.

57 Soziotechnische Systeme



© IART

Remote Assist

XR-Anwendungen unterstützen im Recyclingprozess und bei der Wartung der Recyclinganlagen



„Uns hilft die AR-basierte Remote Maintenance, weltweit verteilte arbeitende Experten zu vernetzen und somit schnell auf Fragestellungen an beliebigen Orten zu reagieren.“

Florian Festge, HAVER & BOECKER OHG

Über die digitale Umgebung und Bereitstellung relevanter Daten, etwa zu Werkstoff, Bauweise oder Verarbeitungshistorie, können die komplex zusammengesetzten Abfallströme schneller erfasst und geschäftsmodellabhängig gesteuert werden. Zugleich stellen digitalisierte Systeme ein notwendiges Instrument für die Entwicklung von angepassten Recyclingprozessen dar. Die digitale Identifizierung von Materialien und Bauteilen, z.B. mittels Tracern, Bar- oder QR-Codes, erleichtert die sortenreine Demontage und Sortierung für ein hochwertiges Recycling.

Menschliche Arbeitskräfte können in Sortierprozessen mit digitalen Assistenzsystemen umfassend entlastet werden, wie etwa durch eine automatisierte Objekterkennung unter Einsatz Künstlicher Intelligenz und die Nutzung von XR-Anwendungen. Diese Ansätze werden durch übergreifende Konzepte wie ein demontage- und recyclingfreundliches Produktdesign und den digitalen Produktpass entscheidend unterstützt, wodurch sich der Sortieraufwand signifikant reduzieren lässt. Darüber hinaus bieten XR-Lösungen als Assistenzsysteme im Recyclingprozess Hilfestellung, indem sie die direkte Kommunikation per Video und Audio mit externen Experten ermöglichen. Hierdurch lassen sich Demontageprozesse effizienter und sicherer durchführen. Ebenso profitieren hiervon Reparatur- und Wartungsprozesse, der Kundenservice und der Vertrieb sowie die Gefahrenabwehr. Auch nach dem erfolgreichen Sortieren der Werkstoffe bilden digitale Informationen die Grundlage für Qualitäts- und Eigenschaftsgarantien sowie für die Rückverfolgbarkeit von Rezyklaten.

Um menschliche Arbeitskräfte zu schützen, werden Roboter auch im Recycling zunehmend eingesetzt, insbesondere für Arbeiten mit hoher Belastung oder gesundheitsgefährdenden Stoffen. Auch hier bilden digitale Kennzeichnungen die Grundlage für eine roboterbasierte Automatisierung der Prozesse. XR-Anwendungen können dabei den Handlungsspielraum der Mitarbeiter:innen erweitern, indem sie die Remote-Steuerung von Anlagen und Robotern ermöglichen. Damit kann individuell in Prozesse eingegriffen werden. Entsprechende Lösungen wurden im Projekt KORESIL für Coboter erfolgreich demonstriert (⇒ QR-Code-Link Seite 9).

LOHNT SICH DAS?

