



FORELSTUDIE

**CHANCEN UND HERAUSFORDERUNGEN
IM RESSOURCENEFFIZIENTEN LEICHTBAU
FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT**





Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen 02PJ2760 – 02PJ2763) und mit Mitteln aus dem Energie- und Klimafonds gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



FORELSTUDIE



Impressum

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth

Institut für Aufbereitungsmaschinen, TU Bergakademie Freiberg

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut

Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, Universität Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München

FOREL-Studie

Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienten Leichtbau
für die Elektromobilität

Publ. 2015

ISBN 978-3-00-049681-3

Layout und Druckvorbereitung

Dipl.-Ing. Gordon Just

Dipl.-Ing. MBA Michael Stegelmann

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.

Die Autoren sind bei der Erstellung der Texte und Grafiken mit größter Sorgfalt vorgegangen, trotzdem können Fehler nicht ausgeschlossen werden.

Autoren

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik

ILK, Technische Universität Dresden – Kapitel 2 & 5



Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

Dipl.-Ing. Gordon Just

Dipl.-Ing. Julia Kaufhold

Dipl.-Ing. Michael Müller

Dipl.-Ing. MBA Michael Stegelmann

Laboratorium für Werkstoff- und Fügechnik

LWF, Universität Paderborn – Kapitel 3



Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut

Dipl.-Ing. Michael Gerkens

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften

iwb, Technische Universität München – Kapitel 3 & 5



Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Dr.-Ing. Daniel Hofmann

Dipl.-Ing. M.Sc. Josef Greitemann

Dipl.-Wirt.-Ing. M.Sc. Tobias Kamps

Dipl.-Ing. Johannes Stock

Institut für Aufbereitungsmaschinen

IAM, Technische Universität Bergakademie Freiberg – Kapitel 4



Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth

Dipl.-Ing. Thomas Krampitz

Vorwort

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c.

Werner Hufebach

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)
Technische Universität Dresden



Systemleichtbau erweist sich zunehmend als eine der tragenden Technologiesäulen im Zeitalter der Elektromobilität. Laut dem Fortschrittsbericht 2014 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) befindet sich Deutschland im internationalen Vergleich derzeit hinter den USA und China, was die Investitionen in öffentliche Forschungsförderung auf dem Gebiet der Elektromobilität betrifft. Um im internationalen Wettbewerb eine Vorreiterposition zu erreichen, wurde auf Initiative der NPE das Leuchtturmprojekt FOREL als national übergreifende, offene Plattform gestartet.

Leichtbau bedeutet dabei schon lange nicht mehr nur die Masse zu minimieren, sondern beinhaltet ebenso die Ausschöpfung von Funktions- und Bauteilintegration bei gleichzeitiger Ressourceneffizienz und Automatisierung der Fertigung. FOREL ist daher die ideale Plattform, um in einem vielseitigen Netzwerk aus Forschungs- und Industriepartnern die

Leichtbau- und Fertigungsentwicklungen für die Elektromobilität langfristig systemisch zu koordinieren. Zudem bietet es insbesondere auch kleinen und mittleren Unternehmen in Deutschland die Möglichkeit, im international umkämpften Markt der Elektromobilität als Innovationsträger zu bestehen. Darüber hinaus leistet FOREL einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag dazu, Deutschland langfristig als Leitmarkt und Leitanbieter auf dem Gebiet der Elektromobilität zu etablieren. Dies bedeutet, dass neben einer ständigen Analyse der Wirtschaftlichkeit die ökologische Bewertung zunehmend in den Vordergrund rückt. Produktionsprozesse aller Branchen müssen immer höhere politische Umweltvorgaben erfüllen, weshalb ökologische Bewertungen von Werkstoffeinsatz und Fertigungstechnologien, wie etwa durch Life Cycle Assessment (LCA), noch mehr an Bedeutung gewinnen werden.

Die vorliegende Studie des FOREL-Koordinationsprojektes sowie erste Ergebnisse der gestarteten Technologieprojekte zeigen bedeutende Potenziale und großen Handlungsbedarf für zukünftige Entwicklungen von Leichtbaustrukturen auf.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Entwicklung der Elektromobilität | 1 |
| 1.2 | Durchführung und Auswertung der FOREL-Studie | 8 |
| 2 | Werkstoffeinsatz und Fertigungstechnologien | 11 |
| 2.1 | Werkstoffe und Multi-Material-Design | 12 |
| 2.2 | Herausforderungen innovativer formgebender Fertigungsverfahren | 21 |
| 3 | Füge- und Trenntechnologien in Leichtbauanwendungen | 29 |
| 3.1 | Eingesetzte Werkstoffe und Produktionstechnologien | 31 |
| 3.2 | Hybridfügen im Multi-Material-Design | 36 |
| 3.3 | Zukünftige Entwicklungen | 39 |
| 3.4 | Anforderungen an die Füge- und Trenntechnik | 43 |
| 4 | Recyclingstrategien für Leichtbauwerkstoffe | 49 |
| 4.1 | Produktionsabfälle als ein relevanter Bestandteil der Fertigung | 50 |
| 4.2 | Herausforderungen für den Einsatz von Recyclingware in der Fertigung | 58 |
| 5 | Prozesskettenanalyse und Technologieplanung | 69 |
| 5.1 | Prozesskettenanalyse für hybride Mischbauweisen | 69 |
| 5.2 | Bedeutung der Technologieplanung und -identifikation | 75 |
| 6 | Zusammenführung und Analyse | 79 |
| | Literatur | IX |

1 Einleitung



Die Berechenbarkeit von hybriden Leichtbaustrukturen und zugehörigen Fertigungsprozessen stellt einen wesentlichen Meilenstein für den Durchbruch innovativer Systemlösungen der Elektromobilität dar.”

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

1.1 Entwicklung der Elektromobilität

Rapide ansteigende Bevölkerungszahlen und die zunehmende Konzentration der Menschen in Ballungsgebieten verlangen in Zusammenhang mit dem Bedürfnis nach sauberen Energiequellen und emissionsarmen Fahrzeugen nach einer neuen Generation der Mobilität. Aktuelle Luftbelastungswerte in Megacities, wie etwa Mexiko City, Peking oder Delhi, welche die empfohlenen Grenzwerte um ein Mehrfaches übersteigen, sowie die starke Abhängigkeit der Automobile vom Erdöl erfordern ein Umdenken bei der Gestaltung zukünftiger Mobilitätskonzepte.

Weltweit sind unterschiedliche Entwicklungen zu beobachten, wie diesen Herausforderungen mit neuartigen Mobilitäts- und Fahrzeugkonzepten entgegengetreten wird. So ist in einigen Ballungsräumen Chinas im Eiltempo die Nutzung verbrennungsmotorbetriebener Pkw verboten worden. Andere Ansätze präferieren die Schaffung eines Anreizsystems für

Motivation

die Nutzung von Elektrofahrzeugen, etwa durch Einführung von Sonderrechten bei der Straßen- und Parkplatznutzung oder steuerliche Vergünstigungen.

Da die Substitution sämtlicher verbrennungsmotorbetriebener Fahrzeuge in den Städten nicht zielführend ist, findet derzeit ein sukzessiver Übergang zur sauberen Mobilität unter anderem mit elektrifizierten, emissionslosen bzw. -armen Fahrzeugen in Ballungsgebieten statt. Zur Verringerung der Feinstaubbelastung in deutschen Großstädten wurden im Jahr 2008 Umweltzonen eingeführt und seitdem fortlaufend erweitert sowie verschärft. Dies führte dazu, dass aktuell in die Umweltzonen von ca. 50 deutschen Großstädten nur noch schadstoffarme Fahrzeuge einfahren dürfen. 2011 wurde zudem das langfristig angelegte *Regierungsprogramm Elektromobilität* in Deutschland gestartet. Im Vordergrund stehen dabei die Unterstützung technologischer Innovationen durch anwendungsnahe und technologieneutrale Förderprogramme für Forschung und Entwicklung sowie die Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen für die Elektromobilität. In diesem Zusammenhang ist bereits 2010 die unikale Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) auf Initiative der Bundesregierung gemeinsam mit Industrie und Wissenschaft initiiert worden. Die zwei zentralen Ziele der NPE sind die Etablierung Deutschlands als Leitmarkt für Elektromobilität mit einer Million Elektrofahrzeugen bis 2020 und als Leitanbieter hoch-innovativer E-Mobilitäts-Produkte. Dazu hat die NPE drei Phasen definiert:

- 1.) Die *Marktvorbereitung*, in der die wichtigsten Voraussetzungen mithilfe von Forschungs- und Entwicklungsprojekten bis Ende 2014 geschaffen werden.
- 2.) Die *Markthochlaufphase* bis Ende 2017, in der die notwendigen Maßnahmen umgesetzt bzw. Rahmenbedingungen geschaffen und die identifizierten Anwendungspotenziale genutzt werden.
- 3.) Die Etablierung der Elektromobilität als wirtschaftlich abbildbarer *Massenmarkt* ab 2018.

Die Marktvorbereitungsphase ist abgeschlossen und im Fortschrittsbericht 2014 der NPE ausführlich bilanziert. Daraus geht insbesondere hervor, dass die Grundvoraussetzungen zwar erfolgreich geschaffen worden sind, jedoch zahlreiche weitere Maßnahmen zeitnah ergriffen werden müssen, um die ambitionierten Ziele bis 2020 zu erreichen. Diverse Analysen und Studien zum Nutzerverhalten ermöglichten es, geeignete Rahmenbedingungen und Anreizsysteme zu identifizieren, die in der Markthochlaufphase zügig umzusetzen sind. Zudem stellt die NPE einen Gesamtinvestitionsbedarf von ca. 2,2 Mrd. Euro für die Fortführung der angestoßenen Forschungs- und Entwicklungsinitiativen fest.

Die Modellvielfalt für Elektrofahrzeuge nimmt weiter zu und das Engagement der Industrie in der Elektromobilität steigt kontinuierlich. Obwohl dies Deutschlands gute Ausgangsposition auf dem Elektromobilitätsmarkt stärkt, liegt es als Anbieter derzeit nur im Mittelfeld. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Umsetzung eines umfassenden Maßnahmenpaketes zur Förderung der Elektromobilität sowie zum Ausbau der Ladeinfrastruktur in Deutschland.

Bei genauerer Betrachtung der gegenwärtigen Entwicklung von Elektrofahrzeugen fällt auf, dass die zahlreichen Konzepte auf unterschiedlichen Ansätzen basieren. Viele der heute verfügbaren Elektrofahrzeuge stellen Anpassungskonstruktionen (*conversion design*) von konventionell angetriebenen Pkw dar. Der Verbrennungsmotor wird dabei direkt durch Batteriesystem und elektrischen Antrieb substituiert. Dem gegenüber steht die komplette Neukonstruktion und -entwicklung (*purpose design*) serienfähiger Elektrofahrzeuge, wodurch zusätzlicher Gestaltungsspielraum entsteht und die frühzeitige Berücksichtigung veränderter Anforderungen möglich ist, wie in Abbildung 1.1 (S. 4) dargestellt. Obwohl im Ansatz unterschiedlich, sind beide Strategien auf konsequenten Leichtbau zur Reduktion der Fahrzeugmasse angewiesen.

Seit Beginn der NPE-Initiativen ist der Leichtbau als tragende Technologiesäule in der Elektromobilität verankert. Die Bedeutung des Leichtbaus zeigt sich anschaulich an der sich selbst verstärkenden Gewichtsspi-

rale. Diese beschreibt die kontinuierlich zunehmende Fahrzeugmasse aufgrund von zusätzlichen Sicherheits- und Komfotelementen in Fahrzeugen sowie die daraus resultierende zusätzlich notwendige Antriebsleistung.



Abbildung 1.1: Vorteile von Anpassungs- und Neukonstruktionen

Diese Spirale ist, wie aus dem aktuellen NPE-Fortschrittsbericht hervorgeht, durch konsequenten Leichtbau – etwa mit modernen Faser-Kunststoff-Verbunden, Hybridwerkstoffen, Leichtmetallen oder Hochleistungsstählen – gestoppt worden. Nun gilt es, die Umkehrung der Massenzunahme voranzutreiben und die Gesamtmasse zukünftiger Fahrzeuge weiter zu reduzieren. Gezielter Leichtbau hat dabei direkten und indirekten Einfluss auf die Masse und Reichweite sowie die notwendige Batterie- und Motorleistung. Eine Verringerung der Batteriemasse senkt direkt die Belastung von Strukturbauteilen, was wiederum den möglichen Leichtbaugrad und somit das Potenzial zur Masseneinsparung erhöht. Mit zunehmender Massenreduktion nimmt die erforderliche Antriebsleistung ebenfalls ab, wodurch der gesamte Energiebedarf des Fahrzeugs reduziert

wird. Diese Umkehrung der Gewichtsspirale wird deshalb zunehmend als Leichtbauspirale bezeichnet (Abbildung 1.2). In Ergänzung dazu umfasst Leichtbau nicht mehr nur die Massenreduktion, sondern beinhaltet ebenso die Nutzung von Funktions- und Bauteilintegration bei gleichzeitiger Ressourceneffizienz und Fertigungsautomatisierung.

Potenziale

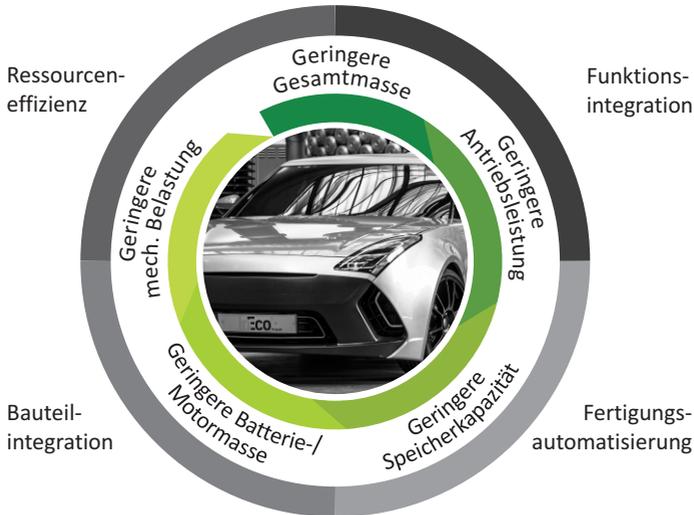


Abbildung 1.2: Leichtbauspirale

Zur Förderung der Entwicklung des Leichtbaus im Bereich der Elektromobilität wurde im Juli 2013 das *Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität* (FOREL) initiiert. Federführend ist das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK, Technische Universität Dresden), das mit dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF, Universität Paderborn), dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb, Technische Universität München) sowie dem Institut für Aufbereitungsmaschinen (IAM, Technische Universität Bergakademie Freiberg) zusammenarbeitet. Der Inhalt dieser unikalenen BMBF-Initiative ist die systemi-

sche Betrachtung der nachhaltigen Entwicklung zukünftiger Elektrofahrzeuge zur gezielten Schließung vorhandener Technologie- und Wissenslücken sowie die Zusammenführung des in Deutschland derzeit nur isoliert vorhandenen Leichtbau-Know-hows für die Elektromobilität. FOREL ist dabei als derjenige Baustein der Forschungs- und Entwicklungsinitiativen der NPE angelegt, der Industrie und Wissenschaft auf dem Gebiet des Leichtbaus zusammenführt und miteinander vernetzt. Ziel von FOREL ist es daher, die Etablierung Deutschlands als Leitanbieter für Leichtbauanwendungen in der Elektromobilität zu unterstützen.

Das FOREL-Koordinationsprojekt

| | |
|----------------|---|
| Ziel | Systemische Betrachtung zur gezielten Schließung vorhandener Lücken in Entwicklungs- und Prozessketten der Elektromobilität |
| Lösung | Aufbau eines vorwettbewerblichen Leichtbau-Forschungsnetzwerkes mit industrieübergreifendem Technologiezentrum und Bereitstellung von serienfähigen Schlüsseltechnologien für die ressourceneffiziente Elektromobilität |
| Wirkung | Funktionsintegrativer Systemleichtbau in Multi-Material-Design ist aufgrund der inhärenten Material- und Energieeffizienz eine wesentliche Schlüsseltechnologie für die nachhaltige Elektromobilität |
| Nutzen | Verknüpfung der – an vielen Stellen in Deutschland bislang weitgehend isoliert vorhandenen – Erfahrungen zur großserienfähigen Auslegung und Herstellung sowie zum Recycling von Leichtbaustrukturen |

Dazu werden im Rahmen von FOREL zusammen mit zahlreichen Partnern aus Industrie und Forschung fortlaufend Technologieprojekte zur Entwicklung von Hightech-Leichtbausystemlösungen im Multi-Material-Design für Elektrofahrzeuge der Zukunft initiiert. Durch die Integration der Technologieprojekte in die Plattform FOREL ergibt sich eine systematische, fachliche Koordination der Entwicklung von Fertigungstechnologien zur Herstellung von Leichtbaustrukturen für Elektrofahrzeuge. Schließlich werden die entwickelten Prozessketten im FOREL-Technologiezentrum am Standort Dresden aufgebaut und vernetzt, um deren Verwertungspotenzial aufzuzeigen. Insbesondere die Vernetzung

der Technologieprojekte zielt darauf ab, Prozesse gezielt zusammenzuführen und den Partnern neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit aufzuzeigen. So können Ergebnisse verschiedener Teilprojekte auf Problemstellungen neuer Vorhaben angewandt werden. Umgekehrt können die Ergebnisse neuer Vorhaben wieder rückwirken und zur Weiterentwicklung vorhandener Technologien genutzt werden. Die so entwickelten Verfahren lassen sich anschließend in kurzer Zeit in industrielle Prozessketten überführen.

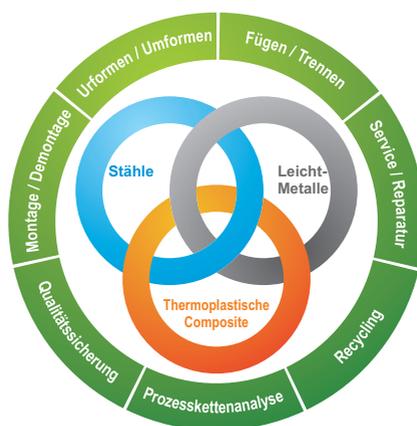


Abbildung 1.3: Technologiebereiche im FOREL-Koordinationsprojekt

Zur Unterstützung dieser Entwicklungen wurde im Rahmen des FOREL-Koordinationsprojektes im vergangenen Jahr eine Expertenumfrage durchgeführt, um aktuelle Herausforderungen zu identifizieren sowie Potenziale von Leichtbauwerkstoffen, Fertigungs- und Verarbeitungstechnologien besser einschätzen zu können. Dabei orientierten sich die Fragen an den in FOREL fokussierten Technologiebereichen Ur-/Umformverfahren, Füge-/Trennverfahren, Montage-/Demontagetechologien, Recycling, Qualitätssicherung, Service und Reparatur sowie Prozesskettenanalyse (Abbildung 1.3).

Die Ergebnisse der Umfrage sind in der vorliegenden Studie zusammengefasst. Sie zeigt über den Fortschrittsbericht der NPE hinaus Potenziale auf dem Gebiet des Leichtbaus auf und gibt konkrete Beispiele für künftige Investitionen in Forschungs- und Entwicklungsprojekte. In diesem Zusammenhang werden auch weitere Studien zum Thema *Zukunft der Elektromobilität* berücksichtigt [1, 2, 3, 4, 5].

1.2 Durchführung und Auswertung der FOREL-Studie

Die Studie basiert auf den Ergebnissen einer Onlineumfrage, die über eine Dauer von 9 Wochen durchgeführt wurde. An der Umfrage nahmen 240 Experten teil. Die Abbildungen 1.4 und 1.5 (S. 9) geben einen Überblick über die beteiligten Unternehmen sowie deren ungefähren Umsatz und Größe. In die Studie fließen Antworten von Kleinbetrieben und mittelständischen Unternehmen ebenso ein wie Einschätzungen aus Forschung und Entwicklung (F&E) sowie Prognosen von Großunternehmen wie Zulieferern und OEM aus der Automobilbranche. Letztere bilden den treibenden Faktor bei der Entwicklung zukünftiger Elektrofahrzeuge, sodass ihre Teilnahme besonders interessante Rückschlüsse auf Entwicklungspotenziale erlaubt. Um eine möglichst breite Einschätzung zu erhalten, wurden jedoch nicht nur Experten aus dem unmittelbaren Umfeld der Automobilbranche befragt, sondern ebenso aus den Bereichen der Luft- und Raumfahrt, der Chemie, der Rohstoffe und Halbzeuge, der Elektronikindustrie sowie des Maschinen- und Anlagenbaus. Da viele Entwicklungen in unterschiedlichen Branchen parallel entstehen und oftmals mit geringen Anpassungen übertragbar sind, können anhand der Ergebnisse Schnittmengen erkannt und eine synergetische Nutzung von F&E-Ergebnissen sowie die engere Zusammenarbeit der beteiligten Unternehmen vorangetrieben werden.

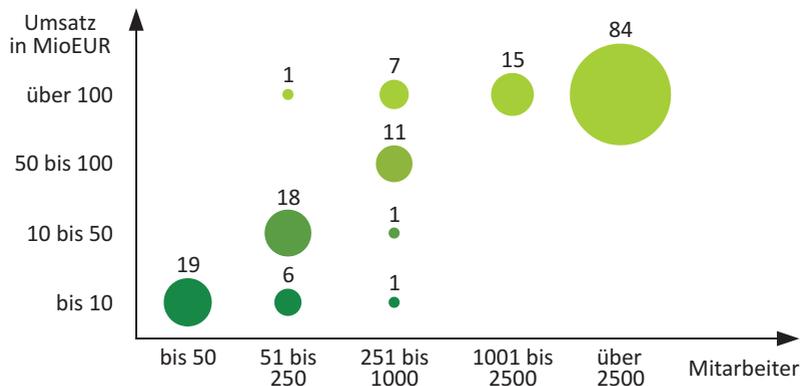


Abbildung 1.4: Einordnung der Befragten nach Unternehmensgröße und Umsatz

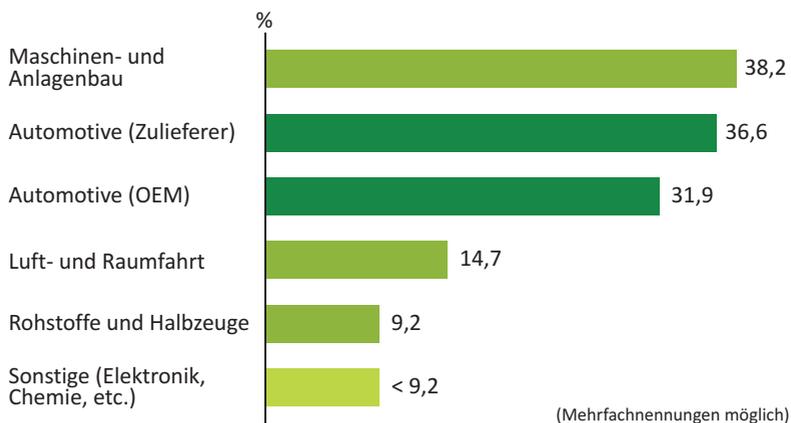


Abbildung 1.5: Branchenzugehörigkeit der Umfrageteilnehmer

In den folgenden Kapiteln werden ausgewählte Ergebnisse der Befragung vorgestellt und im Kontext der aktuellen Entwicklungen der Elektromobilität ausgewertet. Zudem werden am Ende jedes Kapitels zukunfts-trächtige Entwicklungspotenziale für den Leichtbau in der Elektromobilität abgeleitet. Zur besseren Differenzierung wurden die Ergebnisse teilweise für einige Branchen getrennt ausgewertet. So erfolgte zur Bewertung

der Kunden-Lieferanten-Beziehung die Gegenüberstellung der Antworten der OEM und der Zulieferer aus dem Automobilbereich. Zur Bewertung des Ergebnistransfers zwischen Theorie und Praxis wurden die Antworten der Unternehmen und der Forschungseinrichtungen miteinander verglichen. Um den Innovationsgrad in den verschiedenen Branchen darzustellen, wurden zudem einige Ergebnisse, z.B. unterteilt nach Maschinenbau, Automotive sowie Luft- und Raumfahrt, getrennt ausgewertet.

