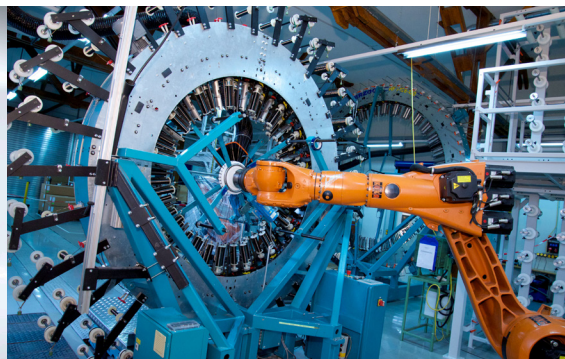
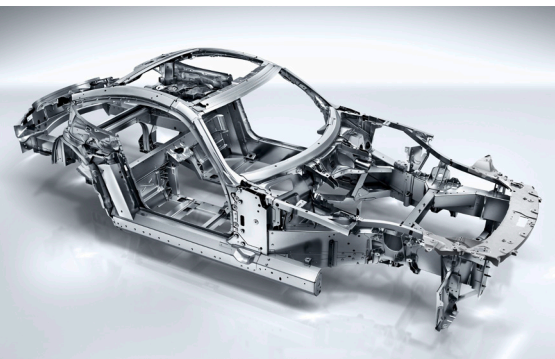


VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 17

Ressourceneffizienz im Leichtbau



Kurzanalyse Nr. 17: Ressourceneffizienz im Leichtbau

Autoren:

Oliver S. Kaiser, VDI Technologiezentrum GmbH
Dr. Oliver Krauss, VDI Technologiezentrum GmbH
Dr. Heike Seitz, VDI Technologiezentrum GmbH
Stefan Kirmes, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik / Nachhaltige Produktion & Life Cycle Engineering an der Technischen Universität Braunschweig, für seine fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-27 59 506-0
Fax +49 30-27 59 506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild:

- © Space Frame des Mercedes-AMG GT (oben links)
- © TEUFELBERGER, Composite Braiding (oben rechts)
- © Ansgar Pudenz, Deutscher Zukunftspreis 2015, Bionic cabin holder “bracket” of the Airbus A350 XWB made of titanium, manufactured using the LaserCUSING process (unten links)
- © Alfred-Wegener-Institut, Bionischer Leichtbau, Paul Bomke, www.elise.de (unten rechts)

Druck: Bonifatius GmbH, Karl-Schurz-Straße 26, 33100 Paderborn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 17

Ressourceneffizienz im Leichtbau

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	4
TEIL 1: KURZANALYSE	7
1 EINLEITUNG	8
2 BEWERTUNG VON RESSOURCENEFFIZIENZ	12
2.1 Produktbezogene Einflussfaktoren auf die Ressourceneffizienz im Leichtbau	14
2.2 Prozessbezogene Einflussfaktoren auf die Ressourceneffizienz im Leichtbau	15
2.3 Verwertungs- und beseitigungsbezogene Einflussfaktoren auf die Ressourceneffizienz im Leichtbau	16
3 RESSOURCENEFFIZIENZPOTENZIALE IM STOFFLEICHTBAU	18
3.1 Metalle	18
3.1.1 Stahl	18
3.1.2 Aluminium	23
3.1.3 Magnesium	29
3.1.4 Titan	33
3.2 Faserverstärkte Kunststoffe	36
3.3 Sonstige Leichtbauwerkstoffe	50
3.3.1 Kunststoffe	50
3.3.2 Technische Keramik	51
4 RESSOURCENEFFIZIENZPOTENZIALE IM KONSTRUKTIVEN LEICHTBAU	56
4.1 Hybridbauweisen	56
4.1.1 Metall-Metall-Verbunde	57
4.1.2 Metall-Kunststoff-Verbunde	59
4.2 Strukturoptimierung/Strukturleichtbau	61
4.2.1 Topologieoptimierung	62
4.2.2 Bauteilstrukturierung	65
4.3 Funktionsintegration	71

5	VERWERTUNG UND BESEITIGUNG VON LEICHTBAUPRODUKTEN	80
6	FAZIT	85
	TEIL 2: FACHGESPRÄCH	87
1	PROGRAMM DES FACHGESPRÄCHS „RESSOURCENEFFIZIENZ IM LEICHTBAU“	88
2	DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS	89
2.1	Lebenszyklusanalyse (LCA)/Ökobilanzierung	89
2.2	Herstellungsprozesse	91
2.3	Recycling	94
2.4	Rahmenbedingungen	96
	LITERATURVERZEICHNIS	98

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Einschätzung des Werkstoffeinsatzes für strukturrelevante Leichtbauteile in den nächsten fünf Jahren hinsichtlich der Elektromobilität	9
Abbildung 2:	Ressourcennutzung im Lebensweg am Beispiel von Materialströmen. Fokus auf die Produktherstellung sowie die Verwertung und Beseitigung.	13
Abbildung 3:	Im 3D-Druck gefertigte Halterung für Flugzeug-Kabinenbauteile	35
Abbildung 4:	Innovations- und Kostensenkungspotenziale in der FVK-Wertschöpfungskette	37
Abbildung 5:	Instandsetzungstechniken für Faserverbundbauteile	43
Abbildung 6:	Eine Konstruktionsmethodik des bionischen Leichtbaus (ELiSE)	64
Abbildung 7:	FVK-Leichtbau durch Funktionsintegration	77

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

3D-CP	3D Composite Print
AFS	Aluminium Foam Sandwich
AHSS	Advanced High Strength Steel
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“
AWI	Alfred-Wegener-Institut
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAIRE	Composite Adaptable Inspection and Repair
CAO	Computer Aided Optimization
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CFS	Carbonfasersensoren
CMC	Ceramic Matrix Composite
CNT	Carbon-Nano-Tubes
CO₂	Kohlendioxid
C/SiC	kohlenstofffaserverstärktes Siliciumcarbid
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ELiSE	Evolutionary Light Structure Engineering

EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EPP	Expandierter Polypropylen-Partikelschaum
Fe-CrMnNi	Eisen-Chrom-Mangan-Nickel
FEM	Finite-Elemente-Methode
FIM	Fiber-Injection-Molding
FLM	Fused Layer Modeling
FML	Faser-Metall-Laminat
FOREL	Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HSD	High Strength and Ductility
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCA	Life Cycle Assessment
LEAP	Leading Edge Aviation Propulsion
LED	Lichtemittierende Diode
LSI	Liquid Silicon Infiltration
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PAG	Premium Aerotec
PAN	Polyacrylnitril
PEEK	Polyetheretherketon
PPS	Polyphenylsulfid
PSU	Polysulfon

PTFE	Polytetrafluorethylen
RCCF	Center Carbon Fibers Saxony
rCF	Recyclingcarbonfasern
rCFK	Recyclingcarbonfaserverstärkter Kunststoff
ReLei	Fertigungs- und Recyclingstrategien für die Elektromobilität zur stofflichen Verwertung von Leichtbaustrukturen in Faserkunststoffverbund-Hybridbauweise
RTM	Resin Transfer Moulding
SAS	Steel Aluminium Foam Sandwich
SKO	Soft Kill Option
SLM	Selective Laser Melting
SUV	Sport Utility Vehicle
UD	Unidirektional
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
ZLP	Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie
ZrO₂	Zirconium(IV)-oxid

TEIL 1: KURZANALYSE

1 EINLEITUNG

Der Leichtbau ist ein Musterbeispiel, um Potenziale der Ressourceneffizienz aufzuzeigen. Die Ressourceneffizienzpotenziale in der Nutzungsphase mobiler Produkte sind bereits häufig untersucht worden und weitestgehend bekannt. Darüber hinaus bieten die unterschiedlichen Leichtbaustrategien und -werkstoffe auch in der Herstellungsphase sowie in der Verwertung und Beseitigung Möglichkeiten zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Unternehmen, die effizient produzieren und dadurch Materialkosten einsparen, verschaffen sich einen deutlichen Wettbewerbsvorteil und sind unabhängiger von Preisschwankungen des Rohstoffmarktes. Dies gilt besonders dann, wenn neue Technologien, innovative Anpassungen des Designs, neue Leichtbaustrategien und verbesserte Fertigungsprozesse eingesetzt werden. Leichtbauweisen können durch Materialeinsparung, Materialsubstitution, Funktionserweiterung oder konstruktive Maßnahmen erreicht werden.

Potenziale für mehr Ressourceneffizienz im Herstellungsprozess von Leichtbauanwendungen sind in allen Werkstoffklassen zu finden. Dabei wird sich der Einsatz klassischer und neuer Werkstoffe zukünftig verändern. Eine Befragung von 240 Fachleuten aus Wissenschaft und Wirtschaft zu diesem Thema mit dem Fokus auf Leichtbau für die Elektromobilität lässt deutliche Veränderungen des zukünftigen Materialeinsatzes vermuten (Abbildung 1). Es ist zu erwarten, dass die Verwendung spezifischer hochfester Stähle und verstärkter Kunststoffe zunimmt, wohingegen klassische Stähle immer weniger eingesetzt werden.¹

¹ Vgl. Gude, M. (2015), S. 24.

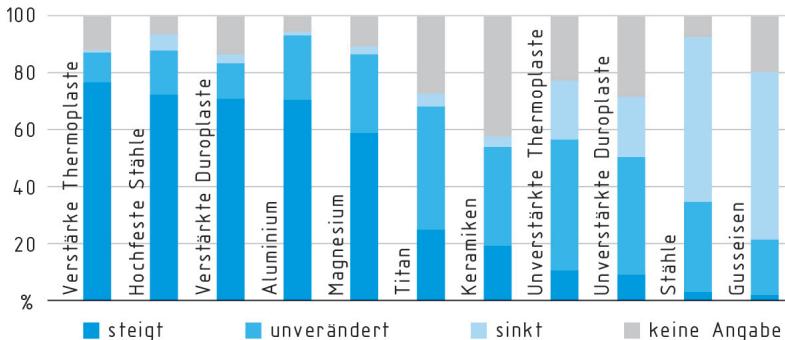


Abbildung 1: Einschätzung des Werkstoffeinsatzes für strukturelevante Leichtbauteile in den nächsten fünf Jahren hinsichtlich der Elektromobilität²

Besonders beachtenswert sind zudem die neuen Hybrid- und Verbundwerkstoffe aus Kombinationen von Metallen, Kunststoffen (inklusive faserverstärkten Kunststoffen), Keramiken und nachwachsenden Rohstoffen. Je nach Herstellungsprozess und Grad der Integration von Funktionen in die Bauteile bieten sie nicht nur optimierte Leichtbau-Anwendungen, sondern ebenso Chancen, Ressourceneffizienz noch besser zu implementieren.³

In Anbetracht dieser Potenziale und der Vielzahl an technischen Möglichkeiten und vor dem wirtschaftlichen und normativen Hintergrund ist es keine Frage mehr, ob es sich als sinnvoll erweist, Leichtbauweisen einzusetzen und damit auch die Ressourceneffizienz von Produkten zu steigern. Der Leichtbau hat sich bereits erfolgreich in der industriellen Herstellung von Produkten etabliert. Dies wird durch die zahlreichen Produktinnovationen und die Optimierung von Werkstoffen sowie Bauteilen verdeutlicht. Ungeklärt oder an vielen Stellen offen ist nach wie vor, welche Ressourceneffizienzpotenziale noch in den neuen oder veränderten Herstellungs- und Verwertungsprozessen innovativer Materialien und Produkte für den Leichtbau verborgen sind und wie sie möglichst wirtschaftlich gehoben werden können.

² Vgl. Gude, M. (2015), S. 24.

³ Vgl. Leichtbau BW (2014), S. 6.

Für eine Beurteilung der Ressourceneffizienz eines Leichtbauprodukts muss der gesamte Lebensweg einbezogen werden.⁴ Beispielsweise können vergleichsweise höhere Energieverbräuche bei der Erzeugung von neuen Leichtbaumaterialien anfallen.⁵ Innovative Verbundmaterialien, die aus einer Vielzahl an Komponenten zusammengesetzt sind, verursachen neue Herausforderungen beim Recycling. Hier bedarf es häufig noch der Entwicklung werkstoffgerechter Technologien zur Zerlegung dieser Verbundmaterialien und zur Rückgewinnung sortenreiner Werkstoffe. Im Hinblick auf eine Kostensenkung spielt insbesondere die Automatisierung eine wichtige Rolle.

In der Automobilindustrie kommt der Leichtbau meist zur Erfüllung der gesetzlich vorgeschriebenen Reduktion der Treibhausgase und neuer Sicherheitsanforderungen sowie zur Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen zum Einsatz. Dabei sind bei deutschen Automobilherstellern verschiedene Trends bei der Umsetzung von Leichtbaukonzepten zu erkennen. Unter anderem finden vermehrt Materialien oder Multimaterialwerkstoffe aus Aluminium, hochfestem Stahl, Magnesium oder faserverstärktem Kunststoff Verwendung.⁶

Die Motivation, Leichtbau bei der Herstellung von Flugzeugen zu betreiben, liegt vornehmlich in der Einsparung von Treibstoff während des Betriebs, aber auch in der Erhöhung der Ladekapazität und in der Möglichkeit, immer geräumigere Flugzeuge bauen zu können. Viele Flugzeughersteller sehen zudem ein großes Potenzial in der additiven Fertigung. Die erforderliche Zeit für die Entwicklung und den Druck endkonturnaher Bauteile ist kürzer. Insbesondere für die in der Luftfahrt typischen kleinen Serien und die seltener benötigten Ersatzteile sind Bauteile interessant, zu deren Herstellung keine Werkzeuge und langen Produktionsketten gebraucht werden.⁷

Die vorliegende Kurzanalyse bietet eine aktuelle Übersicht über innovative Technologien im Leichtbau und skizziert vorhandene Ressourceneffizienzpotenziale mit dem Schwerpunkt Automobil- und Luftfahrtbranche. Dabei liegt der Fokus auf veränderten Prozessen in der Produktherstellung, dem

⁴ Vgl. Vogt, M; Malanowski, N.; Glitz, R. und Stahl-Rolf, S. (2015), S. 17.

⁵ Vgl. e-mobil BW GmbH (2012), S. 20.

⁶ Vgl. Vogt, M; Malanowski, N.; Glitz, R. und Stahl-Rolf, S. (2015), S. 12 ff.

⁷ Vgl. Oberndorfer, D. (2015).

Einsatz neuer Materialien und Verbundwerkstoffe sowie der Integration von Funktionen in Werkstoffe oder Bauteile. Zudem werden Potenziale und Hemmnisse aufgezeigt, die sich für die Verwertung und Beseitigung ergeben. Auf in Einzelfällen mögliche Ineffizienzen bei der Verwertung kann im Rahmen dieser Kurzanalyse nicht eingegangen werden. Bei den hier fokussierten mobilen Produkten werden derartige Effekte jedoch in der Regel durch Effizienzgewinne in der Nutzungsphase überkompensiert.

Die Forschungs- und Entwicklungslandschaft im Leichtbau entwickelt sich rasant, so dass diese Kurzanalyse nur eine Auswahl aktueller Technologien und Forschungsprojekte darstellen kann.

2 BEWERTUNG VON RESSOURCENEFFIZIENZ

Gegenstand dieser Kurzanalyse sind Technologien, die einen Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Leichtbauprodukten leisten. Im Folgenden werden daher Kriterien erarbeitet, die eine qualitative Beurteilung des Ressourceneinsatzes in Herstellung und Verwertung/Beseitigung ermöglichen.

Im gesamten Lebensweg (Cradle-to-Grave) eines Produkts werden Ressourcen verbraucht. Daher bestehen grundsätzlich in jeder Phase Potenziale zur Ressourceneinsparung.⁸ Aber gerade in der Produktherstellung (Gate-to-Gate) sowie in der Verwertung und Beseitigung werden diese Potenziale häufig noch vernachlässigt (Abbildung 2). Im Herstellungsprozess geht es Unternehmen um technische Machbarkeit, ökonomische Fragestellungen und rechtliche Rahmenbedingungen. Die Ressourceneffizienzpotenziale, die sich für die Nutzungsphase mobiler Produkte ergeben, wurden in der Literatur bereits ausführlich erörtert,^{9,10,11} weshalb auf sie nicht weiter eingegangen wird.

⁸ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

⁹ Vgl. Bansemir, H. et al. (2007).

¹⁰ Vgl. Leichtbau BW GmbH (2014).

¹¹ Vgl. Kaiser, O. S. (2014).

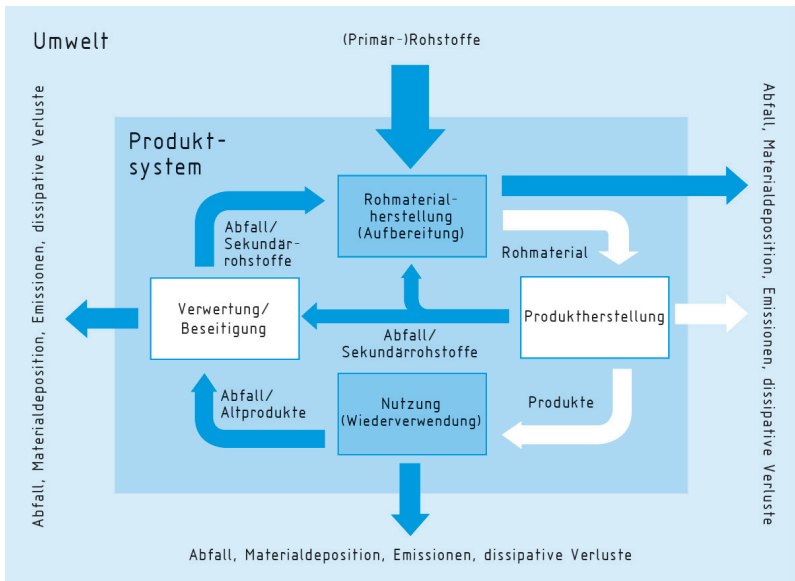


Abbildung 2: Ressourcennutzung im Lebensweg am Beispiel von Materialströmen. Fokus auf die Produktherstellung sowie die Verwertung und Beseitigung.¹²

In Einklang mit den Prinzipien für eine Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 konkretisieren die Richtlinien VDI 4800 Blatt 1¹³, Blatt 2¹⁴ und VDI 4600¹⁵ die Bewertungsgrundlagen für Ressourceneffizienz. In der VDI 4800 Blatt 1 werden methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien zur Schonung natürlicher Ressourcen dargestellt. In der VDI 4800 Blatt 2 wird die Bewertung von Rohstoff-, Wasser- und Flächenaufwand erläutert. Für eine energetische Bewertung von Produkten und Dienstleistungen steht die Richtlinie VDI 4600 zur Verfügung, die erläutert, wie eine primärenergetische Bewertung mithilfe der Berechnungsvorschrift des kumulierten Energieaufwands (KEA) erfolgen kann.

¹² Vgl. VDI 4800 Blatt 1: 2016-02, S. 19. Wiedergegeben mit Erlaubnis des Vereins Deutscher Ingenieure e. V.

¹³ VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

¹⁴ VDI 4800 Blatt 2:2016-03 (Entwurf).

¹⁵ VDI 4600:2012-01.

Aus der Analyse des Lebenswegs von Produkten lässt sich eine Vielzahl an Einflussfaktoren ableiten, mit deren Hilfe eine Steigerung der Ressourceneffizienz erreicht werden kann. Unter Umständen können diese Faktoren jedoch auch Zielkonflikte mit sich bringen. Beispielsweise kann eine Einsparung beim Materialeinsatz eine Verringerung der Produktlebensdauer nach sich ziehen. Im Folgenden werden exemplarisch Faktoren, in Anlehnung an die Richtlinie VDI 4800 Blatt 1, aufgezeigt, die insbesondere im Hinblick auf eine Beeinflussung der Ressourceneffizienz im Stoffleichtbau (Kapitel 3), im konstruktiven Leichtbau (Kapitel 4) und für Verfahren in der Verwertung und bei der Beseitigung (Kapitel 5) beachtet werden sollten. Die Richtlinie VDI 4800 Blatt 1 gibt ebenfalls ausführliche Hinweise auf produkt- und prozessbezogene Ressourceneffizienzpotenziale und Maßnahmen zur Umsetzung.¹⁶

2.1 Produktbezogene Einflussfaktoren auf die Ressourceneffizienz im Leichtbau

- **Materialauswahl/Materialsubstitution:** Ersatz eines Werkstoffes durch einen oder mehrere andere Werkstoffe, z. B. „Smart Materials“¹⁷, Verbundwerkstoffe, nachwachsende Rohstoffe oder Sekundärmaterialien. Dabei müssen die Einflüsse der Werkstoffauswahl auf das Bauteil beachtet werden. Beispielsweise verringert sich die Masse eines Bauteils durch den Einsatz von Werkstoffen mit geringerer Dichte bei gleichem Volumen. Gleichzeitig können sich jedoch auch die Festigkeit, Steifigkeit oder Duktilität des Bauteils durch den Einsatz des anderen Materials verändern.
- **Produktgestaltung:** Eine Verminderung des Werkstoffeinsatzes kann durch die Optimierung der Produktgestalt bei der Produktentwicklung erfolgen. Ein Beispiel dafür ist die Integration von Funktionen in eine tragende Struktur. Dabei kann der Ressourcenaufwand durch ein möglicherweise komplizierteres Fertigungsverfahren steigen.

¹⁶ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

¹⁷ Gemäß Definition des Fraunhofer ISC (vgl. Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung ISC) sind Smart Materials Materialien, deren mechanische Eigenschaften elektrisch oder magnetisch gesteuert werden können.

- **Fügetechnik:** Die Steigerung der Ressourceneffizienz ist durch die Anwendung eines für das Produkt optimierten Fügeverfahrens möglich. Dies kann im Fall von Leichtbau z. B. Kleben, Verzahnen, Umformen oder Einpressen sein. Zielkonflikte durch Fügeverfahren können beim Recycling auftreten, wenn eine Trennung der Materialien nicht mit vertretbarem Aufwand möglich ist.
- **Produktlebensdauer:** Durch eine konstruktive Änderung eines Bauteils können sich Lebensdauer und Reparaturintervalle verlängern. Dem gegenüber kann ein möglicher höherer Ressourceneinsatz in der Herstellung stehen.
- **Reparierbarkeit:** Die werkstoffbezogene Änderung eines Bauteils kann einen Einfluss auf die Reparierbarkeit ausüben. So ist bei Bauteilen aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) die Reparierbarkeit im Gegensatz zu solchen aus Stahl oder Aluminium stark eingeschränkt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass verhältnismäßig mehr Bauteile aus CFK als aus Stahl oder Aluminium der Verwertung zugeführt werden müssen.

2.2 Prozessbezogene Einflussfaktoren auf die Ressourceneffizienz im Leichtbau

- **Energie:** Durch eine Verminderung des Energieverbrauchs beim Herstellungsprozess, wie die Nutzung von Prozesswärme zur Stromerzeugung oder Gebäudeklimatisierung und eine effiziente Energiebereitstellung, bei der unnötige Energieumwandlungen vermieden werden, kann die Ressourceneffizienz gesteigert werden.
- **Prozessautomation:** Eine Automatisierung von manuellen oder mechanisierten Prozessen kann zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz führen. So können z. B. Prozessdaten genau erfasst und Prozesse dadurch optimiert werden. Demgegenüber steht der Aufwand, den z. B. zusätzliche Maschinen und Sensorik hervorrufen.
- **Fertigungsprozess:** Durch den Einsatz neuer Materialien oder angepasster Fertigungsverfahren kann es zu einer Veränderung im Ablauf der Prozesskette kommen. Im günstigsten Fall können bei innovativen Verfahren Fertigungsschritte entfallen, was zu einer Einsparung von Werkzeugen,

Energie und Zeit führen kann. Dagegen können zusätzliche Fertigungsschritte wie Reinigung einen erhöhten Verbrauch an Hilfsstoffen bewirken. Aber auch der Einsatz zusätzlicher Werkzeuge, die beispielsweise zur Formgebung benötigt werden, kann einen negativen Einfluss auf die Ressourceneffizienz nehmen.