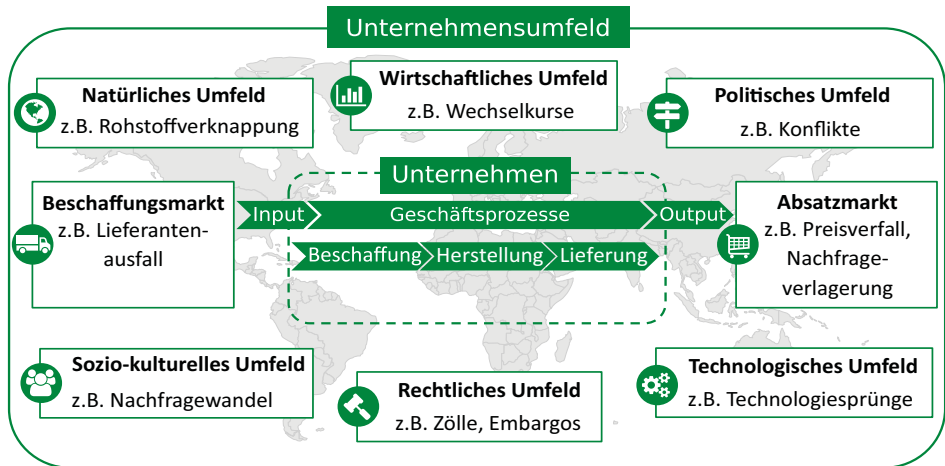
REIFEGRADANALYSE & POTENTIALBEWERTUNG



Produzierende Unternehmen sehen sich heute mit einem zunehmend volatilen Umfeld konfrontiert. Die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens wird dabei maßgeblich von der Fähigkeit bestimmt, mit den internen und externen Einflüssen dieses Umfelds umzugehen. Gerade in den letzten Jahren haben Krisen wie die Corona-Pandemie oder geopolitische Konflikte das Geschäft von Unternehmen weltweit entscheidend beeinflusst. Solche externen Einflüsse sind vielfältig, oft einzigartig und daher schwer vorhersehbar oder planbar.

Volatiles Umfeld

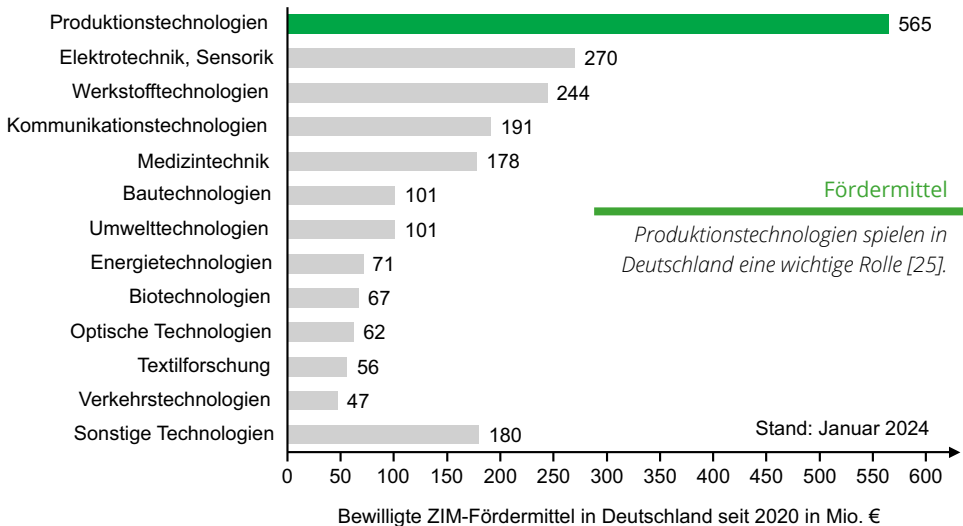
Das Unternehmensumfeld unterliegt zahlreichen externen Einflüssen [24].



61 Reifegradanalyse & Potentialbewertung



Für produzierende Unternehmen erweist sich das technologische Umfeld als entscheidender Hebel, um mit dem komplexen Umfeld umzugehen und dieses selbst zu beeinflussen. Vor dem Hintergrund der globalen Herausforderungen des Klimawandels und der begrenzten Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen ermöglichen z.B. Entwicklungen im Bereich Leichtbau und Ressourceneffizienz Antworten auf ökologische Herausforderungen. Dabei sind insbesondere Produktionstechnologien ein entscheidender Wettbewerbsfaktor, weshalb diese in der deutschen Wirtschaft eine zentrale Rolle spielen und als Innovationstreiber für die wirtschaftliche Entwicklung des Landes von großer Bedeutung sind. Das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz verzeichnet sowohl die meisten Innovationsprojekte als auch das größte Fördervolumen für Innovationsprojekte in Deutschland im Technologiefeld Produktionstechnologien.