2 Werkstoffeinsatz und Fertigungstechnologien



Ressourceneffizienter Leichtbau bedeutet, gezielt die richtigen Werkstoffe an der richtigen Stelle einzusetzen, um mit den geeigneten Fertigungsverfahren die werkstoffspezifischen Potenziale bestmöglich auszunutzen.“

Prof. Dr-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. Werner Hufenbach

Die Werkstoff- und Fertigungstechnologien sind die grundlegenden Bestandteile der Wertschöpfungskette zur Entwicklung und Produktion von Leichtbaustrukturen für die Elektromobilität. Dabei ist im Automobilbau der Trend zum zunehmenden Einsatz von Mischbauweisen erkennbar, wie schon in der VDI-Studie *Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung* hervorgehoben wurde [4]. Dies bedeutet, dass für spezielle Anwendungen mit komplexen Anforderungen zunehmend maßgeschneiderte Lösungen durch die Kombination von Werkstoffen entwickelt werden, gemäß der Devise: „*der richtige Werkstoff an der richtigen Stelle mit der richtigen Ökologie und zu angemessenen Kosten*“. Dies bedeutet gleichzeitig auch eine hohe Gestaltungsfreiheit und -vielfalt. Den gestiegenen Anforderungen muss demnach auch bei der Entwicklung flexibler Fertigungsprozesse Rechnung getragen werden (Abbildung 2.1, S.12).

Angepasstes
Werkstoff-
design

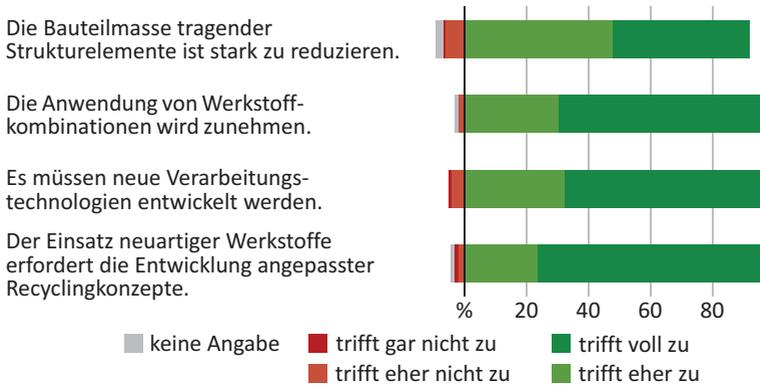


Abbildung 2.1: Antworten auf ausgewählte Thesen zur Entwicklung und Herstellung zukünftiger Elektrofahrzeuge

2.1 Werkstoffe und Multi-Material-Design

Beim Vergleich der Werkstoffzusammensetzungen aktueller und zukünftiger Fahrzeuge ist ein klarer Trend zu erkennen: Während der Anteil an klassischen Stählen abnimmt, nimmt das Spektrum an eingesetzten Werkstoffen zu [6]. Dieser Trend ist in den Umfrageergebnissen branchenübergreifend zu beobachten und wird auch von Forschungseinrichtungen bestätigt. Dem wurde bspw. durch die Entwicklung des Demonstratorfahrzeuges *InEco*[®] Rechnung getragen und somit ein generisches Beispiel des derzeit realisierbaren Multi-Material-Designs umgesetzt (Abbildung 2.2, S. 13). Ein aktuelles Beispiel für ein umfassendes Multi-Material-Design aus der direkten industriellen Anwendung ist der *BMW i3* mit einem Anteil von knapp 50 Gewichtsprozent an faserverstärkten Kunststoffen.

Die Studienergebnisse zeigen, dass metallische Werkstoffe weiterhin ein wichtiger Bestandteil struktureller Leichtbauteile im Automobil sein werden. Konventionelle Stähle werden dabei zunehmend durch hochfeste Stähle ersetzt, was eine Massereduktion zur Folge hat.

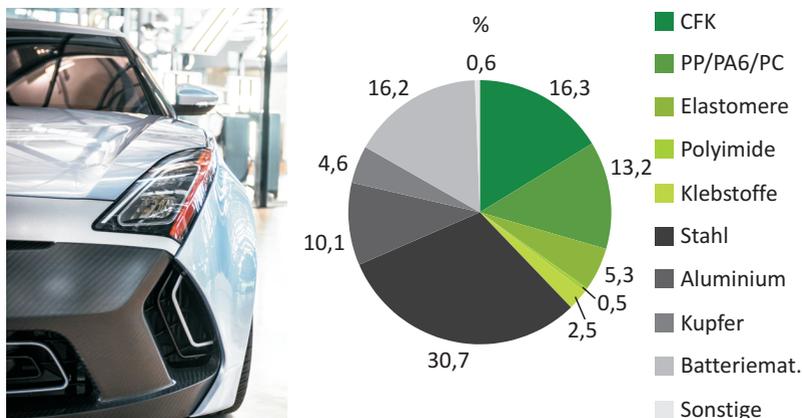


Abbildung 2.2: Werkstoffmix im InEco® (Quelle: ILK)

Allerdings gewinnen auch zunehmend moderne, verstärkte Polymerwerkstoffe an Bedeutung. Konventionelle Werkstoffe wie Gusseisen werden den Befragten zufolge eher an Bedeutung verlieren (Abbildung 2.3, S. 14).

Klar erkennbar ist, dass es aus Sicht der Befragten nicht „den“ Werkstoff der Zukunft geben, sondern dass vielmehr eine Kombination unterschiedlicher Werkstoffe zum Einsatz kommen wird, was wiederum Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette und vor allem die Fügeprozesse bei der Herstellung zukünftiger Elektrofahrzeuge hat. Dies beginnt bereits bei der grundlegenden Gestaltung der Fügeverbindung und erstreckt sich über die Bereitstellung und Handhabung unterschiedlicher Fügepartner sowie die Wahl des Fügeverfahrens bis hin zur individuellen Wahl der Prozessparameter. Exemplarisch sei hier erwähnt, dass sich die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) um mehrere Größenordnungen unterscheiden, was bei starken Temperaturunterschieden, wie sie z.B. beim thermischen Fügen auftreten können, zu Problemen führt. Zentrale Fragestellungen der zukünftigen Füge-technik werden in Kapitel 3 (S. 29 ff.) entsprechend diskutiert.

Bei der Analyse der in den befragten Unternehmen aktuell verwendeten Werkstoffkombinationen ist festzustellen, dass vor allem Metalle, wie Aluminium oder Stahl, sowie Kombinationen dieser Werkstoffe im Automobilbau Anwendung finden. In Tabelle 2.1 (S. 15) wird dies für OEM und Zulieferer des Automotive-Bereiches hervorgehoben. In beiden Fällen wird hauptsächlich Stahl mit Stahl bzw. Stahl mit Leichtmetallen, wie Aluminium, Magnesium oder Titan, kombiniert. Kombinationen aus artfremden Werkstoffen, wie Stahl/Thermoplast oder Leichtmetall/Duroplast, sind derzeit weit weniger verbreitet. Tendenziell werden dabei Thermoplaste häufiger mit metallischen Werkstoffen kombiniert als duroplastische Kunststoffe.

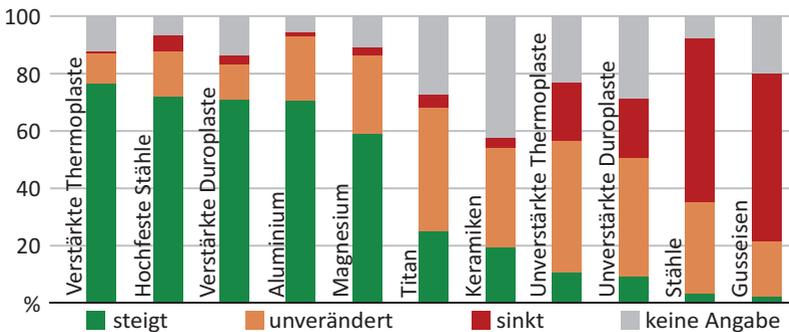


Abbildung 2.3: Einschätzung des Werkstoffeinsatzes für strukturell relevante Leichtbauteile in den nächsten 5 Jahren hinsichtlich der Elektromobilität

Ein aktuelles Beispiel aus der Forschung zeigt dabei, wie die Kombination aus hochfestem Stahl und Thermoplasten umgesetzt werden kann. Im Projekt *3D-Hybrid* haben Industriepartner gemeinsam mit dem ILK eine neuartige Multi-Material-Leichtbauweise entwickelt und am Beispiel einer B-Säule umgesetzt [7]. Besondere Bedeutung kommt hierbei der Grenzschicht zwischen Stahl und Kunststoff zu, welche eine ausreichende Adhäsion aufweisen sowie den prozessinduzierten Belastungen standhalten muss. Als Ergebnis konnten ein ressourceneffizienter Fertigungs-

prozess und eine wirtschaftlich wettbewerbsfähige B-Säule realisiert werden (Abbildung 2.4, S. 16). Ebenso konnten die Herausforderungen der Lackierung sowie der Recyclingfähigkeit unter Annahme einer metallurgischen Rückgewinnung des Stahls und einer Regranulierung des thermoplastischen Kunststoffes bewältigt werden.

Tabelle 2.1: Anteile der befragten OEM und Zulieferer, die folgende Werkstoffkombinationen in ihrem Unternehmen einsetzen

| OEM | Stahl | Leichtmetall | Thermoplaste | Duroplaste |
|--------------|-------|--------------|--------------|------------|
| Stahl | 62 % | 55 % | 32 % | 25 % |
| Leichtmetall | | 54 % | 42 % | 38 % |
| Thermoplaste | | | 38 % | 22 % |
| Duroplaste | | | | 32 % |

| Zulieferer | Stahl | Leichtmetall | Thermoplaste | Duroplaste |
|--------------|-------|--------------|--------------|------------|
| Stahl | 61 % | 45 % | 35 % | 23 % |
| Leichtmetall | | 52 % | 41 % | 29 % |
| Thermoplaste | | | 40 % | 14 % |
| Duroplaste | | | | 25 % |

Die reine Massenreduktion ist dabei nicht der einzige Vorteil bei der Umsetzung des Multi-Material-Designs. Über 80 % der Befragten geben an, dass sie durch die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe eine deutlich verbesserte *Erreichbarkeit der geforderten mechanischen Eigenschaften* eines Bauteils erwarten. Durch ein lokal angepasstes Bauteilverhalten – aufgrund des zielgerichteten Werkstoffeinsatzes – kann den steigenden Sicherheitsanforderungen begegnet werden. So können etwa bei hochbelasteten Strukturbauteilen lokal kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe eingesetzt werden, um große Lasten bestmöglich aufzufangen. In Ergänzung dazu können in crashrelevanten Bauteilen Schaumstrukturen eingesetzt werden, die eine hervorragende Energieaufnahme ermöglichen, sich sehr gut für die Herstellung komplexer Geometrien eignen und gleichzeitig äußerst leicht sind. Weiterhin ergeben sich Möglichkeiten zur *Funk-*

Vorteile von Mischbauweisen

tionsintegration, sodass Bauteile neben ihrer mechanischen Funktion der Lastübertragung noch zusätzliche Aufgaben übernehmen können oder ihren Schädigungszustand durch integrierte Sensorik selbstständig überwachen.

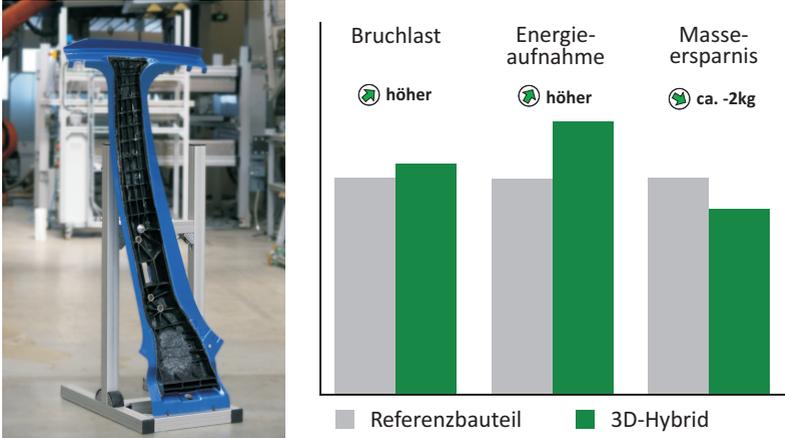


Abbildung 2.4: 3D-Hybrid B-Säule im Vergleich zur reinen Stahlreferenz [7]

Während ihres Einsatzes in zukünftigen Elektrofahrzeugen werden die Bauteile jedoch nicht nur mechanisch beansprucht. Vor allem die Umgebungseinflüsse auf das Fahrzeug müssen auch in Zukunft berücksichtigt werden. Diesbezüglich geben fast 70 % der Befragten an, dass durch Werkstoffkombination spezielle Eigenschaften, wie *Korrosionsschutz* oder *Medienbeständigkeit*, besser eingestellt werden können, um Bauteile ideal auf ihre Einsatzumgebung abzustimmen (Abbildung 2.5, S. 17). Dies trifft auf Automobile in besonderem Maße zu, da sie nahezu dauerhaft Witterungseinflüssen ausgesetzt sind und im Winter etwa durch den Einsatz von Streusalzen zusätzlich beansprucht werden.

Herausforderungen

Den zahlreichen Vorteilen der Mischbauweisen stehen große Herausforderungen, wie etwa das *Recycling*, die *Wirtschaftlichkeit* oder die *Füge- und Umformbarkeit*, gegenüber. Hier gilt es, diese Kriterien schon frühzeitig in der Entwicklungsphase zu berücksichtigen, da ohne durchdachte und verfügbare Lösungen eine industrielle Umsetzung nicht möglich ist.

Im Technologieprojekt *ReLei*, das im Rahmen von FOREL initiiert wurde, wird deshalb ein interdisziplinärer Ansatz verfolgt, der Recycling als zentralen Bezugspunkt aller Entwicklungsbestrebungen betrachtet. Das Ziel ist unter anderem die Entwicklung eines Integralschäumverfahrens zur Verarbeitung von wiederaufbereiteten Hochleistungswerkstoffen mit minimierter Werkstoffdegradation. Detailliertere Betrachtungen zum Thema Elektromobilität und Recycling sind in Kapitel 4 (S. 49 ff.) zu finden.

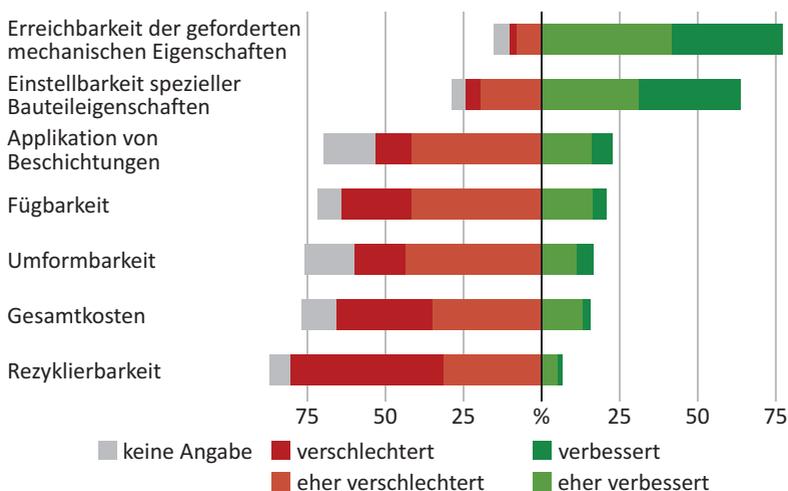


Abbildung 2.5: Einschätzung der Befragten zum Einfluss des Einsatzes von Mischbauweisen

Bei Betrachtung der größten Hemmnisse für die Umsetzung von Mischbauweisen ist branchenübergreifend zu erkennen, dass die Punkte *Erhöhter Aufwand für Design und Auslegung*, *unzureichende Materialcharakterisierung* und *erhöhte Maschinenkosten* von den Befragten als die wesentlichen kritischen Punkte identifiziert werden (Abbildung 2.6, S. 18). Dies kann u.a. auf nicht oder kaum vorhandene Berechnungsgrundlagen und den Mangel an Werkstoffkatalogen oder vergleichbaren Nachschlagewerken, die für Metalle seit Jahrzehnten zum Standard gehören, zurückgeführt werden. Hier sollten, in den nächsten Jahren die Voraussetzun-

Bessere
Prüftechnik

gen für einheitliche Normen und Standards geschaffen werden. Aufgrund der sehr großen Anzahl an möglichen Werkstoffkombinationen gilt es zunächst, vorhandene Prüfmethoden weiterzuentwickeln und neue werkstoffgerechte Charakterisierungsmethoden abzuleiten. So können diese Prüfmethoden zukünftig einen entscheidenden Beitrag zur erfolgreichen Bauteilauslegung und Abbildung der Werkstoffe in der Simulation leisten. Ein weiterer fundamentaler Aspekt ist hierbei die frühzeitige Einführung von Qualitätsmanagementsystemen, um die Prüf- und Auslegeverfahren reproduzierbar und effizient zu gestalten.

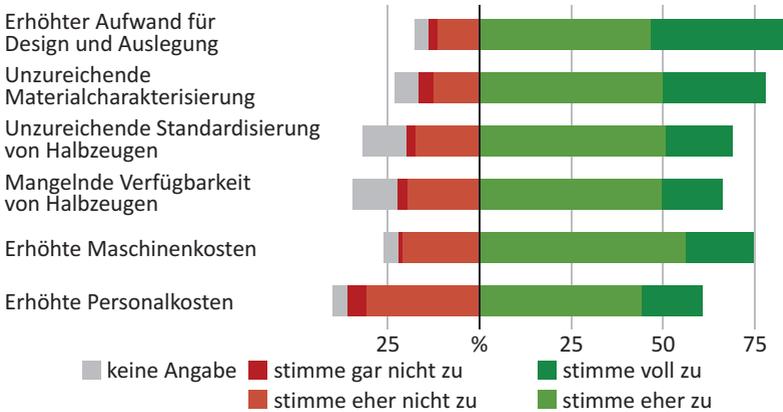


Abbildung 2.6: Einschätzung der Befragten hinsichtlich der größten Hemmnisse beim Einsatz von Mischbauweisen

Neuartige Mischbauweisen stehen im Kostenvergleich in sehr starkem Wettbewerb mit monolithischen Bauweisen. Dabei teilt die Mehrheit der Umfrageteilnehmer die Sorge, dass bei der Nutzung von Mischbauweisen sowohl die Maschinen- als auch die Personalkosten ansteigen werden. Dies darf jedoch nicht mit einer generellen Ablehnung von erhöhten Bauteilkosten verwechselt werden.

Auf die Frage, in welchen Bereichen die Befragten Potenziale zur Maseneinsparung sehen, wurden die Bereiche *Antriebssystem* (79%), *Trag- und Sicherheitszelle* (73%) sowie *Verkleidungselemente* (68%) als am re-

levantesten eingeschätzt (Abbildung 2.7). Zusätzlich wurde untersucht, ob mit dem Masseneinsparpotenzial eine Akzeptanz von Mehrkosten einhergeht. Bspw. würden 72 % derjenigen Befragten, die ein Masseneinsparpotenzial bei der *Trag- und Sicherheitszelle* sehen, tatsächlich auch Mehrkosten akzeptieren.

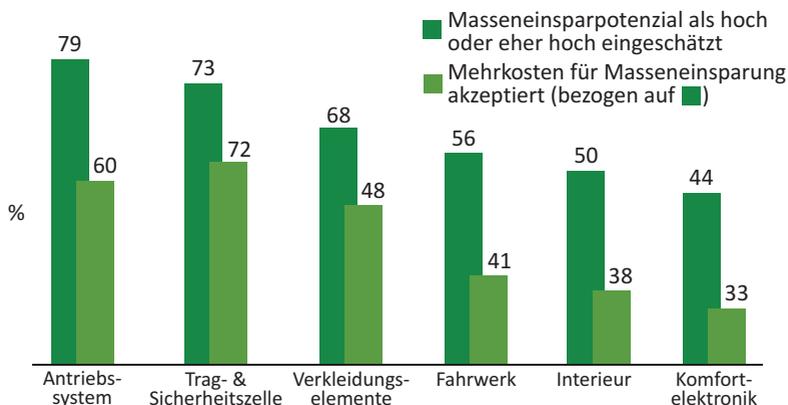


Abbildung 2.7: Einschätzung der Befragten, ob Masseneinsparpotenziale in verschiedenen Fahrzeugbereichen vorhanden sind, und die Bereitschaft, dort Mehrkosten zu akzeptieren

Erkennbar ist jedoch auch, dass für weniger sicherheitsrelevante Bauteile, wie *Verkleidungselemente*, die Bereitschaft, höhere Kosten zu akzeptieren, deutlich geringer (48 %) ausfällt. Hierbei ergeben sich vor allem Potenziale für ganzheitliche Ansätze, die nicht nur Werkstoffe substituieren, sondern durch integrative Lösungen Masse, Material und Investitionsaufwand aufeinander abstimmen, um sowohl eine effiziente Fertigung als auch Recyclingfähigkeit des Bauteils nach Nutzungsende zu erlauben. Die Höhe der akzeptierten Mehrkosten unterscheidet sich dabei stark zwischen den einzelnen Branchen [8]. So werden, aufgrund vergleichsweise höherer Treibstoffkosten und geringerer Stückzahlen, im Bereich der Luftfahrt (ca. 500 €/kg) und der Raumfahrt (ca. 3000 €/kg) die höchsten Mehrkosten akzeptiert (Abbildung 2.8, S. 20).

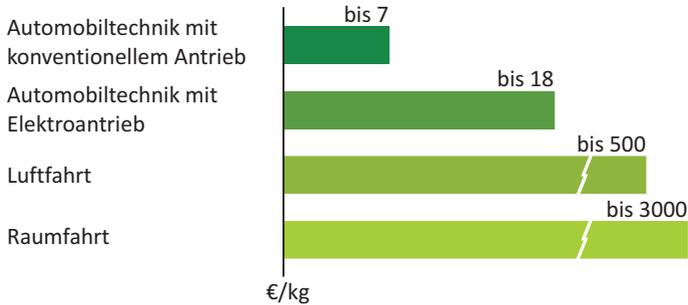


Abbildung 2.8: In der Industrie akzeptierte Mehrkosten für Leichtbau (nach [8])

Innerhalb der Automobilindustrie gibt es, wie die Umfrage zeigt, unterschiedliche Einschätzungen zwischen OEM und Zulieferern, z.B. im Bereich der Verkleidungselemente. Hier zeigen die OEM deutlich häufiger als die Zulieferer die Bereitschaft, Mehrkosten zu akzeptieren. Bei sicherheitsrelevanten Elementen wie der *Trag- und Sicherheitszelle* fallen die Unterschiede geringer aus. Hier geben beide Gruppen eine hohe Bereitschaft an, Mehrkosten zu akzeptieren (ohne Abbildung).