2.3 Verwertungs- und beseitigungsbezogene Einflussfaktoren auf die Ressourceneffizienz im Leichtbau

- **Abfallhierarchie:** Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (§ 6 KrWG) fordert eine fünfstufige Abfallhierarchie mit der Stufenfolge aus (1) Abfallvermeidung, (2) Wiederverwendung, (3) Recycling, (4) sonstiger u. a. energetischer Verwertung von Abfällen und (5) Abfallbeseitigung. Vorrang hat die jeweils beste Option aus Sicht des Umweltschutzes. Dabei sind neben ökologischen Auswirkungen auch technische, wirtschaftliche und soziale Folgen zu berücksichtigen. Die Kreislaufwirtschaft wird somit auf die Abfallvermeidung und das Recycling ausgerichtet, ohne etablierte ökologisch hochwertige Entsorgungsverfahren zu gefährden.¹⁸
- **Recyclinggerechte Produktgestaltung:** Bereits bei der Produktkonzeption sollte die Recyclingfähigkeit bei der Materialauswahl, dem Bauteil und Produktdesign berücksichtigt werden. Beispielsweise sollte bei Verbundwerkstoffen beachtet werden, dass die Komponenten problemlos zu trennen sind, um sie dem Recyclingprozess zuführen zu können.
- **Recyclatqualität:** Ein Recyclingprozess muss gewährleisten, dass die gewonnenen Sekundärmaterialien eine mit den Primärrohstoffen vergleichbare Qualität aufweisen. Dies kann unter Umständen nur mit einem sehr hohen Ressourcenaufwand erfolgen.
- **Sortenreinheit:** Eine sortenreine Trennung von Werkstoffen, insbesondere bei Bauteilen, die aus einer Vielzahl verschiedener Materialien und Komponenten hergestellt werden (Verbundwerkstoffe/Multimaterialwerkstoffe), ist häufig nur mit großem Aufwand möglich. Hier sollte

¹⁸ Vgl. KrWG (2012).

bereits in der Konzeptionsphase auf die Anforderungen des Recyclings geachtet werden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden Fragen zur Ressourceneffizienz beleuchtet, die sich vor und nach der Nutzungsphase der Produkte stellen. Dabei geht es um den Einsatz neuer Materialien sowie um verbesserte und neue Verfahren in der Herstellungsphase sowie bei der Verwertung und Beseitigung. Neben Gute-Praxis-Beispielen werden Potenziale gezeigt, die sich aus aktuellen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ergeben. Für einen schnellen Überblick werden in Blau unterlegten Kästen Maßnahmen, die eine Steigerung der Ressourceneffizienz im Leichtbau ermöglichen können, zusammengefasst und Einflussfaktoren zugeordnet.

3 RESSOURCENEFFIZIENZPOTENZIALE IM STOFFLEICHTBAU

Dieses Kapitel befasst sich mit der Substitution von Werkstoffen höherer Dichte mit Werkstoffen geringerer Dichte, idealerweise unter Beibehaltung oder Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Maßgeblich sind dabei die Ressourceneffizienzpotenziale, die in der Herstellungsphase erzielbar sind.

3.1 Metalle

Im Fahrzeugbau und in der Luftfahrttechnik sind die Metalle Stahl, Aluminium, Magnesium und Titan sowie ihre Legierungen die elementaren Werkstoffe.

3.1.1 Stahl

Stahl ist nach wie vor der wichtigste Werkstoff im Fahrzeugbau, insbesondere im Karosseriebereich, aber auch bei vielen anderen Fahrzeugkomponenten. Dies gilt vor allem für die unteren und mittleren Fahrzeugsegmente mit hohen Stückzahlen, weil Stahl im Vergleich zu Aluminium oder auch CFK deutlich preiswerter ist. Für den Leichtbau mit Stahl kommen in erster Linie hochfeste Stähle in Betracht, die Bauteile mit geringeren Wandstärken ermöglichen und so zur Reduzierung der Fahrzeugmasse beitragen. Auch wenn im direkten Vergleich mit Aluminium oder Faserverbundwerkstoffen die Massenreduktionspotenziale mit hochfesten Stählen etwas schwächer ausfallen, kann dies häufig durch die geringeren Ressourcenaufwendungen in der Produktion und das Recycling von Stahl in der Gesamtbilanz kompensiert werden.¹⁹

Dies ist auch ein Resultat der erheblichen Ressourceneffizienzsteigerungen in der Stahlerzeugung, die in den letzten Jahrzehnten bereits erzielt wurden. So wurde im Zeitraum von 1960 bis 2010 der spezifische Primärenergieverbrauch pro Tonne Rohstahl um 40 % gesenkt und gleichzeitig der Eiseneffizienz-Indikator, also das Verhältnis von erzeugtem Walzstahl zu eingesetztem Eisen, von 65 % auf 90 % Gesamtausbringung erhöht. Zudem konnte der

¹⁹ Vgl. e-mobil BW GmbH (2012).

Anteil von eingesetztem Stahlschrott bei der Rohstahlerzeugung auf insgesamt 45 % gesteigert werden, während der Einsatz von Wasser auf etwa 10,4 m³ pro Tonne Rohstahl reduziert wurde. Wesentliche Beiträge zu diesen Effizienzgewinnen werden durch technologische Verbesserungen in den Prozessen der Stahlhütten und Walzwerke erzielt. Weitere Potenziale zur Effizienzsteigerung in diesem Bereich werden für den Zeitraum von 2010 bis 2050 auf bis zu 37 % geschätzt. Hinzu kommen Effekte, die über die reine Betrachtung der jeweiligen Prozessrouten hinausgehen. So werden bereits Hochofenschlacken aus der Stahlerzeugung als Klinkerersatz in der Zementproduktion eingesetzt, wodurch CO₂-Emissionen reduziert werden, die ansonsten beim Brennen der Klinker entstehen.²⁰

Durch den bereits sehr hohen Recyclinganteil von annähernd 50 % bei der Rohstahlerzeugung in Deutschland werden große Mengen an Primärrohstoffen eingespart. Pro Tonne Stahlschrott sind dies rund 1,5 t Eisenerz und 0,65 t Kohle. Allerdings ist das Recyclingpotenzial in der EU schon nahezu ausgereizt. Die Sammelsysteme und Aufbereitungstechniken sind bereits optimiert und bieten kaum Verbesserungspotenzial. Der zunehmende Abfluss von Recyclingmaterial durch den Export von Stahlschrott kann sogar dazu führen, dass sich die Verfügbarkeit von Sekundärmaterial künftig verschlechtert.²¹ Die Möglichkeit, Stahl mehrfach immer wieder zu recyceln, wirkt sich auch auf die spezifischen Treibhausgasemissionen der Stahlherstellung aus. Bereits ab einer Berücksichtigung von sechs Lebenszyklen sinkt das spezifische Treibhausgaspotenzial auf knapp unter 1.000 kg CO₂-Äquivalent pro Tonne produziertem Warmbandstahl. Dieser Wert basiert auf einem materialpoolorientierten und produktunabhängigen Ansatz und schließt sowohl die Elektroofen- als auch die Hochofen-Route in die Analyse ein.²²

²⁰ Vgl. VDMA (2013).

²¹ Vgl. Stahlinstitut VDEh, Wirtschaftsvereinigung Stahl (2015).

²² Vgl. Neugebauer, S. und Finkbeiner, M. (2012).

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Stoffleichtbau mit Stahl

Materialauswahl

- Einsatz hochfester Stähle in der Fertigung
- Stähle mit geringer Dichte, guter Formbarkeit und reduziertem Bearbeitungsaufwand in der Fertigung (Forschungsprojekt)

Produktgestaltung

- Materialeinsparung von Massivbauteilen aus Stahl

Fertigungsprozess

- Endabmessungsnaher Bandguss anstelle von Strangguss spart Wärme- und Walzvorgänge ein

Materialauswahl

Durch den **Einsatz innovativer hochfester Stahlsorten** können je nach Bauteil 10 bis 40 % an Masse gegenüber herkömmlicher Stahlbauweise eingespart werden. Unter der Annahme, dass eine Reduktion der Fahrzeugmasse um 100 kg zu einer Treibstoffersparnis von 0,35 Litern auf 100 km führt²³, kann daraus auch eine Abschätzung des CO₂-Reduktionspotenzials für die Nutzungsphase durchgeführt werden. Für eine geschätzte Gesamtfahrleistung der deutschen Autoflotte von 600 Milliarden Kilometern im Jahr 2020 ergibt sich daraus eine potenzielle Reduktion der CO₂-Emissionen von elf Millionen Tonnen allein durch den konsequenten Einsatz hoch- und höherfester Stähle in der Pkw-Produktion.²⁴ Als innovative hochfeste Stähle (Advanced High Strength Steel, AHSS) kommen im Karosseriebau vor allem Dual- und Mehrphasenstähle zur Anwendung. Getrieben durch die zunehmende Konkurrenz der anderen Leichtbauwerkstoffe, arbeiten die Stahlhersteller in enger Kooperation mit den industriellen Anwendern kontinuierlich an der Verbesserung der Eigenschaften dieser Stahlsorten. Größte Heraus-

²³ Vgl. The Boston Consulting Group (2010), S. 23.

²⁴ Vgl. The Boston Consulting Group (2010), S. 23.

forderung ist dabei die Vereinigung von hoher Festigkeit, Duktilität und Umformbarkeit. ThyssenKrupp löst dies beispielsweise durch die Zugabe spezieller Legierungselemente und eine gezielte Wärmebehandlung.²⁵ Die Salzgitter Flachstahl GmbH hat mit ihrer Produktfamilie HSD-Stahl mit hohem Mangananteil einen Leichtbaustahl mit hoher Festigkeit und gleichzeitig hoher Bruchdehnung zur Marktreife gebracht.²⁶ Bei der Fertigung mit hochfesten Stählen ist zu bedenken, dass diese einen **erhöhten Aufwand in der Bearbeitung** erfordern und sich die Standzeiten der Werkzeuge verringern können.

Neben der Strategie, immer festere Stähle zu entwickeln, werden in der Materialforschung weiterhin Anstrengungen verfolgt, besonders leichte Stahllegierungen zu entwickeln, die nicht an Festigkeit einbüßen und **gut verformbar** sind. In der Regel führt die Zugabe von Aluminium als Legierungselement dazu, dass der Werkstoff spröde wird und nicht mehr gut zu verformen ist. Um alle gewünschten Eigenschaften in einem Werkstoff zu vereinen, wird permanent nach neuen Legierungszusammensetzungen und Herstellungsverfahren gesucht. So haben beispielsweise Wissenschaftler am Institute of Ferrous Technology im südkoreanischen Pohang eine neue **Stahllegierung mit geringer Dichte** entwickelt, die neben Eisen, Mangan, Aluminium und Kohlenstoff auch einen Anteil von 5 % Nickel enthält. Der unter Argonatmosphäre erzeugte Stahlbarren wird zunächst zu einem Blech von 1 mm Stärke gewalzt. Anschließend wird er nochmals auf etwa 900 °C erhitzt und nach 15 Minuten mit Wasser abgeschreckt. Durch dieses nachträgliche Erhitzen werden spröde Einschlüsse mit sogenannter B2-Struktur gleichmäßig in der austenitischen Matrix verteilt, wodurch **Festigkeit und Verformbarkeit deutlich zunehmen**. Von diesen Laborexperimenten bis zur industriellen Anwendung solcher neuen, besonders leichten Legierungen ist es zwar noch ein weiter Weg, jedoch liefert die neuartige Mikrostruktur, die dabei erstmals realisiert und beobachtet wurde, eine weitere Stoßrichtung für die Entwicklung neuer ressourceneffizienter Stahllegierungen für den Leichtbau.²⁷

²⁵ Vgl. ThyssenKrupp.

²⁶ Vgl. Salzgitter Flachstahl GmbH (2012).

²⁷ Vgl. Kim, S.-H. et al. (2015), S. 77 – 79.

Produktgestaltung

Das Leichtbaupotenzial innovativer Stahentwicklungen für den Fahrzeugbau wurde bereits in mehreren Studien von verschiedenen Industrie- und Forschungskonsortien umfassend ausgelotet. Dazu zählen etwa das EU-geförderte Projekt SuperLIGHT-Car²⁸, InCar von ThyssenKrupp oder FutureSteelVehicle der globalen Stahlindustrievereinigung WorldAutoSteel²⁹. Alle diese Arbeiten konzentrieren sich aber im Wesentlichen auf die Karosserie bzw. auf blechbasierte Leichtbaulösungen. Daher hat sich die 2013 ins Leben gerufene Initiative Massiver Leichtbau zum Ziel gesetzt, die **Leichtbaupotenziale der Stahlwerkstoff- und Massivumformtechnik** an einem Mittelklasse-Kombi als Referenzfahrzeug zu demonstrieren. Insgesamt wurden dabei 3.500 Bauteile mit einer Gesamtmasse von 838 kg vor allem aus den Bereichen Antriebsstrang und Fahrwerk analysiert. Dies entspricht knapp der Hälfte der Gesamtmasse des Referenzfahrzeugs. Daraus wurden 399 Leichtbauideen basierend auf Verfahren der Massivumformung generiert und ausgewertet. Darunter waren beispielsweise Ansätze, **die Formgebungsmöglichkeiten der Schmiedetechnik** zu nutzen, um damit Bauteile wie z. B. Differenzialkegelräder oder Stirnräder leistungsfähiger zu machen, so dass sie bei gleicher Belastbarkeit kleiner und damit leichter ausgelegt werden können. Andere Ideen basieren auf dem Einbringen von Aussparungen oder Bohrungen zur Reduzierung der Bauteilmasse. Insgesamt wurde für die betrachteten Bauteile eine potenzielle Massenreduktion von 42 kg ermittelt. Neben dem schon umsetzbaren Leichtbaupotenzial hat die Studie auch weiteren Forschungsbedarf ermittelt. So wurde etwa festgestellt, dass der Zusammenhang zwischen der Reinheit des Stahls und der resultierenden dynamischen Bauteilfestigkeit besser erfasst werden muss, um neue Stahlherstellungstechniken für den Stahlbau zu erschließen.³⁰

²⁸ Vgl. WorldAutoSteel (a).

²⁹ Vgl. WorldAutoSteel (b).

³⁰ Vgl. Raedt, H.-W.; Wilke, F. und Ernst, C.-S. (2014), S. 58 – 64.

Fertigungsprozess

Um bei der Produktion hochfester Leichtbaustähle weitere Ressourcen einzusparen, haben die Salzgitter Flachstahl GmbH, die SMS Siemag AG und die Technische Universität Clausthal das **horizontale Bandgießen als effizientes Produktionsverfahren** für Stahlprodukte entwickelt. Im Gegensatz zum herkömmlichen Stranggießen wird dabei direkt aus der Schmelze ein nur 15 mm starkes Band gegossen. Das Material ist damit schon rund zwanzigmal dünner als die Walzblöcke aus dem Strangguss. Bei der Weiterverarbeitung zu Blechbauteilen werden mit dem endabmessungsnahen Bandguss energieaufwendige Wärm- und Walzvorgänge eingespart. Insgesamt kann dadurch der **Energieaufwand für die Prozessschritte Gießen und Warmwalzen auf etwa ein Drittel reduziert** werden. Die schnelle Abkühlung auf einem in Gießgeschwindigkeit umlaufenden Förderband wirkt sich zudem positiv auf die Gussqualität aus. Das Verfahren eignet sich daher insbesondere auch für die Herstellung von Leichtbaustählen mit hoher Festigkeit und Duktilität und maßgeschneidertem Eigenschaftsprofil. Das Konsortium war mit dieser Entwicklung für den Deutschen Zukunftspreis 2014 nominiert.³¹

3.1.2 Aluminium

Mit seiner vergleichsweise geringen Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ und sehr guten Umformeigenschaften ist Aluminium ein bewährter Leichtbauwerkstoff im Automobilbau, Flugzeugbau und auch bei anderen Anwendungen. Der Massenanteil von Aluminium in Pkw ist in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. In Europa erhöhte sich die in Neuwagen durchschnittlich verbaute Masse an Aluminium von 50 kg in 1990 auf 140 kg in 2012. Bis 2020 werden Werte von 160 kg bis 180 kg erwartet.³²

Für die Herstellung von Werkstoffen aus Primäraluminium ist rund siebenmal so viel Energie notwendig wie bei der Herstellung der gleichen Menge unlegierten Stahlwerkstoffs in der Hochofenroute.³³

³¹ Vgl. TU Clausthal (2014).

³² Vgl. European Aluminium Association (2013), S. 10.

³³ Vgl. Umweltbundesamt (2016).

Beim Recycling von Aluminium-Schrotten ist zu beachten, dass eine Abtrennung von Legierungselementen nicht möglich ist. Daher müssen für ein Recycling die Legierungsbestandteile des Schrotts bekannt sein und diese sortenrein getrennt werden.³⁴ Andernfalls kommt es zu einer Vermischung der Legierungsbestandteile und somit zu einer Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften des Sekundärmaterials gegenüber dem Primärmaterial.

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Stoffleichtbau mit Aluminium

Materialauswahl

- Anwendungsbedingte Materialeinsparungen durch die Nutzung von Aluminiumschäumen
- Faserverstärkte Aluminiumschäume (Forschungsprojekt)

Energie

- Nutzung von Sekundäraluminium zur Reduktion des Energiebedarfs bei der Werkstoffherstellung
- Flexibilisierung der Energiezufuhr bei der Aluminiumherstellung mittels Schmelzflusselektrolyse durch steuerbaren Wärmetauscher
- Ausnutzung von Restwärme aus Prozessen, z. B. Walzen bei nachgelagerten Prozessen
- Schmelzen von Aluminium durch Solarthermie (Forschungsprojekt)

Fertigungsprozess

- Einsatz additiver Fertigungsverfahren anstelle spanender Verarbeitung zur Reduktion von Produktionsabfällen

Recyclatqualität

- Produktionsabfallrecycling von gereinigten Aluminiumspänen zu gepressten Briketts

³⁴ Vgl. Martens, H. (2011), S. 94.

Materialauswahl

In einigen Anwendungsbereichen kann der Materialeinsatz dadurch verringert werden, dass anstelle von massivem Aluminium ein **zellulärer Aluminiumschaum** verwendet wird. Je nach Herstellungsverfahren lassen sich Schäume mit Dichten von 0,5 bis 0,9 g/cm³ erreichen, d. h., der **Material-einsatz kann auf weniger als ein Fünftel gegenüber dem Vollmaterial reduziert werden**, wobei jedoch die Festigkeit abnimmt. Schmelz- oder pulvermetallurgisch hergestellte Aluminiumschäume lassen sich im Leichtbau vielfältig einsetzen. Neben der geringen Dichte weisen diese Werkstoffe weitere vorteilhafte Eigenschaften auf. Aluminiumschäume sind sehr stabil und eignen sich als Energieabsorber für crash-relevante Bauteile. Das macht Aluminiumschaum sowohl für tragende Strukturen im Automobilbau als auch für Anwendungen in Schienenfahrzeugen, z. B. in Frontmodulen für Triebfahrzeuge, und im Flugzeugbau interessant. Häufig werden die Aluminiumschäume dabei in Sandwich-Bauteile zwischen Aluminiumplatten (aluminium foam sandwich, AFS) oder Stahlblechen (steel aluminium foam sandwich, SAS) integriert.³⁵

Eine weitere Variante besteht in der **Zugabe von Fasern zur Verstärkung des Aluminiumschaums**. So können etwa durch die Beimischung von Glasfasern in das Metallpulver im pulvermetallurgischen Verfahren Schäume mit besseren mechanischen Festigkeiten hergestellt werden. Dabei wird die Dichte gegenüber dem unverstärkten Aluminiumschaum nur minimal erhöht. Die Entwicklung solcher faserverstärkten Aluminiumschäume befindet sich aber noch in einem frühen Stadium, so dass erst in einigen Jahren mit Anwendungen zu rechnen ist.³⁶

Energie

Während sich die geringe Dichte und die sehr guten Recyclingeigenschaften von Aluminium positiv auf die Gesamtbilanz auch im Vergleich zu anderen Leichtbauwerkstoffen auswirken, schlägt der hohe **Energieaufwand** zur Herstellung von Primäraluminium in der Ökobilanz negativ zu Buche.³⁷ Daher ist ein zentraler Ansatzpunkt zur Steigerung der Ressourceneffizienz im

³⁵ Vgl. Knuth, L. (2015), S. 20 – 25.

³⁶ Vgl. Albrecht, R. und Lange, G. (2014), S. 26 - 30.

³⁷ Vgl. e-mobil BW GmbH (2012), S. 24.

Aluminiumleichtbau in der **Reduktion des Einsatzes von Primäraluminium** durch vermehrte **Nutzung von Sekundäraluminium** zu sehen. Bei einer Erhöhung des Gesamtbedarfs an Aluminium ist zu bedenken, dass das Angebot an Sekundäraluminium die Nachfrage u. U. nicht decken und somit die Nachfrage nach Primäraluminium trotz einer hohen Recyclingquote steigen kann.

Das Standardverfahren zur Herstellung von Primäraluminium durch **Schmelzflusselektrolyse** erfordert eine konstante Zufuhr großer Mengen elektrischer Energie. Zwar kann der Energiebedarf für diesen Prozess physikalisch-chemisch nicht verringert werden, jedoch ist es der Firma TRIMET in Kooperation mit Wissenschaftlern der Bergischen Universität Wuppertal gelungen, diesen Prozess auch unter **flexibler Energiezufuhr** aufrechtzuerhalten. Dazu wurde ein **steuerbarer Wärmetauscher** entwickelt, der eine flexible Ofensteuerung ermöglicht. Mit diesem System wird die Energiebilanz im Ofen auch bei fluktuierender Stromzufuhr konstant gehalten. Ein in der Zelle integrierter Aluminiumsee mit zehn Tonnen flüssigem Aluminium dient als Puffer, so dass der anschließende Gießereiprozess nicht gestört wird. Als zusätzlicher Nutzen können derartig ausgerüstete Elektrolyseöfen als „virtuelle Batterie“ und damit als Energiespeicher zum Ausgleich von Fluktuationen im Stromnetz dienen. Damit trägt diese Technik auch zur Integration volatiler erneuerbarer Energiequellen und zur Versorgungssicherheit im Rahmen der Energiewende bei.³⁸

In den etablierten Weiterverarbeitungsverfahren sind Ressourceneinsparungen ebenfalls möglich. Beispielsweise hat die Aluminium Norf GmbH zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Wärmebehandlung von kaltgewalzten Aluminiumbändern ein innovatives Ofenkonzept entwickelt. Eine intelligente Steuerungstechnik erfasst für jedes einzelne Aluminiumband den thermischen Zustand und nutzt diese Daten zur Steuerung des weiteren Glühprozesses. Dadurch können die Bänder unter **Ausnutzung der Restwärme aus dem Walzprozess** direkt weiterverarbeitet werden. Zudem werden die heißen Abgase des Glühofens genutzt, um das **benötigte Schutzgas**

³⁸ Vgl. KlimaExpo.NRW.

vorzuwärmen. Der Energiebedarf für diesen Verarbeitungsschritt konnte auf diese Weise um 45 % gesenkt werden.³⁹

Zur Herstellung von Gussbauteilen muss Aluminium auf etwa 700 °C erhitzt werden, um es einzuschmelzen. Um die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu reduzieren, arbeiten Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) gemeinsam mit der Firma aixprocess und Partnern in Südafrika in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt daran, **Aluminium solar-thermisch aufzuschmelzen.** Dazu wird das einzuschmelzende Aluminium in einen rohrförmigen Ofen eingefüllt, der sich langsam dreht. Das Sonnenlicht wird über eine Anlage aus mehreren Spiegeln auf den Ofen konzentriert. Ab 2017 soll das Verfahren am DLR-Solarkraftwerk in Jülich getestet werden. Die Umsetzung soll ab 2018 in Südafrika erfolgen. Das dort praktisch emissionsfrei aufgeschmolzene Aluminium würde dann im flüssigen Zustand zu den verarbeitenden Betrieben in der Umgebung transportiert werden.⁴⁰

Fertigungsprozess

Ein vielversprechender Ansatz zur ressourcenschonenden Nutzung von energieintensiven Werkstoffen wie Aluminium besteht in der aktuellen Entwicklung **additiver Fertigungsverfahren.** Während bei der spanenden Bearbeitung von Aluminiumbauteilen ein Großteil des eingesetzten Rohstoffs als Abfall anfällt und recycelt werden muss, wird bei der additiven Fertigung im Idealfall **nur so viel Material verarbeitet, wie für die jeweilige Bauteilgeometrie benötigt** wird. Für die generative Fertigung von Bauteilen aus Aluminiumlegierungen und Aluminium-Matrix-Compositen sind das selektive Laser-Sintern (Direct Metal Laser Sintering, DMLS) und das selektive Laser-Schmelzen (Selective Laser Melting, SLM) von besonderem Interesse. In zahlreichen F & E-Projekten wurde die Entwicklung dieser Technologien in den letzten Jahren so weit vorangetrieben, dass nun Bauteile aus verschiedenen Aluminiumlegierungen (z. B. A6061, AlSi12, AlSi12Mg, AlSi10) mit

³⁹ Vgl. Effizienzagentur NRW (2014).