63 Herausforderungen

Angesichts des volatilen Umfelds und des komplexen Zusammenspiels externer und interner Einflüsse sowie der hohen Relevanz der Produktionstechnologien ist es für produzierende Unternehmen von entscheidender Bedeutung, den Reifegrad und das Potential von Produktionstechnologien sorgfältig zu analysieren und zu bewerten. Die Technologiereifegrad- und Potentialanalyse ist dabei ein unverzichtbares Werkzeug. Eine präzise Bewertung und Prognose können einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil für produzierende Unternehmen darstellen, bergen jedoch momentan noch einige Herausforderungen. Technologiebewertungen vernachlässigen häufig nicht-technische Perspektiven und somit einen Großteil der Faktoren, die einen Einfluss auf produzierende Unternehmen haben. Außerdem werden Technologiebewertungen häufig mit Hilfe abstrakter Modelle durchgeführt, die für konkrete Strategie- und Investitionsentscheidungen ungeeignet sind. Darüber hinaus lassen sich mit vielen Modellen nur allgemeingültige Handlungsempfehlungen ableiten. Die Berücksichtigung unternehmensindividueller Anforderungen ist mit großem Aufwand verbunden.

Vernachlässigung nicht-technischer Perspektiven,
wie z.B. ökologische oder strategische Einflüsse

1

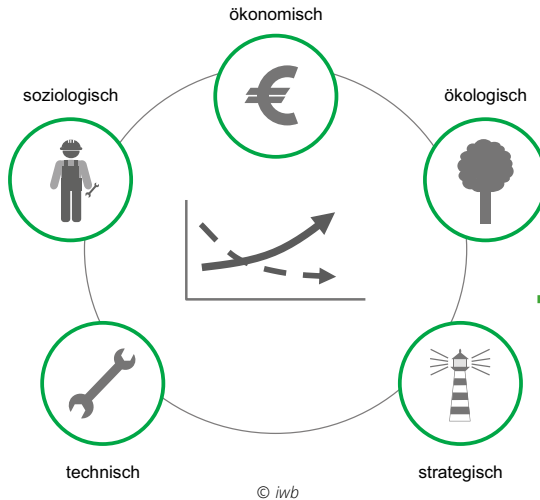
Häufige Nutzung abstrakter Modelle zur Technologiebewertung, die für
konkrete Strategie- und Investitionsentscheidungen ungeeignet sind

2

Ableitung allgemeingültiger Handlungsempfehlungen ohne
Berücksichtigung unternehmensindividueller Anforderungen

3





Ganzheitliche Technologiebewertung

Die vielfältigen Einflüsse auf produzierende Unternehmen müssen in der Bewertung berücksichtigt werden.

1

Berücksichtigung weiterer Perspektiven im Rahmen einer **ganzheitlichen Technologiebewertung**

2

Entwicklung detaillierter Ansätze zur Bewertung von Technologien für **konkrete Strategie- und Investitionsentscheidungen**

3

Entwicklung umfangreicher, gleichzeitig aber auch leicht **anwendbarer und anpassbarer Ansätze**



65 Reifegradanalyse & Potentialbewertung

1 Ganzheitliche Technologiebewertungen

Die Reifegradanalyse und Potentialbewertung von Produktionstechnologien erfordert einen umfassenden Ansatz, der über die rein technische Perspektive hinausgeht. Um das volatile Umfeld adäquat abzubilden, müssen technologische Bewertungen auch strategische, ökologische, soziologische und ökonomische Aspekte einbeziehen [26]. Diese multidimensionale Betrachtungsweise ermöglicht eine realistische Einschätzung der technologischen Entwicklung und ihrer Auswirkungen auf verschiedene Ebenen der Unternehmensführung [27]. Technologien, die nicht nur technisch überzeugen, sondern auch in strategischer Hinsicht nachhaltig sind und gesellschaftliche Akzeptanz finden, können langfristige Wettbewerbsvorteile bieten.