Abbildung 2.9: Bewertung der Relevanz technologischer Fortschrittfelder für die Elektromobilität

Zukünftige Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität erfordern somit sensible Kostenbetrachtungen sowie den effizienten Einsatz von Hochleistungswerkstoffen im technologisch notwendigen und wirtschaft-

lich möglichen Umfang. Um diesen differenzierten Anforderungen gerecht zu werden, ist die Einbeziehung vielfältiger Akteure entlang der Wertschöpfungskette aus Wissenschaft und Industrie notwendig. Danach gefragt, welche technologischen Forschungsfelder die Studienteilnehmer als besonders relevant einschätzen, wurden neben der *Werkstoffentwicklung* und der *Funktionsintegration* die *Prozess- und Struktursimulation* sowie die *Qualitätssicherung* und die *Prozesskettenanalyse* genannt (Abbildung 2.9, S. 20).

2.2 Herausforderungen innovativer formgebender Fertigungsverfahren

Der richtige Werkstoff ist jedoch nur ein Aspekt bei der komplexen Entwicklung zukünftiger Elektrofahrzeuge. Parallel zu den aktuellen Werkstoffentwicklungen ist die Anpassung geeigneter Fertigungsverfahren ein entscheidender Faktor. Dies wird branchenübergreifend durch 94 % der Befragten bestätigt.

Die technologischen Verbesserungen durch Mischbauweisen, wie die Einstellbarkeit spezieller Werkstoffeigenschaften, können nur dann in vollem Umfang genutzt werden, wenn auch die dadurch hervorgerufenen Herausforderungen, wie z.B. die von einem Großteil der Befragten befürchtete Verschlechterung der Umformbarkeit, bewältigt werden. In dem FOREL-Forschungsprojekt *LEIKA* werden in diesem Zusammenhang hochwertige Hybrid-Sandwich-Halbzeuge aus hochfestem Stahl und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen entwickelt, die im Spritzgießprozess umgeformt und funktionalisiert werden (Abbildung 2.10, S. 22). In enger Abstimmung mit den Partnern, u.a. dem Konsortialführer ThyssenKrupp, wird hierzu im FOREL-Technologiezentrum ein innovatives Fertigungsverfahren aufgebaut, mit dem eine Leichtbau-Fahrzeugunterboden-Struktur im Multi-Material-Design großserientauglich gefertigt werden kann.

Neue Ver-
arbeitungs-
techno-
logien



Abbildung 2.10: Demonstratorstruktur, die im Rahmen von *LEIKA* entwickelt und umgesetzt wird

Bekräftigt wird dieser Ansatz durch viele der befragten Experten, die bei der Kombination verschiedener Ur- und Umformverfahren hohe Potenziale hinsichtlich zahlreicher wichtiger Fertigungsaspekte sehen. So gibt ein Großteil der Befragten an, dass sie durch Hybridprozesse eine *bessere Realisierbarkeit komplexer Geometrien* sowie eine *Erhöhung des Automatisierungsgrades* erwarten. Als kritisch stufen die Experten, neben der bereits erwähnten Umformbarkeit, den erhöhten *Füge- und Montageaufwand* durch Hybridprozesse ein. Ebenso wird angeführt, dass der *Umfang der Qualitätssicherung*, der *Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten* sowie die *Investitionskosten* zunehmen könnten (Abbildung 2.11, S. 23). Hier wird deutlich, dass diesen Bedenken durch umfangreiche Forschungsarbeiten begegnet werden muss. Eine Möglichkeit ist dabei, auf bewährte Technologien, wie etwa Spritzgießen, zurückzugreifen und diese für die Verarbeitung neuartiger Halbzeuge zu modifizieren. Zwei gelungene Beispiele dafür sind die Projekte *Thermobility* und *e-generation* bei denen Organobleche bzw. Hybridgarnflechtschläuche als flächige und Profil-Halbzeuge in den Spritzgießprozess integriert wurden. Somit können funktionalisierte Schalenstrukturen und Profilhohlstrukturen im modifizierten Spritzgießverfahren hergestellt werden, die im Rahmen dieser Projekte

an einem Elektrofahrrad und einem Batterieträger eindrucksvoll demonstriert wurden (Abbildung 2.12). Zusätzlich wurde durch die Experten bewertet, inwieweit die Bauteileigenschaften durch die Kombination von Ur- und Umformverfahren beeinflusst werden (Abbildung 2.13, S. 24).

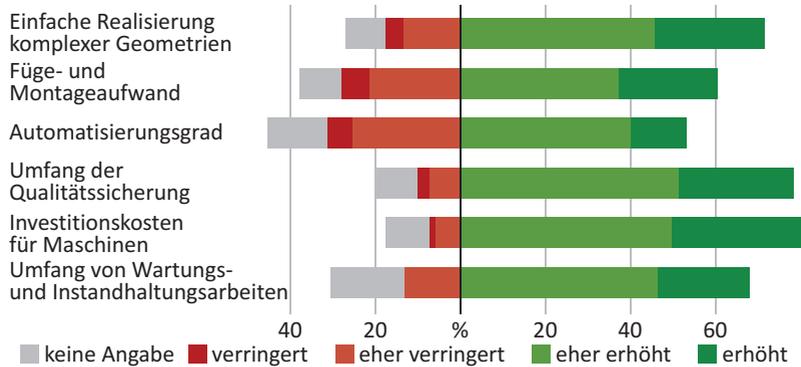


Abbildung 2.11: Einschätzung der größten Herausforderungen hinsichtlich der Kombination von Ur-/Umformverfahren

Die Antworten untermauern, dass Hybridprozesse besonders positive Effekte für die Massenreduktion erwarten lassen. Zudem sehen die Befragten branchenübergreifend große Vorteile hinsichtlich der Funktionsintegration und der erreichbaren mechanischen Eigenschaften.

Potenziale der Hybridprozesse



Abbildung 2.12: Thermobility Minirad-Demonstrator (links) und e-generation-Batterieträger (rechts)

Demgegenüber entstehen nach Einschätzung der Befragten Nachteile bei der Berechenbarkeit und der Recyclingquote. Dies zeigt wiederum, dass nur ganzheitliche Ansätze erfolgversprechend sind.

Ergänzend zu den bisher analysierten Verfahren wurde die Einschätzung der Experten zur Gruppe der additiven Fertigungsverfahren erfragt, da deren Relevanz für die Elektromobilität im nationalen und internationalen Raum stark steigt. Dies kann beispielsweise am Projekt *URBEE* (Abbildung 2.14, S. 25) aufgezeigt werden, bei dem die additive Fertigung gezielt für die Herstellung von Bauteilen für ein Elektrofahrzeug genutzt wird [9]. Die so realisierte Integralbauweise kann zu einer drastischen Reduktion der Bauteilanzahl bei gleichzeitiger Leichtbauweise genutzt werden.

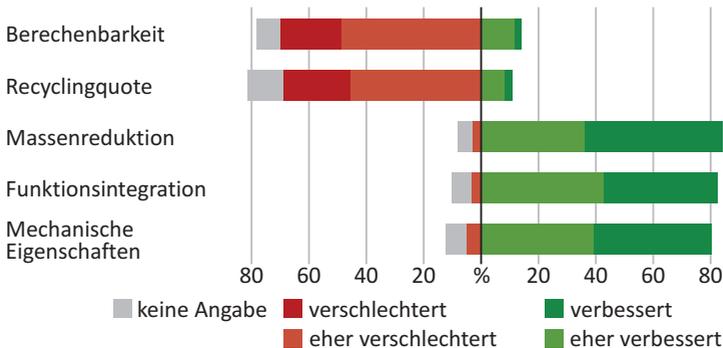


Abbildung 2.13: Einschätzung der Experten bezogen auf den Einsatz von Hybridprozessen

Die Potenziale der additiven Fertigung, beispielsweise zur wirtschaftlichen Fertigung hochkomplexer funktionsintegrativer Leichtbauteile, werden bislang noch nicht flächendeckend ausgeschöpft. In diesem Zuge wurde im Rahmen der Umfrage untersucht, welche Aspekte für die Industrialisierung der additiven Fertigungsverfahren von entscheidender Bedeutung sind (Abbildung 2.15, S. 26). Die Umfrageergebnisse offenbaren, dass 42 % der OEM bereits auf additive Verfahren setzen, jedoch erst 22 % der befragten Zulieferer.

Die zunehmende Nutzung der additiven Fertigung hängt stark von einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit und der Fertigungsqualität ab. Letzteres verdeutlicht sich in der Zustimmung von über 80 % der Befragten zu den Thesen, dass die *Einhaltung von Fertigungstoleranzen*, die *Verbesserung der Reproduzierbarkeit* und die entsprechenden *Werkstoffeigenschaften* als wichtig oder eher wichtig einzustufen sind. Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der industriellen Anwendung sind eine *Verringerung der Maschinenkosten* und eine *Erhöhung der realisierbaren Stückzahlen* von großer Relevanz. Dies bestätigen wiederum jeweils 80 % der Befragten. Eine Steigerung der *Kundenakzeptanz* und der *verfügbaren Werkstoffauswahl* wird als vergleichsweise weniger relevant erachtet.



Abbildung 2.14: Projekt *URBEE* (Urban electric vehicle with ethanol as backup), Hybrid-Fahrzeug in Integral- und Leichtbauweise mittels additiver Fertigung (Bildmaterial zur Verfügung gestellt durch Kor EcoLogic Inc.)

Somit wird die Industrialisierung von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, wobei diese etwa gleichmäßig über alle Branchen hinweg als wesentlich eingestuft werden. Konventionelle Prozessketten, die z.B. mehre-

re Prozessschritte wie Urformen, Umformen oder Spanen umfassen, können durch additive Fertigungsverfahren verkürzt oder vollständig substituiert werden. Dies führt zu einer Kumulation von Anforderungen an die additive Fertigung. Somit ist eine systematische Ermittlung wirtschaftlicher Einsatzbereiche der additiven (Großserien-)Fertigung erforderlich.

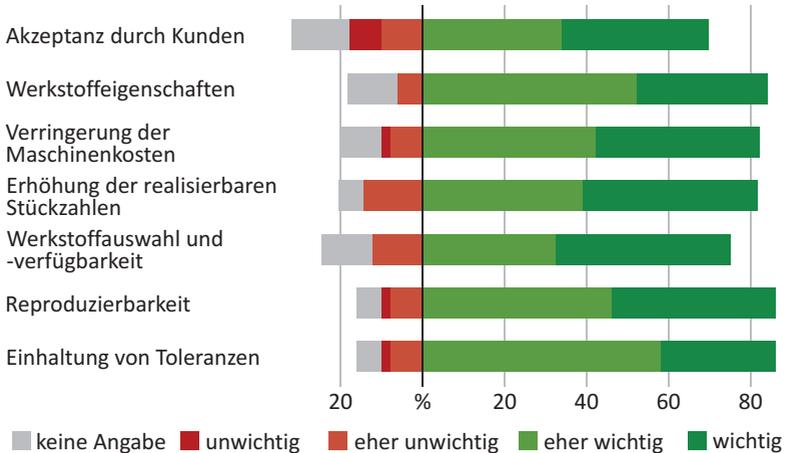


Abbildung 2.15: Einschätzung der Studienteilnehmer zur Wichtigkeit ausgewählter Faktoren für die Industrialisierung additiver Fertigungsverfahren

Dazu ist eine umfassende Weiterentwicklung der Technologiereife, eine Steigerung der realisierbaren Stückzahlen sowie eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit notwendig. Auf diese Weise ist eine Ausschöpfung der Potenziale der additiven Fertigung für die Elektromobilität, beispielsweise für ein integrales Bauteildesign nach den Prinzipien des Leichtbaus, in der industriellen Fertigung realisierbar.

Zusammenfassung

Die Weiterentwicklung der zukünftigen Elektromobilität erfordert den zielgerichteten und effizienten Einsatz komplex beanspruchter Bauteile. Diese müssen nicht nur leicht sein, sondern auch zusätzliche Funktionen in sich vereinen. Mischbauweisen und hybride Fertigungsverfahren ermöglichen die Werkstoffkombination und Funktionsintegration ohne zusätzliche Arbeitsschritte. Grundlage dafür sind jedoch geeignete Prüf- und Qualitätssicherungsmethoden sowie wirtschaftliche Herstellungsprozesse.

**Kurz-
fassung**

- Der moderne Leichtbau ermöglicht Massereduktion und Funktionsintegration.
- Mischbauweisen bieten viele technologische Vorteile und maßgeschneiderte Lösungen für komplexe Anwendungsfälle.
- Werkstoffgerechte Prüf- und Charakterisierungsmethoden müssen (weiter)entwickelt werden.
- Die additive Fertigung kann durch verbesserte Reproduzierbarkeit und gesteigerte Stückzahlen weiter etabliert werden.
- Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren hat oberste Priorität.

Fazit

- (Integratives) Ur-/Umformen von Werkstoffkombinationen
- Intelligente Funktionsintegration
- Zuverlässige Prüf- und Qualitätssicherungsverfahren
- Standardisierung und Katalogisierung von Werkstoffen und Halbzeugen
- Entwicklung neuer, produktiver Fertigungsverfahren

Potenziale

3 Füge- und Trenntechnologien in Leichtbauanwendungen



Die Erforschung von Fertigungsverfahren ist der Schlüssel schlechthin, um das Leichtbaupotenzial von Metallen und Faserverbundwerkstoffen zu entfalten.“

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Eine effiziente und leistungsfähige Füge- und Trenntechnik wird immer wichtiger für die Herstellung von komplexen Produkten wie Elektrofahrzeugen. Die modernen Werkstoffe der heutigen Mischbauweise, seien es Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) oder hochfeste Stähle, können nur effizient genutzt werden, wenn entsprechende Füge- und Trenntechnologien zur Verfügung stehen. Dabei hängt die Qualität und Produktivität der Herstellung von der Effizienz der Trenntechnologie ab. Auch das notwendige Recycling und die Reparatur von Leichtbaustrukturen bedürfen einer sinnvollen Trenntechnologie. Der Themenkomplex *Füge- und Trenntechnologie* nimmt daher eine wichtige Stellung im FOREL-Projekt ein. Schon heute werden unterschiedliche Werkstoffe und Werkstoffkombinationen in der

Elektromobilität in großem Umfang eingesetzt (Tabelle 2.1, S. 15), was die Füge- und Trenntechnik vor eine Vielzahl von komplexen Herausforderungen stellt.

Stahl im
Karosseriebau

So bestand bspw. im Jahr 1977 eine Karosserie mit 75 % noch zum Großteil aus konventionellem Stahl und konnte kostengünstig per Widerstandspunktschweißen gefügt werden [4]. Heute werden bei einer Karosserie in Mischbauweise, wie etwa der eines *Audi TT* (Modelljahr 2014), neben thermischem Fügen (z.B. Widerstandspunktschweißen) zahlreiche mechanische Verfahren (z.B. Halbhohlstanznieten), auch in Kombination mit Klebungen, verwendet. Während früher ein gängiger Stahl Festigkeiten in Höhe von 200 N/mm^2 aufwies, liegen moderne Warmformstähle schon deutlich über 1500 N/mm^2 , wobei die Entwicklung in Richtung 2000 N/mm^2 (z.B. ThyssenKrupp MBW 1900) geht [10]. Die Karosserie eines *GOLF VII* ist allein durch die Verwendung höherer Stahlgüten um 12 kg leichter als die seines Vorgängers [11].

Die VDI-Studie *Werkstoffinnovation für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung* prognostiziert, dass bis 2035 eine Pkw-Karosserie nur noch 20 % konventionellen Stahl, 20 % Polymere und 30 % Leichtmetalle wie Aluminium oder Magnesium enthalten wird [4]. Die Teilnehmer der FOREL-Studie sind zudem der Ansicht, dass die Fügbarkeit durch die Mischbauweise verschlechtert wird (Abbildung 2.5, S. 17). Es stellt sich somit die Frage, wie diese zum Teil auch neuen Werkstoffe zukünftig gefügt werden. Besondere Aufmerksamkeit erfahren hierbei die hybriden Verbindungstechnologien als ein Baustein zum zielgerichteten Einsatz von Leichtbauwerkstoffen für die Umsetzung der Mischbauweise in Elektrofahrzeugen.

3.1 Eingesetzte Werkstoffe und Produktionstechnologien

Werkstoffe

Den Einsatz verschiedener Fügeverfahren für Kombinationen der Werkstoffe *Stahl*, *Leichtmetall*, *Thermoplaste* und *Duroplaste* zeigt Abbildung 3.1. Zu den am häufigsten genutzten Fügeverfahren über alle Kombinationen artverschiedener Werkstoffe hinweg zählen das *mechanische Fügen* und das *Kleben*, wobei hierzu auch die (hybride) *Kombination* gehört. Duroplaste werden am häufigsten durch Kleben gefügt. Bei etwa einem Fünftel der Studienteilnehmer kommen kombinierte Verfahren für das Fügen unterschiedlicher Werkstoffe zum Einsatz. *Mechanisch-thermisches Fügen* sowie das *Fügen durch Ur- und Umformen* werden eher selten angewendet. Das *thermische Fügen*, welches von Unternehmen in geringem Maße eingesetzt wird, bietet jedoch großes Potenzial und wird von Forschungseinrichtungen bereits intensiv untersucht.

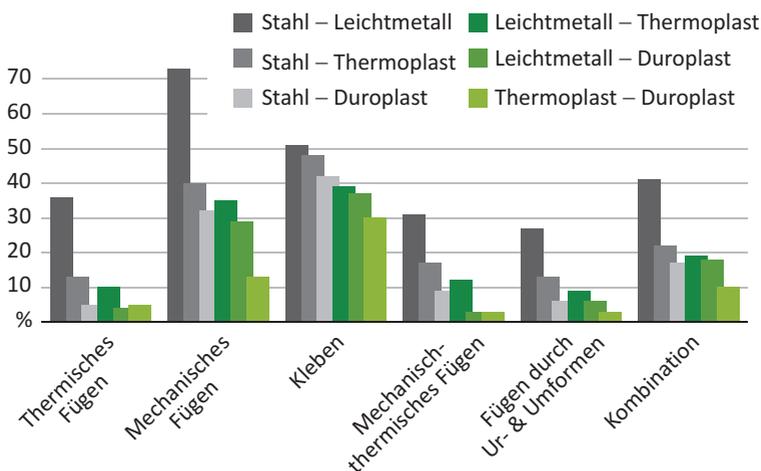


Abbildung 3.1: Eingesetzte Verfahren für das Fügen unterschiedlicher Kombinationen artverschiedener Werkstoffe

Mechanisch-thermische Verfahren zum Fügen von Duroplasten mit Thermoplasten finden bislang kaum industrielle Umsetzung. Thermische Fügeverfahren, z.B. das Widerstandspunktschweißen, werden bei Unternehmen primär für das Fügen von artgleichen Metall-Kombinationen eingesetzt. Eine Kombination artungleicher metallischer Werkstoffe, z.B. von Stahl und Aluminium, lässt sich mit den Sonderverfahren der thermischen Fügetechnik Reibelementschiweißen oder Widerstandselementschiweißen erreichen. Insbesondere im Bereich Automotive ist das Widerstandspunktschweißen, als thermisches Verfahren, aufgrund seiner hohen Produktivität sehr verbreitet. In der Luft- und Raumfahrttechnik (z.B. Nieten) sowie im Maschinen- und Anlagenbau (z.B. Schrauben) sind mechanische Fügeverfahren grundsätzlich die dominierenden Technologien.

Gerade thermische Fügeverfahren, denen u.a. im Bereich Automotive große Bedeutung beigemessen wird, werden bislang nur in geringem Maße für das Fügen von Thermoplasten mit Leichtmetallen oder Stahl eingesetzt. Gleiches gilt für mechanisch-thermische Verfahren, die für das Fügen von Thermoplasten mit Stahl oder Leichtmetall ebenso wenig zum Einsatz kommen wie für das Fügen von Duro- und Thermoplasten.

Fügen

Die Abbildung 3.2 (S. 33) zeigt auf, welche Fügeverfahren bei den OEM und bei den Zulieferern eingesetzt werden. Der Großteil der Befragten (ca. 80 %) fügt konventionell *thermisch* sowie *mechanisch*, wobei hier Schweißen und Schrauben als Beispiele zu nennen sind. Hingegen werden *neuartige Kombinationen* nur von ca. 40 % der Befragten eingesetzt. Ein ähnlicher Trend ist bei *mechanisch-thermischem Fügen*, wie dem Reibelementschiweißen, zu sehen. Vor dem Hintergrund, dass die Mischbauweise für den Leichtbau von Elektrofahrzeugen um die Werkstoffgruppe der FKV erweitert wird, werden aufgrund der Werkstoffkomplexität einige Verfahren, wie das rein mechanische Fügen oder das klassische thermische Fügeverfahren (z.B. Schweißen oder Löten), nicht einfach übertrag-

bar sein. Vielmehr sind neuartige Fügeverfahren für Mischbauweisen, wie etwa innovative thermische Fügeverfahren (z.B. Reibpressfügen) erforderlich, um den neuen Werkstoffen gerecht zu werden.

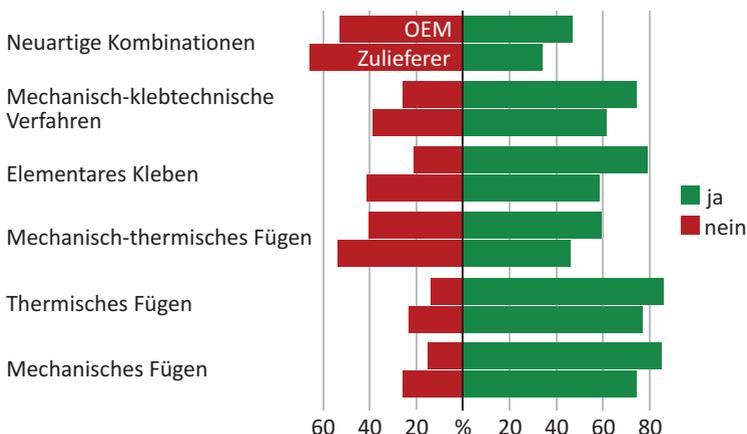


Abbildung 3.2: Aktuell verwendete Fügeverfahren in der Automobiltechnik

Die differenzierte Betrachtung nach Automotive-Zulieferern und OEM zeigt zunächst eine vergleichbare Tendenz im Hinblick auf den Einsatz der verschiedenen Füge Technologien. Interessant ist an dieser Stelle, dass bei den OEM alle genannten Füge Technologien häufiger eingesetzt werden als bei den Zulieferern. Ersichtlich ist dieser Unterschied z.B. für das *elementare Kleben*, was sowohl strukturelles Kleben als auch Montagekleben beinhaltet. *Elementares Kleben* setzen 80 % der befragten OEM, allerdings nur knapp 60 % der Zulieferer ein. Bei Betrachtung der Wertschöpfungskette wird nachvollziehbar, dass viele Montageprozesse, z.B. das Einkleben einer Frontscheibe oder eines CFK-Daches (z.B. *BMW M3*), beim OEM erfolgen.