⁴⁰ Vgl. Ingenieur.de (2015).

tels DMLS oder SLM für Endanwendungen vor allem im Luftfahrtbereich produziert werden können. General Electric Aviation hat bereits Teile für die nächste Generation von Turbofan-Triebwerken (Leading Edge Aviation Propulsion, LEAP) durch SLM hergestellt.⁴¹ Gemeinsam mit dem Tochterunternehmen Premium Aerotec (PAG) plant Airbus den Beginn der Serienproduktion von Aluminiumbauteilen für Militär- und Passagierflugzeuge aus additiver Fertigung ab 2017. Airbus verspricht sich davon Materialeinsparungen von bis zu 90 % gegenüber herkömmlicher Fertigung.⁴²

Aktuelle Forschungsarbeiten konzentrieren sich auch darauf, komplexer aufgebaute hochfeste Aluminiumlegierungen für die additive Fertigung nutzbar zu machen. Beispielsweise wird in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt an der Technischen Universität Dortmund an der Entwicklung eines additiven Fertigungsverfahrens für die Legierung EN AW-7075 gearbeitet. Dabei wird untersucht, wie sich prozessbedingte Defekte auf die Ermüdungsfestigkeit der Bauteile auswirken, um mit diesen Erkenntnissen den Herstellungsprozess zu optimieren.⁴³

Die Frage, ob additive Verfahren generell ökologischer als konventionelle Fertigungsverfahren sind, kann noch nicht beantwortet werden und ist für jeden Anwendungsfall zu prüfen. Einen maßgebenden Faktor für die Ressourceneffizienz stellt das Nutzungsprofil der Produktionsmaschine dar. In diesem Zusammenhang ergeben sich durch Industrie 4.0 neue Möglichkeiten, die additive Fertigung ressourcenschonend umzusetzen. Industrie 4.0 steht dabei für die vierte industrielle Revolution, die durch eine neue Art der Organisation und Steuerung in der Wertschöpfungskette geprägt ist. Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie-4.0-Prozessen sind die Echtzeitverfügbarkeit sämtlicher relevanten Daten durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Komponenten sowie die Fähigkeit, aus

⁴¹ Vgl. Manfredi, D. (2014).

⁴² Vgl. Airliners.de (2015).

⁴³ Vgl. TU Dortmund (2015).

den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten.⁴⁴ Mit diesen Voraussetzungen sind eine intelligente Vernetzung der additiven Fertigungsmaschinen untereinander, eine Integration in das Logistikkonzept sowie die Optimierung der Nutzungsprofile möglich.⁴⁵

Recyclatqualität

Eine effizientere Ressourcennutzung ist außerdem möglich, wenn **Produktionsabfälle direkt vor Ort in den Stoffstrom zurückgeführt** werden können. So hat beispielsweise die HMT Höfer Metall Technik GmbH & Co. KG eine Möglichkeit gefunden, Aluminium-Späne, die bei der Herstellung und weiteren Bearbeitung von Aluminium-Profilen anfallen, werksintern zu recyceln. Um die Späne wieder einschmelzen zu können, werden sie zunächst in einer Presse zu **Briketts komprimiert**, wobei auch die an den Spänen anhaftenden Kühlschmierstoffe zurückgewonnen werden. Das auf diese Weise **verdichtete und gereinigte Abfallmaterial** lässt sich problemlos einschmelzen und zu Bolzen formen, die wieder als Ausgangsmaterial für das Strangpressen eingesetzt werden. Dies erspart dem Unternehmen die Lagerung und den Transport der Alu-Späne zu einer zentralen Verwertungsanlage. Außerdem kann das Material ohne Qualitätseinbußen wieder in den Herstellungsprozess eingespeist werden, weil es sich durch den werksinternen Stoffkreislauf in Zusammensetzung und Eigenschaften nicht vom eingekauften Rohstoff unterscheidet.⁴⁶

3.1.3 Magnesium

Magnesiumlegierungen eignen sich wegen ihrer geringen Dichte bei hoher spezifischer Festigkeit als Alternative zu Aluminiumlegierungen und Stählen. Im Luftverkehr ist der Markt für Magnesiumanwendungen derzeit klein, bis zum Jahr 2020 wird aber ein absolutes Wachstum von 30 % prognostiziert.⁴⁷ In der Automobilindustrie wird der Werkstoff seit dem Ford Modell T eingesetzt, auch Motorblöcke und Getriebegehäuse des VW-Käfers wurden

⁴⁴ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (2014), S. 2.

⁴⁵ Vgl. Richter, S.; Wischmann, S. (2016), S. 23.

⁴⁶ Vgl. Sedlmayr, A. (2015), S. 46 - 47.

⁴⁷ Vgl. Leichtbau BW GmbH (2014), S. 32 f.

bereits aus Mg-Si-Legierungen gefertigt.⁴⁸ Magnesium ist bei ähnlichen mechanischen Eigenschaften 35 % leichter als Aluminium. Der Rohstoffpreis liegt je Masseneinheit etwa 30 % höher als der von Aluminium, ist bezogen auf den Volumenpreis oder auf die normierten Rohmaterialkosten im Bauteil jedoch vergleichbar.

Magnesium kann durch energieintensive thermische Reduktions- oder Elektrolyseverfahren gewonnen werden. Für die Herstellung von Magnesiumwerkstoff ist rund siebenmal so viel Energie wie bei der Herstellung von unlegiertem Stahlwerkstoff in der Hochofenroute notwendig.⁴⁹ Zukünftig könnte Magnesium auch als Koppelprodukt aus der zunehmenden Meerwasserentsalzung gewonnen werden.⁵⁰ Dies kann zu einem Sinken des Rohstoffpreises führen.

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Stoffleichtbau mit Magnesium

Materialauswahl

- Substitution von Seltenerd-Elementen in Magnesium-Blechwerkstoffen (Forschungsprojekt)

Produktgestaltung

- Verbesserte Simulation von Verhalten und Lebensdauer von Magnesiumblechen ermöglicht zuverlässige Leichtbaukonstruktionen mittels Computer Aided Engineering

Fertigungsprozess

- Einsatz additiver Fertigungsverfahren anstelle spanender Verarbeitung zur Reduktion von Produktionsabfällen durch spezielle Prozesskammer und optimierte Schutzgasführung
- Verbesserung der Materialeigenschaften von Magnesiumlegierungen durch Prozess des Gießwalzens (Forschungsprojekt)
- Reduktion der Walzvorgänge bei der Produktion von Magnesiumblechen (Forschungsprojekt)

⁴⁸ Vgl. Tschätsch, H.-U. (2012).

⁴⁹ Vgl. Umweltbundesamt (2016).

⁵⁰ Vgl. Kawalla, R. (2015).

Recyclatqualität

- Sortenreiner Magnesiumschrott ermöglicht bis zu 30-mal niedrigeren Energieaufwand beim Recycling gegenüber verunreinigtem Magnesiumschrott
- Sortenreines Produktionsabfallrecycling von Angüssen aus Druckgussfertigung

Materialauswahl

Die **Substitution von Seltenerd-Elementen in Magnesium-Blechwerkstoffen** wird bis zum Jahr 2017 im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts SubSEEMag erforscht. Magnesium-Legierungen erfüllen spezielle Anforderungen an mechanische Eigenschaften und Brandsicherheit und sollen durch solche ohne Elemente der Seltenen Erden ersetzt werden und dennoch vergleichbare Eigenschaften zeigen. Hilfreich bei der Gestaltung der Werkstoffeigenschaften könnte neben der Materialauswahl ein geeignetes Mikrostrukturdesign sein.⁵¹

Produktgestaltung

Für den industriellen Einsatz von Magnesiumblechen im Fahrzeugbau ist die Kenntnis ihres Verformungs- und Festigkeitsverhalten erforderlich, die sich stark von denen der Magnesiumgusslegierungen unterscheiden. An der Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut wurde im BMBF-geförderten Forschungsvorhaben „Betriebsfestigkeitsanalyse für Leichtbaustrukturen aus Magnesiumknetlegierungen“ (MagFest) ermittelt, dass es deutliche Abweichungen zwischen Simulationen unter Verwendung herkömmlicher Berechnungsansätze für gegossene Magnesiumlegierungen und den durchgeführten Experimenten gibt. Daher wurden **neue Berechnungsmodelle** entworfen, die das **Verhalten und die Lebensdauer** der Feinbleche besser beschreiben. Das macht die **Konstruktion von zuverlässigen Leichtbaustrukturen mittels Computer Aided Engineering (CAE)** möglich.⁵²

⁵¹ Vgl. Kawalla, R. (2015).

⁵² Vgl. Hochschule Landshut (2015).

Fertigungsprozess

Auch das **3D-Drucken von Magnesium** ist inzwischen möglich. Selektives Laserschmelzen ist bisher für Edelstahl, Aluminium- oder Titanlegierungen gängig, nicht aber für Magnesiumlegierungen. Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen haben eine Prozesstechnik entwickelt, die die **starke Rauchentwicklung durch eine spezielle Prozesskammer mit optimierter Schutzgasführung kompensiert**. Bevorzugte Anwendung in einem ausgegründeten Start-up-Unternehmen sind medizinische Implantate, doch als Demonstrator wurde bereits eine Motoradgabelbrücke im Maßstab 1 : 4 produziert.⁵³

Das Institut für Metallformung an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg untersucht das **Gießwalzen und Walzen von Magnesium-Flachprodukten mit reproduzierbaren Eigenschaften**. So verbessern sich die Werkstoffeigenschaften mehrerer Legierungen in Bezug auf Bruchdehnung und Zugfestigkeit durch Gießwalzen signifikant. Die Legierungen sind für flächige Bauteile ohne tragende Funktion, deren Oberflächen keinen starken korrosiven oder abrasiven Einflüssen ausgesetzt sind, geeignet.⁵⁴

Dem Handling von Magnesiumblechen widmet sich das Helmholtz-Zentrum Geesthacht. Am Institut für Werkstoffforschung wurde deshalb eine neue Halle mit einer Magnesium-Gießwalzanlage aufgebaut, mit deren Hilfe Magnesiumbleche und deren Anwendungen gründlich erforscht werden sollen. Das dort angesiedelte Magnesium Innovation Centre (MagIC) arbeitet auch an Verfahren, die **Magnesiumbleche statt in bis zu 40 Schritten in nur noch dreimaligem Walzen umzuformen** und damit die Fertigung effizienter und preiswerter zu machen.⁵⁵

Recyclatqualität

Umfassende End-of-Life-Recyclingkonzepte existieren noch nicht, weil vor allem Verfahren zur Entfernung von **Verunreinigungen** wie Eisen, Kupfer

⁵³ Vgl. Nollis, P. (2016).

⁵⁴ Vgl. Kawalla, R. (2015).

⁵⁵ Vgl. Tschätsch, H.-U. (2012).

und Nickel im industriellen Maßstab fehlen. Zur Herstellung eines Kilogramms Primärmagnesium ist etwa **30-mal mehr Energie nötig** als bei der Herstellung aus **sauberem Magnesium-Schrott**. Üblich ist lediglich ein Downcycling oder das Verdünnen von Magnesiumschrotten mit reinem Primärmagnesium, bis der Grad der Verunreinigungen unter die vorgegebenen Grenzwerte fällt.⁵⁶

Das Recycling von Magnesium findet derzeit hauptsächlich bei **sortenreinen Legierungen** statt, wie sie in den Gießereien als **saubere Produktionsabfälle** anfallen. **Bis zu 50 % eines Druckgussbauteils** werden so als Schrotte verarbeitet.⁵⁷

3.1.4 Titan

Als Leichtbauwerkstoff erreicht Titan zwar nicht die geringe Dichte von Aluminium und Magnesium, spart jedoch im Vergleich zu Stahlwerkstoffen etwa 40 % Masse ein. Verwendet werden Reintitan, Titanlegierungen und Titanaluminide. Ihre spezifische, auf die Dichte bezogene Festigkeit ist auch bei größeren Temperaturen höher als die von Stählen und Aluminiumlegierungen. Gerade Titanaluminid-Legierungen besitzen selbst bei 800 °C und mehr eine hohe spezifische Festigkeit, was sie für den Einsatz im Motor- und Triebwerksbau prädestiniert. Reintitan hingegen ist sehr korrosionsbeständig und gut verformbar. Seit langem etabliert in der Luftfahrt, wurde um das Jahr 2000 erstmals Titan im Fahrzeugbau, in Abgasanlagen und Federn sowie oszillierenden und mechanisch belasteten Motorkomponenten wie Pleueln, Ventilen und Abgasturboladerädern eingesetzt.⁵⁸

Für die Herstellung von Titanwerkstoff ist rund zwanzigmal so viel Energie wie bei der Herstellung von unlegiertem Stahlwerkstoff in der Hochofenroute notwendig.⁵⁹

⁵⁶ Vgl. Duwe, S. (2015).

⁵⁷ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 331.

⁵⁸ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 336 – 347.

⁵⁹ Vgl. Umweltbundesamt (2016).

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Stoffleichtbau mit Titan

Produktgestaltung

- Optimierung des Produktdesigns und der Prozessparameter durch Simulationsverfahren bei der Herstellung durch Schleuderguss

Fertigungsprozess

- Reduktion der Umschmelzschritte bei der Titanherstellung durch Anpassung der Titanlegierung an den Anwendungszweck
- Einsatz additiver Fertigungsverfahren anstelle spanender Verarbeitung zur Reduktion von Produktionsabfällen

Recyclatqualität

- Forschung zum Recycling von Titanspänen durch Anpassung von Maschinen- und Betriebsmittelkonzepten

Produktgestaltung

Luffahrt-Komponenten von etwa einem Meter Größe wie Türrahmenkomponenten oder Triebwerksgehäuse mit geringen Wandstärken von nur rund fünf Millimetern können im **Schleuderguss** hergestellt werden. Im Rahmen des EU-Projekts „Casting of Large Ti Structures“ (COLTS) wurden hierzu **Simulationsverfahren** entwickelt und in Experimenten validiert, mit denen sowohl die **Konstruktion als auch die Prozessparameter für den Gießprozess optimiert** werden können. So können Probleme in einer frühen Entwicklungsphase erkannt und der Materialeinsatz minimiert werden.⁶⁰

Fertigungsprozess

Für den Fahrzeugbau werden derzeit neue, preiswertere **Titanlegierungen** entwickelt, die **sich nicht mehr an den Sicherheitsanforderungen der Luft- und Raumfahrt orientieren** und somit durch eine **reduzierte Anzahl von Umschmelzschritten im Vakuum-Lichtbogenofen** mit geringerem Energieeinsatz erschmolzen werden können.⁶¹

⁶⁰ Vgl. Koeser, O. et al. (2015), S. 12 – 18.

⁶¹ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 347.

Die generative Fertigung erreicht auch Titan – im Jahr 2014 verbaute Airbus erstmals 3D-gedruckte Kabinenhalter für den Crew-Ruheraum an Bord des A350 XWB (Abbildung 3). Das Bauteil wurde **zuvor aus Aluminium gefräst und wird nun aus Titanpulver „gedruckt“**, was es 30 % leichter macht.⁶² Zur Topologieoptimierung tragen auch bionische Verfahren bei.⁶³



Abbildung 3: Im 3D-Druck gefertigte Halterung für Flugzeug-Kabinenbauteile⁶⁴

Recyclatqualität

Die spanende Bearbeitung der Titan-Halbzeuge zu Strukturbauteilen für die Luft- und Raumfahrt bedingt eine sehr große Menge anfallender Titanspäne, die je nach Bauteil bis zu 95 % betragen kann. Durch die in die Späne eingebrachten Verunreinigungen ist eine Weiterverarbeitung der Schrotte nicht möglich, so dass Titan-Werkstoffe ausschließlich aus Primärmaterial hergestellt werden müssen. Im BMWi-geförderten Forschungsprojekt „Prozesskette **Recycling von Titanspänen**“ (RETURN) sollen daher bis zu 70 % der

⁶² Vgl. VDI-Z (2016).

⁶³ Vgl. Biokon (2015)

⁶⁴ Foto: Ansgar Pudenz, Deutscher Zukunftspreis 2015

Späne recycelt werden, um daraus erneut Titanlegierungen in Luftfahrtqualität herstellen zu können. Ansätze sind **neue Kühlschmierstoffstrategien und angepasste Werkzeugmaschinenkonzepte, alternative Schneidstoffe und eine analytische Inline-Prüfung der Recycling-eignung** von Titanspänen.⁶⁵

3.2 Faserverstärkte Kunststoffe

Aufgrund der einzigartigen Kombination von hervorragenden mechanischen Eigenschaften und geringer Masse gewinnen faserverstärkte Kunststoffe (FKV) für den Leichtbau kontinuierlich an Bedeutung. Es besteht eine Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten von Glas- oder Kohlenstofffasern unterschiedlicher Länge (Kurzfasern, Langfasern oder Endlosfasern) mit verschiedenen Matrixkunststoffen (Duroplaste und Thermoplaste). Insbesondere hochfeste kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden immer häufiger als leichte Konstruktionswerkstoffe eingesetzt und treten damit in direkte Konkurrenz zu Stahl- und Aluminiumbauweisen.

Der Flugzeugbau und in zunehmender Weise der Automobilbau gehören zu den wesentlichen Nachfragetreibern für diese Entwicklung. Im Luftfahrtbereich werden mit dem A350 von Airbus und der 787 von Boeing bereits serienmäßig Großraum-Passagierflugzeuge mit einem Anteil von hochfesten Verbundwerkstoffen in der Struktur von über 50 % gebaut. Im Automobilsektor wird mit dem Elektrofahrzeug i3 von BMW erstmals ein Auto mit einer vollständigen CFK-Karosserie in mittlerer Seriengröße produziert. Auch wenn mit einer solchen Bauweise für Großserienmodelle bis 2020 noch nicht gerechnet wird, ist zu erwarten, dass der Einsatz hochfester CFK-Bauteile im Automobilbau stetig zunehmen wird. Für endlosfaserverstärkte CFK wird daher bis 2020 ein Nachfragewachstum von jährlich 17 % prognostiziert, wobei das Nachfrageplus aus dem Automobilsektor mit jährlich 33 % am größten ist. Im Gegensatz dazu wird für endlosfaserverstärkte GFK ein jährliches Wachstum von nur 5 % erwartet. Allerdings übertrifft die voraussichtliche absolute Masse an produzierten endlosfaserverstärkten GFK auch im Jahr 2020 noch die Masse an CFK um mehr als das Zehnfache.⁶⁶

⁶⁵ Vgl. Universität Hannover (2015).

⁶⁶ Vgl. Lässig, R. et al. (2012), S. 32 ff.

Ein wesentliches Hemmnis für die Nutzung solcher Leichtbauwerkstoffe vor allem im Automobilbau stellen bislang die hohen Kosten dar. Diese wiederum sind zum Großteil bedingt durch wenig automatisierte und nicht großserientaugliche Herstellungsverfahren für FVK-Bauteile. So werden laut einer Studie von Roland Berger und dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) die größten Kostensenkungs- und Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Herstellungsverfahren und bei der Bereitstellung von Kohlenstofffasern gesehen (Abbildung 4). Bei der Produktion von Glasfasern und der Herstellung der Matrixmaterialien hingegen ergeben sich nur geringe Einsparmöglichkeiten.⁶⁷

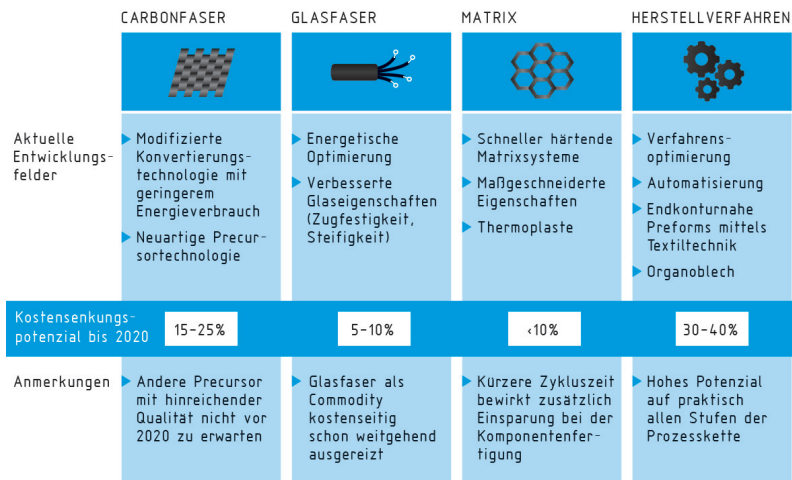


Abbildung 4: Innovations- und Kostensenkungspotenziale in der FVK-Wertschöpfungskette⁶⁸

Bei der Betrachtung des Lebensweges stellen sich weitere Herausforderungen, insbesondere für endlosfaserverstärkte CFK. Mit dem Einsatz von CFK wird im Vergleich mit Stahl oder Aluminium die geringste Bauteilmasse erreicht. Vor allem wenn die Carbonfasern unidirektional in Lastrichtung in den Verbundwerkstoff eingebracht werden, sind Masseinsparungen gegen-

⁶⁷ Vgl. Lässig, R. et al. (2012), S. 15 ff.

⁶⁸ Vgl. Lässig, R. et al. (2012), S. 16.

über einem Referenzbauteil aus herkömmlichem Stahl von 79 % möglich. Jedoch schlagen der hohe Energiebedarf für die Produktion der Kohlenstofffasern und die Herstellung von CFK-Bauteilen sowie die bislang fehlende Möglichkeit eines werkstoffgerechten Recyclings von CFK in der Gesamtbilanz negativ zu Buche.⁶⁹ Hinzu kommt, dass Schäden im Verbundmaterial bislang durch den Austausch des gesamten Bauteils repariert wurden, was weder ressourceneffizient noch wirtschaftlich ist. Einige zentrale Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei der Bereitstellung der Kohlenstofffasern, den Fertigungsprozessen von CFK-Bauteilen und dem stofflichen Recycling wurden bereits in der Kurzanalyse Nr. 3 „Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien“ beschrieben.⁷⁰

Eine ökobilanzielle Analyse der wichtigsten Prozessketten zur effizienten Fertigung von CFK-Bauteilen wurde im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes MAI Enviro unter Federführung des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie (ICT) durch den Institutsteil Funktionsintegrierter Leichtbau (FIL) durchgeführt. Dabei wurden für verschiedene Verfahren und Prozessschritte, wie z. B. das Preforming flächiger Halbzeuge, das Direct-Roving-Fiber-Placement, das Automated-Fiber-Placement oder das Resin Transfer Moulding (RTM), der Primärenergiebedarf und die Stoffströme erfasst und miteinander verglichen. Dabei wurden zum Teil erhebliche Einsparpotenziale an Primärenergie, insbesondere aus nicht regenerativen Ressourcen, ermittelt. Für die untersuchten duromer- und thermoplastbasierten CFK-Fertigungsprozessketten ergaben sich dabei Möglichkeiten zur Reduktion des Primärenergiebedarfs aus nicht regenerativen Quellen von 3 – 38 % im Vergleich zur Ausgangsbasis durch geeignete Ressourceneffizienzmaßnahmen. Die größten Potenziale werden in der Reduktion von Verschnitt (25 – 30 %), in der Nutzung regenerativer Energiequellen für die Herstellung von Kohlenstofffasern aus Polyacrylnitril (PAN) und in der Weiterverarbeitung zu Hochleistungsverbundbauteilen (rund 38 %) gesehen. Im Nachfolge-

⁶⁹ Vgl. e-mobil BW GmbH (2012).

⁷⁰ Vgl. Eickenbusch, H.; Krauss, O. (2013).

projekt MAI Enviro 2.0 ist geplant, die Verfügbarkeit von belastbaren Prozessbilanzdaten zu erhöhen, die bestehenden Ökobilanzmodelle zu erweitern und outputbezogene Auswirkungen auf die Umwelt, wie z. B. Treibhausgasemissionen, in die Betrachtung einzuschließen.⁷¹

Aufgrund der dynamischeren Marktentwicklung und der zu erwartenden Ressourceneffizienzpotenziale wird im Folgenden überwiegend auf kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe eingegangen.

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Stoffleichtbau mit faserverstärkten Kunststoffen

Materialauswahl

- Herstellung von Carbonfasern aus Mesophasen-Pechen oder nachwachsenden Rohstoffen, wie z. B. Lignin
- Nutzung von Hanffasern zur Verstärkung von Polypropylen

Produktgestaltung

- Optimierung des Materialeinsatzes durch Bauteilsimulation mittels Finiten-Elemente-Methode

Reparierbarkeit

- Unterschiedliche Reparaturverfahren zum Materialab- und Materialauftrag (Forschungsprojekt)
- Mobile Fräsröbter zum Ausfräsen beschädigter Stellen (Forschungsprojekt)
- Vernetzung von Automobilwerkstätten und Herstellern von Reparaturpatches (Forschungsprojekt)

Energie

- Senkung der Verarbeitungstemperatur von hanffaserverstärktem Polypropylen im Spritzgussprozess

⁷¹ Vgl. Hohmann, A. et al. (2015).