2 Konkrete Entscheidungsmodelle

Die Entwicklung konkreter Strategien und Investitionsentscheidungen erfordert präzise und differenzierte Bewertungsansätze [28]. Hierbei sollte nicht nur die aktuelle Leistungsfähigkeit einer Technologie berücksichtigt werden, sondern auch ihr zukünftiges Potential [29]. Die Identifikation von Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken im Kontext der Unternehmensziele ermöglicht es, gezielt in Technologien zu investieren, die nicht nur kurzfristige Erfolge versprechen, sondern langfristig zur Wertschöpfung des Unternehmens beitragen.

3 Anwendungsfreundliche und anpassbare Bewertungsmodelle

Die Vielfalt produzierender Unternehmen mit unterschiedlichen Strukturen und Anforderungen erfordert flexible Instrumente, die an individuelle Anforderungen angepasst werden können. Eine modulare Struktur, die es ermöglicht, verschiedene Bewertungskriterien je nach Branche, Unternehmensgröße und strategischer Ausrichtung zu gewichten, stellt sicher, dass die Bewertung sowohl für kleine, mittelständische Unternehmen als auch für große Konzerne relevant ist [30].



67 Lösungsansätze KORESIL



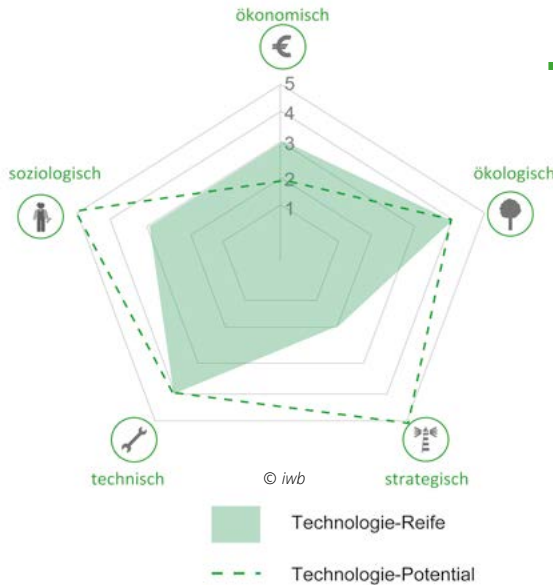
„Wirtschaftlicher Leichtbau auf technologischem Spitzenniveau gelingt nur bei einer konsequent interdisziplinären Herangehensweise und Betrachtung. Die Praxis muss dazu mit der richtigen Methodik für eine Technologiereifegradanalyse unterstützt werden.“

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, iwb der TU München

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde in KORESIL ein Ansatz zur ganzheitlichen Reifegradanalyse und Potentialbewertung von Produktionstechnologien entwickelt (⇒ QR-Code-Link Seite 59). Die Bewertung berücksichtigt neben technischen auch ökonomische, ökologische, soziologische und strategische Faktoren. Das Bewertungsmodell kann durch eigene Gewichtungen an die individuellen Gegebenheiten der Unternehmen angepasst werden. Die Anwendbarkeit wurde durch eine Validierung bei den fünf beteiligten Instituten sowie einem Industrieunternehmen nachgewiesen. Mit diesem Bewertungsmodell kann somit eine umfassende Betrachtungsweise hinsichtlich des Reifegrads und Potentials von Produktionstechnologien geboten werden, um produzierende Unternehmen in ihren Strategie- und Investitionsentscheidungen zu unterstützen.

Bewertungsradar

Die Technologien werden anhand von fünf Dimensionen bewertet.



ZUKUNFT IM BLICK

VISION 2024

Digitalisierung

Die Vernetzung intelligenter Datenverarbeitungssysteme und Simulationen ermöglicht die durchgängige Virtualisierung und Prognose der Produkteigenschaften entlang der Prozesskette.

Soziotechnische Systeme

Bildungs-, Entwicklungs- und Arbeitsprozesse erfolgen interaktiv und individualisiert durch eine frühe Einbindung von XR-Technologien und rücken die Ergonomie des soziotechnischen Systems in den Fokus.