Füge Technologien werden nach ihrer Häufigkeit in absteigender Rangfolge in folgenden Branchen eingesetzt: Automobilbau, Maschinen- und Anlagenbau sowie Luft- und Raumfahrttechnik. Demnach ist der Automobilbau in diesem Bereich sehr innovativ, obwohl im Gegensatz dazu in

der Luft- und Raumfahrttechnik größere Leichtbaukosten akzeptiert werden (Abbildung 2.8, S. 20). Für das Verständnis dieses Zusammenhangs sind folgende Hintergründe zu berücksichtigen:

- Die Pkw-Produktion erfordert aufgrund der hohen Stückzahlen i.d.R. eine sehr hohe Produktivität.
- Produktivität ist eine Funktion aus Taktzeit und Verfügbarkeit, die niedrige Kosten und damit einen *bezahlbaren* Leichtbau bewirkt.
- Durch Automatisierung und Spezialisierung wird i.d.R. die Produktivität verbessert. Dadurch steigt die Bedeutung von Sonderverfahren, wie z.B. dem Reibelementschweißen.
- Zur Automatisierung ist aufwändige Anlagentechnik erforderlich, die über die Stückzahl abgeschrieben wird.
- Der Grad der Automatisierung ist in der Luft- und Raumfahrtbranche deutlich geringer.
- Im Maschinen- und Anlagenbau ist der Leichtbau nachgeordnet.
- OEM können aufgrund ihrer Größe bedeutende Entwicklungsarbeiten leisten.

Transfer
neuartiger
Fügetech-
nologien

Die Betrachtung von Forschungseinrichtungen und Unternehmen offenbart wesentliche Unterschiede. Branchenübergreifend ist festzustellen, dass die mechanischen und thermischen Verfahren am häufigsten von Unternehmen fokussiert werden, während an Forschungseinrichtungen auch diverse neuartige, noch nicht am Markt etablierte Fügetechnologien betrachtet werden. Hier gilt es, künftig den Austausch zwischen Industrie und Forschung über die Potenziale neuer, in der Entwicklung befindlicher Fügetechnologien weiter auszubauen.

Trennen

Neben dem Fügen ist das Trennen eine der wichtigen Hauptgruppen von Fertigungsverfahren nach DIN 8580. Dem Überbegriff Trennen sind vielfältige Verfahren zugeordnet. Eine Auswahl der bekanntesten Verfahren ist in Abbildung 3.3 dargestellt. *Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden* (z.B. Drehen oder Fräsen) wird bei den Befragten am häufigsten eingesetzt. Verfahren wie das *Zerteilen*, das *Trennen mit Laserstrahl* und das *Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden* kommen etwa bei der Hälfte der Befragten zum Einsatz. Das *Zerlegen* (z.B. Abschrauben) und vor allem das *Abtragen* (z.B. Flammstrahlen) finden dagegen eher selten Anwendung. Bei genauerer Betrachtung der Automotive-Branche lässt sich qualitativ eine ähnliche Verteilung wiederfinden. Dabei setzen die OEM Trennverfahren häufiger ein als ihre Zulieferer. So verwenden 68 % der OEM *Trennverfahren mit Laserstrahl*, hingegen aber nur 52 % der Zulieferer. Analog zu den Ergebnissen aus dem Themenkomplex der Fügetechnologien kann den OEM im Bereich der Trenntechnik somit ein Technologievorsprung gegenüber den Zulieferern zugeschrieben werden.

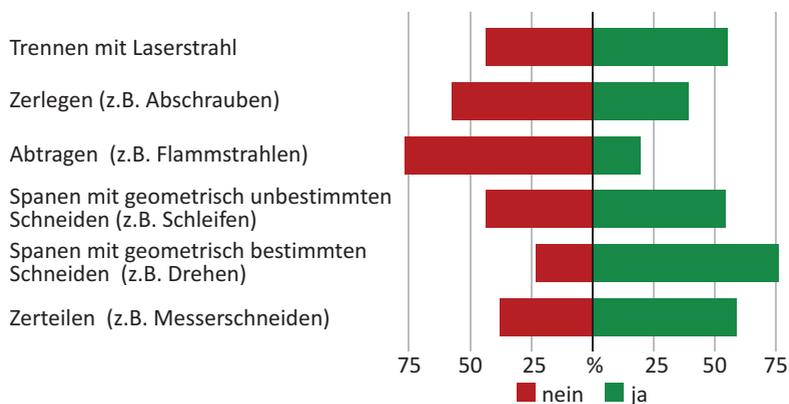


Abbildung 3.3: Von den Befragten aktuell verwendete Trennverfahren

3.2 Hybridfügen im Multi-Material-Design

Die Kombination unterschiedlicher Metalle oder faserverstärkter Kunststoffe beim Multi-Material-Design stellt eine fundamentale Weiterentwicklung gegenüber konventionellen, stahlintensiven Pkw-Karosserien dar. Diese werden überwiegend mit thermischen Fügeverfahren, wie dem Widerstandspunktschweißen, gefügt. Die zunehmende Verwendung der Mischbauweise erfordert jedoch flexible hybride Fügeverfahren. Das Hybridfügen bezeichnet allgemein eine Kombination von unterschiedlichen Fügeverfahren, wobei häufig die Kombination mechanisch-klebtechnisch oder thermisch-klebtechnisch auftritt. Klebstoffe werden eingesetzt, um die Eigenschaftsprofile von Hochleistungswerkstoffen maximal auszunutzen; so können bspw. größere Struktursteifigkeiten erreicht werden. In diesem Kontext dient das mechanische oder das thermische Fügen vorrangig der Fixierung während des Herstellprozesses. Die eigentliche Verbindungsfestigkeit in Kombination mit einem verbesserten Bruchverhalten und einem hohen Energieaufnahmevermögen kann nur zusammen mit dem Kleben realisiert werden. Diese Eigenschaften sind nicht zuletzt für eine gute Crash-Performance von großer Bedeutung. Eine werkstoffgerechte hybride Füge-technologie ist daher eng mit der Bereitstellung einer flexiblen und reproduzierbaren Kleb-technologie verknüpft. Denn anders als die mechanische Füge-technik, die z.B. aufgrund der hohen Festigkeiten pressgehärteter borlegierter Stähle an ihre Grenzen stößt, kann die Kleb-technik auf nahezu jedem Werkstoff eingesetzt werden (vgl. [12]).

Kleben

Der Klebstoffeinsatz in der Automotive-Branche ist in Abbildung 3.4 (S. 37) dargestellt. Es wird zwischen Klebstofftyp (*Montage-, Strukturklebstoff*) und Aushärtemechanismus (*chemisch reagierend, physikalisch abbindend*) unterschieden. *Montage-* und *Strukturklebstoffe* werden mit bis zu 80 % insbesondere bei OEM verwendet. Der Einsatz der *Strukturkleb-*

stoffe lässt sich über den Karosserierohbau erklären. Der Zulieferer liefert üblicherweise Komponenten, die anschließend bei den OEM unter Verwendung von Klebstoffen zur Karosserie zusammengesetzt werden. Des Weiteren findet bei den OEM ein Großteil der Montagearbeiten statt, bei denen Montageklebstoffe, z.B. zur Dichtung oder Unterfütterung, verwendet werden [13]. Kleben wird jedoch in relevantem Umfang auch in anderen Branchen eingesetzt.

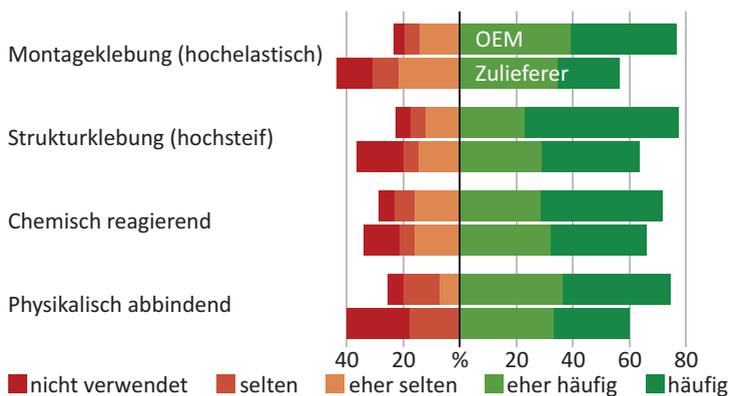


Abbildung 3.4: Einsatz verschiedener Klebstoffsysteme

Die Festigkeit einer Klebung wird maßgeblich vom Zustand der Oberflächen beeinflusst. Abbildung 3.5 (S. 38) zeigt den Einsatz von verschiedenen Oberflächenvorbehandlungsverfahren im Karosseriebau. Dabei werden *mechanische* und *chemische Reinigungsverfahren* von ca. 60–70% der Befragten eingesetzt. Die *thermische Oberflächenbehandlung* (z.B. das Laserstrukturieren) wird dagegen im direkten Vergleich seltener genutzt, was jedoch womöglich mit dem erhöhten Investitionsaufwand für Laseranlagen zusammenhängt.

Bei genauerer Analyse der Fügetechnologie des Elektrofahrzeugs *BMW i3* lässt sich die aktuelle Relevanz der Klebetechnologie im Fahrzeugbau eindeutig feststellen. Die Fahrgastzelle (*Life-Modul*) wird struk-

turell geklebt, wobei es sich dabei eher um eine Dickschichtklebung als um eine konventionelle dünn-schichtige Strukturklebung handelt. Die elastischere Dickschichtklebung bringt u.a. Vorteile bei der Kraftverteilung sowie beim Toleranzausgleich mit sich. Die FKV-Bauteile werden zuvor durch Sandstrahlen angeraut und anschließend chemisch gereinigt. Die Fixierung der Komponenten während der Aushärtezeit des Klebstoffes erfolgt mithilfe mechanischer Vorrichtungen. Trotz beschleunigter Aushärtung mittels Infrarotstrahler bedarf es einer längeren Taktzeit, um die notwendige Handhabungsfestigkeit der geklebten Komponenten zu gewährleisten. Diese Prozesskette ist für das Fügen mit den Stückzahlen eines *BMW i3* wohl vertretbar, stellt aber aus aktueller Sicht für die Massenproduktion keine Alternative dar. Zum Vergleich: Im November 2014 wurde der *BMW i3* 126 und der *Volkswagen Golf* 24.661 Mal neu zugelassen. Demnach ist die Produktion des *Golfs* fast 200 Mal größer als die des *BMW i3* [14]. Zur Verringerung der Taktzeiten und Erhöhung der Produktivität können effizientere Technologien, wie z.B. der Klebbo-len eingesetzt werden. Hierbei wird ein Funktionselement mithilfe eines unter UV-Licht schnellaushärtenden Klebstoffs angeklebt (vgl. [15]).

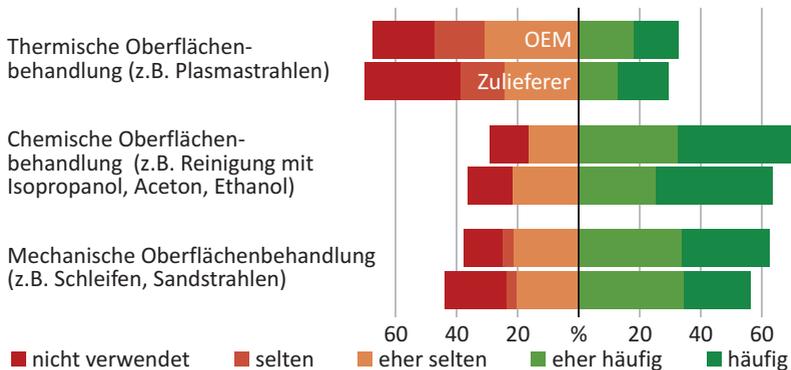


Abbildung 3.5: Vorbehandlung von Klebeflächen bei OEM und Zulieferern

Um beim Kleben die erforderlichen Taktzeiten einzuhalten, wird bei den OEM am häufigsten mit mechanischen Fügeverfahren fixiert, während 40 % der Befragten thermische Verfahren angeben. Die gefügten Komponenten sind dadurch sofort handhabbar und können weiterverarbeitet werden. Bei der Verwendung von Klebstoffen erfolgt die erforderliche Aushärtung i.d.R. in der kathodischen Tauchlackierung (KTL). Die mechanischen Fügeverfahren haben jedoch werkstoffliche Grenzen bezogen auf die Duktilität und die Festigkeit. Thermische Verfahren wirken sich aufgrund der hohen Prozesstemperatur hingegen negativ auf einen Kunststoffverbund aus. Hier zeigt sich die Problematik beim Einsatz von FKV sowie ultrahochfesten Stählen.

3.3 Zukünftige Entwicklungen

Fügen

Im Vergleich zu den in Abschnitt 3.1 (S. 31 ff.) dargestellten aktuell verwendeten Füge Technologien wird im Folgenden die zukünftige Entwicklung der Verfahren aus Sicht der Studienteilnehmer erläutert. Die Abbildung 3.6 (S. 40) zeigt etwa die Einschätzung der Automobilindustrie hinsichtlich des Einsatzes der Fügeverfahren in fünf Jahren. Zunächst ist ersichtlich, dass ein Großteil der Fügeverfahren perspektivisch eine steigende Nutzung erfahren dürfte.

Dies ist besonders bei *neuartigen Kombinationen* sowie *mechanisch-klebtechnischen Verfahren* der Fall. Hier sind jeweils rund 80 % der Befragten der Meinung, dass diese Technologien vermehrt Einsatz finden werden. Dagegen schätzen 63 %, dass die Nutzung des *thermischen Fügens* in den nächsten fünf Jahren nicht steigen wird. Ein Grund für diese Einschätzung kann sein, dass eine Zunahme von Fügeaufgaben für artfremde Werkstoffkombinationen erwartet wird, wie z.B. beim Fügen von Aluminium mit FKV.

Innovative Verfahren wie *neuartige Kombinationen*, *mechanisch-klebtechnische Verfahren* sowie *elementares Kleben* werden nach Meinung der Experten zukünftig vermehrt eingesetzt werden. Abbildung 3.7 (S.41) zeigt einen Vergleich der heutigen Technologienutzung mit einer Fünf-Jahres-Prognose seitens unterschiedlicher Branchen. Anhand des Linienerlaufs lässt sich der Nutzungsanteil der Technologie beurteilen. Je weiter eine Linie nach außen ragt, desto häufiger wird das Fügeverfahren eingesetzt.

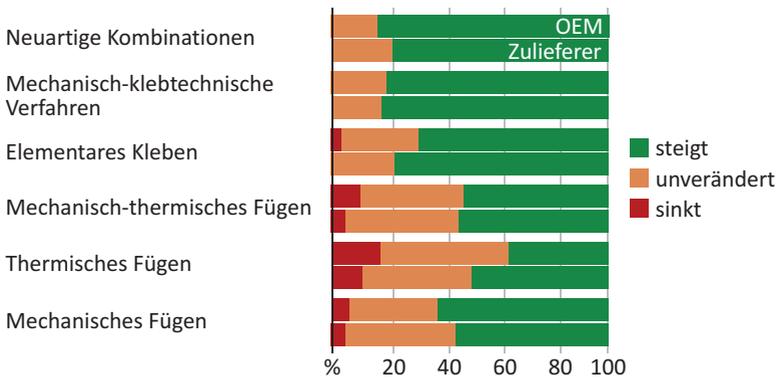


Abbildung 3.6: Erwarteter Einsatz von Fügeverfahren in fünf Jahren in der Automotive-Branche

Die Form des Linienzuges stellt hingegen die Variation der Technologienutzung dar. Ein gleichseitig sechseckiger Linienzug zeugt von einer großen Vielfalt der Fügeverfahren. Verzerrungen und Spitzen weisen auf Nutzungstendenzen und Spezialisierungen hin. Ferner lässt sich das Netzdiagramm in zwei Bereiche unterteilen: In der unteren Hälfte befinden sich die konventionellen bzw. elementaren Verfahren, wie z.B. das Schweißen, oben befinden sich die hybriden Fügeverfahren.

Es lässt sich deutlich ablesen, dass es nach Meinung der Studienteilnehmer, unabhängig von der Branche, eine Entwicklung in Richtung der *neuartigen Kombinationen* sowie der *mechanisch-klebtechnischen Verfahren*

geben wird. Erwähnenswert ist, dass sich die Luft- und Raumfahrttechnik hier anscheinend als Vorreiter präsentiert. In allen Branchen wird hingegen das rein *thermische* sowie das rein *mechanische Fügen* an Bedeutung verlieren.

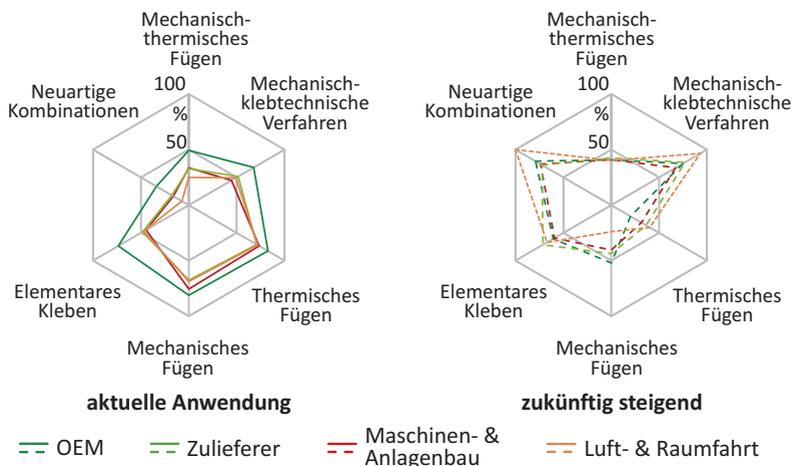


Abbildung 3.7: Aktuelle Anwendung und erwartete Entwicklung des Einsatzes unterschiedlicher Fügeverfahren in den nächsten fünf Jahren

Trennen

Im Bereich der Trenn- und Demontageverfahren zeichnet sich generell ab, dass die Nutzung der Lasertrennverfahren, neben der konventionellen Technologie des Wasserstahlschneidens, in den nächsten fünf Jahren deutlich steigen wird. Die Abbildung 3.8 (S. 42) stellt die Ergebnisse der Automotive-Branche dar. Ein Großteil der Befragten erwartet einen zunehmenden Einsatz der laserbasierten Trenntechnologien. Bei allen anderen Verfahren wird von 70–90% der Befragten keine Veränderung prognostiziert. Eine negative Veränderung wird am ehesten beim Spannen gesehen, was sowohl geometrisch bestimmte als auch unbestimmte

Schneiden beinhaltet. Ein Grund hierfür könnte zum Beispiel sein, dass bei der Bearbeitung von CFK die abrasive Wirkung der Fasern einen starken Werkzeugverschleiß verursachen kann.

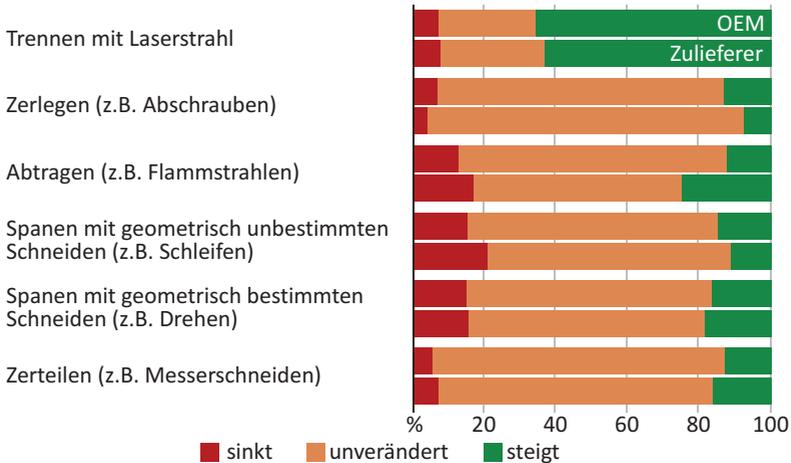


Abbildung 3.8: Erwarteter Einsatz von Trennverfahren in fünf Jahren in der Automotive-Branche

Reparatur
von Leicht-
baustruk-
turen

Schließlich muss hier noch einmal hervorgehoben werden, dass ein Großteil der Befragten aufgrund von Mischbauweisen keine großartigen Veränderungen bei der Anwendung der Trenntechnologien erwartet. Trotzdem besteht auch hier noch Entwicklungsbedarf, um die Trenntechnologien so anzupassen, dass auch beim variablen Werkstoffeinsatz die Anforderungen von Unternehmen an eine hochwertige Trennung erfüllt werden. Die anvisierte Anwendung von Multi-Material-Design bringt zudem auch große Herausforderungen hinsichtlich der Reparatur von Leichtbaustrukturen in Elektrofahrzeugen mit sich. Hierbei eignen sich innovative Trenntechnologien zur Herauslösung beschädigter Komponenten am Beginn des Reparaturvorgangs. Damit könnten sie beim verstärkten Einsatz von Mischbauweisen zukünftig stark an Bedeutung gewinnen.

3.4 Anforderungen an die Füge- und Trenntechnik

Allgemein

Durch die Validierung der in die Studie eingeflossenen Thesen können allgemeine Anforderungen an Füge- und Trennverfahren sowie Demontagetechniken abgeleitet werden. Die Auswertung der Einschätzungen der Befragten ist in Abbildung 3.9 dargestellt. 87 % der Studienteilnehmer geben an, dass die Mischbauweise zukünftig durch die *Anwendung hybrider Fügeverfahren* geprägt werden wird. Die Befragten stimmen ebenso zu, dass die *Berücksichtigung von Demontagetechniken für die Konstruktion von Fügstellen* künftig eine größere Rolle spielen wird (77 %). Bei der Verbundauslegung müssen den Nennungen entsprechend die Versagensfälle *Bruch in der Fügezone* und *Bruch im Grundwerkstoff* gleichermaßen berücksichtigt werden. Danach gefragt, ob sich die Auslegung von Fügeverbindungen am *Versagen der Grundwerkstoffe* oder der Fügeverbindung orientieren wird, ergab sich kein eindeutiges Ergebnis.

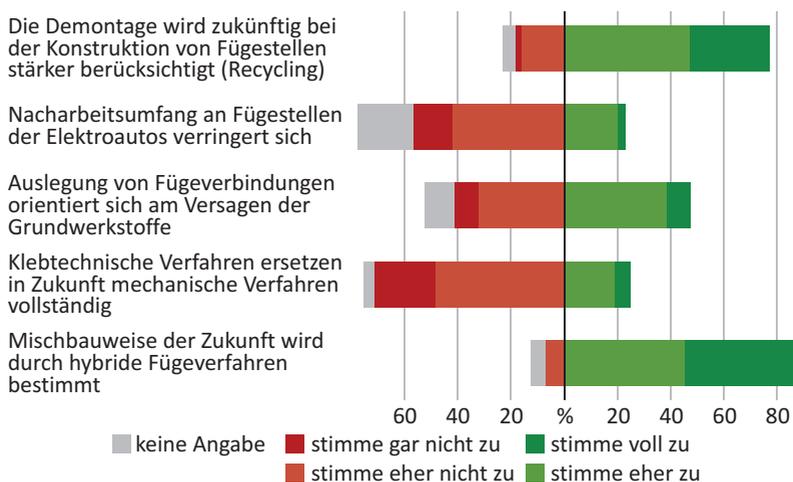


Abbildung 3.9: Thesen zu Anforderungen an die Füge- und Trenntechnik im Bereich der Elektromobilität

Ferner prognostizieren etwa 25 % der Studienteilnehmer, dass *klebtechnische Verfahren die mechanischen vollständig ersetzen* könnten. Hierbei ist zu bedenken, dass mechanische Verfahren häufig auch bei Klebungen eine Fixierungsfunktion übernehmen können, weshalb eine vollständige Ablösung der mechanischen Verfahren eher unwahrscheinlich ist. Bei der Frage zum *Nacharbeitsumfang an Fügestellen* zeigt sich eine schwache Tendenz dahin, dass der Umfang der Nacharbeit größer werden kann, jedoch auch eine gewisse Unsicherheit bei den Befragten, überhaupt eine Einschätzung abgeben zu können.