Prozessautomation

- Umwandlung manueller in durchgängig roboterbasierte Prozesse (Forschungsprojekt)

Fertigungsprozess

- Reduktion des Verschnittes und des Materialeinsatzes durch Herstellung komplexer CFK-Bauteilgeometrien aus kleineren Subpreforms mit lastoptimierter Faserausrichtung
- Verschnittfreie Preforms und lastgerechte Faserdichte durch Fiber-Injection-Molding (FIM)
- Bei Preforms entfällt Verschnitt durch 3D-Faserspritzverfahren
- Einsparung von Fertigungsschritten und Energie durch In-situ-Polymerisation, d. h. gleichzeitig stattfindende Polymerisation und Formgebung
- 3D-Druck von CFK-Bauteilen mittels Integration der Endlofaser in Kunststoffstrang beim Fused Layer Modeling (FLM) (Forschungsprojekt)
- Effiziente Herstellung kleiner Stückzahlen durch 3D-Druckverfahren von faserverstärkten Kunststoffen (Forschungsprojekt)
- Fertigung großer Leichtbaustrukturen durch mobile Roboter (Forschungsprojekt)
- Simulation der Prozessketten zur Optimierung der CFK-Fertigung (Forschungsprojekt)

Materialauswahl

Das Standardverfahren zur Herstellung von Carbonfasern basiert auf dem Erdölprodukt Polyacrylnitril (PAN) als Precursor, das durch energieaufwendige Oxidierung und Carbonisierung sowie weitere nachgelagerte Prozessschritte zu Kohlenstofffasern verarbeitet wird. Insbesondere der Carbonisierungsschritt bei Temperaturen von etwa 1400 °C ist sehr energieintensiv. Außerdem werden nur etwa 50 % der Masse des im Precursor vorliegenden Kohlenstoffs in die resultierende Carbonfaser umgesetzt. Ansätze zur

Ressourceneinsparung ergeben sich prinzipiell durch die Nutzung alternativer Precursor-Materialien, allerdings führt dies zu Fasern mit zum Teil deutlich anderen mechanischen Eigenschaften. So ist es technisch möglich, **Kohlenstofffasern statt aus Polyacrylnitril aus Mesophasen-Pechen** herzustellen. Die Carbonausbeute liegt hier bei 80 % der Masse des im Precursor vorliegenden Kohlenstoffs. Pech-basierte Kohlenstofffasern zeigen ein höheres E-Modul, aber auch eine geringere Festigkeit im Vergleich zu PAN-basierten Fasern, daher sind sie aktuell nur für einige Nischenanwendungen relevant. Es bestehen auch Ansätze, **Carbonfasern aus Lignin oder Cellulose** herzustellen. Die Carbonausbeuten sind mit rund 25 % der im Precursor vorliegenden Masse noch geringer als in der PAN-Prozessroute. Dafür werden die fossilen Ausgangsstoffe durch nachwachsende Rohstoffe substituiert. Da die Qualität und die mechanischen Eigenschaften aber deutlich schlechter sind als bei herkömmlichen PAN-basierten Fasern, spielen diese Verfahren aktuell kaum eine Rolle am Markt. Es ist davon auszugehen, dass auch mittelfristig erdölbasiertes PAN seine dominierende Rolle als Precursor für die Herstellung von Kohlenstofffasern behaupten wird.⁷²

Die Forschung im Bereich der Kohlenstofffaserherstellung soll am neu gegründeten Research Center Carbon Fibers Saxony (RCCF) an der Technischen Universität Dresden vorangetrieben werden. Dort wird ab Juni 2016 eine Carbonfaseranlage in Betrieb sein, mit der die **Herstellung von maßgeschneiderten Fasern aus fossilen und auch aus nachwachsenden Rohstoffen** erforscht werden soll. Die Anlage bietet die Möglichkeit, Fasern mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften herzustellen, um so im Labormaßstab Parameter zu bestimmen, die künftig in der industriellen Produktion genutzt werden können.⁷³

Der Automobil-Zulieferer Hib Trim Part Solutions GmbH aus Bruchsal entwickelte eine **rohstoffeffiziente Mischung aus losen Hanffasern, Polypropylen und Wachs**, die zu Pellets verarbeitet wird. Das Wachs dient im Extruder einer Spritzgussanlage als Schmelzhilfe für den Kunststoff. Der Hanf sollte nach der Ernte bereits ein erstes Verrottungsstadium erreicht haben, so dass seine Inhaltsstoffe bei der Verarbeitung nicht ausgasen. Nach dem

⁷² Vgl. Jäger, H. und Haider, P. (2014), S. 24 – 28.

⁷³ Vgl. TU Dresden (2016).

Spritzgießen hat das Material eine **Schlagfestigkeit**, wie sie mit den durchaus schon üblichen Mischungen aus kurzen Naturfasern, Kunststoff und Klebstoff nicht erreichbar ist. Bei diesen entstehen bei Brüchen scharfe Kanten, was den Einsatz im Interior unmöglich macht, etwa um Blenden aus Holz, Kunststoff und Aluminium zu unterfüllen. Formteile aus Hanf-Polypropylen-Spritzguss sind im Ergebnis 20 % leichter als solche aus herkömmlichen Kunststoffen. Die Hälfte des mineralölbasierten Kunststoffes kann durch den nachwachsenden Rohstoff Hanf ersetzt werden – bei den anderen Verfahren mit Naturfasern beträgt dieser Anteil nur etwa ein Drittel.⁷⁴

Produktgestaltung

Die **Entwicklungen bei den Simulationsverfahren** bietet weiteres Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei Faserverbundmaterialien. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf einer genaueren Bauteilberechnung mit numerischen Werkzeugen wie z. B. der **Finiten-Elemente-Methode**. Durch eine genauer berechenbare Vorhersage des Bauteilverhaltens kann die **Bauteilauslegung optimiert** und auf diese Weise **Material eingespart** werden. Zudem kann eine verbesserte Prozesssimulation zur ganzheitlichen Optimierung der gesamten Prozesskette genutzt werden, was sich in der Regel auch positiv auf die Ressourceneffizienz auswirkt.⁷⁵

Reparierbarkeit

An der Instandsetzung von Faserverbundbauteilen aus unterschiedlichen Einsatzbereichen wird in dem europäischen Projekt „ReCarbofit“ geforscht. Ein Schaden an einem Bauteil kann auf verschiedene Weise hervorgerufen werden und ein unterschiedliches Ausmaß aufweisen. Aus diesem Grund gibt es auch vielfältige Instandsetzungstechniken. Im Einzelfall muss entschieden werden, welche Art der Reparatur geeignet ist. Dazu wurde nach Bewertung des Schadens die **Eignung der verschiedenen Verfahren für Materialabtrag und Materialaufbau** untersucht.⁷⁶ Die Instandsetzungstechniken wurden zur Auswahl der geeigneten Verfahren in einem morphologischen Kasten zusammengefasst (Abbildung 5). Die Ergebnisse an den

⁷⁴ Vgl. Langen, R. (2015), S. 15.

⁷⁵ Vgl. Lässig, R. et al. (2012), S. 19.

⁷⁶ Vgl. Ellert, F. (2015).

untersuchten Prüfkörpern zeigen grundsätzlich gute Steifigkeitswerte von bis zu 115 % gegenüber den Referenzprüfkörpern. Dabei erwies sich das Abtragen von Material mit dem Laser als besonders präzise, so dass keine Nachbearbeitung erforderlich ist. Im Vergleich zu dem Ersatz eines kompletten CFK-Bauteils stellt die Reparatur mit 20 - 30 % der Herstellungskosten die wirtschaftlichere Variante dar.⁷⁷ Zudem muss ein repariertes Bauteil nicht recycelt werden.

Kategorie	Instandsetzungstechnik			
Materialabtrag - Geometrie				
	Stufenweise	Winklig	Senkrecht	-
Materialabtrag - Verfahren				
	Manuelles Schleifen	Fräsen	Lasern	Sandstrahlen
Oberflächen- behandlung				
	Sandstrahlen	Plasma	Schleifen	-
Materialaufbau - Verfahren				
	Soft-Patch	Hard-Patch	Harzinjektion	-
Materialaufbau - Materialsystem				
	Prepreg	Nasslaminat	Harz	-
Materialaufbau - Variationen				
	Zusätzl. Lage (n)	Fillerlage	Klebeschicht	-

Abbildung 5: Instandsetzungstechniken für Faserverbundbauteile ⁷⁸

Bei Flugzeugen werden zur Reparatur von CFK-Bauteilen Bleche aus Kompositmaterial oder Metall als Doppler angenietet⁷⁹, was sowohl die Faserstruktur an der genieteten Stelle zerstört als auch kontraproduktiv hinsichtlich der Leichtbaueigenschaften ist. Aktuell wird bei der Lufthansa Technik AG in dem Forschungsverbund Composite Adaptable Inspection and Repair (CAIRE) - aufbauend auf dem Vorgängerprojekt „Rapid Repair“ - ein **mobiler Fräsroboter** entwickelt, der sich mit Saugnäpfen an der Außenhaut von Flugzeugen festhalten und dort einen Schaden beheben kann.

⁷⁷ Vgl. Ellert, F. (2015).

⁷⁸ Vgl. Ellert, F. (2015).

⁷⁹ Vgl. Lufthansa Technik: Im Fokus.

Der Roboter **scant die zu reparierende Stelle und berechnet selbständig die Größe der auszubessernden Fläche**. Nachdem das beschädigte Stück ausgefräst wurde, wird ein Reparaturpatch eingesetzt und bei hohen Temperaturen unter Vakuum verklebt.⁸⁰ Durch den mobilen Einsatz des Roboters können so auch große Schäden an schlecht zugänglichen Stellen wie an und unter den Tragflächen ausgebessert werden. Nach Verbesserung der Klebefestigkeit und Haltbarkeitsprüfung wird prognostiziert, dass dieses Verfahren bei Lufthansa noch im Jahr 2016 eingeführt werden kann.⁸¹

Auch im Automobilbau sollte der vollständige Austausch schadhafter CFK-Bauteile vermieden werden. Hierzu hat die RWTH Aachen ein Projekt begonnen, in dem es darum geht, klassische Werkstätten darin zu unterstützen, Schäden durch die Erhebung spezifischer Daten an CFK-Bauteilen detektieren zu können. Diese Daten werden automatisch ausgewertet und an einen Hersteller **industriell gefertigter Reparaturpatches** versendet. Die fertigen Patches werden der Werkstatt zugesendet und dort eingefügt. In dem Projekt sollen Verfahren zur standardisierten Datenerfassung und Qualitätssicherung entwickelt werden.⁸² Die **Vernetzung der Werkstätten mit den Herstellern der Patches** ermöglicht eine ressourceneffiziente Reparatur von CFK-Schäden und verringert den logistischen Reparaturaufwand.

Energie

Die im Abschnitt Materialauswahl aufgeführte **Verarbeitung einer Hanf-Kunststoff-Mischung spart Energie**, weil die Verarbeitungstemperatur im Extruder von rund 260 °C bei reinen Kunststoffen auf etwa 160 °C beim Hanfspritzguss reduziert werden kann.⁸³

Prozessautomation

Das Zentrum für Leichtbauproduktion (ZLP) des DLR entwickelt an seinen Standorten in Augsburg und Stade neue Verfahren für die automatisierte Produktion von CFK-Bauteilen für Luft- und Raumfahrt. Ziel der Forschung

⁸⁰ Vgl. FLUG REVUE 2015.

⁸¹ Vgl. Lufthansa Technik: Projekte.

⁸² Vgl. Lightweightdesign (2015), S. 6.

⁸³ Vgl. Langen, R. (2015), S. 15.

ist es, **manuelle Prozesse in durchgängig roboterbasierte Prozesse umzuwandeln** und damit durch eine erhöhte Produktqualität auch die Ressourceneffizienz zu steigern. Schwerpunkte sind unter anderem die berührungsrme und zerstörungsfreie Handhabung, die Reduzierung von Fügestellen, die produktionsintegrierte, zerstörungsfreie Qualitätsprüfung bei der CFK-Produktion sowie die Entwicklung neuer Ablagetechnologien.⁸⁴

Fertigungsprozess

Für die im Automobilbau angestrebte Produktion von CFK-Bauteilen in hohen Stückzahlen und kurzen Taktraten wird vor allem das RTM, ein Flüssigimprägnierverfahren, als besonders vielversprechende Fertigungstechnologie angesehen.^{85, 86} Ein zentraler Prozessschritt ist dabei das sogenannte „Preforming“, bei dem aus mehreren Lagen eines textilen Faserhalbzeugs durch geeignete Drapiertechniken ein endkonturnaher Faservorformling hergestellt wird. Bauteile mit einer komplexen Geometrie sind mit einer durchgängigen Preform allerdings nur bedingt realisierbar. Zudem entsteht bei den herkömmlichen Preformingprozessen ein Faserverschnitt von bis zu 30 %. Für **komplexe dreidimensionale Bauteilgeometrien werden die Preforms daher aus mehreren kleineren Teilstücken**, den sogenannten „Subpreforms“, zusammengesetzt.

Forscher am Karlsruher Institut für Technologie arbeiten an einem ganzheitlichen Optimierungsansatz, mit dem das Preforming mit Subpreforms deutlich ressourceneffizienter gestaltet werden kann. Dabei werden die Beanspruchungen, die das Bauteil in der späteren Anwendung erfährt, Einschränkungen, die sich durch die eingesetzten Drapierverfahren ergeben, und der entstehende Verschnitt beim Zuschneiden der Halbzeuglagen gleichermaßen berücksichtigt. So wird etwa die Aufteilung des Preforms in die Subpreforms so gewählt, dass dabei **Bereiche mit unterschiedlicher Lastrichtung in der späteren Anwendung voneinander getrennt werden**. Dadurch kann die anisotrope Belastbarkeit des Faserwerkstoffs ausgenutzt und somit Material eingespart werden. Die Anzahl der Faserhalbzeuglagen wird für

⁸⁴ Vgl. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2015)

⁸⁵ Vgl. Wagner, H. et al. (2013).

⁸⁶ Vgl. Eickenbusch, H. und Krauss, O. (2013), S. 25 ff.

jede Subpreform anhand der zu erwartenden Belastung individuell festgelegt. Auch dies trägt zu einer effizienten Materialnutzung bei. Schließlich werden die Zuschnitte der verschiedenen Preforms so auf den Faserhalbzeugbahnen angeordnet, dass möglichst wenig Verschnitt entsteht. Alle Optimierungsschritte werden iterativ wiederholt, um ein Gesamtoptimum an Ressourceneffizienz zu erreichen.⁸⁷

Das **Faserblasen, bekannt als Fiber-Injection-Molding (FIM)**, kann für die materialeffiziente Herstellung von Preforms in der RTM-Prozesskette genutzt werden. Bei diesem von der Firma Fiber Engineering GmbH entwickelten Verfahren werden Kurz- oder Langfasern zusammen mit thermoplastischen Binfedern mittels einer Blasmachine in eine Werkzeugform eingeblasen. Anschließend wird das Fasergemisch im endkonturnahen Formwerkzeug in die Bauteilkontur gepresst. Dabei wird Heißluft eingeleitet, um die Binfedern zu aktivieren, die das Bauteil in der gewünschten Form fixieren. Bisher werden mit diesem Prozess Dämm- und Dämpfungsbaueteile vorwiegend für den Automobilbau hergestellt. Dabei stellen die verpressten Faserbauteile bereits das fertige Bauteil dar, das heißt, es erfolgt kein weiterer Schritt zur Konsolidierung mit einem Matrixkunststoff zu einem Faserverbundbauteil.

Wissenschaftler am wbk-Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie haben den Faserblasprozess zu einem besonders materialeffizienten Preformingprozess weiterentwickelt, mit dem durch einen anschließenden RTM-Prozess lasttragende Faserverbund-Strukturbauteile hergestellt werden können. Zur Materialeffizienz trägt zum einen die verschnittfreie Realisierung der Endkontur der Preforms bei. Zum anderen kann durch spezielle Anpassung des Einblaswerkzeugs die **Faserdichte im Bauteil variiert und so an die lokale Lastverteilung in der späteren Anwendung angepasst werden**. Um dieses Verfahren auch für die Fertigung von Bauteilen für höhere Belastungen nutzbar zu machen, können auf die Deckschicht der gepressten Preforms aus Kurz- oder Langfasern zusätzlich End-

⁸⁷ Vgl. Fleischer, J. et al. (2016), S. 82 – 84.

losfasern aufgebracht werden, die die Belastbarkeit und Steifigkeit des Bauteils gezielt erhöhen. Als nächster Schritt ist die Entwicklung eines automatisierten Werkzeugsystems kombiniert mit einem Bestückungssystem zur gezielten Einbringung der Endlosfasern geplant.⁸⁸

Eine weitere Möglichkeit für ein **ressourceneffizientes Preforming** bei der CFK-Fertigung im RTM-Verfahren bietet ein am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) der RWTH Aachen im Rahmen eines AiF-Projektes entwickeltes **3D-Faserspritzverfahren**. Mit dieser Technologie lassen sich Preforms aus geschnittenen Fasern verschnittfrei und großserientauglich herstellen. Dazu werden die von einem Roving kommenden Fasern auf 50 mm Länge geschnitten und dann durch eine Venturidüse in einem Luftstrom auf ein Ablagewerkzeug transportiert. Dabei passieren sie eine Faserleiteinheit, in der sie ausgerichtet werden, so dass sie in einheitlicher Orientierung in das Bauteil eingebracht werden. Die Fasern werden auf der perforierten Ablage durch Unterdruck festgehalten, bevor ein zugegebener Binder für die dauerhafte Fixierung der Fasern im Preform sorgt. Mit diesem Preforming-Prozess können Zykluszeiten von fünf Minuten erreicht werden. Die Weiterverarbeitung zum Verbundbauteil erfolgt dann im RTM-Verfahren. Die weitere Entwicklungsarbeit konzentriert sich auf die Erhöhung des Orientierungsgrades der Fasern und die Realisierung komplexerer Bauteile durch Integration von Durchbrüchen, Versteifungsstrukturen und Kräfteinleitungselementen in die Preforms.⁸⁹

Auch beim Zusammenführen von Faser-Preform und Kunststoff-Matrix zum fertigen Verbundbauteil besteht noch Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Ein vielversprechender Ansatz liegt beispielsweise in der In-situ-Polymerisation des Matrixmaterials direkt im Formwerkzeug vor. Forscher am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) der RWTH Aachen haben diese Technologie für die **In-situ-Polymerisation** von Caprolactam zu Polyamid 6 entwickelt. Statt des polymeren Matrixmaterials wird das Monomer in das Werkzeug, in dem sich der Preform befindet, eingespritzt. Dabei wirkt sich vor allem die im Vergleich zur Polyamidschmelze um mehrere Größenordnungen geringere Viskosität des Monomers positiv auf die Infiltration der Fasern aus. Dadurch können höhere Einspritzgeschwindigkeiten erreicht

⁸⁸ Vgl. Fleischer, J. et al. (2015), S. 14 – 19.

⁸⁹ Vgl. Hopmann, C. und Fecher, M. L. (2014), S. 52 – 57.

werden und gleichzeitig ist der Druck auf die Fasern geringer, so dass ihre Anordnung erhalten bleibt. Für die Polymerisationsreaktion werden Temperaturen von maximal 170 °C benötigt. Durch diese **gleichzeitig stattfindende Polymerisation und Formgebung ist der Prozess besonders energieeffizient**, denn der Energie- und Zeitaufwand für die vorgelagerte hydrolytische Polymerisation beim Zulieferer entfällt vollständig.

Im Jahr 2012 wurde eine erste Prototypenmaschine für die In-situ-Polymerisation von Caprolactam realisiert. Bis zur serienreifen Produktion von CFK-Bauteilen, etwa für den Automobilbau, besteht allerdings noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.⁹⁰

Der Innovationstrend der generativen Produktionsverfahren bietet auch für CFK-Bauteile Potenzial hinsichtlich einer ressourceneffizienteren Bauteilfertigung. Allerdings sind die Herausforderungen bei der Nutzung solcher Fertigungsprozesse im Vergleich zu homogenen Werkstoffen für Verbundwerkstoffe deutlich größer. Daher befindet sich der **3D-Druck mit faserverstärkten Kunststoffen** noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Forscher am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung arbeiten an einem sogenannten 3D-Fibre-Printer, mit dem Bauteile aus einem kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff gedruckt werden können. Der Ansatz beruht auf der **Integration von Endlosfasern in den Kunststoffstrang beim Fused Layer Modeling (FLM)**, einem etablierten Verfahren für den 3D-Druck mit Kunststoffen. Der Verbund aus Matrix-Kunststoff und Verstärkungsfaser wird dabei schichtweise aufgetragen. Die Zusammenführung und Anbindung von Faser und thermoplastischer Polymer-Matrix erfolgen im Schmelzkopf des Systems.

Einschränkungen gibt es noch beim maximalen Bauvolumen und bei der Oberflächenqualität, die durch die aufeinander abgelegten Schichten geprägt ist. Durch einen nachgelagerten Glättungsprozess können Oberflächenqualitäten erreicht werden, die annähernd denen von Spritzgussbauteilen entsprechen. Es besteht auch die Möglichkeit, andere Materialien, Halbzeuge

⁹⁰ Vgl. Egger, P. (2014), S. 58 – 62.

oder Komponenten im laufenden Prozess in das entstehende Bauteil zu integrieren. Der maximale Fasergehalt, der mit diesem Verfahren erreicht werden kann, liegt bei 10 %. Für eine industrielle Nutzung dieser Technologie besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.⁹¹

Mit dem Ziel, Lösungen für die generative Fertigung von Faserverbundkunststoffen zu entwickeln, hat sich unter der Leitung der Fraunhofer-Projektgruppe Regenerative Produktion das Netzwerk 3D-Composite-Print (3D-CP) mit Vertretern aus Forschung und Industrie gebildet, die alle Stufen der FVK-Produktion abdecken. Dabei geht es vor allem um die **effiziente Herstellung von Bauteilen in kleinen Stückzahlen** und auch um die Instandsetzung. So können beispielsweise besonders leichte Außenspiegel für Sportwagen aus faserverstärkten Kunststoffen **mittels 3D-Druck gefertigt** werden.⁹²

In einer Kooperation zwischen der TU-Braunschweig und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wird an der Kombination von Leichtbau und Industrie 4.0 geforscht. Bei dem Forschungsprojekt sollen durch zwei batteriebetriebene, **mobile Industrieroboter große Leichtbaustrukturen gefertigt** werden. Die Roboter erfüllen Handlings- und Fahraufträge, durch Sensorik und Algorithmen zur Lokalisierung, Pfadplanung und Lastaufnahme automatisiert. Beim Forschungsprojekt sollen Erkenntnisse über neue Produktionstechniken von faserverstärkten Kunststoffen gewonnen werden, die z. B. bei der Fertigung von Flugzeugen oder Fahrzeugen zum Einsatz kommen können.⁹³

In einem Teilprojekt der Active Research Environment for the Next generation of Automobiles (ARENA2036 mit Beteiligung des DLR Stuttgart) wird die **komplexe Verarbeitung von CFK in einer geschlossenen, digitalen Prozesskette simuliert**. Mithilfe dieser Berechnungen soll geklärt werden, wie CFK über den Lebensweg simuliert werden können. Die resultierenden Modelle erlauben dann die Auswahl passender Materialkonfigurationen.⁹⁴

⁹¹ Vgl. Fischer, A. und Finus, F. (2014).

⁹² Vgl. Fraunhofer IPA (2016).

⁹³ Vgl. DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (2015).

⁹⁴ Vgl. Lightweightdesign (2013).

3.3 Sonstige Leichtbauwerkstoffe

In Ergänzung zu den metallischen Werkstoffen und faserverstärkten Kunststoffen spielen reine Kunststoffe und technische Keramiken eine bedeutende Rolle, deren ressourceneffiziente Verarbeitung in diesem Kapitel dargestellt wird.