Wandlungsfähige Prozesskette

Adaptive Prozesstechnologien und -verkettungen ermöglichen die ressourceneffiziente und robuste Herstellung von rezyklatbasierten Leichtbaustrukturen.

Kreislaufwirtschaft

Produkte werden nach der Nutzungsphase durch einen etablierten Informationsaustausch gezielt identifiziert, demontiert und durch materialgerechte Stoffstromkanalisierung in den Stoffkreislauf zurückgeführt.

Reifegradanalyse und Potentialbewertung

Flexible Entscheidungsmodelle berücksichtigen technische, strategische, ökologische, soziologische sowie ökonomische Aspekte und können an unternehmensspezifische Anforderungen angepasst werden.

ZUKUNFT GESTALTEN

HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Wandlungsfähige Prozesskette

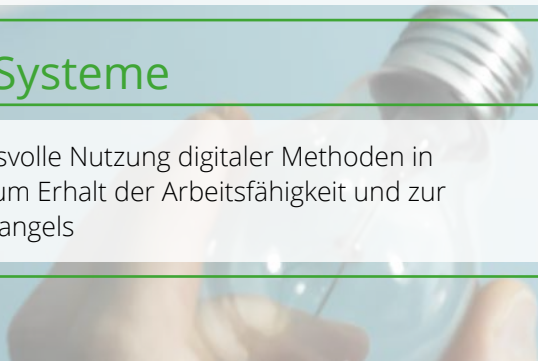
Entwicklung werkstoffunabhängiger, wandlungsfähiger und ressourceneffizienter Technologien für vernetzte Prozessketten

Kreislaufwirtschaft

Schaffung gesetzlicher Rahmenbedingungen für die industrielle Umsetzung der Kreislaufwirtschaft etwa durch die Entwicklung und Einführung eines international standardisierten Digitalen Produktpasses

Soziotechnische Systeme

Durchgängige, verantwortungsvolle Nutzung digitaler Methoden in soziotechnischen Systemen zum Erhalt der Arbeitsfähigkeit und zur Bekämpfung des Fachkräftemangels





Digitalisierung

Virtuelle Abbildung der Prozessketten zur adaptiven Auslegung, Optimierung und Absicherung von Technologien sowie zur Gewährleistung der anforderungsgerechten Prozessinteraktionen

Werkstoffkreislauf

Kooperation aller Beteiligten in der Recyclingkette bei der ganzheitlichen Prozessoptimierung und der Etablierung gemeinsamer Standards zur Steigerung der Werkstoffwiederverwertungsquote und -qualität

Reifegradanalyse und Potentialbewertung

Standardisierung ganzheitlicher Technologiereifegrad- und Potentialanalysen zur unternehmensindividuellen Ableitung von Strategie- und Investitionsentscheidungen