Im Folgenden soll die aus der Studie ermittelte Bedeutung definierter Anforderungen an mechanische Fügeverfahren erläutert werden (Abbildung 3.10, S. 45). Eine *leichte Zugänglichkeit*, eine *geringe Verformung*, die *Fügbareit hochfester Metalle* sowie eine *Vermeidung von Faserschädigung bei Verbundwerkstoffen* stellen in absteigender Rangfolge die bedeutendsten Anforderungen für mechanische Fügeverfahren dar. Die Studienteilnehmer, insbesondere aber Forschungseinrichtungen, messen dabei den letzten zwei Anforderungen die größte Bedeutung bei. Die *Lösbarkeit von mechanisch erzeugten Verbindungen* sowie die *Vermeidung einer Vorlochformung* für einen anschließenden Fügevorgang werden mehrheitlich als eher unwichtig eingestuft. Zudem sind diese Kriterien von der konkreten Fügeaufgabe abhängig.

Eine *leichte Zugänglichkeit* zur Fügestelle ist insbesondere im Bereich Automotive sowie im Maschinen- und Anlagenbau von hoher Bedeutung, während *unbeschädigte Fasern in Verbundwerkstoffen* für die Luft- und Raumfahrttechnik essentiell sind. Die *Fügbareit hochfester Metalle* wird, wie auch eine *geringe Verformung der Fügezone*, von den Befragten der zuvor genannten drei Branchen als ebenso bedeutend eingestuft. Dabei ist die Forderung nach einer *geringen Verformung der Fügezone* auf den Einsatz vergleichsweise dünner Bleche zurückzuführen.

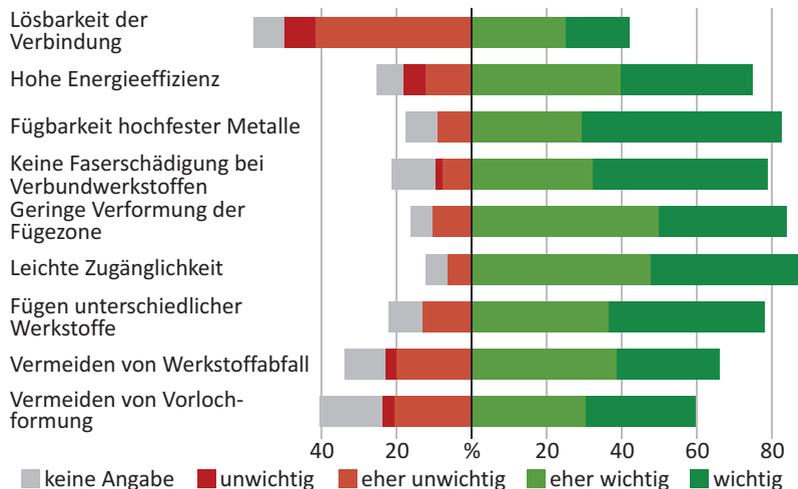


Abbildung 3.10: Anforderungen an mechanische Fügeverfahren

Fügen von Faser-Kunststoff-Verbunden

FKV werden nach einhelliger Meinung der Befragten eine tragende Säule für die Entwicklung von Leichtbaustrukturen in der Elektromobilität darstellen (Abbildung 2.3, S. 14). Die wirtschaftliche Integration von FKV in die Fertigung stellt produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der FOREL-Studie der Entwicklungsbedarf zum Fügen von FKV erfasst (Abbildung 3.11, S. 46).

Ein hoher Bedarf liegt in der Bereitstellung geeigneter *Verbindungskennwerte*, der Erhöhung der *Lebensdauer* des FKV sowie in der Entwicklung eines prozessstabilen und reproduzierbaren Verfahrens zum Fügen von Verbunden. Während Forschungseinrichtungen den höchsten Entwicklungsbedarf bei der Erhöhung der *Lebensdauer* der Verbunde sehen, bedarf es aus Sicht der befragten Unternehmen vor allem in Bezug auf die *Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit* an deutlichen Weiterentwicklungen.

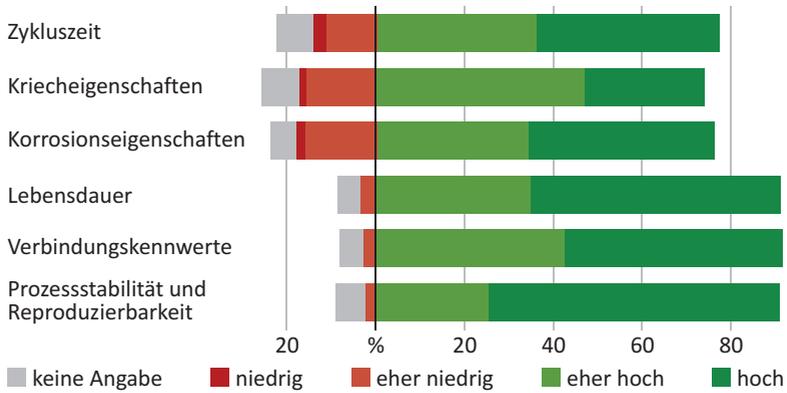


Abbildung 3.11: Einschätzung des Entwicklungsbedarfs beim Fügen von Faser-verbunden

Durch den Einsatz von FKV werden sich zahlreiche neue und noch nicht in vollem Umfang bekannte Anforderungen entlang der gesamten Produktions- und Logistikkette von Elektrofahrzeugen ergeben. Dies beinhaltet u.a. den Einfluss von aus dem Verbund gelösten Faserpartikeln auf die Anlagenelektronik auszuschließen, was auch die Entwicklung von Füge-technologien für CFK vor zusätzliche Herausforderungen stellt.

Zusammenfassung

Füge- und Trennverfahren sind als Schnittstellentechnologien von hoher Bedeutung für den Leichtbau in Mischbauweise. Die gängigen Verfahren wurden bisher vorwiegend für die Anwendung bei metallischen Werkstoffen entwickelt. Höchstfeste Stähle und Aluminiumwerkstoffe sowie Faser-Kunststoff-Verbunde gewinnen jedoch deutlich an Relevanz und werden künftig auch in der Großserienfertigung zum Einsatz kommen. Bisher verwendete thermische Fügeverfahren sind vor allem bei der Kombination unterschiedlicher Werkstoffe nicht mehr nutzbar. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an neuen Anforderungen und Randbedingungen für Füge- und Trennverfahren, wie z.B. reduzierte Taktzeiten und eine reproduzierbare Qualität. Derzeit werden vor allem nichtlösbare Verbindungen vorgesehen. Die Entwicklung innovativer Füge- und Trennverfahren ist zudem stark durch gesetzliche Anforderungen zur Energieeffizienz und Rezyklierbarkeit motiviert. Auch die Reparatur von Leichtbaustrukturen wird an Bedeutung zunehmen, was u.a. auch zu neuen Anforderungen an Trenntechnologien führen kann.

**Kurz-
fassung**

- Der Einsatz neuer Werkstoffe in Mischbauweise erfordert neuartige, flexible Fügeverfahren. **Fazit**
- Für qualitativ hochwertige Klebverbindungen sind geeignete mechanische oder thermische Fixierungen erforderlich.
- Hybride Fügeverfahren weisen im Hinblick auf den Versagensfall zusätzliche Festigkeitsreserven auf und können die Gesamtstruktur zusätzlich stärken.
- Bei den Trenntechnologien sind die grundsätzlichen Funktionsweisen auf neuartige Leichtbaustrukturen in Multi-Material-Design übertragbar.

- Entwicklung neuartiger werkstoffflexibler Fügeverfahren für den bezahlbaren Leichtbau in Mischbauweise **Potenziale**
- Ausweitung der Verfahrensgrenzen und Anwendungsfelder durch zielgerichtete Kombination von Fügetechnologien (Hybridfügen)
- Produktivitätssteigerung durch die Weiterentwicklung und den Einsatz von Klebetechniken
- Nutzung etablierter Trenntechnologien zur Entwicklung von Reparaturkonzepten für Leichtbaustrukturen in Mischbauweise
- Laserbasierte Trenn- und Oberflächenreinigungsverfahren bei Faser-Kunststoff-Verbunden

4 Recyclingstrategien für Leichtbauwerkstoffe



Langfristiger Erfolg der Elektromobilität ist nur möglich, wenn frühzeitig geeignete Recyclingstrategien für Elektrofahrzeuge entwickelt werden.”

Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth

Das Teilgebiet Recycling konzentriert sich insbesondere auf die Betrachtung der Schnittstellen zwischen Abfallentstehung und Entsorgung sowie die Möglichkeiten des Wiedereinsatzes von Recyclingprodukten in Fertigungsprozessen. Die in der Studie adressierten Schwerpunkte umfassen sowohl die Wahrnehmung und den Umgang mit Produktionsabfällen im Unternehmen als auch die Anpassung von Fertigungsprozessen und erforderlichen Produktqualitäten für den Wiedereinsatz von Recyclingware in der Fertigung.

4.1 Produktionsabfälle als ein relevanter Bestandteil der Fertigung

„Das Potenzial zur Gewichtsreduzierung muss beim GFK [(glasfaserverstärkter Kunststoff)] gut gegen seine schwierige Entsorgung abgewogen werden“ [16]. Diese Aussage des Volkswagen-Konzerns zum Thema Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Fahrzeugbau zeigt sehr deutlich die erforderliche Balance zwischen Leichtbaupotenzial und dem Verwertungskonzept für Leichtbauwerkstoffe. Mittlerweile gibt es belastbare stoffliche Verwertungswege für GFK. Dennoch bleibt die Problemstellung durch Integration faserverstärkter Kunststoffe in die Misch- oder Hybridbauweise sowie im Hinblick auf kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) von signifikanter Bedeutung. Mit steigender Nutzung von Leichtbaustrukturen findet eine immer stärkere Diversifizierung der in einem Produkt eingesetzten Werkstoffe und Materialkombinationen statt [4]. Die Entwicklungen gehen einerseits in Richtung einsatzoptimierter hochfester Stähle oder Werkstoffe wie Magnesium, andererseits in die zunehmende Verwendung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe [17, 18, 19]. Für die Abfallentstehung in Fertigungsprozessen lassen sich daraus folgende Thesen formulieren:

- Beim Einsatz hochwertiger Werkstoffe für Leichtbaustrukturen führen Produktionsabfälle, die nicht weiterverwendet werden, zu hohen spezifischen Herstellungskosten durch nicht genutztes Material.
- Mit Einführung neuartiger Werkstoffe für die Karosserie von Elektrofahrzeugen sind Anpassungen der Fertigungsprozesse erforderlich, die aufgrund noch nicht ausgereifter oder sich in der Entwicklung befindender Fertigungsprozesse spezifisch hohe Verschnittmengen erzeugen.
- Aufgrund vermehrter Sortenvielfalt der Abfälle entsteht ein erhöhter Aufwand für die sortengerechte Bereitstellung zur Entsorgung.

Die Ursachen der Abfallentstehung können dabei vielfältig sein. Abfälle entstehen bei der Bearbeitung von Halbzeugen in Form von Spänen, Verschnitt, usw. Ebenso entstehen spezifische Abfälle aufgrund von Werkzeugwechsel oder Anfahrresten von Produktionsanlagen. Eine weitere Kategorie von Abfällen entsteht aufgrund nicht erreichter Qualitätsstandards der Bauteile (Fehlchargen, Produktionsausschuss). Die Summen der Produktionsabfälle aus den Einzelprozessen und den Produktfehlern ergeben die Abfallmengen in Abhängigkeit von der Gesamtproduktionsmenge zur Fertigung von Leichtbaustrukturen.

Die Befragten sollten den Prozentanteil der Abfallmengen (Verlust) im Vergleich zur Gesamtproduktionsmenge einschätzen. Dabei erfolgte eine Gliederung in die Prozessschritte *An- und Abfahren von Produktionsanlagen* und *Bearbeitung von Halbzeugen*. Zusätzlich wurde noch der *Produktionsausschuss* (Produktfehler) unterschieden (Abbildung 4.1).

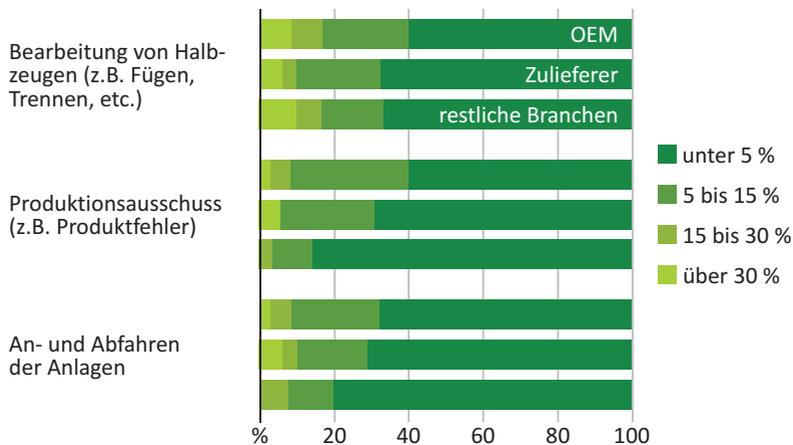


Abbildung 4.1: Prozentanteil der Abfallmengen im Vergleich zur Gesamtproduktionsmenge in Abhängigkeit von Prozessschritt und Produktionsfehlern

Beim überwiegenden Teil der Befragten liegen die Produktionsabfallmengen in Abhängigkeit von der Gesamtproduktionsmenge unterhalb von 5%. Etwa 30–40% der Befragten gaben Abfallmengen von über 5%

an. In Einzelfällen wird auch die Grenze von 30 % überschritten. Bei einem Vergleich der Branchen fällt auf, dass die OEM tendenziell höhere Abfallmengen in ihrer Produktion erwarten als die Zulieferindustrie oder die restlichen Branchen. Ursache für diese Unterschiede kann die Nutzung neuer Werkstoffe und innovativer Fertigungsprozesse durch die OEM sein. Im Hinblick auf die Fertigung hochwertiger Hybrid-Bauteile trifft dies nach Abbildung 4.1 (S.51) vor allem auf den Bereich *Produktionsausschuss* zu, womit der Anteil der Produkte angezeigt wird, die die festgelegten Qualitätsstandards nicht erreichen. Als eindeutiger Trend lässt sich festhalten, dass der Produktionsausschuss zur Herstellung von Leichtbaustrukturen bei den OEM am höchsten ausfällt und somit Handlungsbedarf zur Produktionsoptimierung hinsichtlich Qualitätserreichung deutlich wird.

Deutlich fallen die Materialverluste bei der Bearbeitung von Halbzeugen aus und betreffen alle Branchen gleichermaßen. Die Abfallmengen liegen in diesem Bereich bei ca. 15 % der Gesamtproduktionsmenge. Die großen Schwankungen der spezifischen Abfallmengen bei den Befragten zeigen, dass einige wenige Fertigungsprozesse hohe spezifische Abfallmengen erzeugen und damit einen erheblichen Verbesserungsbedarf in Bezug auf die Reduktion von Verschnitt und Abfallerzeugung aufweisen. Zusammenfassend können in allen Bereichen der Fertigung für einzelne Werkstoffe oder Prozessschritte erhebliche Produktionsabfallmengen anfallen, die bei den OEM ausgeprägter erscheinen als in anderen Branchen.

Die Akkumulation von Abfällen aus einzelnen Fertigungs- und Bearbeitungsschritten führt unter Umständen zu erheblichen Abfallgesamtmengen, die wirtschaftlich relevante Prozesskosten darstellen können. Ziel der FOREL-Studie war es, zu evaluieren, inwieweit die Abfallentsorgung von *wirtschaftlicher Relevanz* für die Fertigung von Leichtbaustrukturen werden kann (Abbildung 4.4, S. 57).

Mehr als ein Drittel der Befragten gibt eine hohe wirtschaftliche Relevanz der Abfallentsorgung als Bestandteil der Fertigungskosten an. Die

Zustimmung der OEM liegt mit ca. 45 % deutlich höher als in der Zulieferindustrie mit 26 % und ist für die restlichen Befragten anderer Branchen mit 50 % ebenfalls stark ausgeprägt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Herstellung hybrider Werkstoffverbunde wirtschaftlich relevante Entsorgungskosten für Produktionsabfälle in größerem Maße zu berücksichtigen sind, als dies bisher erwartet wurde. Unter der Annahme, dass Metalle bei der Verwertung generell als unkritisch einzustufen sind, sind vor allem Leichtbauwerkstoffe auf Basis faserverstärkter Kunststoffe oder hybride Verbunde in Mischbauweise ohne genaue Zuordnung zu einer Werkstoffkategorie betroffen.

Aufgrund der energieintensiven Herstellung faserverstärkter Kunststoffe und der zusätzlichen fertigungsbedingten Kosten ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Rückführung der Werkstoffe in den Produktkreislauf durch Recycling sowohl ökologisch als auch ökonomisch von herausragender Bedeutung. Materialverluste in der Fertigung führen ansonsten zwangsläufig zu hohen spezifischen Produktionskosten, wodurch mittelbar die gezielte Reduktion der Gesamtmasse von Elektrofahrzeugen erschwert wird [20].

Für das Recycling von Produktionsabfällen stehen grundsätzlich verschiedene Strategien zur Verfügung, die stark vom Werkstofftyp, der stofflichen Zusammensetzung in der Mischbauweise und von der Menge der Produktionsabfälle abhängig sind. Eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Recyclingstrategien für Produktionsabfälle zeigt die Abbildung 4.2 (S. 54). Großflächige Verschnittreste können beispielsweise an anderer Stelle der Fertigung als Halbzeug wieder eingesetzt werden oder bedürfen nur einer *Aufarbeitung* durch einen weiteren Bearbeitungsschritt (z.B. Zuschnitt). Dies ermöglicht eine *interne Weiterverwendung*. Aufgrund der Tatsache, dass Verschnittreste weiterverwendet werden können, ergeben sich Einsparpotenziale durch wegfallende Kosten für die *Entsorgung* sowie für neue Einsatzstoffe.

Durch den geringen Aufwand für das Recycling stellt die *Aufarbeitung* die effizienteste Recyclingstrategie dar. Produktionsausschuss kann auf-

grund ungeeigneter oder unbekannter Eigenschaften nur bedingt weiterverwendet werden und muss i.d.R. durch *Aufbereitung* in seine werkstofflichen Bestandteile zerlegt werden. Aufbereitungsverfahren erfordern meist ein umfangreiches technisches Wissen und hohe Investitionen, die nur mit einer Mindestauslastung wirtschaftlich tragbar sind. Eine interne Aufbereitung ist daher an hochwertige Werkstoffe, relativ hohe Abfallmengen und eine direkt anschließende stoffliche Verwertung der Rezyklate gebunden. Die Alternative zur *Weiterverwendung* und *Wiederaufbereitung* ist die *externe Entsorgung* von Produktionsabfällen, für die eine Behandlung gesetzlich vorgeschrieben ist (Behandlungsgebot) [21]. Dabei sind Recyclingunternehmen in der Lage, Stoffströme werkstofflich und mengenmäßig so zu vereinen, dass eine wirtschaftliche Aufbereitung und die Herstellung marktfähiger Recyclingprodukte möglich werden. Die aus der *Aufbereitung* entstehenden Abfälle sind zu verwerten oder zu beseitigen.

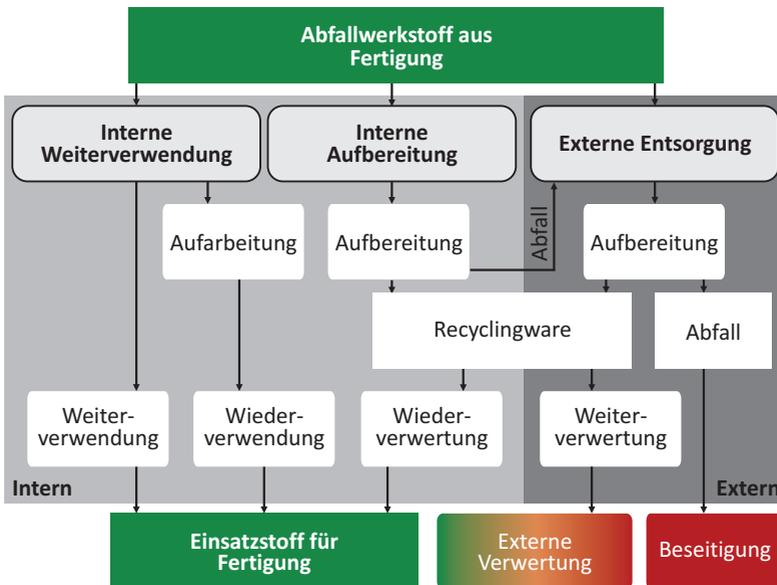


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung von Recyclingstrategien für Produktionsabfälle

Um einen Überblick über die Recyclingstrategien der Fahrzeugindustrie zu bekommen, wurden die Teilnehmer der Studie befragt, was mit den verschiedenen Arten von Abfällen ihrer Einrichtung geschieht. Die Antworten in Abbildung 4.3 (S. 56) zeigen die Verwertungswege für Produktionsabfälle für die Branchen Automotive-Zulieferer und Automotive-OEM sowie die restlichen Branchen auf. Die Antwortmöglichkeiten beschränkten sich dabei auf eine *externe Entsorgung*, eine *interne Aufbereitung* zu Recyclingware oder eine interne Aufarbeitung und *internen Wiedereinsatz* von Produktionsabfällen in der Fertigung.

Der überwiegende Anteil der Befragten gibt an, die Produktionsabfälle extern zu entsorgen. Für Metalle und thermoplastische Kunststoffe liegt der Anteil für ein internes Recycling (*Aufbereitung* und *Wiedereinsatz*) nach Abbildung 4.3 (S. 56) noch bei ca. 20%. Dieser Anteil reduziert sich hingegen sehr stark für Magnesium und Faser-Kunststoff-Verbunde auf duroplastischer Basis. Die Unterschiede innerhalb der Automotive-Branche (OEM und Zulieferer) sind dabei sehr gering. Allerdings zeigen sich große Unterschiede zu den restlichen Branchen, bei denen mit Ausnahme metallischer Werkstoffe alle weiteren Werkstoffe einer *externen Entsorgung* zugeführt werden. Unternehmen mit größeren Abfallmengen neigen tendenziell eher zum internen Recycling als kleinere Unternehmen. Die Werthaltigkeit der Werkstoffe kann dabei jedoch nicht die Ursache sein.

Im Vergleich zu den restlichen Befragten ist für die Fahrzeugindustrie eine Tendenz zum internen Recycling (Weiterverwendung) von Produktionsabfällen erkennbar. Dies kann damit zusammenhängen, dass die Eigenschaften bekannt sind und die Werkstoffe somit für einen anderen Einsatzfall intern weiter eingesetzt werden können.

Für eine interne Aufbereitung von Produktionsabfällen mit Rückgewinnung und Wiedereinsatz der Recyclingwerkstoffe müssten die Eigenschaften der Recyclingwerkstoffe neu ermittelt und für die daraus entstehenden Halbzeuge Prüfnormen eingehalten werden. Dies bedeutet zu-

sätzlichen Aufwand. Zudem ergibt sich aufgrund der Vielzahl von eingesetzten Leichtbauwerkstoffen eine große Anzahl verschiedener Abfallarten, -gemische sowie Anfallstellen mit relativ kleinen Abfallmengen, bei denen sich ein internes Recycling aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht rentiert. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Vielfalt der eingesetzten Leichtbauwerkstoffe zunehmend den Einsatz etablierter und effizienter Recyclingstrategien erschwert.