3.3.1 Kunststoffe

Faserverstärkte Kunststoffe dienen verbreitet der Leichtbauweise. Reine Kunststoffprodukte werden im Leichtbau deutlich seltener eingesetzt. Dennoch gibt es auch bei Polymeren Aspekte ressourcenschonender Fertigung und Anwendung im Leichtbau. Die Studie „Leichtbau – Trends und Zukunftsmärkte und deren Bedeutung für Baden-Württemberg“ verortet für die Kunststoffbranche ein mittleres Leichtbaupotenzial mit mittlerer Marktbedeutung. In 17 % der Unternehmen des kunststoffverarbeitenden Gewerbes werden Leichtbauverfahren eingesetzt.⁹⁵

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Stoffleichtbau mit Kunststoffen

Fertigungsprozess

- Dynamisch temperiertes Spritzgießwerkzeug ermöglicht den Einsatz von Kunststoffschäumen auch an optisch relevanten Flächen
- Forschung an Kunststoffverbund mit expandiertem Polypropylen-Partikelschaum

Fertigungsprozess

Das Schäumen von Kunststoff bietet die Möglichkeit, die Dichte des Materials herabzusetzen und den Rohstoffeinsatz zu reduzieren. Ein Nachteil liegt in der mangelhaften Oberflächenqualität der geschäumten Kunststoffe, die Schlieren zeigen und somit für z. B. den Autoinnenraum nur mit Verblendung einsetzbar wären. Die Covestro AG (bis 2015 Bayer MaterialScience AG) stellte im Jahr 2015 unter dem Projektnamen „Surface Technologies“ einen integrierten, serientauglichen Material- und Prozessansatz auf Basis

⁹⁵ Vgl. Leichtbau BW GmbH (2014), S. 7.

von Polycarbonat vor, der hochglänzende und strukturierte Dekorbauteile ermöglicht. Grundlage ist ein **dynamisch temperiertes Spritzgießwerkzeug mit integriertem, physikalischem Schäumverfahren**. Hier werden mikrozelluläre Schäume durch überkritischen Stickstoff erzeugt, der in den Spritzgießzylinder und damit direkt in die Schmelze injiziert wird. Mit der dynamischen Werkzeugtemperierung wird von der Glasübergangstemperatur des Thermoplasts Polycarbonat während des Einspritzens zügig auf die Entformungstemperatur abgekühlt. Dieser integrierte Prozess erlaubt nicht nur verbesserte Qualitätsmerkmale, sondern auch eine Reduzierung der Formteilwanddicke.⁹⁶

Für das automobiler Interieur entwickelt BMW einen **Kunststoffverbund aus expandiertem Polypropylen-Partikelschaum (EPP)** auf einem Spritzgussträger aus Polypropylen und einer Dekorfolie auf Polyolefinbasis. In der Anwendung als Instrumententafel beispielsweise erweist sich die geringere Masse dieses Systems in der Nutzungsphase als zielführend, die Herstellung der Bauteile in der Produktion ist nach Firmenangaben ebenfalls ökologisch nachhaltiger als der Stand der Technik. Die Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozesses ist zudem bereits gegeben, allerdings sind in der Herstellungstechnologie noch Verbesserungen für eine Serienfertigung notwendig.⁹⁷

3.3.2 Technische Keramik

Technische Keramiken sind anorganische nichtmetallische Werkstoffe. Die typischen Eigenschaften, wie geringe Dichte, die hohe Formstabilität, aber auch eine niedrige Bruchzähigkeit, erhalten Technische Keramiken, indem eine Rohform einem Sintervorgang bei hohen Temperaturen zwischen 1050 °C bis 2200 °C unterzogen wird.⁹⁸

3.3.2.1 Massivkeramik

Massivkeramiken weisen eine hohe Warmfestigkeit auf und sind gegen Verschleiß und chemische Einflüsse beständig, weswegen sie beispielsweise in

⁹⁶ Vgl. Gutbrod, M. (2015).

⁹⁷ Vgl. Geltinger, A. (2014).

⁹⁸ Vgl. IZTK – Informationszentrum Technische Keramik (2001).

Zündkerzen, Lambdasonden, Piezo-Injektoren und Rußpartikelfiltern eingesetzt werden. Durch ihre geringe Dichte tragen sie zum Stoffleichtbau für das Gesamtsystem Fahrzeug bei, vor allem aber als bewegte Massen. Ventile und Verdichterräder aus Siliziumnitrid in turboaufgeladenen Verbrennungsmotoren und Wasserpumpen mit Siliziumcarbidkeramik sind Beispiele hierfür.⁹⁹

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Stoffleichtbau mit technischer Keramik

Fertigungsprozess

- 3D-Druckverfahren ermöglicht Herstellung von Keramikbauteilen mit geringem Rohstoffaufwand und beliebig gestaltbarer Formgebung
- Herstellung von Keramiklaminat mittels Schichtverfahren auf Folien (Forschungsprojekt)

Fertigungsprozess

Im Gegensatz zu Metallen und Polymeren stellt die **additive Fertigung für technische Keramik** ein neuartiges Verfahren dar. Der erste 3D-Drucker wurde im Jahr 2012 von der Wiener Lithoz GmbH auf den Markt gebracht¹⁰⁰, die bis heute eine kleine zweistellige Anzahl ihrer Maschinen verkauft hat. Gefertigt wird aus Schlicker, einem hochviskosen Photopolymer aus Binder und keramischen Partikeln aus hochreinem Aluminiumoxid. Das Verfahren kommt mit **geringen Mengen Rohstoff aus, weil nicht verbrauchter Schlicker einer Schicht direkt für weitere Schichten wiederverwendet werden kann**. Die Schichtstärke beträgt 25 bis 100 Mikrometer, stündlich ist das Auftragen von bis zu 100 Schichten möglich, entsprechend 2,5 bis 10 mm pro Stunde. Durch ein Maskenbelichtungsverfahren ist diese Geschwindigkeit unabhängig von der Bauteil-Formgebung. Abschließend wird das Produkt im Ofen gesintert.¹⁰¹ Die Materialdichte im Endprodukt beträgt mindestens $3,96 \text{ g/cm}^3$, das sind 99,4 % der theoretisch möglichen Dichte. Die Festigkeitswerte ähneln denen der klassisch gefertigten Keramik.¹⁰² Wie

⁹⁹ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 348 f.

¹⁰⁰ Vgl. Lithoz GmbH (2012), S. 63.

¹⁰¹ Vgl. Asche, S. (2016), S. 23.

¹⁰² Vgl. Lithoz GmbH (2012), S. 63.

bei allen generativen Verfahren ist die **Formgebung beliebig gestaltbar** und geeignet für den Prototypenbau und die Kleinserienfertigung im Sondermaschinenbau und in der Medizintechnik. In der Luftfahrttechnik sind Gusskerne für Turbinenschaufeln mit komplexen Kühlkanal-Geometrien eine Anwendungsmöglichkeit.¹⁰³

Bremsscheiben aus Aluminium mit einer darauf aufgetragenen Keramikschicht könnten das schwere Gusseisen überflüssig machen und die ungefederten Massen im Fahrwerk verringern. Die Keramikschicht schützt die relativ weiche Aluminium-Bremsscheibe und übernimmt die Reibarbeit. Die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), das Politecnico di Torino, der spanische Bremsenhersteller Fagor Ederlan und das Fiat-Forschungszentrum haben sich vorgenommen, die Produktion der Leichtbaubremse großserientauglich und preiswert zu gestalten, um damit ins Kleinwagensegment vorzudringen. Geeignete Grundstoffe sind das preisgünstige Aluminiumoxid sowie Siliziumkarbid für eine gute Wärmeleitung. Aufgebracht werden sie als zwei Millimeter dickes **Keramiklaminat aus 15 einzelnen Schichten**. Jede Schicht wird als **Schlicker mit Wasser angerührt, dann auf eine Kunststoffolie aufgezogen**. Schließlich werden die Schichten zusammengepresst, der Kunststoff dazwischen herausgebrannt und die verschiedenen Schichten bei mehreren hundert Grad miteinander verbunden und verdichtet. Die Ergebnisse des Demonstrators werden zeigen, ob diese Fertigungstechnik die für Oberklasse-Pkw in Serie gefertigten, aber teuren Bremsscheiben aus Ceramic Matrix Composite (CMC) ergänzen kann.¹⁰⁴

3.3.2.2 Keramik-Matrix-Komposite

Keramische Matrix-Komposite bestehen aus in ein Matrixmaterial eingebetteten Fasern. Der Faseranteil von 40 - 50 % sorgt für eine Erhöhung der Zähigkeit. Als Fasermaterial kommen keramische Werkstoffe oder Carbon zum Einsatz. Die eingesetzten Fasern haben einen Durchmesser von rund 10 µm.¹⁰⁵

¹⁰³ Vgl. Asche, S. (2016), S. 23.

¹⁰⁴ Vgl. Klose, R. (2014).

¹⁰⁵ Vgl. Bertau, M.; Müller, A.; Fröhlich, P. und Katzberg, M. (2013).

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Stoffleichtbau mit Keramik-Matrix-Kompositen

Fertigungsprozess

- Einbettung von Stahl in Keramikstrukturen (Forschungsprojekt)

Recyclinggerechte Produktgestaltung

- CMC-Bauteile, z. B. Brems scheiben erschweren ressourceneffizientes Recycling von Produktionsabfällen

Fertigungsprozess

Perspektivisch könnten **keramische Strukturen auf ZrO₂-Basis auch mit Stahl auf Fe-CrMnNi-Basis kombiniert** werden. Dazu wird eine Keramikstruktur in ein flüssiges Stahlbad eingebracht. Hier liegt die Anwendung besonders auf dem Energieabsorptionspotenzial der Karosserie während eines Unfalls, da sowohl Keramik als auch Stahl Phasenumwandlungen während einer Verformung durchlaufen, deren Kombination eine ressourceneffiziente Nutzung der Werkstoffe ermöglichen würde.¹⁰⁶

Recyclinggerechte Produktgestaltung

In den letzten 15 Jahren wurden Brems scheiben aus Verbundkeramik für Sport- und Oberklassefahrzeuge in den Markt eingeführt. Sie bestehen aus kohlenstofffaserverstärktem Siliciumcarbid (C/SiC), sind also ein Keramik-Matrix-Komposit, häufig auch abgekürzt als CMC.¹⁰⁷ Auch als Reibbeläge in der Propellerbremse des Airbus A400M¹⁰⁸ oder in Hochgeschwindigkeitsaufzügen¹⁰⁹ sind CMC vertreten. Von den vielfältigen Herstellungsmethoden für CMC kommt das LSI-Verfahren (Liquid Silicon Infiltration) zum Einsatz. Weil die Masse einer Brems scheibe aus CMC nur ein Drittel einer Grauguss-scheibe beträgt, würden pro Pkw etwa 30 kg eingespart. Hinzu käme eine insgesamt leichtere Fahrwerkskonstruktion, weil die ungefederten Massen reduziert sind. Zur Ressourceneffizienz trägt auch die Lebensdauer von

¹⁰⁶ Vgl. Technische Universität Bergakademie Freiberg (kein Datum).

¹⁰⁷ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 357 f.

¹⁰⁸ Vgl. Kindervater, C. (2014).

¹⁰⁹ Vgl. Heidenreich, B. und Göring, J. (2008).

CMC-Scheibenbremsen bei, die mit 300.000 km Fahrleistung der Nutzungsdauer eines Pkw entspricht.¹¹⁰ Das Endprodukt ist jedoch unter anderem wegen komplexer Prozessschritte¹¹¹, hoher Taktzeiten und der Fehlerkosten teuer, da **ein Einschmelzen fehlerhafter Scheiben** wie bei Gussbrems-scheiben **nicht möglich** ist.¹¹² Für einen ressourceneffizienten Herstellungsprozess und entsprechende Kostensenkung besteht also noch Potenzial.¹¹³

¹¹⁰ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 354 ff.

¹¹¹ Vgl. Technische Universität Hamburg Harburg (2015).

¹¹² Vgl. Reichert, F.; Langhof, N. und Krenkel, W. (2015).

¹¹³ Vgl. Nestler, D. (2012), S. 203 ff.

4 RESSOURCENEFFIZIENZPOTENZIALE IM KONSTRUKTIVEN LEICHTBAU

Der konstruktive Leichtbau bedient sich nicht nur veränderter Werkstoffe, sondern auch veränderter konstruktiver Maßnahmen, um Leichtbauziele zu erreichen. So sind dünnwandige Bauteile bei der Strukturoptimierung und den Hybridbauweisen mittels mechanischer Analyse zu optimieren. Eine wichtige Rolle spielen die Funktionsintegration, Fügeverfahren und bionischen Ansätze. Auch in diesem Kapitel werden Ressourceneffizienzpotenziale vor der Nutzungsphase betrachtet.

4.1 Hybridbauweisen

Ein Hybridbauteil entsteht durch Kombination von zwei oder mehreren unterschiedlichen Werkstoffen innerhalb eines Bauteils.¹¹⁴ Diese Werkstoffe ergänzen sich gleichberechtigt mit unterschiedlichen Aufgaben bei insgesamt erhöhter Belastbarkeit im Vergleich zu den einzeln eingesetzten Werkstoffen. Beispielsweise ist bei der Hybridbauweise mit Metall und Kunststoff das Metall für die hohe Steifigkeit verantwortlich, während der Kunststoff durch eine Rippenstruktur die Gesamtfestigkeit des Bauteiles gewährleistet und gleichzeitig angespritzte Halterungen für andere Bauteile aufweisen kann.¹¹⁵ Verschiedene Werkstoffe im Verbund ermöglichen also im Bauteil eine verbesserte Eigenschaft oder zusätzliche Funktion. Auch lässt sich die Anzahl an Fertigungsschritten reduzieren. Nicht betrachtet wird hier das sogenannte Multimaterialdesign, das sich auf Baugruppen und Karosserien in Mischbauweise bezieht, in denen verschiedene Materialien und Materialklassen nebeneinander verbaut sind, etwa Aluminiumguss, -bleche, -profile und warm- und kaltumgeformter Stahl.¹¹⁶

Eine große Herausforderung in den Hybridbauweisen stellen großserientaugliche Fügeverfahren dar, die die artverschiedenen Werkstoffe mit unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten prozesssicher und dauerhaft

¹¹⁴ Vgl. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU.

¹¹⁵ Vgl. Ehrenstein, G. W.; Amesöder, S.; Fernández Díaz, L.; Niemann und H., Deventer, R. (2003), S. 152 f.

¹¹⁶ Vgl. Bayern Innovativ (2015).

verbinden.¹¹⁷ Falls das gelingt, sind Hybridbauweisen großserientauglich. Seit 20 Jahren ist das Frontend des Audi A6 aus einer Hybridkombination von Stahlblech – später Aluminium – und einem spritzgegossenen, modifizierten Polyamid gefertigt.¹¹⁸

Als Fügeverfahren kommen punktuell Niete oder Clinchen infrage, flächige Klebverfahren oder entsprechende Hybridfügeverfahren. Auch thermisch-mechanische Verfahren wie Widerstandselementschweißen und Reibelementschweißen spielen eine Rolle, ebenso wie innovative Varianten des Lichtbogenschweißens.¹¹⁹ In den nachfolgenden Abschnitten über Metall-Metall- und Metall-Kunststoff-Verbunde sind vor allem Aspekte der Ressourceneffizienz in der Herstellung von Interesse.¹²⁰

4.1.1 Metall-Metall-Verbunde

Metall-Metall-Verbunde setzen sich im Leichtbau meist aus Stahl und Aluminium zusammen. Solche Stahl-Aluminium-Feinbleche können durch Schmelzschweißverfahren nicht mehr anforderungsgerecht verbunden werden. Beim Schweißen kommt es zur Bildung spröder intermetallischer Verbindungen. Die zusätzlich entstehenden Schrumpfspannungen durch unterschiedliche Längenausdehnungskoeffizienten führen meist zum Bruch der Verbindung. Korrosion, bedingt durch den elektrochemischen Potenzialunterschied, stellt eine weitere Schwierigkeit dar.¹²¹ Eine gängige Alternative besteht darin, in einer Schweiß- oder Laserlötung ohne spröde intermetallische Phase das Aluminium zu schmelzen und als Lot für den Stahl zu verwenden.¹²²

¹¹⁷ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 624.

¹¹⁸ Vgl. LANXESS Deutschland GmbH (2006).

¹¹⁹ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 652 – 662.

¹²⁰ Weitere Informationen zum Thema „Ressourceneffizienz der Fügeverfahren“ finden Sie in der VDI ZRE-Kurzanalyse Nr. 16 (vgl. Drechsler, K.; Kirmes, S. (2016))

¹²¹ Vgl. Friedrich, H. E. (2013), S. 625.

¹²² Vgl. Rasche, M.; Lange, E. (2016), S. 54 – 59.

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für konstruktiven Leichtbau von Metall-Metall-Verbunden

Fertigungsprozess

- Umformung von Verbundbauteilen aus Stahl und Aluminium und somit Einsparung von Prozessschritten (Forschungsprojekt)

Fügetechnik

- Laserlöten ermöglicht das Fügen von materialsparenden Tailored Hybrid Tubes aus Stahl und Aluminium.

Fertigungsprozess

Der DFG-geförderte Sonderforschungsbereich 1153 „Tailored Forming“, angesiedelt am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover, startete 2015 mit dem Ziel, **unterschiedliche Halbzeuge aus hochfestem Stahl und Aluminium gemeinsam umzuformen**. Auch hierbei entstehen dem Anwendungsfall angepasste Teile. Im Prozess müssen die unterschiedlichen Werkstoffe stoffschlüssig zum hybriden Halbzeug verbunden und anschließend gemeinsam umgeformt und spanend nachbearbeitet werden. Damit würde erstmals das Fügen komplexer Geometrien von Metall-Verbunden möglich.¹²³

Fügetechnik

Das Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) und das Laser Zentrum Hannover (LZH) arbeiten derzeit an einer Kombination von Tailored Tubes und **Werkstoffverbunden aus Stahl und Aluminium, den Tailored Hybrid Tubes**. Ziel ist eine Masseeinsparung von 10 - 20 % für solche maßgeschneiderten Rohre, die als Achsträger, Cockpitquerträger, Sitzquerträger, Bauteile in Rücksitzlehnen oder als Aufprallschutz in Türen Verwendung werden. In einem ersten Schritt sollen mehrere Rohrabschnitte aus **Stahl und Aluminium** zu einem langen **Hybridrohr (Hybrid Tube) mittels Laserlöten zusammengefügt** werden. Mit der sogenannten Innenhochdruckumformung lassen sich anschließend angepasste Rohre umformen, deren

¹²³ Vgl. Bougueche, A. (2015).

Geometrie und Dicke an die Belastung der jeweiligen Stelle angepasst sind.¹²⁴ Im Vergleich zu verschweißten Hälften tiefgezogener Blechelemente haben die Tailored Hybrid Tubes aufgrund des geschlossenen Querschnitts hohe Steifigkeiten bei reduziertem Materialeinsatz. Dieses Projekt wird durch das BMWi und die AiF gefördert.¹²⁵

4.1.2 Metall-Kunststoff-Verbunde

Bei den Hybridmaterialien mit Kunststoff handelt es sich meist um Metall-Kunststoff-Verbunde, wobei zum Kunststoff auch faserverstärkte Kunststoffe zählen.

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für konstruktiven Leichtbau von Metall-Kunststoff-Verbunden

Produktlebensdauer

- Einsatz von CFK-Bauteilen mit korrosionsfreiem Titan für ermüdungsfreiere Bauteile (Forschungsprojekt)

Fertigungsprozess

- Laserstrukturierung von Titanwerkstoff ermöglicht Titan-CFK-Hybrid-Bauweise mit weniger Arbeitsschritten
- Kontinuierliches Fertigungsverfahren für Faser-Metall-Lamine verbessert Produktionseffizienz

Produktgestaltung

- Simulation von Verbindungen zwischen Aluminium und CFK

Produktlebensdauer

In der Luftfahrt wird erhöhte Ressourceneffizienz häufig nicht nur durch geringere Masse, sondern auch durch die Lebensdauererhöhung stark belasteter Komponenten erreicht. Im BMBF-Projekt „Transhybrid“ steht die Reduktion der bewegten Massen im Heckrotorbereich eines Helikopters durch den **Einsatz von CFK-Bauteilen zusammen mit korrosionsfreiem Titan** im

¹²⁴ Vgl. IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover (2014).

¹²⁵ Vgl. Förster, J. (2014).

Vordergrund. Erforscht wird die **Ermüdungsbeständigkeit** der Antriebswelle des Heckrotors mit ihren hohen Drehzahlen und der geforderten Temperaturbeständigkeit gegen Heißgase.

Fertigungsprozess

Die Arbeiten im BMBF-Projekt „Transhybrid“, das bereits im vorherigen Abschnitt „Produktlebensdauer“ aufgeführt ist, beeinflussen auch den Fertigungsprozess. **Die konventionelle Titan-CFK-Hybrid-Bauweise benötigt sechs Prozessschritte, die innovative, in „Transhybrid“ entwickelte nur vier Schritte.** Entscheidend ist die **Laserstrukturierung des Titanbauteils**, um eine definierte Verklebung zu erreichen. Weiterhin wird ein neuartiges Testverfahren begleitet, um ein Modell für ein mögliches Versagen der Klebeverbindung zu bekommen. Durch dieses Wissen wird die Schwingfestigkeit erhöht und die Antriebswelle muss seltener getauscht werden.¹²⁶

Faser-Metall-Laminat (FML), die abwechselnde Anordnung von dünnen Metallblechen mit faserverstärkten Kunststoffschichten, sind ideal für großflächige Bauteile, die auf Zug oder Biegung beansprucht werden. Sie sind dauerschwingfest und schadenstolerant. Genutzt werden sie im Flugzeugbau, etwa beim Airbus A 380 aus Aluminium und duroplastischem GFK. Nachteile sind die sequenzielle Fertigung mit langen Prozesszeiten und die mangelnde Umformbarkeit nach der Fertigung.

Im DFG-geförderten Bundesexzellencluster „MERGE“ wurde ein **kontinuierliches Fertigungsverfahren** entwickelt, das die **Produktionseffizienz wesentlich verbessert** und ein Umformen der Halbzeuge ermöglicht. Basis bleibt eine Aluminiumlegierung, neu hingegen ist der Einsatz thermoplastischer, faserverstärkter Verbundwerkstoffe, hergestellt aus Lagen von Faser-Folien-Bändern aus Polyamid 6 oder Polypropylen mit unidirektional angeordneten Endlosfasern, wahlweise aus Glas-, Basalt- oder Kohlenstofffasern. Die Bänder als Vorprodukte werden in einem kontinuierlichen Prozess hergestellt und aufgewickelt.

An der Technischen Universität Chemnitz wurde als geeignete Vorbehandlung eine spezielle Haftvermittlungsschicht entwickelt, die während des

¹²⁶ Vgl. Hombergsmeier, E. (2014), S. 11 f.

thermischen Verpressens erzeugt wird und durch Inline-Fertigung großserienfähig ist. Die Versuche an der TU Chemnitz wurden bisher mit Batch-Fertigung gefahren. In Zukunft sollen konzeptionell alle Komponenten als Halbzeuge von der Rolle in einem Prozessschritt verarbeitet werden. Muster aus drei Metall- und zwei Kunststofflagen aus kohlenstofffaserverstärktem PA 6 mit etwa 4 mm Dicke haben mit duraplastischen FML vergleichbare Biegefestigkeiten und Biegesteifigkeiten. Sie sind durch Tiefziehen umformbar und werden im Automobilbau als Dachquerträger und Querlenker erprobt.¹²⁷

Produktgestaltung

Eine Alternative zu einer ausgefeilten Messtechnik in der Produktion stellt die Simulation der Klebeverbindungen in der Entwicklungsphase dar. Diesen Ansatz verfolgte der Automobilzulieferer Brose in Coburg im Rahmen des BMBF-Projekts „REAL4HYBRID - **Simulation von Verbindungstechniken zwischen Aluminium und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen**“. Die Brose-Leichtbautür besteht aus CFK und Aluminium. Stanznietverbindungen unterstützen die Klebung, da sie die sofortige Festigkeit der Verbindung herstellen. Die Rechenzeit und der Arbeitsaufwand für Simulationsmodelle von Klebeverbindungen waren bisher zu lang. Die neue Software der Weimarer Dynardo GmbH, die einfache Laborversuche zur Modellbildung heranzieht, ermöglicht eine um Wochen bis Monate kürzere Entwicklungszeit, geringere Kosten und den kompletten oder zumindest teilweisen Verzicht auf physische Prototypen.¹²⁸

4.2 Strukturoptimierung/Strukturleichtbau

Die Strukturoptimierung von Bauteilen im Leichtbau dient insbesondere dem Einsparen von Material bei optimaler Lastauslegung und Spannungsreduktion. Grundlagen zur Strukturoptimierung sind beispielsweise bei Lothar Harzheim zu finden.¹²⁹ Für die vorliegende Kurzanalyse werden zwei Kategorien bei der Strukturoptimierung unterschieden: Topologieoptimierung und Bauteilstrukturierung.

¹²⁷ Vgl. Nestler, D. et al. (2015), S. 20 – 25.

¹²⁸ Vgl. Dlugosch, G. (2016).

¹²⁹ Vgl. Harzheim, L. (2007).

Innovative Leichtbaulösungen mit großen Einsparpotenzialen bietet die Anwendung bionischer Verfahren. Biologische Konstruktionen entstehen mit möglichst wenigen verschiedenen Materialien in einem hierarchischen Aufbau unter minimalem Ressourcen- und Energieaufwand. Trotzdem sind sie meist sehr stabil, biegeelastisch und oft multifunktional.¹³⁰ Biologische Vorbilder für technische Leichtbaulösungen sind beispielsweise das Wachstum der Bäume oder Knochen der Säugetiere, der Aufbau pflanzlicher Halme, die Schalenstrukturen mariner Lebewesen und auch optimale selbstorganisierende Strukturierungen wie die Wabenkonstruktion von Honigbienen. Die Umsetzung biologischer Inspirationen in technische Lösungen erfordert je nach Anwendungsfall den Einsatz unterschiedlicher Konstruktionsverfahren. Beispiele für bionischen Leichtbau und deren Ressourceneffizienzpotenziale sind in den folgenden Kapiteln zu finden.