LITERATUR- & QUELLENVERZEICHNIS

- [1] Gude, M. et al.: Ressourceneffizienter Leichtbau für die Mobilität: Wandel - Prognose - Transfer. FOREL-Studie 2018, Dresden, 2018, <https://plattform-forel.de/studie/>
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK (Hrsg.): Leichtbaustrategie der Bundesregierung. Berlin, 2023
- [3] European Aluminium Industry (Hrsg.): Environmental Profile Report, Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. Brüssel, 2018
- [4] Schulze, A.: Bleche aus stranggepressten Aluminiumspänen. Herstellung, Charakterisierung und Umformbarkeit. Dissertation TU Dortmund, 2023
- [5] Selvaggio, A.; Tekkaya, A. E.: Identification of Factors Influencing the Quality of Extruded Profiles Using Aluminum Recyclate-Based Billets. In: Manufacturing Letters, Volume 35, Supplement, 2023, S. 1326-1335, DOI: 10.1016/j.mfglet.2023.08.076
- [6] Haase, M.: Mechanical Properties Improvement in Chip Extrusion with Integrated Equal Channel Angular Pressing. Dissertation TU Dortmund, 2013
- [7] Güley, V. et al.: Direct recycling of 1050 aluminum alloy scrap material mixed with 6060 aluminum alloy chips by hot extrusion. International Journal of Material Forming, vol. 3, 2010, S. 853–856, DOI: 10.1007/s12289-010-0904-z
- [8] Kent, R.: Energy Management in Plastics Processing - strategies, targets, techniques and tools. Elsevier, 2018, DOI: 10.1016/C2017-0-02035-9
- [9] Rieck, M. C.: Mikrospritzgießen gasbeladener Thermoplaste. Dissertation RWTH Aachen, 2023
- [10] TH Köln (Hrsg.): Spritzguss: Werkzeugtemperierung energieeffizienter gestalten. Pressemitteilung 36/2023
- [11] Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (Hrsg.): Der neue 911 Carrera. Technik Workshop – Karosserie und Fertigung. <https://presskit.porsche.de/workshops/de/porsche-new-911/downloads.html>, Abruf: 05.03.2024
- [12] Meschut, G. et al.: Review on mechanical joining by plastic deformation. Journal of Advanced Joining Processes, 5(1):100113, 2022, DOI: 10.1016/j.jajp.2022.100113
- [13] Kappe, F. et al.: Joining of multi-material structures using a versatile self-piercing riveting process. Production Engineering - Research and Development, 17(1):65-79, 2023, DOI: 10.1007/s11740-022-01151-w
- [14] Bielak, C. R. et al.: Further development of a numerical method for analyzing the load capacity of clinched joints in versatile process chains. ESAFORM 2021, 24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgique, 2021, DOI: 10.25518/esaform21.4298
- [15] Meschut, G. et al.: Entfüge- und Fügekonzepte von Leichtbaustrukturen in der Karosserieinstandsetzung. Projektabschlussbericht, In: Forschung für die Praxis P 1030, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 2020, ISBN 978-3-946885-83-2
- [16] Ditter, J.: Methoden zum Entfügen von Stahl-Klebverbindungen bei tiefen Temperaturen. Dissertation Universität Paderborn, 2020

- [17] Modi, S., Vadhavkar, A.: Technology Roadmap: Intelligent Mobility Technologies. Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI., 2019
- [18] Zöllner, M. et al.: Chapter 34 - Carbon fibers. In: Meskers, C.; Worrell, E.; Reuter, M.A. (Hrsg.): Handbook of recycling - State-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists. Elsevier, Amsterdam, 2024, S. 535-550, DOI: 10.1016/B978-0-323-85514-3.00043-9
- [19] Lieberwirth, H.; Krampitz, Th.; Schnutz, S.: Aufschlusszerkleinerung metallintensiver Leichtbaustrukturen zur Freilegung von Werkstoffkomponenten am Beispiel einer Hybrid-B-Säule in Mischbauweise. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe (Band 10), Kapitel Fahrzeuge. TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2017, S. 327-337, ISBN 978-3-944310-34-3
- [20] Steinert GmbH (Hrsg.): Sensorsortierung. <https://steinertglobal.com/de/magnete-sensorsortierer/sensor-sortierung/>, Abruf: 04.04.2024
- [21] Schlütersche Fachmedien GmbH (Hrsg.): Zuverlässige Sortiertechnologie für das Recycling. International Aluminium Journal, <https://www.aluminium-journal.de/zuverlaessige-sortiertechnologie-fuer-das-recycling>, Abruf: 07.03.2024
- [22] Schlütersche Fachmedien GmbH (Hrsg.): Innovativer 3D-Druck von Aluminium in Automobilbranche. International Aluminium Journal, <https://www.aluminium-journal.de/innovativer-3d-druck-von-aluminium-in-automobilbranche>, Abruf: 07.03.2024
- [23] Informationsdienst Wissenschaft e.V. (Hrsg.): Elektromotoren mit künstlicher Intelligenz besser recyceln. <https://nachrichten.idw-online.de/2023/03/22/elektromotoren-mit-kuenstlicher-intelligenz-besser-recyceln-idee-der-tu-freiberg-mit-innovationspreis-ausgezeichnet>, Abruf: 04.04.2024
- [24] Böhnke et al.: Supply-Chain-Strategien im Zeitalter von VUCA. ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112(9):555-558, 2017, DOI: 10.3139/104.111786
- [25] Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand [ZIM] des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.): Bewilligte Fördermittel nach Technologiefeldern, Stand Januar 2024
- [26] Provimedia GmbH (Hrsg.): Technologiebewertung. <https://nachhaltigkeit-wirtschaft.de/technologiebewertung/>, Abruf: 29.01.2024
- [27] Ejsmont, K.: Holistic assessment of intelligent technologies: Top management's perceptions. MATEC Web of Conferences 312, 05002, 2020, DOI: 10.1051/mateconf/202031205002
- [28] El Amine Tali, M. et al.: Decision modelling: Methods and tools. International Conference on Mathematics and Information Technology, Adrar, Algeria, December 4 - 5, 2017, DOI: 10.1109/MATHIT.2017.8259701
- [29] Hofer, A. et al.: Potenzialbasierte Bewertung innovativer Technologien in der Produktion: Ein Konzept zur Bewertung von Produktionstechnologien und deren Einfluss auf die Produktion, das Produkt und das Gesamtunternehmen. ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116(5):294-298, 2021, DOI: 10.1515/zwf-2021-0060
- [30] Pfeffer, S.: Entwicklung einer modularen Methode zur Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion mit Applikation bei Medizinprodukten. Dissertation, Uni Stuttgart, 2017