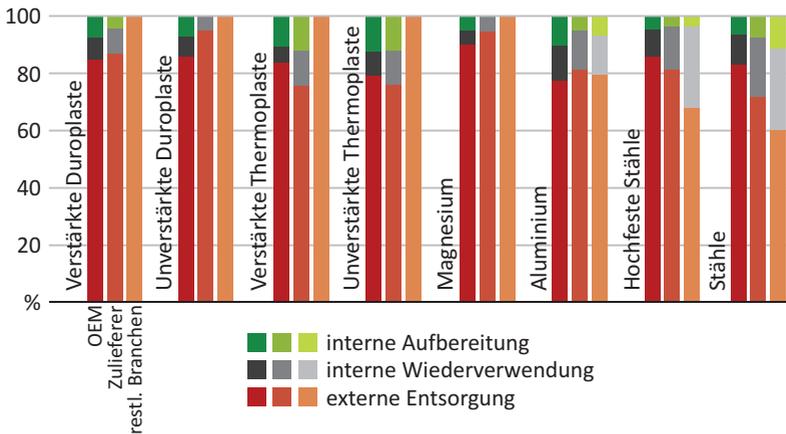


Abbildung 4.3: Verwertungswege für Produktionsabfälle in der Automotive-Branche und den restlichen Branchen in Abhängigkeit von den eingesetzten Werkstoffen

Identifikation

Unter der Bedingung, dass sortenreine Werkstoffe eher einer kostengünstigen Verwertung oder einer zielgerichteten Aufbereitung zugeführt werden können als gemischte Abfälle, ist eine Vorsortierung an der Anfallstelle oder die Weitergabe von Werkstoffinformationen an den externen Verwerter als zielführend zu betrachten. Es ist also eine genaue Schnittstellenbetrachtung zwischen Abfallentstehung und Abfallverwertung erforderlich, die mit strengen Vorgaben an eine ausreichende, sortenreine Gewinnung der Abfälle beim Erzeuger und eine anschließende zielgerichtete Verwertung beim Entsorger einhergehen. Einfach zu handhabende

Möglichkeiten der Werkstoffzuordnung sind Grundvoraussetzung für eine effektive Vorsortierung. Eine Möglichkeit der Werkstoffzuordnung eines Bauteils für seine spätere Identifikation durch den Abfallverursacher wie auch durch den Verwerter ist die Kennzeichnung. Grundlage hierfür bietet die Richtlinie 2003/138/EG der Europäischen Kommission zur Festlegung von Kennzeichnungsnormen [22]. Der *Volkswagen*-Konzern hat diese Regelungen nach eigenen Angaben weitgehend übernommen [23]. In der Studie wurde daher nach der Verbreitung bzw. der Etablierung der Nutzung von Kennzeichnungsmethoden für die Identifikation von Werkstoffen zur Verbesserung einer Vorsortierung gefragt.

Die Hälfte aller Befragten bestätigt die *Nutzung von Kennzeichnungssystemen*, die der Identifikation von Werkstoffen und der Zuordnung zu Abfallarten dienen. Bei den OEM liegt der Anteil bei über 60% (Abbildung 4.4). Hier kann ein Zusammenhang mit der *wirtschaftlichen Relevanz der Abfälle* vermutet werden, die ebenfalls als relativ hoch eingeschätzt wurde. Zusammenfassend führt eine Weitergabe von Informationen über einzelne Abschnitte der Prozessketten hinweg zu einer Verringerung von Kosten für die Produktionsabfallentsorgung. Diese wird durch die Weitergabe von Identifikationsmerkmalen über Prozessschnittstellen hinweg gefördert. Für die Zulieferindustrie ergeben sich nach Auswertung der Umfrage noch Optimierungspotenziale.

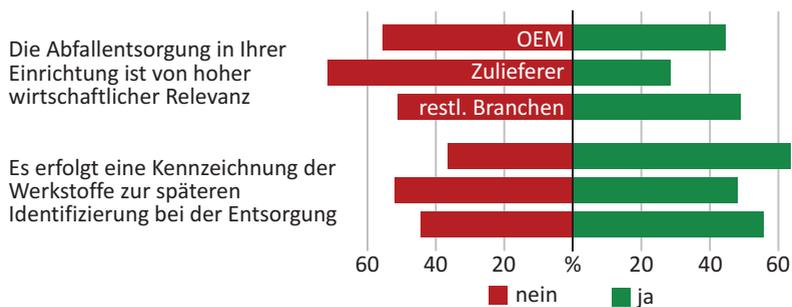


Abbildung 4.4: Wirtschaftliche Relevanz einer Abfallentsorgung als Bestandteil der Produktionskosten für hybride Leichtbaustrukturen

4.2 Herausforderungen für den Einsatz von Recyclingware in der Fertigung

Ressourcen-
effizienz

Durch Masseinsparung und erweiterte Konstruktionsmethoden, bspw. mit dem Ziel der Funktionsintegration, können Leichtbauwerkstoffe und -strukturen einen maßgeblichen Beitrag zur Ressourceneffizienz vor allem aufgrund von Kraftstoff- oder Energieeinsparung in der Nutzungsphase leisten. Zur Ressourcenbetrachtung muss allerdings die energieintensive Herstellung der meisten Leichtbauwerkstoffe (Aluminium, CFK, etc.) mit einbezogen werden. Um die Leichtbaupotenziale vollständig zu nutzen, sind daher alle Stufen des Produktlebenszyklus von den Rohstoffen bis zum fertigen Bauteil sowie das Recycling mit einem hochwertigen Wiedereinsatz zu betrachten. Ressourceneffiziente Prozesse sind laut dem *Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)* nur mit dem Wiedereinsatz der Leichtbauwerkstoffe gegeben [20].

Metalle können sehr effizient über metallurgische Prozesse zurückgewonnen werden. Bei technischen Kunststoffen sind Eigenschaftsänderungen durch Beanspruchungen in Aufbereitungsprozessen oder Alterungsdegradation zu berücksichtigen (*Downcycling*). Herausforderungen bestehen derzeit vor allem beim Recycling von CFK-Verbunden mit Rückgewinnung geeigneter Sekundärfasern und hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten für den Wiedereinsatz. Ressourceneffizienz wird erst durch eine stoffliche Verwertung mittels nachhaltiger Kreislaufwirtschaft erreicht. Zudem lassen sich dadurch auch die zukünftig weiter steigenden Quoten für ein stoffliches Recycling in der Altfahrzeug-Verordnung erfüllen [20]. Ab 2015 gelten folgende neue Anforderungen an die Verwertung von Altfahrzeugen [24, 25]:

- Mindestens 85 Gewichtsprozent müssen der Weiter- und Wiederverwendung oder der stofflichen Verwertung zugeführt werden.
- Mindestens 95 Gewichtsprozent müssen entweder den obigen Kategorien oder einer thermischen Verwertung zugeführt werden.

Unabhängig von einer technischen Umsetzung der Rückgewinnung von Wertstoffkomponenten aus Recyclingmaterialien muss eine grundsätzliche Akzeptanz für den Wiedereinsatz in der verarbeitenden Industrie wie auch bei den Verbrauchern vorhanden sein. Folglich wurde diese Fragestellung in der FOREL-Studie genauer untersucht.

Die Einschätzungen zum Thema Akzeptanz von Recyclingwerkstoffen bei Zulieferern und Herstellern von Elektrofahrzeugen ergibt überraschend hohe Erwartungen an die Akzeptanz von Recyclingware. Gleichzeitig offenbaren sich große Schwankungen zwischen deutlicher Zustimmung und deutlicher Ablehnung. Die Unterschiede zwischen den Branchen sind zwar gering, vor allem bei den OEM fällt aber die Zustimmung mit 25% deutlich positiv aus. Allerdings vermuten branchenübergreifend ca. 5–9%, dass der Einsatz von Recyclingware in der Fertigung grundsätzlich nicht akzeptiert werden wird (Abbildung 4.5).

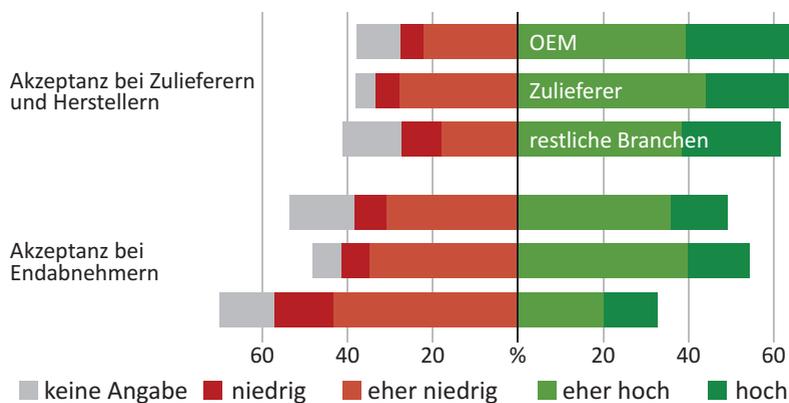


Abbildung 4.5: Einschätzung der Akzeptanz von Recyclingware bei der Herstellung von Elektrofahrzeugen

Ein anderes Bild ergibt sich für die Akzeptanz bei den Endverbrauchern (Akzeptanz bei den eigenen Kunden). Erkennbar wird die Erwartung, dass Endverbraucher eine deutlich geringere Akzeptanz für Recyclingwerkstoffe aufweisen. Vor allem in den Branchen außerhalb des Fahrzeugbaus

sinkt die Zustimmung deutlich. Damit kann vermutet werden, dass der Fahrzeugbau eine gewisse Vorreiterrolle als innovative Branche für den Einsatz von Recyclingwerkstoffen beansprucht und dies den Endverbrauchern weitgehend vermitteln kann und muss.

Einsatz von
Recycling-
ware

In der FOREL-Studie wurden die befragten Personen weiterhin nach dem derzeitigen Einsatz von Recyclingware in der Fertigung befragt und ein zukünftiger Ausblick erbeten. Als Antwortmöglichkeiten konnte zwischen *prinzipiell nicht eingesetzt*, *bereits früher eingesetzt* sowie *zukünftig eingesetzt* gewählt werden.

Aus den Antworten ist erkennbar, dass 16–26 % aller Befragten eine prinzipielle Ablehnung für den Einsatz von Recyclingware angeben. Dabei stellten die befragten OEM die Gruppe mit der geringsten (16 %) und die Zulieferer der Automotive-Branche mit 26 % die Gruppe mit der höchsten Ablehnung dar. Die restlichen Branchen ordneten sich dazwischen ein (Abbildung 4.6). Damit liegt eine deutliche Korrelation mit der vorherigen Frage vor, die eine relativ hohe Akzeptanz für den Einsatz von Recyclingware in der Fahrzeugindustrie ergibt.

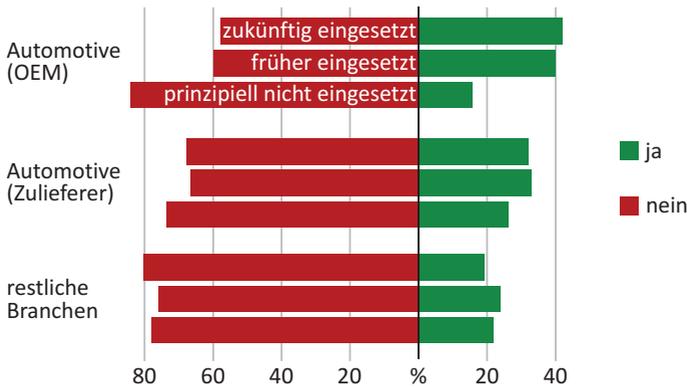


Abbildung 4.6: Übersicht über den bisherigen sowie den beabsichtigten Einsatz von Rezyklaten in der Fertigung in Abhängigkeit von der Branche

Ca. 30–40 % der befragten Personen geben Erfahrungen (*früher eingesetzt*) im Umgang mit Recyclingware an, wobei die OEM mit 40 % die größte Gruppe bilden. Auffällig ist die Tatsache, dass alle Befragten einen nur geringen zukünftigen Zuwachs oder sogar eine Reduktion des Einsatzes von Recyclingware angeben. Im Vergleich zur hohen Akzeptanz aus der vorhergehenden Auswertung offenbart sich hier ein erhebliches Potenzial für den Einsatz von Recyclingware. Da kein generelles Akzeptanzproblem vorliegt, müssen die Ursachen für den geringen Einsatz von Recyclingware im Bereich Fertigung oder bei den Recyclingwerkstoffen gesucht werden.

Schlussfolgernd liegt ein erhebliches Potenzial für den Einsatz von Recyclingware zur Fertigung von Leichtbaustrukturen vor, wobei fehlende Akzeptanz als Ursache des geringen Einsatzes weitgehend vernachlässigt werden kann. Die Fahrzeugindustrie und insbesondere die OEM sind dabei im Vergleich zu anderen Branchen als innovativste Branche hervorzuheben.

Der Einsatz von Recyclingware ist vielfältig. Metallische Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium oder Stähle werden über metallurgische Prozesse aufgeschmolzen, gereinigt und als Zuschlagstoff zur Herstellung von Neuware wieder eingesetzt. Meistens wird der Gehalt an Recyclingware in Metallen nicht gekennzeichnet. Werkstoffverbunde bestehen dagegen aus einer Matrix und den Verstärkungsfasern. Der Begriff Recyclingwerkstoff bezieht sich daher entweder auf den Wiedereinsatz der Komponenten (Fasern, Standardkunststoffe, etc.) oder den aufbereiteten Verbund. Matrixwerkstoffe bzw. Polymere unterliegen einem Downcycling. Diese können aber für bestimmte Anwendungsfälle mit verringertem Anforderungsprofil als Recyclingware wieder eingesetzt werden. Die Rückgewinnung von Kohlenstofffasern aus Verbunden stellt dabei derzeit die größte Herausforderung dar. Automatisierte Recyclingverfahren mit Freilegung von Fasern sowie deren anschließende Aufbereitung und Wiederverwendung in einer

Größenordnung von mehreren tausend Tonnen sind derzeit mit Ausnahme von Einzelprozessen bzw. einzelnen Aufbereitungsschritten (z.B. Pyrolyse) nicht verfügbar [20]. Momentan werden unterschiedliche Forschungsansätze zur Rückgewinnung von Fasern im Forschungsprojekt *MAI Recycling* [26] und ein alternativer Wiedereinsatz von thermoplastischem CFK zum Schäumformen im FOREL-Technologieprojekt *ReLei* [27] verfolgt.

Das Recycling von Standardkunststoffen wird hingegen bereits großtechnisch praktiziert. Mit dem Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden steigt die Materialvielfalt jedoch deutlich an. Daraus resultieren erhöhte Ansprüche an die Aufbereitungstechnik (Sortierung), und die Einhaltung sowie die Ermittlung von Produktqualitäten werden erschwert. Ein steigender Recyclingaufwand lässt die grundsätzliche Entscheidung für eine Aufbereitung allerdings unattraktiv erscheinen. Dieser Umstand in Verbindung mit höheren Ansprüchen an die Werkstoffeigenschaften der Leichtbauwerkstoffe könnte für den zukünftigen Einsatz von Recyclingwerkstoffen hinderlich sein (Abbildung 4.6, S. 60). Eine Nutzung effizienter Kennzeichnungssysteme zur Erfassung sortenreiner Abfälle an der Anfallstelle wie auch die Entwicklung leistungsfähiger Sortierprozesse zur Gewinnung und Bereitstellung sortenreiner Werkstoffe würden effiziente Gegenmaßnahmen darstellen und anschließend ein hochwertiges, separates Recycling von Kunststoffen und Faser-Kunststoff-Verbunden fördern.

Für den Wiedereinsatz von Recyclingware in Fertigungsprozessen sind zwei grundsätzliche Dinge zu beachten, die zudem einer gegenseitigen Abhängigkeit unterliegen:

- *Eignung der Fertigungstechnik* für den Einsatz von Recyclingwerkstoffen,
- Definition der *Qualität der Recyclingware* und deren Mindesteigenschaften für den Wiedereinsatz.

Die kritischen Aspekte der Anpassung von Fertigungsprozessen zum verstärkten Einsatz von Recyclingware untergliedern sich in der Studie in die

Bereiche *Arbeitsmehraufwand für Transport und Logistik*, Mehraufwand für die *Einhaltung von Qualitätsstandards* und *Anpassung der Prozesstechnik* (Abbildung 4.7).

Recyclingware wird meist nur zu geringen Anteilen in der Produktion eingesetzt oder anteilig zugemischt. Im Falle eines Verschnitts mit Neuware muss die Qualitätssicherung, die Lagerung und die Logistik neben der Neuware auch die Recyclingware bedienen. Ein anteiliger Einsatz von Recyclingware bedeutet damit immer auch einen zusätzlichen Aufwand, der mit entsprechenden Kosten für Lagerung, Qualitätssicherung und Handling verbunden ist. Die entstehenden zusätzlichen Kosten für den Miteinsatz von Recyclingware müssen über im Vergleich zur Neuware reduzierte Einkaufskosten mindestens ausgeglichen werden. Eine Preisgestaltung ohne Kostenunterschied für die Einsatzstoffe würde zum ausschließlichen Einsatz von Neuware führen.

Herausforderungen
Fertigung

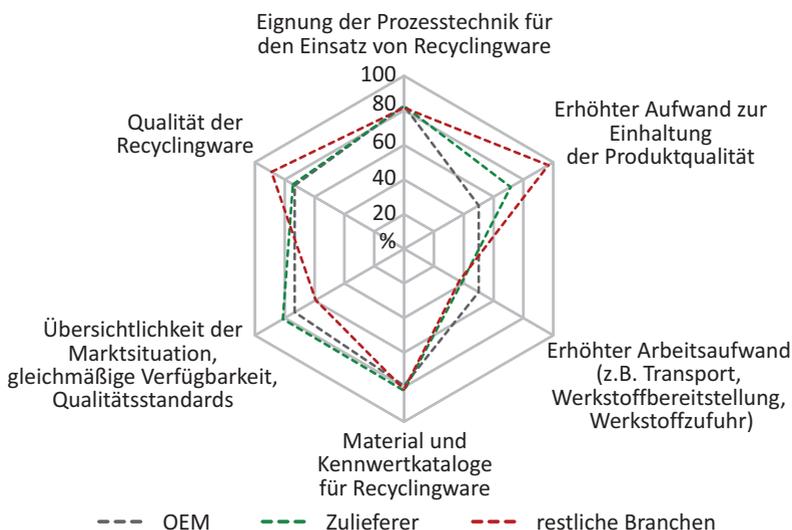


Abbildung 4.7: Anteile der Befragten, welche die dargestellten Aspekte in Bezug auf Recyclingware tendenziell als *problematisch* erachten

In der FOREL-Studie wird der *Mehraufwand für Logistik und Handhabung* bei Miteinsatz von Recyclingware von ca. 60 % der befragten Personen als eher unproblematisch empfunden. Ca. 40 % der Befragten sehen die zusätzliche Logistik als eher problematisch an. Am kritischsten wird dieser Punkt von den OEM betrachtet.

Stark differenzierte Aussagen ergeben sich bei der Beurteilung der *Einhaltung von Qualitätsstandards* beim Einsatz von Recyclingware. Bei den befragten OEM wird dieser Punkt von ca. 40 % als eher problematisch eingestuft aber nur zu einem geringen Prozentsatz von 5 % als sehr problematisch. Hingegen liegt der Anteil der sehr problematischen Einschätzungen für die Zulieferindustrie bei ca. 25 % und für die restlichen Branchen bei über 55 % der Befragten, wie in Abbildung 4.7 (S. 63) visualisiert. Zuzüglich einer mit ca. 40 % eher problematischen Einschätzung liegt die Summe der problematischen Einschätzungen der restlichen Branchen ohne Automotivebereich bei fast 100 % der Studienteilnehmer. Dies deutet auf ein Hauptproblem für den Einsatz von Recyclingwerkstoffen hin. Allerdings beschränken sich die Probleme weitgehend auf automobilfremde Branchen. Dies stärkt die Vermutung, dass entweder bei den OEM Prüfnormen und Verarbeitungsmethoden eher verbreitet und bekannt sind als in den anderen Branchen oder aber sich die Qualitätsanforderungen stark unterscheiden. Damit liegen in Abhängigkeit von Unternehmen, Qualitätsanforderungen und Prüfmethoden unterschiedliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Recyclingware vor.

Die *Eignung der Prozesstechnik* für einen Einsatz von Recyclingware wird von allen Befragten und weitgehend gleichmäßig über die Branchen hinweg mit über 80 % als eher bzw. sehr problematisch eingeschätzt. Tendenziell betrachten die OEM ihre Prozesstechnik am kritischsten mit über 50 % an sehr problematischen Einschätzungen.

Zusammenfassend gibt es für den Miteinsatz von Recyclingware eine ganze Reihe von prozessspezifischen Hinderungsgründen, die aber zum Großteil auf mangelnder Eignung der Prozesstechnik beruhen. Zudem

weist die Haltung der Zulieferindustrie und der restlichen Befragten zur Einhaltung von Produktqualitäten auf spezifische Probleme bei Qualitätsanforderungen und Prüfmethode von Recyclingwerkstoffen an der Schnittstelle zum Wiedereinsatz hin.

Der Einsatz von Recyclingware ist an die Definition von Qualitätsparametern gekoppelt. Dahingehend sind auch Aspekte der Recyclingware selbst zu hinterfragen. In der FOREL-Studie wurden folgende Aspekte in Zusammenhang mit Recyclingware in Fertigungsprozessen erfragt: *Qualität der Recyclingware*, *Marktsituation* und die *Verfügbarkeit von Materialkennwertkatalogen*. Die Marktsituation bezieht sich dabei auf die Mengenverfügbarkeit einer gleichmäßigen Qualität und deren Kennzeichnung hinsichtlich physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Die Fragen wurden wieder nach der Branche Automotive (OEM und Zulieferer) und den restlichen Branchen gefiltert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.7 (S. 63) dargestellt.

Es werden alle Aspekte, die im Zusammenhang mit der Recyclingware stehen, weitgehend branchenübergreifend mit 60–80 % als eher bzw. sehr problematisch eingeschätzt. Auffällig ist die Tendenz, dass die OEM bei jedem dieser Aspekte größere Herausforderungen sehen als die Zulieferer und die restlichen Befragten. Aufgrund der vermutlich größeren Erfahrung der OEM im Umgang mit Recyclingware in Fertigungsprozessen sind für diese Branche die Anforderungen an die Recyclingware das größte Einsatzhindernis. Als Schwerpunkt wurde die Erstellung und Lieferung von *Materialkennwertkatalogen* angeführt. Hinzu kommt, dass das Grundlagenwissen über Recyclingware als Basis für ihren Einsatz in der Fertigung von 90 % der befragten OEM als eher und sehr problematisch bzw. unzureichend angesehen wird.

Daraus kann als Zusammenfassung folgen Arbeitshypothese abgeleitet werden: Die Ursache für die industrielle Zurückhaltung hinsichtlich des Einsatzes von Recyclingware liegt kaum in der Akzeptanz, sondern in der bisher unzureichenden Bereitstellung geeigneter und entsprechend

gekennzeichneter Recyclingwerkstoffe sowie der Unsicherheit hinsichtlich der Einsatzfähigkeit in der Fertigung. Eine übersichtliche Marktsituation mit Informationen zu Kenngrößen und Produktqualitäten von Recyclingwerkstoffen wird als genauso wichtig erachtet wie die Anpassung der Prozesstechnik an den Einsatz von Recyclingware.