4.2.1 Topologieoptimierung

Verfahren, mit denen eine günstige Grundgestalt eines Bauteiles im Hinblick auf seine mechanische Belastung ermittelt wird, werden klassischerweise in der Luft- und Raumfahrt sowie im Fahrzeug- und Flugzeugbau eingesetzt. Hier findet sich ein breites Methodenspektrum wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) und bionische Verfahren wie Computer Aided Optimization (CAO) und Soft Kill Option (SKO). Dabei wird CAO zur Gestaltoptimierung mit dem Ziel der Dauerfestigkeit eingesetzt und SKO zur Topologieoptimierung für Leichtbauteile. Diese computerbasierten Simulationstechniken können durch weitere Verfahren wie den Einsatz evolutionärer Algorithmen zur Bauteiloptimierung unterstützt werden. Ziel der Bauteiloptimierung ist in erster Linie das Einsparen von Material unter optimaler Auslegung der Bauteile hinsichtlich der geforderten Lastfälle. Mit den bereits am Markt etablierten und im Fahrzeugbau eingesetzten Methoden CAO und SKO können im Vergleich zu herkömmlichen Bauteilen hohe Massen- und damit Materialeinsparungen erzielt werden. Dabei sind Massereduktionen insbesondere für Gussteile wie Querlenker von 12 %, Motorhalter von 28 % oder LKW-Radnabe von 35 % möglich.¹³¹

¹³⁰ Vgl. Seitz, H. (2013), S. 30 ff.

¹³¹ Vgl. 3. Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress (2014), S. 51 ff.

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für konstruktiven Leichtbau von Metall-Kunststoff-Verbunden

Produktgestaltung

- Verbesserte Simulationsalgorithmen – insbesondere für Gussteile – optimieren Gestalt und Topologie hinsichtlich Materialminimierung
- Neue bionische Ansätze für komplexe und innovative Leichtbaulösungen unter Einsatz verschiedener Optimierungsmethoden, z. B. Evolutionary Light Structure Engineering (ELiSE)

Produktgestaltung

Die kommerzielle CAO- und SKO-Software für die Herstellung möglichst leichter Gussteile des Motorraums und der Karosserie ist für Fahrzeuge der Volkswagen AG noch nicht optimal ausgelegt und wurde daher mithilfe weiterer Algorithmen auf die werkseigenen Vorgaben angepasst. So wurden zusätzliche **Algorithmen zur Verbesserung der Steifigkeit, Spannung und Betriebslast sowie zur Minimierung von Wandstärken** entwickelt. Zusätzlich wird nach jedem Simulationsschritt geprüft, ob sich das Bauteil im Gießverfahren herstellen lässt.¹³² Durch dieses verbesserte Simulationsverfahren für **Gussbauteile lassen sich bereits bei ihrer Herstellung die optimale Gestalt und Topologie unter minimalem Materialeinsatz ermitteln.**

Ein weiteres Verfahren, mit dem systematisch sowohl individuelle als auch diverse Leichtbaulösungen für verschiedene Anwendungen entwickelt werden können, ist das bereits patentierte **Evolutionary Light Structure Engineering (ELiSE)** des Alfred-Wegener-Instituts (AWI).¹³³ Die hier verwendete Konstruktionsmethodik durchläuft fünf Phasen – von der Bauteilanalyse bis zum fertigen Produkt (Abbildung 6). In der Screening-Phase erfolgt der eigentliche bionische Abstraktionsprozess.

¹³² Vgl. Manz, H. (2015).

¹³³ Vgl. Hamm, C. (2005).

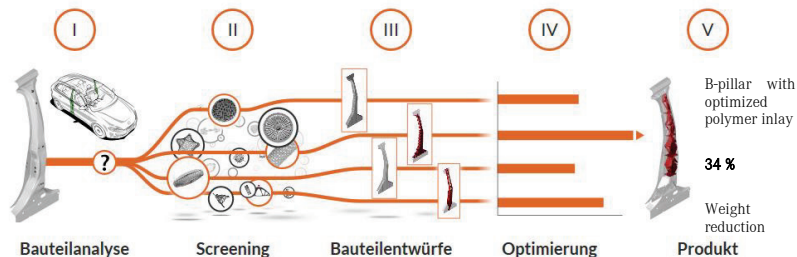


Abbildung 6: Eine Konstruktionsmethodik des bionischen Leichtbaus (ELiSE)¹³⁴

Biologische Vorbilder sind die äußerst stabilen, aber sehr leichten Schalen der Planktonorganismen (Diatomeen und Radiolarien). Anhand tausender Organismen, die in wissenschaftlichen Sammlungen und einer Datenbank des AWI hinterlegt sind, werden unterschiedliche Bauteilentwürfe erstellt, die **anschließend mit Verfahren wie FEM, CAO, SKO und evolutionären Algorithmen** bis hin zu einem mit Computer Aided Design (CAD) erzeugten Modell des gewünschten **Produkts optimiert** werden.¹³⁵ Mit diesem Verfahren können Leichtbaulösungen für Bauteile entstehen, die mit herkömmlichen Kreativmethoden oder klassischen Konstruktionsansätzen nicht gefunden werden. Sie haben das Potenzial einer Masseinsparung von mehr als 50 % gegenüber einem konventionellen Bauteil.¹³⁶ Insbesondere die additiven Verfahren wie der 3D-Druck bieten hier großes Potenzial zur Material- und Energieeinsparung sowie zur Funktionsintegration im Herstellungsprozess. Dies konnte eindrucksvoll am Prototyp eines Rahmens für ein Faltrad (Bionic Bike) gezeigt werden. Der bionisch optimierte und aus Aluminium lasergesinterte Rahmen wiegt 2,1 kg gegenüber rund 5 kg eines herkömmlichen Rahmens. Durch die Integration von LED-Beleuchtung und Kabeleinführungen erreicht dieses Modell eine Masseinsparung von 60 %.¹³⁷

Die Möglichkeit, während der Screening-Phase auf mehrere Konstruktionsprinzipien der Natur zurückzugreifen, ermöglicht den Entwurf multipler Bauteilkonzepte mit z. T. unterschiedlichsten Fertigungsverfahren und Ma-

¹³⁴ Afred-Wegener Institut (2016).

¹³⁵ Vgl. Maier, M. et al. (2015), S. 34 – 39.

¹³⁶ Vgl. Strauß, O. (2015).

¹³⁷ Vgl. Strauß, O. (2015).

terialkonzepten. Durch eine Bewertung der Ressourceneffizienz der diversen Lösungen können neben der Leistungsfähigkeit eines Konzeptes auch erste Abschätzungen der benötigten Ressourcen mathematisch berücksichtigt und als ein Zielkriterium in der 4. Phase optimiert werden. Ein Vergleich der Konzepte untereinander ermöglicht anschließend die gezielte Auswahl der effizientesten Bauweise.

Um dieses innovative und ressourceneffiziente Verfahren weiter zu verbessern und einer Vielzahl an Industriepartnern zur Verfügung zu stellen, plant das AWI zusammen mit dem Institut für Fahrzeugkonzepte im DLR die Weiterentwicklung des Verfahrens. Ziel ist, in einem integrierten Produktentwicklungsansatz die gesamte Wertschöpfungskette zu berücksichtigen. Ressourcenschonung, wirtschaftliche Produktion und die Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit sollen hier bereits bei der Produktentwicklung einfließen.

4.2.2 Bauteilstrukturierung

Die Verbesserung der Steifigkeit von Leichtbauteilen wird immer häufiger durch eine Strukturierung der Materialien oder Halbzeuge erzielt. Durch die höhere Steifigkeit können deutlich dünnere Materialdicken bei gleich bleibender oder sogar noch verbesserter Steifigkeit verwendet und so ein nicht zu unterschätzender Anteil an Material eingespart werden. Einsatzbereiche sind in erster Linie Bleche aus verschiedenen Metallen und Legierungen. Eine Strukturierung kann aber auch für Kunststoffe oder Papier und Pappe interessant sein. Strukturierte Bleche haben eine dreidimensionale Geometrie, die eine bessere Steifigkeit, Wärmeleitfähigkeit und einen verminderten Körperschall aufweist. Trotz der vielen Vorteile strukturierter Bleche gibt es bei der Verarbeitung noch Herausforderungen, da sich das Material bei Umformungsprozessen anders verhält als nicht strukturierte Materialien.

4.2.2.1 Sickenoptimierung

Ein Verfahren, um materialeffiziente, steife und an verschiedene Lastfälle angepasste dünne und damit meist leichtere Bleche herzustellen, ist das Sicken. Das Versehen von Blechen mit Sicken der unterschiedlichsten Geometrien stellt ein lange bekanntes und regulär eingesetztes, meist softwarebasiertes Verfahren dar, Leichtbauprodukte herzustellen. Die Anforderungen an die Funktionen von Sicken sind sehr vielfältig. Beispiele dafür sind

Massereduktion, Erhöhung des Flächenmomentes oder Veränderung der Schwerpunktlage, Veränderung der Reaktionskräfte und -momente oder Verringerung des Rückfederungsverhaltens, Erzielen eines definierten Deformationsverhaltens in Crashelementen und Oberflächenvergrößerung oder Strömungsführung.¹³⁸

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für konstruktiven Leichtbau durch Sickenoptimierung

Produktgestaltung

- Optimierung von Sicken z. B. hinsichtlich Schweißnahtspannungen oder Materialeffizienz durch Einsatz evolutionärer Algorithmen

Produktgestaltung

An Bauteile werden häufig mehrere und dabei sich oft widersprechende Anforderungen (z. B. geringe Blechdicke, hohe Steifigkeit, ungleich verteilte Lastfälle) gestellt. In kommerziellen **Softwarelösungen für Versickungen** können ggf. nicht alle Anforderungen optimal berechnet werden. Eine Lösung der Volkswagen AG in Braunschweig besteht darin, die Ergebnisse, die mit kommerzieller Software erzielt werden, hinsichtlich auftretender **Schweißnahtspannungen mit Hilfe evolutionärer Algorithmen deutlich zu verbessern**. Der Fertigungsprozess für Karosseriebauteile wurde dahingehend verbessert, dass die Schweißnahtspannung um 37 % reduziert werden konnte.¹³⁹ Mit dem Einsatz evolutionärer Algorithmen ist auch eine Optimierung von Sicken hinsichtlich weiterer Parameter zur maximalen Materialeffizienz oder Fertigungsrestriktionen im Herstellungsprozess möglich.¹⁴⁰

4.2.2.2 Wölbstrukturierung

Die Wölbstrukturierung unterscheidet sich von Verfahren zur Strukturierung wie dem Hydroforming, Prägen oder Sicken dadurch, dass sich eine

¹³⁸ Vgl. Reitter, G.K. (2013).

¹³⁹ Vgl. Manz, H. (2015).

¹⁴⁰ Vgl. VDI 6224 Blatt 1:2012-06.

vier- oder sechseckige Struktur durch einen energieeffizienten Selbstorganisationsprozess herausbildet.

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für konstruktiven Leichtbau durch Wölbstrukturierung

Energie

- Herstellung von Wölbstrukturierung spart Energie durch Selbststrukturierungsprozess bei Raumtemperatur

Fertigungsprozess

- Wölbstrukturierungsprozess für kontinuierliche Bänder spart Material und verbessert mechanische Eigenschaften

Energie

Der Prozess der Wölbstrukturierung ist besonders energie- und ressourcensparend. Für das Ausbilden der **Wölbstruktur** ist ein hoher Außendruck zuständig, der innerhalb eines Zylinders auf das Material aufgebracht wird. Die sich selbst organisierenden Strukturen entstehen bei Überschreiten eines äußeren Grenzdrucks spontan und stellen den irreversiblen Gleichgewichtszustand dar. Wenn dem System möglichst viele Freiheiten zur Verformung gegeben werden, entstehen automatisch wabenförmige Sechsecke als stabilste Struktur.¹⁴¹ Dieses Verfahren zur Herstellung dünner, biegefesten Halbzeuge und Vorprodukte wurde von der Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH entwickelt und ist insbesondere dadurch **energiesparend, dass der Strukturierungsprozess bei Raumtemperatur stattfindet und außer dem Aufbringen des Initialdrucks keine weitere Energie benötigt**. Die Wanddicken können so stark reduziert werden, dass bei gleichbleibender oder besserer Stabilität bis zu 30 % Material eingespart werden können.¹⁴²

Fertigungsprozess

Mittlerweile wurde das Verfahren der **Wölbstrukturierung** dahingehend erweitert, dass **kontinuierliche Bänder strukturiert werden können**. Im

¹⁴¹ Vgl. Sterzing, A. (2005), S. 28 – 31.

¹⁴² Vgl. Seitz, H. (2013), S. 30 ff.

Automobilbereich findet dieses Verfahren beispielsweise bei dem Karosserieboden des Konzeptcar C90 von Opel oder der Rückwand des Mercedes SLK aus Aluminium 6016 Anwendung. Dieses in Serie produzierte Bauteil ist besonders platzsparend bei geringer Masse und hoher Steifigkeit. Zusätzlich sorgt die Wölbstrukturierung für gute geräuschkämpfende Eigenschaften.¹⁴³

Ein weiteres Beispiel aus dem Fahrzeugbau ist eine leichte Katalysatoreinhausung aus Edelstahl. Diese Ummantelung wird für das Unternehmen Emitec produziert und in dem Motorrad-Modell R1200GS von BMW eingebaut. Eine deutliche **Materialeinsparung von bis zu 40 %** kann durch den lediglich 0,5 mm dünnen Mantel erzielt werden. Die ursprüngliche Einhausung hat eine Wandstärke von bis zu 2 mm. Außerdem weist sie eine **bis zu 65 % verbesserte Steifigkeit** und bessere Haltbarkeit bei thermischen Spannungen auf.¹⁴⁴ Neben der deutlichen Materialeinsparung ergeben sich aufgrund der längeren Lebensdauer Vorteile im Hinblick auf die Verwertung.

4.2.2.3 Faltechniken

Weitere, schon seit langem in der Architektur bekannte und eingesetzte Methoden, um an spezifische Lastfälle angepasste Leichtbauprodukte herzustellen, sind die verschiedenen Faltechniken. Eine Übersicht ist bei Arch+ zu finden.¹⁴⁵

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für konstruktiven Leichtbau durch Faltechniken

Produktgestaltung

- Einsatz der Faltechnik Origami in industriellen Anwendungen, z. B. Sandwichbauweise mit Kern aus Falzwaben, Faltungen auf kleinstmöglichem Raum oder Faltungen ganzer Leichtbau-Robotereinheiten

¹⁴³ Vgl. Mirtsch, F. (2016).

¹⁴⁴ Vgl. Continental Emitec GmbH (2016).

¹⁴⁵ Vgl. ARCH+ (1996).

Fertigungsprozess

- Falstechniken können Prozessschritte wie Kleben, Schweißen oder Nieten reduzieren bzw. ersetzen
- Einsatz von Industrierobotern ermöglicht automatisiertes Falten von Metallblechen ohne zusätzliche Formwerkzeuge

Produktgestaltung

Die alte japanische **Falstechnik Origami** wird vermehrt für **industrielle Anwendungen adaptiert** und teilweise bereits eingesetzt. Mit einem 1:1-Modell wollte beispielsweise der Autobauer Lexus zeigen, dass ein Leichtbau-Auto aus gefalteter Pappe herstellbar und fahrfähig ist.¹⁴⁶ Auch die Foldcore GmbH konnte beispielsweise zeigen, dass es möglich ist, Papier so zu falten, dass bei 10 g Papiermasse eine Last von 10 t getragen werden kann.¹⁴⁷ Allerdings gibt es auch industrielle Anwendungen in Schiffbau und Luftfahrt, mit denen Leichtbauwerkstoffe aus Metall, Kunststoffen oder Papieren und Pappen in Form von Faltkernen durch isometrische Faltungen hergestellt werden können. Diese **Faltdkerne** zeichnen sich dadurch aus, dass variable Formen erzeugt werden können, die der Zielform entsprechen und in einem kontinuierlichen Verfahren hergestellt werden können.¹⁴⁸ Für Airbus wurde beispielsweise ein Prototyp für einen Flugzeugrumpf mit dem Ziel, 40 % der Kosten und 30 % der Masse einzusparen, entwickelt. Die so entstandene **Sandwichbauweise verfügt über einen leichten Kern aus Faltdwaben** und ist multifunktional sowie drainagefähig.¹⁴⁹

Die National Aeronautics and Space Administration (NASA) hat sich der Origami-Technik bedient und im Jahr 2014 ein leichtes, auf **extrem geringem Raum faltbares Solarpanel** entwickelt.¹⁵⁰ Das Panel hat im gefalteten Zustand einen Durchmesser von 2,70 Metern und umfasst ausgestreckt 25 Meter. Gewicht und Raumbedarf stellen aufgrund der hohen Transportkosten

¹⁴⁶ Vgl. Auto-Service.de (2015).

¹⁴⁷ Vgl. Foldcore GmbH (2016a).

¹⁴⁸ Vgl. Foldcore GmbH (2016a).

¹⁴⁹ Vgl. Foldcore GmbH (2016b).

¹⁵⁰ Vgl. Gosch, W. (2014a).

ins All in der Raumfahrt entscheidende Kriterien dar, und so gibt es ebenfalls bereits **faltbare Roboter**, die ins Weltall geschickt werden können. Sie bestehen lediglich aus Papier, zwei Motoren mit Batterien und einer Steuereinheit.¹⁵¹ Die Herausforderung lag darin, das **am besten geeignete Faltmuster** zu finden. Dieser leichte und im Urzustand flache Roboter spart ebenfalls Gewicht und Raum. Er baut sich innerhalb von vier Minuten selbständig zusammen und kann seine vorgesehene Arbeit aufnehmen. Denkbar ist auch die Herstellung eines faltbaren, sich selbst aufbauenden Roboters mittels additiver Verfahren aus haltbareren Materialien.¹⁵²

Fertigungsprozess

Es gibt eine Vielzahl von Vorteilen und Ressourceneffizienzpotenzialen, die durch Falntechniken ausgeschöpft werden können. So können **komplexe Bauteile beispielsweise aus einem Stück Material gefertigt** werden. **Prozessschritte wie Kleben, Schweißen oder Nieten können entfallen**. Da gefaltete, ebene Werkstoffe wie Bleche durch Faltungen besonders stabil werden, ergeben sich zudem ein geringerer Materialverbrauch, effiziente Produktionsabläufe und kürzere Produktionszeiten. Auch können gefaltete Produkte, die erst an ihrem Einsatzort auf ihre vollständige Größe entfaltet werden, platzsparend und logistisch effizient transportiert werden.

Der Prozess des Faltens von Metallen bedarf in der Regel eines großen Kraftaufwands. Für die Faltung komplexer Origami-inspirierter Strukturen wird ein automatisierter Prozess benötigt. Das Unternehmen RoboFold aus London hat ein Verfahren entwickelt, mit dem **Metallblechstrukturen aus einem Stück gefaltet** werden können. Auf Basis von CAD-Daten bringen zwei **Industrieroboter** das Metall in die gewünschte Form, **ohne dass dafür weitere Formwerkzeuge** benötigt werden.¹⁵³ Die Roboter können Geometrien und Formen falten, die bisher nicht industriell gefertigt werden konnten. Dieses Verfahren ist derzeit vor allem für Einzelstücke und Kleinserien aus Metallblechen interessant, da dafür keine weiteren Werkzeuge oder Prozessketten geschaffen werden müssen.

¹⁵¹ Vgl. Gosch, W. (2014b).

¹⁵² Vgl. Gosch, W. (2014b).

¹⁵³ Vgl. RoboFold (2016).

4.3 Funktionsintegration

Funktionsintegration ist die Zusammenführung verschiedener Funktionen (z. B. Aktorik, Sensorik, Beleuchtung, Leitungen, Antennen) in einem Bauteil. Die Herstellung des Bauteils, aber auch das Bauteil selbst, wird dadurch komplexer. Dafür werden jedoch für die Herstellung des Produkts weniger Bauteile benötigt und es werden Produktionsschritte eingespart. Neben einer nennenswerten Massereduktion können auch Aufwand, Kosten und Baupraum reduziert werden.

Meist wird die Funktionsintegration in Zusammenhang mit Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen genannt. Einzelne Komponenten wie Aktuatoren oder Sensoren lassen sich leicht beim Herstellungsprozess in die Lagen aus Faserverbünden integrieren. Außerdem besitzen Kohlenstofffasern selbst eine elektrische Leitfähigkeit, wodurch sie als Sensoren eingesetzt werden können. Einen guten Überblick über die Forschung für den Einsatz von Carbonfasersensoren (CFS) in Leichtbauteilen im Automobil- und Flugzeugbau ist bei Alexander Horoschenkoff zu finden.¹⁵⁴ Zusatzfunktionen, die in Faserverbundwerkstoffe integriert werden können, sind beispielsweise die Integration von Funktionen in das Bauteil wie Druck- und Temperatursensoren, die Integration von elektrischen und thermischen Eigenschaften, z. B. durch Carbon-Nano-Tubes (CNT), oder die Nutzung der elektrischen Eigenschaften der Carbonfasern selbst als Sensorsystem. Diese können beispielsweise als Detektoren zur Qualitätsüberwachung der Bauteile hinsichtlich Delamination oder Mikrorissen genutzt werden.¹⁵⁵

Die Funktionsintegration ist aber nicht auf Faserverbundwerkstoffe beschränkt. Beispielsweise können bei der Herstellung von Bauteilen mit generativen Verfahren wie dem 3D-Druck in unterschiedliche Werkstoffe ebenfalls zusätzliche Funktionen integriert werden.

Ein kleiner, aber sich schnell entwickelnder Bereich für Leichtbauwerkstoffe betrifft die technischen Textilien. Der Textil-Markt wird von der Landesagentur Leichtbau BW GmbH als ein interessanter Zukunftsmarkt bewertet, der

¹⁵⁴ Vgl. Horoschenkoff, A. (2014), S. 28 – 33.

¹⁵⁵ Vgl. Horoschenkoff, A. (2014), S. 28 – 33.

im Bereich Leichtbau und Funktionsintegration ein hohes Potenzial aufweist.¹⁵⁶ Eine Übersicht über technische Textilien und ihren Einsatz im Leichtbau ist bei Chokri Cherif zu finden.¹⁵⁷ Hier werden Beispiele für eine Funktionsintegration in technischen Textilien, wie das Zuführen und Einarbeiten elektrisch leitfähiger Fasern in das Gewebe, Garne mit integrierten Glasfilamenten zur Verstärkung oder mit Komponenten zur Selbstreparatur sowie die Einarbeitung von Spezialfasern zur Schwingungsdämpfung, gegeben.¹⁵⁸

Einsatz und Anwendung technischer Textilien werden in großem Umfang in Deutschlands größtem Textilforschungszentrum, dem Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf (ITV Denkendorf), erforscht und entwickelt. Ein Bereich befasst sich mit der Funktionsintegration und Funktionalisierung von Textilien (Smarte Textilien), die auch für den funktionalen Leichtbau eingesetzt werden können.¹⁵⁹ Die Funktionen können direkt in das Textil und nicht in das Bauteil eingearbeitet werden. Sofern diese Textilien für Leichtbauanwendungen genutzt werden, bietet die Funktionalisierung einen weiteren Vorteil hinsichtlich der Komplexität der Bauteile. Anwendungsbeispiele in Textilien sind auch hier die verschiedenen Sensoren, Vibrationsdämpfung, Formadaption, Lärmreduzierung, Beleuchtung (selbstleuchtende oder fluoreszierende Garne), Kommunikation (Mikrofone, Lautsprecher), Erwärmung (fädige Heizelemente), Energiespeicherung (Wärme, Photovoltaik, Piezofasern).¹⁶⁰ Die Integration von Sensortechnik in sicherheitsrelevante Bauteile kann in Zukunft dazu beitragen, derartige Bauteile in allen Beanspruchungsfällen überwachbar und damit sicherer zu gestalten.

¹⁵⁶ Vgl. Leichtbau BW GmbH (2014), S. 12 ff.

¹⁵⁷ Vgl. Cherif, C. (2011).

¹⁵⁸ Vgl. Cherif, C. (2011).

¹⁵⁹ Vgl. Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (2016).

¹⁶⁰ Vgl. Planck, H. (2013).