Wir danken folgenden Unternehmen für die Unterstützung des Whitepapers durch die Bereitstellung von Bildmaterial: Adobe, Anybrid GmbH, BMW AG, Freepik Company S.L., herone GmbH, iStock, Panther Media GmbH, Shutterstock Inc., Unsplash Inc.

Impressum

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya
Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL), TU Dortmund

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), TU München

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut
Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth
Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik (IART), TU Bergakademie Freiberg

Layout und Druckvorbereitung

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden
Dr.-Ing. Daniel Weck
Saskia Trute

Bildnachweise

Die Bildrechte der verwendeten Fotos und Abbildungen sind entweder Eigentum der beteiligten Institute bzw. Hochschulen oder durch eine entsprechende Quellenangabe kenntlich gemacht.

DOI: 10.25368/2024.8 | Veröffentlichung: 04/2024

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen, Texten und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland zulässig und bedarf der schriftlichen Zustimmung der Herausgeber. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.



www.plattform-FOREL.de

Im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens KORESIL wurden entlang einer beispielgebenden Prozesskette für hybride Leichtbaustrukturen notwendige Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte ermittelt. Insbesondere die Steigerung der Ressourceneffizienz und die Unterstützung des Menschen im Kontext zukünftiger Arbeitsumfelder standen dabei im Mittelpunkt der Arbeiten. Hierauf aufbauend konnten Handlungsempfehlungen für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik abgeleitet werden.

Das Projekt KORESIL ist eingebettet in das Projektnetzwerk des Forschungs- und Technologiezentrums für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen – FOREL. Dieses Zentrum wurde im Jahr 2013 als BMBF-Leuchtturmprojekt eingerichtet und ist eine offene, unabhängige Plattform zur Entwicklung von Hightech-Leichtbausystemlösungen in Multi-Material-Design für die Mobilität der Zukunft. Ziel der Plattform ist die Unterstützung von Entwicklungsprojekten, die Vernetzung der Leichtbauforschung innerhalb Deutschlands und die Zusammenführung verschiedener Förderinitiativen.

Kontakt

Plattform FOREL:

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden

Holbeinstr. 3

01307 Dresden

Tel. +49 351 463-38153

forel@plattform-forel.de

www.plattform-FOREL.de