Zusammenfassung

Obwohl seine große wirtschaftliche Relevanz bestätigt wird, spielt das Recycling beim Großteil der Befragten bisher nur eine untergeordnete Rolle. Hauptsächlich werden Produktionsabfälle weitgehend ohne Rückführung in die eigene Produktion extern entsorgt. In der Fahrzeugindustrie ist eine hohe Akzeptanz für Recyclingwerkstoffe vorhanden. Für die interne Weiterverwendung nimmt der Fahrzeugbau eine Vorreiterrolle gegenüber anderen Branchen ein. Mit steigendem Anteil an Mischbauweisen müssen jedoch effizientere Strategien und Verfahren zur Aufbereitung entwickelt werden. Die erforderliche Prozesstechnik für den Miteinsatz von Recyclingware ist dabei ebenso wichtig wie die Qualität und Bereitstellung von Mengen mit geprüfter und reproduzierbarer Qualität.

**Kurz-
fassung**

- Produktionsabfälle sind wirtschaftlich kritische Prozessbestandteile.
- Der Umfang der spezifischen Abfallmengen wird durch die verwendeten Werkstoffe und Fertigungsprozesse bestimmt.
- Es fehlen Aufbereitungs- und Verwertungsstrategien für CFK und hybride Verbunde.
- Hohe Kosten für Abfälle entstehen durch unzureichende Informationsweitergabe an Schnittstellen (inhouse und extern).
- Hybride Werkstoffkombinationen erschweren das Recycling und den Wiedereinsatz.
- Die Industrie bestätigt eine hohe Akzeptanz für Recyclingware und ihren Einsatz.
- Ein Problem stellen unzureichende Informationen und Qualitäten der Recyclingware dar.
- Fertigungsprozesse sind nicht hinreichend an Recyclingware angepasst.

Fazit

- Senkung spezifischer Fertigungskosten:
 - Entwicklung abfallreduzierter Fertigungsverfahren
 - Informationsmanagement für die Optimierung der Verwertungswege
 - Integration des Wiedereinsatzes von Verschnittresten in die Fertigungsplanung
- Ressourceneffizienz durch Einsatz von Recyclingwerkstoffen:
 - Betrachtung ganzheitlicher Prozesskettenmodellierung
 - Vereinheitlichung von Prüfnormen und Erstellung von Katalogen für Recyclingware
 - Anpassung der Fertigungstechnik für Recyclingware
 - Entwicklung adaptiver Recyclingverfahren unter Einbindung von Wiederverwendung

Potenziale

5 Prozesskettenanalyse und Technologieplanung



Die NPE empfiehlt auch zukünftig den Multi-Material-Ansatz. Dieser verbindet verschiedenste Werkstoffgruppen und ist auch mit einem Wettbewerb zwischen den Materialien verbunden. [...] Mittels eines systemischen Ansatzes sollten künftig die Lücken in den Technologie- und Wertschöpfungsketten schnell identifiziert und gezielt geschlossen werden.”

Fortschrittsbericht 2014 der NPE [2]

5.1 Prozesskettenanalyse für hybride Mischbauweisen

Im Rahmen von FOREL wird der von der NPE verfolgte systemische Ansatz bei der Nutzung der Prozesskettenanalyse adressiert. Die Prozesskettenanalyse ist nach [28] eine softwaregestützte Methode zur Visualisierung und Analyse von technologischen Zusammenhängen. Sie wird auf Fertigungs- und Montageprozesse angewendet, die auf die Herstellung von Einzelkomponenten oder komplexen Gesamtsystemen abzielen. Hierzu werden Teilprozesse auf verschiedenen Detaillierungsebenen miteinander

Definition
Prozess-
ketten-
analyse

der verknüpft. Neben einer Produktions- und Versuchsplanung erlaubt die Prozesskettenanalyse eine Ressourcenplanung in Form von Material- oder Maschinendatenbanken. Basierend auf der Dokumentation der relevanten Parameter erfolgt eine Analyse der Zustandsänderungen im Verlaufe eines Prozesses oder einer Prozesskette, wodurch u.a. eine detaillierte Prozessparameter-Bauteileigenschaftsanalyse möglich wird. Hierbei können verschiedene statistische Methoden zur Anwendung kommen. Der Vorteil dieser Methode liegt in der einheitlichen Visualisierung (Abbildung 5.1) und systematischen Auswertung vielfältiger und komplexer Datenmengen wie etwa Materialkennwerten, Maschinendaten, Messwerten, Prozesszeiten oder Investitions- und Personalkosten. Darüber hinaus bietet es sich an, wirtschaftliche Bewertungen und Werkzeuge wie das LCA direkt in die Modellierung von Prozessketten zu integrieren, um die inhärenten Anforderungen der Automobilindustrie zu berücksichtigen. Die Prozesskettenanalyse hat sich bereits für die Technologieentwicklung und Qualitätskontrolle moderner Fertigungsverfahren, wie etwa der Herstellung von Faserverbundbauteilen, bewährt [28].

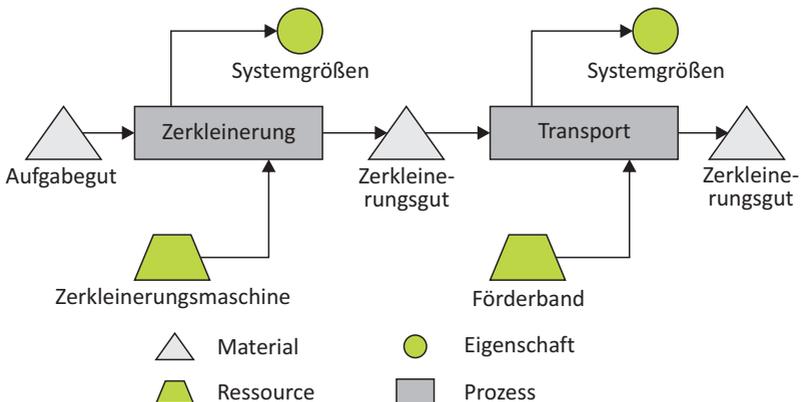


Abbildung 5.1: Prozesskettenmodell eines Recyclingprozesses

Die Entwicklung von angepassten Multi-Material-Leichtbaustrukturen für die Elektromobilität ist eine komplexe interdisziplinäre Aufgabe, für deren Erfüllung ein Zusammenwirken von verschiedenen Experten sowie verschiedenen Unternehmen und Forschungseinrichtungen gestaltet werden muss. Die Methodik der Prozesskettenmodellierung stellt eine einheitliche Vorgehensweise dar, die es erlaubt, unterschiedlichste Größen zu erfassen, miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Zudem steht dieser Ansatz im Einklang mit der ganzheitlichen Methode zur Entwicklung von modernen Faserverbundbauteilen. Diese geht davon aus, dass im Sinne eines effektiven, interaktiven Entwicklungsprozesses eine möglichst frühzeitige und kontinuierliche Abstimmung der Faktoren *Bauteil*, *Werkstoff*, *Fertigungsprozess* und *Fügetechnik* untereinander erfolgen sollte [29].

Um einen qualitativen Einblick in den Ablauf der Entwicklungsprozesse der Unternehmen zu erhalten, wurde ermittelt, zu welchem Zeitpunkt ausgewählte, für die Technologiebewertung entscheidende Faktoren vorrangig berücksichtigt werden. Die betrachteten Parameter unterteilen sich in klassische Struktureigenschaften, wie die mechanischen Eigenschaften oder auch die Temperaturbeständigkeit eines Werkstoffs, sowie interdisziplinäre Systemgrößen, wie die Reparaturfreundlichkeit oder die Recyclingfähigkeit. Die Befragten sollten einschätzen, welchen Phasen sie besondere Bedeutung zuschreiben oder ob eine Bewertung der Größen im gesamten Produktlebenszyklus relevant ist.

Häufig wird die These formuliert, dass KMU deutlich weniger Ressourcen aufwenden können, um komplexe Prozessketten zu analysieren [30, 31]. In Abbildung 5.2 (S. 72) ist daher jeweils für KMU und Großunternehmen dargestellt, zu welchem Prozentsatz die Antwortmöglichkeit *in allen Phasen* ausgewählt wurde. Am häufigsten antworteten die Befragten, dass der Faktor *Kosten* in allen Phasen der Produktentwicklung berücksichtigt wird.

Mit über 30 % scheint dieses Kriterium sowohl für KMU als auch für Großunternehmen gleichermaßen relevant zu sein. Am anderen Ende der

Skala steht die *Recyclingfähigkeit*, die von lediglich 16 % (Großunternehmen) bzw. 14 % (KMU) im gesamten Produktlebenszyklus berücksichtigt wird. Bei einer Analyse der Unterschiede zwischen KMU und Großunternehmen ergeben sich für die Kriterien Reparaturfreundlichkeit und Fügeaufwand die größten Unterschiede. Großunternehmen betreiben hier augenscheinlich mehr Aufwand. Als einziges Kriterium, bei dem sich für die KMU ein signifikant höherer Prozentsatz ergibt, kann die *Reproduzierbarkeit* identifiziert werden.

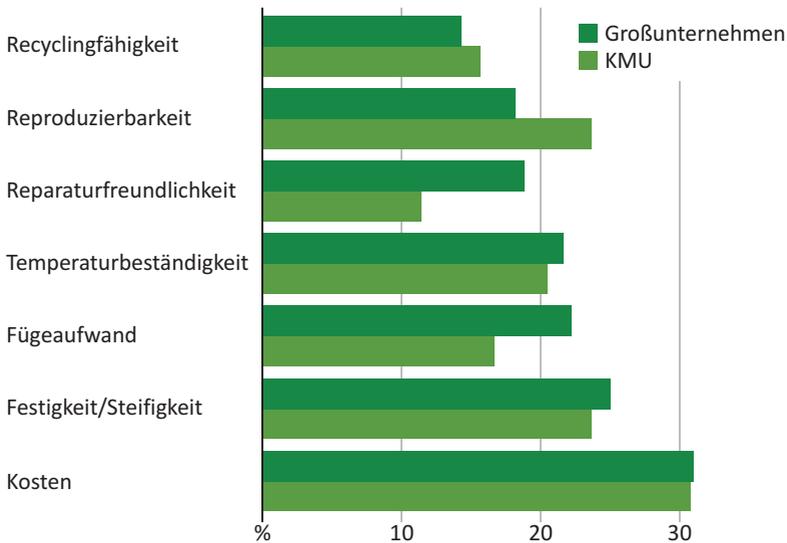


Abbildung 5.2: Häufigkeit der Antwort *in allen Phasen* auf die Frage: „Zu welchem Zeitpunkt der Produktentwicklung werden die nachfolgend genannten Parameter von Ihnen vorrangig berücksichtigt?“

Die Mehrheit der Befragten gibt an, dass sie die zur Auswahl gestellten Kriterien nicht in allen Phasen des Produktlebenszyklus berücksichtigen, sondern dass es gewisse Schwerpunktphasen in der Beurteilung gibt. Demnach ist in Abbildung 5.3 (S. 73) für ausgewählte Antwortmöglichkeiten die Verteilung auf die jeweiligen Entwicklungsstadien visualisiert.

Daran lässt sich ablesen, dass die *Kosten* vergleichsweise früh, d.h. vorwiegend schon in der *Konzept-* und in der *Entwurfsphase*, berücksichtigt werden. Mit Beginn der *Prototypenphase* verschiebt sich der Fokus stärker zu den Systemgrößen *Fügeaufwand* und *Recyclingfähigkeit*.

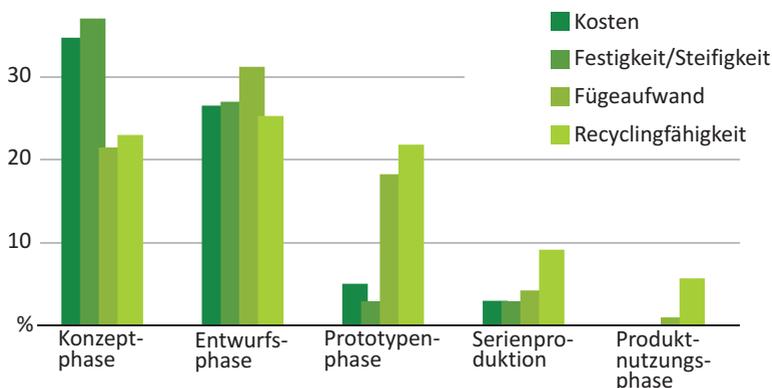


Abbildung 5.3: Prozentuale Anteile der Befragten, die die Faktoren *Kosten*, *Festigkeit/Steifigkeit*, *Fügeaufwand* und *Recyclingfähigkeit* in den dargestellten Phasen der Produktentwicklung berücksichtigen

Diese finden zu großen Anteilen auch in späteren Entwicklungsphasen Berücksichtigung. Festzuhalten ist, dass insbesondere die Betrachtung der *Recyclingfähigkeit* zwar relativ breit über den Produktlebenszyklus verteilt ist, jedoch im Vergleich zu den Struktureigenschaften später erfolgt. Entsprechend den Studienergebnissen des Technologiebereichs *Recycling* (vgl. Kapitel 4, S. 49 ff.) wäre es für die Erreichung einer höheren Recyclingquote jedoch erfolgversprechend, bereits in der Konzeptphase verstärkt Wiederverwertungsstrategien zu erarbeiten und z.B. anhand einer konsequenten Entwicklung abfallreduzierter, adaptiver Fertigungsverfahren die Material- und Produktlebenszyklen zu schließen. Um einen entscheidenden Beitrag zur ökologischen Einordnung der Energie- und Werkstoffkreisläufe zu leisten, kann das Werkzeug der LCA vorteilhaft in die Prozesskettenanalyse integriert werden.

Im Hinblick auf die zunehmende Komplexität zukünftiger Gesamtfahrzeuge ist zu erwarten, dass sich die im Rahmen der FOREL-Studie ermittelten und von der NPE benannten Trends:

- Einführung neuer kombinierter Werkstoffe und Verfahren,
- zunehmende Komplexität der Fertigungsprozesse,
- steigender Kostendruck und
- Streben nach größerer Ressourceneffizienz

noch weiter verstärken werden (Abbildung 2.1 und 2.5). Eine möglichst umfangreiche Einbindung der Prozesskettenanalyse in den Produktentwicklungsprozess stellt hierbei ein wirkungsvolles Tool zur Bewältigung der genannten Herausforderungen dar, was sich auch in den Antworten widerspiegelt. Wie in Abbildung 5.4 gezeigt, gehen 83% der Befragten davon aus, dass die Relevanz der Prozesskettenanalyse zukünftig steigen wird.

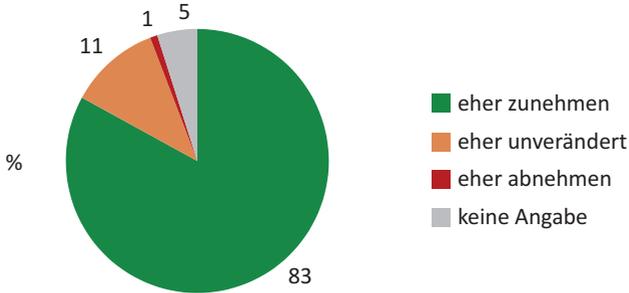


Abbildung 5.4: Allgemeine Erwartungen zur zukünftigen Relevanz der Prozesskettenanalyse

Aus den erhobenen Daten lässt sich zunächst ablesen, dass die Analyse von Systemgrößen in einem vergleichsweise späten Entwicklungsstadium erfolgt. Klassische Struktureigenschaften wie bspw. die mechanischen Eigenschaften werden von den Befragten deutlich häufiger schon zu Beginn der Entwicklungsphase evaluiert. Als Grund hierfür muss die Komplexität bzw. der interdisziplinäre Charakter der Systemgrößen angeführt werden.

Zudem kann aus den Ergebnissen abgelesen werden, dass bei KMU eine Beurteilung der Produkteigenschaften in vielen Fällen auf weniger Phasen der Produktentwicklung beschränkt ist als in Großunternehmen. Um den genannten Anforderungen und Trends gerecht zu werden, sollten anwendungsnahe Methoden der Prozesskettenanalyse möglichst vielfältig einsetzbar sein und einen geringen Aufwand zur Einführung in bestehende Entwicklungs- und Produktionsabläufe mit sich bringen. Insbesondere KMU würden von einem solchen Tool profitieren, da sie häufig damit konfrontiert sind, dass bestehende Ressourcen und Tools nicht ausreichen, um einen entsprechenden Wissenstransfer in die Serienanwendung zu gewährleisten [30, 31]. Eine systematische Dokumentation, Visualisierung und Evaluierung relevanter Daten besitzt das Potenzial, diese Hürde zu beseitigen.

5.2 Bedeutung der Technologieplanung und -identifikation

Ziel der Technologieplanung ist das Treffen richtiger Entscheidungen und deren Umsetzung im Hinblick auf die technologische Ausrichtung des produzierenden Unternehmens. In diesem Zusammenhang ist zu klären, welche Technologien zu welchem Zeitpunkt sowie zu welchem Zweck zur Anwendung kommen sollen, um Wettbewerbsvorteile zu sichern und auszubauen [32]. Hierzu müssen potenziell geeignete Technologien rechtzeitig identifiziert werden [33]. Im Folgenden wird dargestellt, wie der Prozess zur Identifikation von Produktionstechnologien (hier *Technologien* genannt) und dessen Schwerpunkte aktuell von den befragten Studienteilnehmern in Bezug auf seine Effektivität und Effizienz eingeschätzt werden (Abbildung 5.5, S. 76). Etwa 80 % der befragten Studienteilnehmer erachten die Identifikation neuer Produktionstechnologien als sehr zeit- und personalintensiv. Dies liegt nach [33, 34] und [35] in erster Linie an der großen Menge verfügbarer Informationen, die in einer Vielzahl an Informationsquellen enthalten sind.

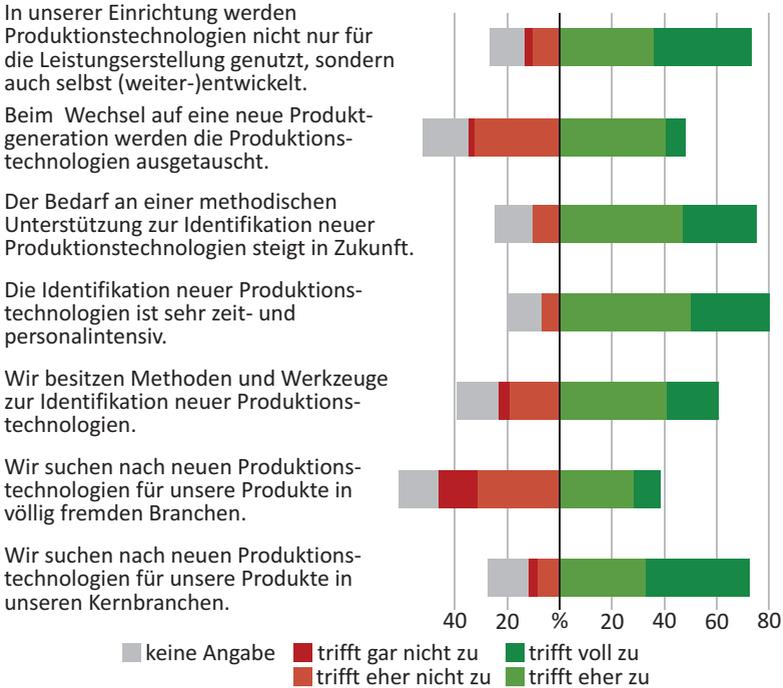


Abbildung 5.5: Thesen zur Erfassung der Bedeutung von Aspekten der Technologieplanung und -identifikation

In Abhängigkeit von der Branche besitzen zwischen 54 % (Maschinen- und Anlagenbau) und 70 % (Automotive) der Unternehmen Methoden und Werkzeuge zur Technologieidentifikation, wobei der Durchschnitt branchenübergreifend bei circa 61 % liegt. Nach [36] und [34] mangelt es jedoch oft an einer durchgehenden Verknüpfung einzelner Methoden, um die Effizienz des Prozesses zu erhöhen. Der Bedarf an methodischer Unterstützung zur gezielten Identifikation von Technologien wird nach Aussage von 75 % der Befragten in Zukunft steigen. Aktuell wird primär in den jeweiligen Kernbranchen nach neuen Technologien gesucht, wohingegen die Suche in fremden Branchen von den Studienteilnehmern mehrheitlich nicht fokussiert wird. Nach [37] könnten Technologien mit

hohem Potenzial insbesondere in analogen Märkten anderer Domänen identifiziert werden, die ähnliche Charakteristika in Bezug auf den Einsatz einer Technologie aufweisen.

Die Mehrheit der Befragten (73 %) gibt an, dass Technologien neben ihrer eigentlichen Nutzung zur Herstellung von Produkten ebenso für diesen Zweck selbst entwickelt bzw. weiterentwickelt werden. Dabei führt der Wechsel einer Produktgeneration nicht zwangsläufig zum Austausch der Technologie. Lediglich 49 % der befragten Studienteilnehmer geben an, dass die Einführung eines neuen Produktes mit einem Technologiewechsel einhergeht.

Zusammenfassung

Kurz- fassung

Um die bestehenden Lücken in komplexen, interdisziplinären Prozessketten zu identifizieren und zu bewerten, bedarf es einer einheitlichen Vorgehensweise, die eine offene und technologieübergreifende Erfassung aller relevanten Daten und Informationen erlaubt. Die Prozesskettenanalyse kann mit ihrem generalisierten Ansatz dazu einen bedeutenden Beitrag leisten. Zur Ausschöpfung des Potenzials müssen frühzeitig einheitliche Schnittstellen sowie Zielgrößen definiert werden.

Die Anforderungen an Produktionstechnologien einer solchen Kette sind aufgrund des dynamischen Umfeldes eines Unternehmens einem stetigen Wandel unterworfen. Unternehmen müssen daher effektive und effiziente Technologien einsetzen, die insbesondere auch zukünftigen Anforderungen genügen. Zu diesem Zweck müssen alternative potenzielle Technologien in Abhängigkeit vom Technologiebedarf identifiziert werden.

Fazit

- Die Komplexität von Fertigungsprozessen und der Einsatz von Werkstoffkombinationen steigen weiterhin an.
- Prozessketten werden detaillierter und interdisziplinär gestaltet.
- Wachsende Datenmengen müssen erfasst, dokumentiert und bewertet werden.
- Technologieidentifikation ist zeit- und personalintensiv.
- Technologien werden primär innerhalb der Kernbranche identifiziert.
- Der Bedarf an methodischer Unterstützung für die Identifikation von Technologien steigt.

Potenziale

- Definition von einheitlichen Schnittstellen zwischen allen Beteiligten und Ressourcen einer Prozesskette
- Frühzeitige und systematische Analyse komplexer Systemgrößen
- Weitgehende Reduktion von „trial-and-error“-Vorgehen in der Produktentwicklung und Bauteilfertigung
- Erhöhung des Innovationspotenzials bei KMU durch schnellere und koordinierte Einführung neuer Technologien mit Hilfe der Prozesskettenanalyse
- Effektive und effiziente Identifikation von neuen Technologien
- Nutzung der Prozesskettenanalyse zur ökologischen Bewertung (LCA)

6 Zusammenführung und Analyse



Der Leichtbau mittels bezahlbarer Hochleistungsverbundsysteme, welche nur durch effiziente Fügeprozesse realisierbar sind, ist der Schlüssel für bedarfsgerechte elektromobile Fahrzeugstrukturen.”