Ressourceneffizienz-Maßnahmen für Funktionsintegration im Leichtbau

Produktgestaltung

- Bauteile aus formvariablem Faserverbund mit integrierter Aktorik und Sensorik können an Lastfälle angepasst werden
- Materialeinsparung durch Integration von Leuchtelementen in tragende CFK-Strukturen
- Materialeinsparung durch Integration von Bauteilen des Motors in tragende CFK-Radstrukturen
- Materialeinsparung durch Integration von Batteriesystemen in tragende Aluminiumrahmenstrukturen
- Faserverbundwerkstoffe mit integrierten Funktionen wie Schall- und Wärmedämmungen, thermischen, sensorischen oder elektrischen Funktionen sowie Flüssigkeits- und Energiespeicher für eine PKW-Bodengruppe (Forschungsprojekt)
- Inertes PTFE in Polymeren reduziert Reibung in Lagern
- Integration von Kühlfunktion in Polymergehäuse durch Einbettung von Kupferplättchen

Fertigungsprozess

- Optimiertes Extrusionswerkzeug mit geänderter Schmelzeführung verbessert die gewünschte Orientierung von Zusatzstoffen in Spritzgussteilen

Produktgestaltung

Intelligente Bauteile aus CFK mit zusätzlichen Funktionen für die Luft- und Raumfahrt und den Verkehr erforscht und entwickelt das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR. Ausgewählte Forschungsschwerpunkte sind dabei unter anderem ein **formvariabler Faserverbund mit integrierter Aktorik und Sensorik** und die integrierte Beleuchtung.¹⁶¹

¹⁶¹ Vgl. Wiedemann, M. (2011).

Die Herstellung einer flexiblen Flügelvorderkante eines Flugzeugs mit verbesserten Flugeigenschaften ist ein Ziel eines Projekts. Durch die Einbettung einer intelligenten Struktur in die Flügelvorderkante kann die Kante des Flügels gezielt deformiert werden. Eingebettete **Sensoren messen die Verformung** und leiten diese an Steuerungseinheiten weiter. Integrierte **Aktoren können daraufhin die Ausrichtung der Struktur anpassen**. Als Sensoren und Aktoren können piezoelektrische Komposite für robuste Anwendungen eingesetzt werden. Eine Herausforderung besteht allerdings darin, dass die dafür verwendeten Komposite auf gegensätzliche Anforderungen wie maximale Aktuierung, Lasttragfähigkeit und Steifigkeit ausgelegt sein müssen. In verschiedene Bauteile können auch Leiterbahnen, z. B. für eine Leistungsverorgung, Informationsübertragung, oder Sensoren zur Bauteilüberwachung integriert werden.

In einem weiteren Projekt wird die Beleuchtung als funktionale Einheit untersucht und entwickelt, mit dem Ziel, die Anzahl von Bauteilen zu reduzieren und damit Raum einzusparen. Eine **strukturintegrierte Beleuchtung** kann entweder **durch eine Elektrolumineszenzfolie oder integrierte LED** erreicht werden. Eine A4 große und 2 mm dünne Elektrolumineszenzfolie kann als lasttragende Struktur vollständig in CFK eingebettet werden. Ein Glasfasergewebe schützt die Folie, ohne dass dieses zu erkennen ist. Im Fall der LED (120 Dioden) werden Wandstärken von 4 mm benötigt. Auch hier dient die integrierte Beleuchtung zusätzlich als lasttragende Struktur und wird ebenfalls von einem nicht erkennbaren Glasfasergewebe geschützt.¹⁶²

Ein Beispiel für Funktionsintegration in Leichtbaurädern für den Einsatz in Elektrofahrzeugen ist das vom Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF entwickelte **Faserverbundrad mit integriertem Elektromotor**.¹⁶³ Diese Entwicklung hat im Jahr 2012 in der Kategorie „Umwelt“ den Preis für eine der besten Zukunftsideen im Wettbewerb „365 Orte im Land der Ideen“ gewonnen. Bemerkenswert an diesem **Leichtbaurad aus CFK** ist, dass die **Motorglocke** mit dem inneren Bereich der Radachse verbunden wurde. Durch den Einsatz von CFK und Schaumkernen

¹⁶² Vgl. Wiedemann, M. (2011).

¹⁶³ Vgl. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF (2016).

in den Speichen konnte die Masse reduziert und die Steifigkeit erhöht werden, so dass das Rad mit CFK-Glocke nur 4,9 kg wiegt. Im Vergleich zu einem Stahlrad entspricht dies einer Massenreduktion von 60 %. In das Rad wurden neben einem Elektromotor, der mit dem Rad verbunden ist, mehrere Sensoren integriert, um auf diese Weise weitere Einsparungen hinsichtlich Bauraum, Kosten und Aufwand für die Montage umsetzen zu können.¹⁶⁴

Um das Leichtbaupotenzial von Aluminium für den Automobilbau aufzuzeigen, haben die Firma Hydro Aluminium und die fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen ein Karosseriekonzept auf Basis neuer Aluminiumlegierungen entwickelt, das eine Massenreduktion insbesondere für künftige Elektrofahrzeuge ermöglichen soll. Dabei führt **die Integration des Batteriesystems in die Lastpfade der Aluminiumkarosserie** zu einer weiteren Masseinsparung, so dass Karosserie und Batteriesystem insgesamt 115 kg leichter sind als im Referenzfahrzeug, was einer Reduktion der Masse dieser Einheiten um über 35 % entspricht.¹⁶⁵

Multifunktionelle Leichtbaumaterialien aus den verschiedenen Werkstoffgruppen haben ein großes Potenzial, zu einer verbesserten Ressourceneffizienz beizutragen. In dem Wettbewerb „Forschungscampus“ des BMBF konnte sich deshalb auch das Projekt ARENA2036 (Active Research Environment for the Next generation of Automobiles) durchsetzen und wird nun über die nächsten 15 Jahre gefördert.¹⁶⁶ Für die nächsten fünf Jahre stehen dafür fünf Millionen Euro zur Verfügung. Die Industriepartner bringen im gleichen Zeitraum 20 Millionen Euro in das Projekt ein. Partner des baden-württembergischen Forschungscampus setzen sich aus großen Maschinenbauern, verschiedenen Forschungsinstituten, der Universität Stuttgart und Daimler als Automobilhersteller zusammen. Auch das ITV-Denkendorf ist einer der Partner. Das neue Forschungsgebäude, in dem gleichfalls die „Fabrik der Zukunft“ integriert wird, entsteht auf dem Gelände der Universität Stuttgart und wird von dem Bundesland und der Universität im Umfang von 27 Millionen Euro finanziert.

¹⁶⁴ Vgl. Haubert, K. (2012).

¹⁶⁵ Vgl. Hören, B. et al. (2015), S. 44 – 49.

¹⁶⁶ Vgl. Lightweightdesign (2013).

Das Ziel des Forschungscampus und der Forschungsfabrik besteht darin, Leichtbau durch Funktionsintegration für zukünftige Anwendungen im Automobilbau darzustellen. Beispielsweise wird dies am Prototyp eines Pkw-Bodenmoduls demonstriert. Basis dafür sind Faserverbundwerkstoffe, in die **Funktionen wie Schall- und Wärmedämmungen, thermische, sensorische oder elektrische Funktionen sowie Flüssigkeits- und Energiespeicher integriert** werden (Abbildung 7).¹⁶⁷

Die Open Hybrid LabFactory (OHLF) in Braunschweig hat Produktionstechnologien im Fokus, mit denen hybride Leichtbaustrukturen in der Automobilbranche serienfähig und wirtschaftlich gefertigt werden können. Erforscht wird die gesamte Wertschöpfungskette für hybride Bauteile - von der Konzeption über den automatisierten Fertigungsprozess bis hin zum Recycling. Die Ausnutzung kombinierter Materialeigenschaften zeigt Potenziale zur Gewichtsreduzierung und Funktionsintegration auf. Durch den angepassten Materialeinsatz sind Kostenvorteile gegenüber reinen FVK-Bauteilen zu erzielen. Die als Public-Private Partnership organisierte Open Hybrid LabFactory e.V. kooperiert mit der Technischen Universität Braunschweig, mit dem Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik und mit Instituten der Leibniz Universität Hannover und der Technischen Universität Clausthal sowie der Fraunhofer-Gesellschaft. Projektunabhängig beteiligen sich industrielle Partner am Aufbau und Betrieb der Open Hybrid LabFactory.¹⁶⁸

¹⁶⁷ Vgl. ARENA2036 (2016).

¹⁶⁸ Vgl. Lippky, K. et al. (2016), S. 59 – 63.

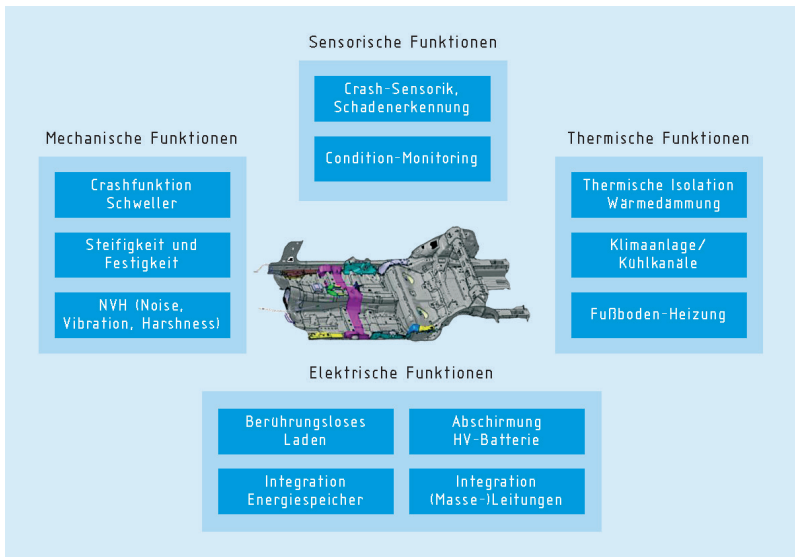


Abbildung 7: FVK-Leichtbau durch Funktionsintegration¹⁶⁹

Mit Kunststoffen anstelle von Metallen lassen sich verschleißfeste Beschichtungen und selbstschmierende Getriebe sowie Gleitlager und Zahnräder realisieren, indem Polytetrafluorethylen (PTFE) beigemischt wird. Das als Teflon bekannte Polymer ist thermisch, chemisch und mechanisch äußerst stabil und verfügt über einen **sehr geringen Reibungskoeffizienten**, verteilt sich in der Mischung allerdings inhomogen und entmischt sich. Dr. Dieter Lehmann hat die **chemische Kopplung des inerten PTFE möglich** gemacht, indem es in einem hochenergetischen Prozess aktiviert wird. Dabei teilen sich dessen Molekülketten, die an den Enden reaktionsfreudige Carbonsäuregruppen bilden. Diese koppeln sich beispielsweise mit den Trägerpolymeren Polyetheretherketon (PEEK), Polyphenylsulfid (PPS) oder Polysulfon (PSU). Nach diesem effizienten Herstellungsprozess ist der selbstschmierende Hochleistungskunststoff wie handelsübliches Kunststoffgranulat für die Weiterverarbeitung durch Spritzgießen oder Extrusion geeignet. Den Markteintritt soll das Dresdner Unternehmen perfluorence GmbH vor-

¹⁶⁹ Vgl. ARENA2036 (2016).

bereiten, eine Ausgründung des Leibniz-Instituts für Polymerforschung Dresden e.V.¹⁷⁰

Durch Zusatz von Kupferplättchen zu Standard-Polymeren bleiben diese weiterhin elektrisch isolierend, werden aber besser wärmeleitfähig. **Dreißig Volumen-Prozent Kupfer in Polyamid 6 können die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu reinem Polyamid 6 verzehnfachen.** Das ermöglicht Verlustwärme abführende Gehäuse für mechatronische und elektronische Komponenten, bei denen die aktive Kühlung durch Lüfter entfallen kann, was die Masse reduziert. Zur Modifikation werden anisometrische Zusatzstoffe genutzt, etwa Plättchen oder Fasern, da diese sich eher berühren und wärmeleitfähige Netzwerke ausbilden. Die zugesetzte Menge darf nicht zu groß sein, weil zum einen die Verarbeitbarkeit in Spritzguss oder Extrusion schlechter wird, zum anderen die Kosten der Metalle höher als die der Kunststoffe sind.¹⁷¹

Fertigungsprozess

Das im Abschnitt „Produktgestaltung“ genannte Beispiel, die Wärmeleitfähigkeit von Polyamid 6 durch die Zugabe von Kupferplättchen zu erhöhen, stellt größere Anforderungen an den Fertigungsprozess. Die anisometrische Form der Zusatzstoffe bedingt auch die anisotrope Eigenschaft der Wärmeleitfähigkeit: Sie ist in der Regel in der zur Wärmeabfuhr idealen Dickenrichtung, der geringsten Ausdehnung des Bauteils, am geringsten. Plättchen und Fasern als Zusatzstoffe richten sich bei platten- bzw. gehäuseförmigen Bauteilen hauptsächlich in Fließ- und Breitenrichtung aus. Abhilfe schafft das Institut für Kunststofftechnik an der Universität Stuttgart, das für die Extrusion von Platten ein **neuartiges Extrusionswerkzeug entwickelte, mit dem sich die Zusatzstoffe durch geänderte Schmelzuführung vermehrt in Dickenrichtung orientieren.** In Dickenrichtung steigt die Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 2 bis 3, je nach Zusatzstoffanteil, im Vergleich zur Herstellung mit einem konventionellen Werkzeug. So genügt nun ein drei-

¹⁷⁰ Vgl. Trechow, P. (2014), S. 17.

¹⁷¹ Vgl. Bonten, C. und Skrabala, O. (2015), S. 16 – 19.

Bigprozentiger Volumenzusatz an Kupfer, um die Wärmeleitfähigkeit in Dickenrichtung auf das Sechsfache der Wärmeleitfähigkeit des reinen Polyamid 6 zu steigern. Die Leistungsfähigkeit steigt also trotz des geringeren Metalleinsatzes, und das bei akzeptabler Verarbeitbarkeit.¹⁷²

¹⁷² Vgl. Bonten, C. und Skrabala, O. (2015), S. 16 – 19.

5 VERWERTUNG UND BESEITIGUNG VON LEICHTBAUPRODUKTEN

Neue technische und technologische Entwicklungen für den Umgang mit Leichtbauteilen und -produkten nach der Nutzungsphase werden hier nur dann betrachtet, sofern sie noch nicht in die vorangegangenen Kapitel eingeflossen sind und in Bezug zu neuen Leichtbauwerkstoffen oder -produkten stehen. Unter Verwertung und Beseitigung fallen Anwendungen zur Weiter- oder Wiederverwendung von Bauteilen nach der Produkt-Nutzungsphase sowie für ein ökologisch sinnvolles und wirtschaftliches Recycling. Handlungsbedarf besteht insbesondere dann, wenn lediglich eine energetische Verwertung mit anschließender Deponierung aufgrund fehlender Trenn- oder Recyclingverfahren möglich ist. Ziel sollte es zudem sein, die durch das Recycling erhaltenen Sekundärrohstoffe in einer so guten Qualität zu erhalten, dass sie gleichermaßen wie Primärrohstoffe eingesetzt werden können, um einem Downcycling so gut wie möglich entgegenzuwirken. Insbesondere für CFK gelingt dies in den seltensten Fällen.

Im Automobilbau sind die ressourceneffiziente Herstellung und Verwertung von Bauteilen auch im Hinblick auf die Vorgaben der Altfahrzeug-Verordnung geboten. Seit dem 1. Januar 2015 müssen nach dieser Verordnung 85 % der Masse eines Fahrzeugs wiederverwendet oder stofflich verwertet werden. Weiterhin wird gefordert, verstärkt Recyclingmaterial einzusetzen. Zudem besteht eine Informationspflicht über die verwertungs- und recyclinggerechte Konstruktion von Fahrzeugen und ihren Bauteilen.¹⁷³

Diese Verordnung gilt für alle neu hergestellten Fahrzeuge, sie hat eine besondere Bedeutung für Leichtbaufahrzeuge in der Elektromobilität, da diese zum Teil aus schwer zu recycelnden Werkstoffen wie CFK hergestellt werden. Aus diesem Grund fördert das BMBF seit Dezember 2014 ein umfangreiches Verbundprojekt zum Recycling von Leichtbaustrukturen künftiger Elektrofahrzeuge im Projekt „Fertigungs- und Recyclingstrategien für die Elektromobilität zur stofflichen Verwertung von Leichtbaustrukturen in Faserkunststoffverbund-Hybridbauweise (ReLei)“⁴. Die Unterstützung erfolgt

¹⁷³ Vgl. AltfahrzeugV (2012).

im Rahmen des Forschungs- und Technologiezentrums für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität (FOREL).¹⁷⁴ An dem Verbund sind Universitäten, Zulieferer, Hersteller und ein Entsorgungsunternehmen beteiligt. In den kommenden Jahren werden Grundlagenerkenntnisse in die industriellen Entwicklungs- und Prozessketten überführt und dabei eine ökonomische und ökologische Technologiebewertung (Lebenswegbetrachtung) durchgeführt. Projektinhalte sind unter anderem die Erarbeitung demontagegerechter Fügeverfahren, die Anpassung von Aufbereitungstechnologien zur Produktion von Rezyklat für den Spritzguss und die Herstellung komplexer Hybrid-Sandwich-Strukturen mit recyceltem CFK.

Das Verbundvorhaben ReLei wurde im Mai 2015 von der Bundesregierung als eines von sieben Leuchtturmprojekten ausgezeichnet, was ein besonderes Gütesiegel für herausragende Innovationen und technologischen Fortschritt darstellt.¹⁷⁵ Die Erwartungen an die Ergebnisse für die Ressourceneffizienz im Hinblick auf recyclinggerechte Herstellung und Wiederverwendung und Verwertung der Leichtbauprodukte sind bereits zu Beginn der Projektlaufzeit hoch.

Ein problematischer Bereich bei der Verwendung von CFK ist nach wie vor die schlechte Recyclingfähigkeit. Zur Rückgewinnung von in die Matrix eingebetteten Fasern eignen sich derzeit Pyrolyse- und Solvolyseverfahren. Der Energieverbrauch liegt in beiden Fällen sehr hoch, so dass die Kosten für die recycelten Fasern ebenfalls oft nicht wirtschaftlich sind. Vor allem die Solvolyse eignet sich noch nicht für einen großtechnischen industriellen Einsatz. Beim Automobilbau fallen zudem 20 - 30 % an Produktionsabfällen beim Zuschnitt von Carbonfasergelegen an, bevor sie in eine thermoplastische Matrix eingebettet werden. Die Materialkombination und feste Anbindung der Kohlenstofffasern an die polymere Matrix stellen eine große technische Hürde für das Recycling von CFK-Bauteilen dar. Aufgrund des hohen Energiebedarfs bei der Faser- und Bauteilherstellung bietet aber die Rückgewinnung von Kohlenstofffasern nach der Nutzungsphase ein großes Potenzial zur Verbesserung der ökologischen Lebenswegbilanz. Verfahren für das

¹⁷⁴ Vgl. ReLei (2016).

¹⁷⁵ Vgl. Rischer, L. (2015).

Recycling von CFK sind allerdings erst in Ansätzen entwickelt. Derzeit stellen in erster Linie die Pyrolyse und alternativ das chemische Recycling durch Solvolyse die am weitesten entwickelten Prozesse dar. Beim Einsatz dieser Verfahren ist aber eher von einem Downcycling der wiederaufbereiteten Kohlenstofffasern auszugehen (siehe Kapitel 4).^{176, 177}

Recyclatqualität

Ziel des Thüringischen Instituts für Textil- und Kunststoff-Forschung ist es, Textil-Abfälle sinnvoll zu recyceln und hochwertige Produkte daraus herzustellen.^{178, 179} In einem rein mechanischen Verfahren können Abfälle aus den unverharzten Fasergelegen aufgeschlossen und zu kurzfasrigen Recycling-carbonfasern (rCF) aufbereitet werden. Daher kosten die rCF nur 25 % des Preises im Vergleich zu neuen Fasern. Ihre mechanischen Eigenschaften erreichen bis zu 90 % der Eigenschaften von Primärfasern. Hiervon ausgehend wurden zwei Produktionswege beschrieben, auf denen Recycling-Leichtbauteile hergestellt werden können. Zum einen sind dies Granulate für den Einsatz im Spritzguss und zum anderen Organobleche.¹⁸⁰

Fertigungsprozess

Zur Herstellung von Organoblechen müssen die Prozessschritte an die Verarbeitung von Stapelfasern angepasst werden, sind dann aber nach wenigen einfachen Modifikationen in einer herkömmlichen Anlagentechnik verarbeitbar. Die Versuche mit verschiedenen Vliesen aus rCF (Nassvliese, Krempevliese, aerodynamisch gelegte Vliese) haben ergeben, dass sich gekrempelte Vliese aufgrund ihrer ausgeprägten Faserorientierung am besten eignen. Nach Einbettung in eine geeignete Matrix haben recyclingcarbonfaserverstärkte Kunststoffbleche (rCFK-Bleche) - neben den Leichtbaueigenschaften und der guten Steifigkeit - ein gutes Warmumformverhalten, so dass

¹⁷⁶ Vgl. Eickenbusch, H. und Krauss, O. (2013), S. 38 ff.

¹⁷⁷ Vgl. Meiners, D. und Eversmann, B. (2014), S. 371 - 378.

¹⁷⁸ Vgl. Reussmann, T. et al. (2014), S. 18 - 24.

¹⁷⁹ Vgl. Reussmann, T. et al. (2015), S. 26 - 31.

¹⁸⁰ Vgl. Reussmann, T. et al. (2015), S. 26 - 31.

auch komplexe Bauteile für den Automobilbau hergestellt werden können.¹⁸¹

In einem Beispiel aus dem Automobilbereich wurde eine Leichtbau-Sitzlehne in Hybridbauweise mit Vliesen aus Recycling-CFK, verschiedenen angeordneten unidirektionalen Gelegen (UD-Tapes) und mit GFK verstärktem Spritzguss hergestellt.¹⁸² Der Bauraum für die Sitzlehne wurde hinsichtlich der Lastfälle topologieoptimiert. Anschließend wurde die Außenschale aus den recycelten CFK-Vliesen hergestellt, die an ausgewählten Stellen durch GFK-Spritzguss-Rippen verstärkt wird. Eine weitere Verstärkung erfolgt durch UD-Tapes in unterschiedlicher Orientierung. Zudem wird ein metallischer Einleger aus Stahlblech zur Befestigung und Einstellung der Sitzlehne durch Spritzguss formschlüssig gefügt.¹⁸³ Dieses Verfahren ermöglicht eine ressourceneffiziente und kostenoptimierte Herstellung von Bauteilen durch ein materialschonendes und lastoptimiertes Leichtbaudesign. Beispielsweise ist die beschriebene Sitzlehne um 50 % leichter als das Vergleichsmodell.¹⁸⁴

Zur Herstellung von Granulaten aus rCF für den Einsatz im Spritzguss müssen Anpassungen der Verfahrenstechnik vorgenommen werden. rCF haben keine definierte Länge und sind voluminös, weshalb sie vor der Dosierung im Compounding pelletiert bzw. verdichtet werden müssen. Eine derartige Serierendosierung wurde vom Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung gemeinsam mit Industriepartnern entwickelt. Dazu mussten unter anderem die elektrischen Anlagen gegen Carbonfasern abgesichert werden und angepasste Schneidmesser für den verschleißfreien Einsatz der Granulatoren zum Einsatz kommen. Die Weiterverarbeitung der Granulate aus rCF kann anschließend auf herkömmlichen Spritzgussmaschinen erfolgen. Bemerkenswert ist, dass die so produzierten Bauteile vergleichbare Eigenschaften mit den gleichermaßen hergestellten Produkten aus Primärfasern aufweisen.¹⁸⁵

¹⁸¹ Vgl. Reussmann, T. et al. (2014), S. 18 – 24.

¹⁸² Vgl. Schulte, T. et al. (2015), S. 38 – 43.

¹⁸³ Vgl. Schuck, M. (2015), S. 14 – 19.

¹⁸⁴ Vgl. Schuck, M. (2015), S. 14 – 19.

¹⁸⁵ Vgl. Reussmann, T. et al. (2015).

Neben der Weiterentwicklung und Verbesserung der Verfahren selbst besteht aktuell eine zentrale Aufgabe darin, geeignete Anwendungen für wiederaufbereitete Kohlenstofffasern mit den verfügbaren Eigenschaften zu identifizieren und die entsprechenden Verfahren an die Nutzung der Recyclingfasern anzupassen. Ein Beispiel hierfür betrifft die Entwicklung von CFK-Recyclinghalbzeugen für Anwendungen im Flugzeugbau, die Airbus gemeinsam mit der CTC GmbH und weiteren Partnern in Stade vorantreibt. Die dort durch einen Pyrolyseprozess zurückgewonnenen Fasern werden als Kurzfasern für Bauteile im Flugzeuginnenraum verarbeitet. Die Anforderungen an die Fasern sind dort deutlich geringer als bei den Hochleistungsverbundwerkstoffen, die in der Rumpfstruktur zur Anwendung kommen. Im Rahmen eines Verbundprojektes wurde für die Realisierung von Kabinenbauteilen aus Recyclingfasern (rCF) eine Prozesskette zur Fertigung eines flächigen Halbzeugs entwickelt. Der entscheidende Schritt umfasste dabei die Charakterisierung und Optimierung eines rCF-Vlieses, das als Prepreg weiterverarbeitet werden kann. Bis Anfang 2017 soll eine erste Anwendung solcher rCF-Bauteile für den Flugzeuginnenraum realisiert werden.¹⁸⁶

¹⁸⁶ Vgl. Herrmann, A. und Witte, T. (2014), S. 16 – 19.