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut

Die in der FOREL-Studie analysierten Themenkomplexe wurden gezielt hinsichtlich thematischer Schnittmengen ausgewertet. Die bisher aufgeführten Ergebnisse zeigen bereits konkreten Forschungsbedarf. Die Identifikation von „technologischen Lücken“ und interdisziplinären Fragestellungen kann jedoch nur durch eine ganzheitliche Betrachtung der untersuchten Themenfelder erreicht werden. Im Rahmen einer vertieften Analyse des Ist-Standes sowie der laut Wirtschaft und Wissenschaft zeitnah zu erwartenden Entwicklungen im Technologiecluster *Fahrzeugtechnologie – Leichtbau* sollen bewusst auch an Bedeutung gewinnende Trends angesprochen werden, die über den Zeitraum von 10 Jahren hinausreichen. Die FOREL-Studie benennt demnach Entwicklungen, die über den Zeitraum der von der NPE beschriebenen Phasen *Marktvorbereitung* (bis

2014), *Markthochlauf* (bis 2017) und *Massenmarkt* (bis 2020) hinausgehen. Das Forschungs- und Technologiezentrum FOREL kann daher nur mittelbar daran gemessen werden, ob bis zum Jahr 2020 tatsächlich 1 Million Elektroautos für den deutschen Straßenverkehr zugelassen worden sind. Es wird vielmehr die Zielstellung verfolgt, die im Rahmen der NPE anvisierten technologischen Entwicklungen wissenschaftlich und aus dem spezifischen Blickwinkel des Leichtbaus zu begleiten und zu unterstützen.

Ziele Zur Erreichung dieses Ziels sollen namhafte und in ihrem jeweiligen Fachgebiet als führend wahrgenommene Experten aus Wissenschaft und Industrie zusammengebracht werden, um das Themenfeld Leichtbau für die Elektromobilität durch gezielt initiierte Technologieprojekte voranzutreiben. Die Besonderheit liegt in der standort- und themenübergreifenden Herangehensweise, die es FOREL ermöglicht, synergetische Effekte zu nutzen und Forschungsergebnisse entlang komplexer Prozessketten miteinander zu verknüpfen, zu vergleichen und damit zu evaluieren. Eine systemisch koordinierte Forschungsförderung ist ein essentieller Baustein für den Aufbau und die Sicherung eines Technologievorsprungs für die ressourceneffiziente Elektromobilität in Deutschland. Die Entwicklungsergebnisse können innerhalb des FOREL-Technologiezentrums validiert, anschließend transferiert und somit zeitnah in industriellen Wertschöpfungsketten genutzt werden. Zur Realisierung der Ziele ist sowohl ein Austausch zwischen allen beteiligten Partnern als auch eine über das Konsortium hinausgehende Potenzial- und Bedarfsanalyse von zentraler Bedeutung. Aus dieser Notwendigkeit ist die FOREL-Umfrage initiiert worden, deren Ergebnisse in Form der vorliegenden Studie nun für die Öffentlichkeit zugänglich sind. Die inhaltlichen Schlüsse aus der Erhebung lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Ergebnisse Die Massenreduktion ist längst nicht mehr der einzige Treiber für konsequenten Leichtbau in Kraftfahrzeugen. Die Ergebnisse der Studie zeigen deutlich, dass insbesondere durch Multi-Material-Design und neue Mischbauweisen enorme Chancen für maßgeschneiderte, hochintegrative

Bauteillösungen entstehen, jedoch auch offene Fragen etwa hinsichtlich der Rezyklierbarkeit, der Gesamtkosten sowie der Fügbarkeit vorhanden sind. Darüber hinaus müssen werkstoffgerechte Prüf- und Charakterisierungsmethoden dringend erweitert werden, um auf Basis der Werkstoffprüfung geschlossene Eigenschaftsmodelle zu formulieren und damit die Vorhersagbarkeit des komplexen Werkstoffverhaltens zu verbessern. Zudem stellen sich die additiven Fertigungsverfahren durchweg als sehr innovatives Feld heraus, bei dem jedoch noch viele Unzulänglichkeiten beseitigt werden müssen, wie etwa die mangelnde Produktivität oder die unzureichende Werkstoffcharakterisierung. Es bleibt weiterhin offen, in welchen Gebieten des Automobils additiv gefertigte Komponenten wirtschaftlich eingesetzt werden können. Hier gilt es zunächst, die Potenziale der Technologien genauer zu definieren und anschließend optimal auszu-schöpfen.

Die Kombination von Werkstoffen stellt die Verbindungstechnologien vor enorme Herausforderungen. Wie die Studie zeigt, legt die Industrie großes Augenmerk auf die Weiterentwicklung von Füge-technologien. Die etablierten Technologien müssen hinsichtlich der vielfältigen Werkstoffkombinationen um innovative, hybride Fügeverfahren erweitert werden. Nur auf diese Weise kann ein flexibles, werkstoffgerechtes und qualitativ hochwertiges Fügen erreicht werden. Bei der Entwicklung neuer Fügeverfahren spielt zudem die Automatisierbarkeit eine entscheidende Rolle, um reproduzierbare, hochfeste Verbindungen zwischen Fahrzeugkomponenten herzustellen.

Bei näherer Betrachtung der Schnittstellen zwischen Füge-technologien und Recycling ist ersichtlich, dass auch der Lösbarkeit der Verbindungen eine zentrale Rolle zukommt. Für eine ideale, sortenreine Trennung der in den Fahrzeugkomponenten verwendeten Werkstoffe ist die Auswahl der Verbindungstechnologie der entscheidende Faktor. Bei Betrachtung der internen Recyclingkreisläufe stellt die Studie klar heraus, dass das Recycling aus dem internen Unternehmensbereich häufig ausgelagert wird.

Es stellt sich die Frage, ob werkstoffangepasste Recyclingtechnologien und eine verstärkte Automatisierung der Werkstoffaufbereitung diesen Trend umkehren können. Eine zentrale Herausforderung ist zudem die Akzeptanz von Recyclingware, die nur durch Minimierung der aktuell noch großen Schwankungen in den Werkstoffkennwerten erreicht werden kann. Zur Steigerung der Ressourceneffizienz gilt es, schon bei den Fertigungsprozessen anzusetzen und die entstehende Abfallmenge und -zusammensetzung zu analysieren.

Ein erfolgreicher Beitrag zur Elektromobilität kann nur dann vom Leichtbau geleistet werden, wenn die Schließung der hier identifizierten Lücken in den Wertschöpfungsketten gelingt. Dazu müssen gezielt Entwicklungen initiiert und die in Deutschland verteilt vorhandene Expertise zusammengeführt werden. Hierzu birgt das Werkzeug der Prozesskettenmodellierung ein hohes Potenzial, um das Zusammenwirken von Werkstoffen, Fertigungsverfahren, Verbindungen von Komponenten sowie späteren Bauteileigenschaften oder gar Recyclingkreisläufen und Ökobilanzen (LCA) darzustellen. Um jedoch universell einsetzbare Prozesskettenmodellierungswerkzeuge als dauerhafte Qualitätssicherungs- und Entwicklungstools zu etablieren, müssen noch essentielle Bausteine, wie etwa die möglichst einheitliche Maschinenintegration, die Anwenderfreundlichkeit oder das Datenmanagement, erarbeitet bzw. erprobt werden.

Roadmap

Die Ergebnisse der FOREL-Studie definieren Forschungsfelder und Entwicklungsbestrebungen, die sowohl einen kurzfristigen Wissenstransfer von der Forschung in die Anwendung erwarten lassen als auch mittel- und langfristige Technologietrends darstellen. Diese lassen sich in ihrer Gesamtheit zu einer Roadmap zusammenfassen, die zeitnah in die Realisierung ressourceneffizienter Prozessketten und Prozessnetzwerke für die Elektromobilität mündet. Neben Fortschritten bei spezifischen Werkstoffen und Fertigungstechnologien ist in erster Linie eine konsequente systemische Betrachtungsweise des zukünftigen Leichtbaus erforderlich. Ent-

sprechend den Ergebnissen der Studie ist mit einer zunehmenden Kombination von untereinander artfremden Werkstoffen, wie etwa Kunststoffen, FKV, Leichtmetallen und Stählen, zu rechnen. Deren Anwendung wird sich ausgehend von einzelnen Komponenten über Strukturen bis hin zu kompletten Fahrzeugsystemen erweitern. Hierfür ist eine Intensivierung der anwendungsorientierten Forschung insbesondere in den in Abbildung 6.1 dargestellten Forschungsfeldern notwendig. Eine entsprechende Leichtbau-Roadmap wird in Abstimmung mit der NPE erarbeitet.



Abbildung 6.1: Leichtbau-Roadmap

Mit bloßen Anpassungskonstruktionen wird die Automobilindustrie langfristig kaum in der Lage sein, die Elektromobilität wettbewerbsfähig zu machen. Vielmehr wird zunehmend auch die Neukonstruktion von Fahrzeugarchitekturen und Produktionsprozessen erforderlich sein, um verän-

derten und miteinander gekoppelten Randbedingungen gerecht zu werden. Hierfür wird neben standardisierten Auslegungs- und Berechnungsmethoden auch eine flexiblere Kombination von Fertigungstechnologien notwendig sein. Ziel muss es sein, ganzheitliche Entwicklungen wie z.B. One-Shot-Prozesse von komplexen Hybrid-Bauteilen mit einer entsprechenden Wirtschaftlichkeit für alle Fahrzeugklassen zur Verfügung zu stellen. Hierzu zählen auch werkstoffangepasste Reparaturkonzepte und Recyclingstrategien, die in einem Kostenrahmen liegen müssen, der von der Industrie auch gegenüber Metallen als konkurrenzfähig eingestuft wird. Neben der Wirtschaftlichkeit spielt die Ökologie eine übergeordnete Rolle. So müssen frühzeitig die Stoff- und Energiebilanzen in künftigen Fertigungsprozessen abgebildet und bewertet werden. Neue Fertigungstechnologien werden nur dann in die industrielle Produktion transferiert, wenn deren ökologischer Fußabdruck dies zulässt. LCA ist dabei ein ideales Werkzeug, um Prozessketten und -netzwerke künftig, auch über die Systemgrenzen hinweg, zu evaluieren.

Life-Cycle-
Assessment

Der steigende Beitrag von Unterhaltungselektronik und Fahrerassistenzsystemen zur Gesamtmasse heutiger (Elektro-)Fahrzeuge zeigt, dass der Aspekt der Funktionsintegration immenses Entwicklungspotenzial besitzt. Eine nachhaltige Umkehr der Gewichtsspirale kann nur sichergestellt werden, wenn elektronische Bauteile und Komponenten systematisch in die Konzeption und den Entwurf der Fahrzeuggesamtstruktur einbezogen werden.

SWOT-
Analyse

Ausgehend von der hier skizzierten Roadmap wird abschließend eine SWOT-Analyse durchgeführt, in der interne Faktoren externen Faktoren gegenübergestellt werden (Abbildung 6.2, S. 85). Dabei zeigt sich, dass die im Bereich des Fahrzeugbaus unbestreitbare Vorreiterstellung der deutschen Industrie als eine der wichtigsten Stärken angeführt werden kann. Insbesondere im Bereich des Leichtbaus hat sich ein enges Netzwerk aus Kooperationen zwischen Forschungseinrichtungen und Wirtschaft etabliert.

| | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Dichte Vernetzung von Forschung und Industrie • Internationale Technologieführerschaft bei der Entwicklung von Leichtbaukonzepten in Multi-Material-Design • Vielfältige Möglichkeiten zur Integration von Funktionselementen in FKV-Strukturen • Maßgeschneiderte Bauteillösungen mit maximaler Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften • Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit durch ständig steigenden Automatisierungsgrad und dadurch eingesparte Lohnkosten <p style="text-align: center;">STÄRKEN</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Lücken in der Fertigungs-/Wertschöpfungskette bei hybriden Leichtbaukomponenten für die Elektromobilität • Ausrichtung von Aus- und Weiterbildungsprogrammen im Automobilbau auf konventionellen Werkstoffeinsatz • Fehlende interdisziplinäre Partnerschaften • Werkstoffdaten und Prüfmethoden unbefriedigend • Fehlende Recyclingstrategien und Reparaturkonzepte für Leichtbaustrukturen <p style="text-align: center;">SCHWÄCHEN</p> |
| <p style="text-align: center;">MÖGLICHKEITEN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paradigmenwechsel der Verbraucher hin zur grünen Energie • Intelligente Vernetzung der Zulieferindustrie zum weiteren und gemeinsamen Ausbau der Innovationsführerschaft • Langfristige Verankerung des Leichtbaus als tragende Säule in der Fahrzeugentwicklung • Richtungsweisender Schub durch neuartige Fertigungsmethoden, wie etwa die additive Fertigung • Nutzung von Life Cycle Assessment zur ökologischen Optimierung von Fertigungsprozessen | <p style="text-align: center;">GEFAHREN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unzureichender Transfer zur Nutzung des Verwertungspotentials aus der F&E • Zögerliche Innovationsumsetzung seitens der Automobilindustrie • Gefahr eines zu geringen Marktanteils deutscher Elektrofahrzeuge • Unzureichende Weiterentwicklung werkstoffangepasster Füge- und Trenntechnologien |

Abbildung 6.2: SWOT-Analyse

Aufbauend auf diesem Know-how müssen die in der Studie identifizierten Lücken in bestehenden Prozessketten ausgefüllt werden, um so bspw. einen größeren Automatisierungsgrad bei der Herstellung von modernen Leichtbaustrukturen zu erreichen. Als Chance und Katalysator können dabei der derzeitige Paradigmenwechsel hin zur Etablierung erneuerbarer Energien und die damit einhergehende veränderte Erwartungshaltung der Verbraucher wirken. Anhand der Studienergebnisse können eindeutige Schwächen identifiziert werden, die eine schnelle und flächendeckende Einführung der Elektromobilität erschweren. So führen veränderte Bauweisen und Werkstoffe zu offenen Fragen im Bereich des Recyclings sowie der Automatisierung. Hierzu sind auch Problemstellungen wie die Aus- und Weiterbildung des Personals entscheidend. Als externe Faktoren kommen außerdem Risiken wie die Wirtschaftlichkeit oder die schwer abschätzbare Bereitschaft zur Umsetzung der technologisch möglichen Innovationen hinzu.

Literatur

- [1] LÄSSIG, R. ; EISENHUT, M. ; MATHIAS, A. ; SCHULTE, R. T. ; PETERS, F. ; KÜHMANN, T. ; WALDMANN, T. ; BEGEMANN, W.: *Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen – Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. Amsterdam, Berlin, Zürich : Roland Berger Strategy Consultants, 2012
- [2] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT (NPE): *Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung*. Berlin : Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2014
- [3] SCHLICK, T. ; HERTEL, G. ; HAGEMANN, B. ; MAISER, E. ; KRAMER, M.: *Zukunftsfeld Elektromobilität – Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. Amsterdam, Berlin, Zürich : Roland Berger Strategy Consultants, 2011
- [4] EICKENBUSCH, H. ; KRAUSS, O. ; VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung*. Düsseldorf, 2014
- [5] BIERMANN, D. ; HUFENBACH, W. ; SELIGER, G. ; INSTITUT FÜR LEICHTBAU UND KUNSTSTOFFTECHNIK (ILK) (Hrsg.): *Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe (sefawe) – Untersuchung zum Forschungs- und Handlungsbedarf*. Dresden, 2008. – ISBN 978–3–00–026217–3
- [6] LIEBERWIRTH, H. ; KRAMPITZ, T.: Entwicklungstendenzen für den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeugbau und Auswirkung auf das Recycling. In: *Berliner Recyclingkonferenz*. Berlin, März 2015
- [7] GUDE, M. ; VOGEL, C. ; TROSCHITZ, J. ; MAASS, J.: Methods for the process-integrated hybridisation of lightweight structures in

- multi-material design. In: *Material Science Engineering*. Darmstadt, September 2014
- [8] KLEIN, B.: *Leichtbau-Konstruktion - Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 9. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2011
- [9] KOR, J.: Das Auto aus dem Drucker – Vision oder Wirklichkeit. In: *16. Jahreskongress Zulieferer Innovativ: Das Fahrzeug der Zukunft*. München, Juli 2014
- [10] LAURENZ, R.: Stahlientwicklung aus Sicht der Fügetechnik. In: *Vortrag auf der AFT-Tagung in Halle (Saale)*. Halle (Saale), Mai 2014
- [11] FRIEDRICH, H.E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. 1. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [12] SCHÜBELER, C.: *Hybridfügen pressgehärteter borlegierter Stähle*. Paderborn, Universität Paderborn, Dissertation, 2012
- [13] LINNENBRINK, M. ; SCHULENBERG, J. O.: Neues Konzept für den Karosseriebau – Semi-Strukturelle Unterfütterung mit 2K-Klebstoffen. In: *Adhäsion* (2006), Nr. 9, S. 16–21
- [14] N.N.: *Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen im November 2014*. Website des Kraftfahrt-Bundesamtes - online abrufbar unter: <http://www.kba.de>; abgerufen am 05.05.2015, November 2014
- [15] SÜLLENTROP, S.: *Qualifizierung von geklebten Funktionselementen auf Basis photoinitiert härtender Acrylate*. Paderborn, Universität Paderborn, Dissertation, 2014
- [16] N.N.: *Stellungnahme der Volkswagen AG zur Nachhaltigkeit und zum Einsatz von glasfaserverstärktem Kunststoff*. Website der

- Volkswagen AG - online abrufbar unter: <http://www.volkswagen.de>;
abgerufen am 05.05.2015, Mai 2015
- [17] HOFFMANN, O.: *InCar – Der innovative Lösungsbaukasten für die Automobilindustrie*. Website der ThyssenKrupp AG - online abrufbar unter: <http://www.thyssenkrupp.com>; abgerufen am 05.05.2015, Oktober 2009
- [18] REUSS, I. ; KRANZ, U.: Elektroauto i3 kommt auf bis zu 300 km Reichweite, Einblicke in die i-Produktlinie von BMW. In: *VDI Nachrichten* (2013)
- [19] TRECHOW, P. ; PLATH, A.: Leichtbau ist Königsdisziplin, Einblick in die VW-Konzernforschung, 3. VDI Fachkongress. In: *VDI Nachrichten* (2013)
- [20] EICKENBUSCH, H. ; KRAUSS, O. ; VDI ZENTRUM RESSOURCENEFFIZIENZ GMBH (Hrsg.): *Kurzanalyse Nr. 3: Kohlenfaser-verstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien*. Berlin, 2013
- [21] N.N.: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG). (2012)
- [22] N.N.: Festlegung von Kennzeichnungsnormen für Bauteile und Werkstoffe gemäß der Richtlinie über Altfahrzeuge 2000/53/EG unter Aktenzeichen 2003/138/EG. (2003)
- [23] HACKENBERG, U.: *Strategie der Volkswagen Aktiengesellschaft zur Erreichung von Recycling- und Verwertungsquoten*. Website der Volkswagen AG - online abrufbar unter: <http://www.volkswagen.de>;
abgerufen am 05.05.2015, Mai 2007
- [24] N.N.: Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über Altfahrzeuge. (2000)

-
- [25] N.N.: Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (AltfahrzeugV.), letzte Änderung 12.2013. (1997)
- [26] KREIBE, S.: *MAI-Recycling Projektbeschreibung*. Website MAI Carbon - online abrufbar unter: <http://www.mai-carbon.de>; abgerufen am 05.05.2015, Mai 2015
- [27] GUDE, M. ; STEGELMANN, M.: *Forschungsprojekt ReLei – Recyclingstrategien für Leichtbaustrukturen in Elektrofahrzeugen*. Website der Plattform FOREL - online abrufbar unter: <http://www.plattform-forel.de>; abgerufen am 05.05.2015, Mai 2015
- [28] GROSSMANN, K. ; WIEMER, H. ; GROSSMANN, K. K.: Methods for modelling and analysing process chains for supporting the development of new technologies. In: *Procedia Materials Science* 2 (2013), S. 34–42
- [29] HELMS, O. ; HUFENBACH, W.: Konstruieren von Strukturbauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden. In: FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg : Vieweg+Teubner, 2013, S. 648–664
- [30] LERCH, C. ; ZANKER, C. ; KÜHLBACH, P.: Strategische Prozessmodernisierung in KMU. In: *wt Werkstattstechnik online* 102 (2012)
- [31] BRÄUTIGAM, K.R. ; GERYBADZE, A.: *Wissens- und Technologietransfer als Innovationstreiber*. Berlin : Springer, 2011
- [32] SCHUH, G. ; KLAPPERT, S. ; ORILSKI, S.: Technologieplanung. In: SCHUH, G. ; KLAPPERT, S. (Hrsg.): *Technologiemanagement*. Berlin : Springer, 2011, S. 171–222

-
- [33] LANG, H.-C.: *Gestaltung der Technology Intelligence in Abhängigkeit der Wettbewerbssituation*. Zürich, Diss., 1998. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-001979554>. – DOI 10.3929/ethz-a-001979554
- [34] LICHTENTHALER, E.R.V. ; TSCHIRKY, H. (Hrsg.): *Technology, innovation and management*. Bd. 5: *Organisation der Technology Intelligence: eine empirische Untersuchung der Technologiefrühaufklärung in technologieintensiven Grossunternehmen*. Zürich : Verlag Industrielle Organisation, 2002
- [35] SAVIOZ, P.: Technology intelligence systems: practices and models for large, medium-sized and start-up companies. In: *International Journal of Technology Intelligence and Planning* 2 (2006), Nr. 4, S. 360–379
- [36] REGER, G.: Technology Foresight in Companies: From an Indicator to a Network and Process Perspective. In: *Technology Analysis & Strategic Management* 13 (2001), Nr. 4, S. 533–553. <http://dx.doi.org/10.1080/09537320127286>. – DOI 10.1080/09537320127286
- [37] FRANKE, N. ; POETZ, M.K. ; SCHREIER, M.: Integrating Problem Solvers from Analogous Markets in New Product Ideation. In: *Management Science* 60 (2014), Nr. 4, S. 1063–1081

www.plattform-FOREL.de

Kurzbeschreibung

FOREL wurde im Jahr 2013 auf Initiative der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) als BMBF-Leuchtturmprojekt eingerichtet und ist eine national übergreifende, offene Plattform zur Entwicklung von Hightech-Leichtbausystemlösungen in Multi-Material-Design für E-Fahrzeuge der Zukunft. Partner von FOREL aus Industrie und Forschung profitieren vom „Know-how“ des FOREL-Netzwerks aus führenden Forschungs- und Entwicklungszentren für den funktionsintegrierten Systemleichtbau für die Elektromobilität.

Zur Identifikation strategisch wichtiger Forschungsfelder wurden im Rahmen des FOREL-Koordinationsprojekts ausgewiesene Wirtschafts- und Wissenschaftsexperten auf dem Gebiet des Leichtbaus und der Elektromobilität aus verschiedenen Branchen befragt, um aktuelle Ansätze und Entwicklungen zu erfassen und Entwicklungsbearbeitungen aufzuzeigen. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Befragung wurden in dieser FOREL-Studie zusammengefasst.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), TU Dresden
Holbeinstr. 3, 01307 Dresden
Tel.: +49 351 / 463 37915
E-Mail: info@plattform-forel.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

ISBN 978-3-00-049681-3



9 783000 496813