6 FAZIT

Die mit dieser Kurzanalyse vorgelegten Ergebnisse einer Literaturlauswertung verdeutlichen, dass die Ressourceneffizienzpotenziale, die vor der Nutzungsphase und bei der Verwertung und Beseitigung im Fahrzeugbau und der Luftfahrtbranche liegen, zum Teil erheblich sein können.

Ein Trend im Leichtbau zeigt sich in der Reduzierung der Bauteilanzahl bei der Herstellung eines Produkts, wodurch Verbindungen durch Schweißen, Nieten oder Kleben eingespart werden. Im günstigsten Fall verringern sich die Anzahl der Prozessschritte, der Material- und Energieverbrauch sowie das Abfallaufkommen. Zudem können Produkte, die aus wenigen Bauteilen hergestellt werden, meist besser recycelt werden, da verhältnismäßig weniger Komponenten voneinander getrennt werden müssen. Dies gilt, wenn für die resultierenden Materialverbände entsprechende Recyclingverfahren existieren. Aufgrund des großen Einflusses der Produktentwicklung auf die Verwertung und Beseitigung sollte der Dialog zwischen Herstellern und Recyclern verstärkt werden.

Ein weiterer Trend, der sich im Leichtbau abzeichnet, betrifft die Integration von funktionellen Baugruppen, wie z. B. Energiespeichern, Beleuchtungen oder Motoren in die tragenden Strukturen von Produkten zur Einsparung von Material. Nachteile ergeben sich daraus, dass die einzelnen Komponenten meist aus unterschiedlichen Materialien bestehen und sich für ein sortenreines Recycling in der Regel nicht mehr oder nur unter sehr hohem energetischen und materialintensivem (z. B. Lösungsmittel) Einsatz voneinander trennen lassen. Hier existiert noch ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Bei der Hybridbauweise besteht ein hohes Ressourceneffizienzpotenzial in der Entwicklung großserientauglicher Fertigungsverfahren. Beispielsweise werden durch die Kombination von Umform- und Fügeprozessen komplexe Geometrien bei Metall-Verbunden ermöglicht sowie die Anzahl der Prozessschritte reduziert. Forschungsbedarf liegt jedoch auch hier für das sortenreine Recycling vor.

Das additive Verfahren des 3D-Drucks bietet im Leichtbau ein hohes Ressourceneffizienzpotenzial. Eine Vielzahl an Werkstoffen, die im Leichtbau

zum Einsatz kommen, können verarbeitet werden, z. B. Stahl, Aluminium, Magnesium, Titan, technische Keramik oder CFK. Mittels 3D-Druck hergestellte Bauteile bestehen meist aus einem Material und besitzen eine freie Formgebung. Im Vergleich zu subtraktiven Verfahren (z. B. Zerspanen) reduziert sich die Anzahl der notwendigen Bearbeitungsschritte und Werkzeuge. 3D-gedruckte Bauteile sind einerseits durch den Bauraum des Druckers und somit in ihrer Bauteilgröße, andererseits durch die Fertigungsgeschwindigkeit und von daher in ihrer Großserientauglichkeit eingeschränkt. Der 3D-Druck von Leichtbauteilen stellt momentan eine Ergänzung zur klassischen anlagentechnischen Produktion dar. Es bleibt abzuwarten, wie sich diese Technologie weiterentwickelt und ob den derzeit noch bestehenden Hemmnissen so weit entgegengewirkt werden kann, dass sich auch große gedruckte Bauteile und Großserien am Markt etablieren können.

Die Frage einer ressourceneffizienten Verwertung und Beseitigung ist nicht bei allen Leichtbauwerkstoffen abschließend geklärt. In Relation zu den Leichtbauwerkstoffen Stahl und Aluminium, die mittels etablierter Techniken zurückgewonnen werden, können Magnesium, Titan, faserverstärkte Kunststoffe und Keramik-Matrix-Komposite noch nicht großserientauglich und ressourceneffizient verwertet werden.

Dieser Nachteil beim Recycling kann aber im Einzelfall in der Gesamtbilanz aufgrund der Masseinsparung in der Nutzungsphase kompensiert werden. Gleiches gilt für einen höheren Ressourcenverbrauch bei der Erzeugung und Verarbeitung. Generell ist die Nutzungsintensität entscheidend.

Eine abschließende Bewertung der Ressourceneffizienz eines Leichtbauprodukts kann nur durch die individuelle Betrachtung des gesamten Lebenswegs vorgenommen werden. Im Sinne einer Gesamtoptimierung ist deshalb die Verbesserung der Ressourceneffizienz vor und nach der Nutzungsphase weiterhin von entscheidender Bedeutung.

TEIL 2: FACHGESPRÄCH

1 PROGRAMM DES FACHGESPRÄCHS „RESSOURCENEFFIZIENZ IM LEICHTBAU“

Frankfurt/M., 15. März 2016

Moderation: Dr. Martin Vogt (Geschäftsführer VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH)

TOP 1: Begrüßung und Vorstellungsrunde

TOP 2: Vortrag: Potenziale für Ressourceneffizienz im Leichtbau - Ergebnisse einer Kurzanalyse des VDI ZRE, Dr. Oliver Krauß (VDI Technologiezentrum GmbH)

TOP 3: Vortrag: Ressourceneffizienz und Ökobilanzierung in Mobilität und Fertigung, Robert Ilg (Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart)

TOP 4: Moderierte Diskussion zu den Vorträgen

TOP 5: Vortrag: Automobilbau: Ressourceneffizienter Leichtbau in der Open Hybrid LabFactory, Prof. Christoph Herrmann (Technische Universität Braunschweig)

TOP 6: Moderierte Diskussion zu den Vorträgen

TOP 7: Leichtbau und Ressourceneffizienz dank 3D-Druck in der Luftfahrt, Peter-Leopold Pirklbauer (AIRBUS Group, Hamburg)

TOP 8: Moderierte Diskussion zu den Vorträgen

TOP 9: Abschlussdiskussion

TOP 10: Zusammenfassung und Ausblick

2 DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS

Am 15. März 2016 fand in Frankfurt am Main ein Fachgespräch zum Thema „Ressourceneffizienz im Leichtbau“ mit 23 Teilnehmern aus Forschung, Industrie, Politik und fachlichen Netzwerken statt. Zu diesem Fachgespräch hatte die VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH eingeladen. In den Diskussionsblöcken wurden Ressourceneffizienzpotenziale bei der Herstellung sowie bei der Verwertung und Beseitigung von Leichtbauprodukten erörtert. Ressourceneffizienzpotenziale, die durch den Einsatz von Leichtbauprodukten in der Nutzungsphase entstehen, sollten weitestgehend ausgeklammert werden, um einen Fokus auf die weniger betrachteten Potenziale vor und nach der Nutzungsphase zu erreichen. Neben den Fragen nach ressourceneffizienten Herstellungsprozessen und einem ökonomisch und ökologisch sinnvollen Recycling bildete die Betrachtung der Ökobilanzierung einen Schwerpunkt der Diskussion.

Aufgrund der großen Mengen an benötigten Materialien sind der Bausektor und der Maschinenbau, gefolgt von der Mobilitätsbranche, die bedeutendsten Anwendungsmärkte für Leichtbau. Im Vordergrund des Fachgesprächs stand die Mobilitätsbranche. Es wurden die Bereiche Automobilbau und Luftfahrt betrachtet, die sich insbesondere durch die unterschiedlichen gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen an die Nutzungsphase klar unterscheiden.

2.1 Lebenszyklusanalyse (LCA)/Ökobilanzierung

Die Annahme, dass Leichtbauprodukte grundsätzlich ressourceneffizienter seien als konventionell hergestellte Produkte, wurde kontrovers diskutiert. Letztlich wurde festgehalten, dass die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse dabei helfen kann, die Ressourceneffizienz eines Produktes in Leichtbauweise gegenüber einem Produkt in konventioneller Bauweise zu beurteilen. Eine Lebenszyklusanalyse kann in Bezug auf Umweltfaktoren (LCA bzw. Ökobilanzierung), Ökonomie (LCC bzw. Life Cycle Costing) und/oder Sozioökonomie (sLCA - Soziale Lebensweganalyse) durchgeführt werden.

Die Basis für eine Ökobilanzierung bilden die DIN EN ISO 14040¹⁸⁷ und die DIN EN ISO 14044¹⁸⁸. Diese Ökobilanzierung betrachtet Massen- und Energiebilanzen von Produkten und Prozessen in definierten Systemgrenzen. Entscheidend dabei ist die Skalierung auf eine funktionelle Einheit.

Die Teilnehmenden waren sich einig, dass zur Durchführung einer aussagekräftigen Ökobilanzierung die Berücksichtigung einer Vielzahl an verschiedenen Parametern wie verwendete Herstellungsprozesse, Werkstoff- und Produktarten sowie Aussagen über Einsatzort und Rahmenbedingungen zur Verwendung des Produkts gehört. Es wurde darauf hingewiesen, dass einige dieser Parameter zum Teil noch nicht vollständig in die Ökobilanzierung einfließen. Bereits beim Herstellungsprozess können wesentliche Angaben fehlen. Aber auch Daten zur Region, in der das Produkt hergestellt wird, wo und in welcher Anwendung es eingesetzt wird sowie Angaben über die Ausfallwahrscheinlichkeit fließen nicht immer hinreichend in die Ökobilanz ein. Die Berücksichtigung von Reparaturfähigkeit und Recycling in der Ökobilanz ist in Ermangelung der Kenntnisse über die Zusammensetzung von Produkten und über geeignete Bewertungsverfahren immer noch sehr schwierig. Zudem muss berücksichtigt werden, wie und wo das Produkt verwertet oder beseitigt wird.

Für die Bewertung eines Produktes hinsichtlich der Ressourceneffizienz ist es nach Ansicht der Teilnehmenden notwendig, Ökobilanzen vergleichbarer Produkte, d. h. mit gleichen funktionellen Einheiten, in Bezug auf die eingesetzten Werkstoffe, Prozesse und Prozessketten gegenüberzustellen (Benchmark). Für die ökologische Bewertung bewegter Massen ist dabei interessant, zu welchem Zeitpunkt die Ressourceneinsparungen in der Nutzungsphase mögliche zusätzliche Ressourcenaufwendungen in den übrigen Lebenswegphasen kompensieren.

Es wurden Faktoren, die eine Ökobilanz positiv beeinflussen, identifiziert, z. B. der Einsatz erneuerbarer Energien oder Gutschriften für Recycling. So fällt die Ökobilanz für ein energieintensives Bauteil aus Stahl oder Aluminium günstiger aus, wenn es mit Energie aus Wasserkraft oder Wind anstelle

¹⁸⁷ DIN EN ISO 14040:2009-11.

¹⁸⁸ DIN EN ISO 14044:2006-10.

aus fossilen Energieträgern hergestellt werden kann. Die Einbeziehung von Gutschriften für ein Recycling erfordert, dass entsprechende Recyclingtechnologien in der industriellen Praxis zum Einsatz kommen. Insbesondere bei der Bewertung von Multimaterialbauteilen gilt es, verschiedene End-of-Life-Szenarien zu evaluieren.

Zur Durchführung einer Ökobilanzierung gibt es verschiedene kommerziell verfügbare Softwarewerkzeuge, die an entsprechende Prozesse und Prozessketten angepasst werden können. In der Diskussion wurde deutlich, dass die Auswertung von Massen- und Energiebilanzen mittlerweile in deutlich kürzerer Zeit erfolgen kann, da in den Unternehmen in der Regel geeignete Modelle dazu vorliegen. Für Entwicklungsingenieure bieten solche softwarebasierten Werkzeuge eine große Unterstützung, die Aussagen über den ökologischen Punkt treffen, an dem die Ressourceneinsparungen ihrer Prozesse und Produkte höher sind als der Ressourcenaufwand.

2.2 Herstellungsprozesse

Im Anschluss an Impulsvorträge über Leichtbau im Automobilbau und in der Luftfahrtbranche mit einem Blick auf bereits erreichte Steigerungen der Ressourceneffizienz sowie weitere Ressourceneffizienzpotenziale wurde betont, dass sich das Interesse, Leichtbau zu forcieren, in beiden Branchen stark an der Nutzungsphase orientiert. Dennoch steht außer Frage, dass weiterhin erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale vor und nach der Nutzungsphase bestehen.

Bei Flugzeugen machen sich insbesondere die beträchtlichen Einsparpotenziale durch Leichtbau in der langen Nutzungsphase bemerkbar. Es wurde verdeutlicht, dass selbst eine geringe Gewichtsreduzierung der Bauteile eine extrem hohe Einsparung an Treibstoff nach sich zieht. Leichtbau ist daher eine zentrale Strategie. Es wurde angemerkt, dass in manchen Bereichen bedingungsloser Leichtbau betrieben wird. Dies gilt sowohl für die Luftfahrt als auch für Teile des Automobilbaus. Automobilhersteller tätigen beispielsweise große Investitionen in neue Fertigungsanlagen, um den Anteil von Aluminium in ihren Fahrzeugen zu erhöhen. Mit Blick auf die Ressourceneffizienz bestehen noch hohe Potenziale entlang diesen Prozessketten. Nach Aussage von Teilnehmenden sind bis zu 70 % des Materials in der Herstellungsphase von Aluminiumdruckguss Produktionsabfälle, z. B. Anguss, die

erneut eingeschmolzen werden. Als weiteres Beispiel wurde die Herstellung großer Blechteile genannt, bei der ebenfalls Produktionsabfälle wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt werden. Hier bestehen noch erhebliche Effizienzpotenziale.

Bei der Herstellung von Pkw der unteren Fahrzeugklassen mit konventionellem Antrieb und von einigen Elektrofahrzeugen liegt noch ein beträchtliches Leichtbaupotenzial vor. Insbesondere bei den Fahrzeugen im Volumensegment gilt es zu hinterfragen, wie diese Potenziale – beispielsweise Multimaterialbauweisen – wirtschaftlich und ressourceneffizient umgesetzt werden können. Hier besteht zudem noch ein vielfältiger Forschungsbedarf.

Wie in einem Vortrag vorgestellt wurde, werden in der Luftfahrt bis zum Jahr 2032 durch Austausch und prognostizierten Zuwachs der gesamten Flotte weltweit rund 35.000 neue Flugzeuge gebaut. Der globale Ressourcenverbrauch der Luftfahrt inklusive der Nutzungsphase liegt im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern sehr hoch. Allein vor dem Hintergrund der großen Mengen an benötigten und zu verarbeitenden Rohstoffen ist eine Steigerung der Ressourceneffizienz in der Produktion und im Lebenszyklus zwingend erforderlich. Um dies zu erreichen, ist eine Reihe an Anpassungen in der Produktherstellung notwendig. So muss bereits im Bauteildesign die Bewertung der Lebenszyklusdenkweise systematisch integriert werden. Dies beinhaltet optimierte Prozesse, den Einsatz ökologisch vorteilhafter Werkstoffe und alternativer Energieträger.

Für die additive Fertigung wird derzeit ein enormes Wachstum prognostiziert, worüber im Plenum durchweg Einigkeit bestand. Insbesondere für kleine Stückzahlen, für eine Reduktion von Bauteilen innerhalb eines Produkts, für die Herstellung komplexer Geometrien – z. B. mit Hinterschnitten – oder für die Reparatur vor Ort erscheinen additive Verfahren ressourceneffizient und wirtschaftlich. Beschränkungen – insbesondere im Flugzeugbau – liegen noch darin, dass die realisierbaren Bauteilgrößen durch den verfügbaren Bauraum aktueller 3D-Drucker begrenzt sind. Auch spielt der benötigte Energieaufwand für die Herstellung von Metallpulver (z. B. Titanlegierungen) eine Rolle hinsichtlich der Ausschöpfung von Ressourceneffizienzpotenzialen. Eine Steigerung der Ressourceneffizienz lässt sich meist über die Reduktion von Prozessschritten, die Verkürzung der Logistikkette,

den verringerten Einsatz von Werkzeugen und die Reduktion des Materialabfalls, der bei der herkömmlichen Produktion von Bauteilen entsteht, erreichen. Es wurde darauf hingewiesen, dass auch hier im Einzelfall betrachtet werden muss, ob ein Bauteil, das mittels additiver Fertigung hergestellt wurde, eine positive Ökobilanz aufweist.

Die Expertinnen und Experten diskutierten zudem über die Perspektiven, die sich aus der Etablierung von Innovationen ergeben: Neue Technologien wie der 3D-Druck können neuen Geschäftsmodellen den Weg ebnen, die den Innovationstransfer von Forschungsergebnissen in die Praxis unterstützen und einen Transfer auf andere Branchen ermöglichen. Auf diese Weise kann ein breiterer und auf verschiedene Branchen ausgeweiteter Einsatz neuer ressourceneffizienter Technologien begünstigt und beschleunigt werden.

Auch die Bioökonomie bietet nach Ansicht einiger Teilnehmenden Chancen für mehr Ressourceneffizienz. Eine Steigerung der Ressourceneffizienz lässt sich beispielsweise erreichen, wenn vermehrt nachwachsende Rohstoffe als Leichtbauwerkstoffe in Betracht gezogen werden. So kann sich Holz (z. B. beplanktes Balsaholz) für den Einsatz im Automobilleichtbau eignen. Der Abfallstoff Lignin aus der Papierherstellung könnte sich für die Substitution erdölbasierter Vorprodukte zur Herstellung von Kohlenstofffasern für Faserverbundwerkstoffe eignen. Auch Bambus ist ein leichter, biegeelastischer und fester Naturwerkstoff, der auf Grund seiner hohen Wachstumsraten in der Lage ist, große Mengen an CO₂ zu binden, und somit einen positiven Einfluss auf die Ökobilanz ausüben kann.

Trotz der grundsätzlich positiven Einschätzung wurde angemerkt, dass derzeit insbesondere in der Gewährleistung reproduzierbarer Ergebnisse beim Einsatz von Naturmaterialien Schwierigkeiten bestehen, die wachstums- und anbaubedingt schwankende Qualität auszugleichen. Im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe gibt es noch einen großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf, wenn es um geeignete Fertigungstechnologien sowie die Gewinnung und Herkunft der Rohstoffe geht. Im Automobilbau ist eine Verwertungsquote von 95 % gefordert, von denen 85 % stofflich erfolgen müssen. Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe scheidet aus diesem Grund häufig aus.

2.3 Recycling

Bei der Verwertung und Beseitigung von Abfällen nach der Nutzungsphase besteht bei Akteuren häufig ein unterschiedliches Verständnis hinsichtlich des Begriffs "Recycling". Zur Schaffung einer gemeinsamen Basis wurde dieser Begriff in der VDI Richtlinie 4800 Blatt 1 in Anlehnung an das Kreislaufwirtschaftsgesetz definiert als „Verwertungsverfahren, durch das Abfälle und Rückstände zu Produkten und Materialien entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; dies schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“¹⁸⁹. Bei einem qualitativ geringwertigen Einsatz handelt es sich um Downcycling.

Die Wiederverwendung von Aluminiumschrott ist bereits seit langem etabliert. Dennoch gibt es hier Optimierungspotenziale, da die Legierungen des Schrotts, der zum Aluminiumwerk zurückgeführt wird, meist nicht bekannt sind und der Schrott nicht sortenrein ist. Die Legierungen sind entscheidend für die Werkstoffeigenschaften. Eine Deklaration über Herkunft und Zusammensetzung der Abfälle würde den Aufwand der Analyse beim Hersteller deutlich verringern und damit das Recycling vereinfachen. In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, dass diese Tatsache nicht nur für Leichtbauprodukte gilt, sondern ein grundsätzliches Problem bei der Verwertung und Beseitigung darstellt.

Die Teilnehmenden beschäftigten sich anschließend mit der Frage eines Recyclings von Faserverbundwerkstoffen. Für eine Verwertung von CFK werden Pyrolyse und Solvolyse eingesetzt, um die eingebetteten Fasern vom Harz zu trennen, so dass die Carbonfasern wiederverwendet werden können. Es wurden beispielsweise CarboNXT in Stade und ELG in Großbritannien genannt, in deren Anlagen großtechnisch die Pyrolyse zur Rückgewinnung von Carbonfasern eingesetzt wird. Dieses Verfahren ist aber sehr energieintensiv und weder wirtschaftlich noch ressourceneffizient. Die zurückgewonnenen Fasern sind kürzer und können nur noch zur Herstellung von Bauteilen mit geringeren Anforderungen an Festigkeit und Steifigkeit, etwa in

¹⁸⁹ VDI 4800 Blatt 1: 2016-02.

Form von Vliesen, genutzt werden (Downcycling). Es gibt Bestrebungen, bis zum Jahr 2020 85 % des als Abfall anfallenden CFK zu recyceln. Für die Expertinnen und Experten ist momentan nicht ersichtlich, wie dies in diesem Zeitraum erfolgen kann. Um geeignete Technologien bereitzustellen, werden nach ihrer Einschätzung ca. weitere zehn bis 15 Jahre Entwicklungszeit benötigt. Dies trifft vor allem auf die Solvolyse zu, die derzeit nur im Forschungsmaßstab betrieben wird. Insbesondere anfallende CFK aus dem Flugzeugbau stellen ein Problem dar. Dies gilt sowohl für die in großem Maße entstehenden Produktionsabfälle als auch für Abfälle, die der Verwertung und Beseitigung zugeführt werden. Carbonfaserabfälle, die in der Produktion anfallen, können ohne aufwändige Vorbehandlung für Produkte verwendet werden, die kurze Fasern einsetzen (z. B. Vliese). Dagegen ist der Aufwand, Fasern aus dem Matrix-Material zu lösen, sehr viel höher. Insgesamt wurde hinterfragt, wie eine Verwertung oder gar ein Recycling von Faserverbundkunststoffen funktional, ökologisch und ökonomisch erfolgen kann.

Hybride Bauteile, deren Werkstoffe verklebt oder auf andere Weise fest miteinander gefügt sind, stellen für ein Recycling eine Herausforderung dar. Inwieweit ein ressourceneffizientes Recycling möglich ist, ist von den Experten und Expertinnen derzeit noch nicht einschätzbar. Dabei wurde festgehalten: Je mehr unterschiedliche Werkstoffe zur Herstellung eines Bauteils und je mehr verschiedene Fügetechniken eingesetzt werden, desto schwieriger ist das Recycling. Insbesondere der Energieaufwand für das Lösen chemischer Verbindungen fällt sehr hoch aus. Im Hinblick auf ein ressourceneffizientes und wirtschaftliches Recycling von Multimaterialsystemen besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Es wird nach Ansicht der Teilnehmenden zunehmend erforderlich, dass alle Branchen eine ressourceneffiziente Recyclingfähigkeit bereits im Produktdesign berücksichtigen und die Entsorgungsunternehmen in die Entwicklung einbinden. Gleichzeitig müssen sich die Entsorgungsunternehmen verstärkt für die Entwicklung neuer Verfahren bezogen auf ein Recycling einsetzen.

Es wurde darüber diskutiert, welchen Stellenwert Deutschland bei innovativen Recyclingtechnologien für Verbundwerkstoffe einnimmt. Hinsichtlich der Patente sehen einige Teilnehmende Deutschland nicht in einer Füh-

rungsrolle. Hier werden Japan und die USA vor China als Vorreiter betrachtet. Es wurde diskutiert, wie und unter welchen Voraussetzungen die anschließende Umsetzung in industrielle Verfahren in den jeweiligen Ländern erfolgt. Gerade bei der Umsetzung ist Deutschland, nach Aussage einiger Diskussionsteilnehmer, gut aufgestellt. Dennoch fehlen in den meisten Branchen für Hersteller in Deutschland derzeit Anreize, ein Recycling ihrer Produkte voranzutreiben. Ein Anreiz für Hersteller kann der direkte Vorteil sein, den sie aus der Entsorgung ziehen, wie von einem Teilnehmenden vorgeschlagen wurde. Dies wäre der Fall, wenn Hersteller Zugang zu den Rezyklaten aus eigenen Produkten erhielten oder sie die Entsorgungskosten einsparten. Ein weiterer Weg, um Anreize zu schaffen, der im Teilnehmerkreis erörtert wurde, betrifft die Einführung handelbarer Zertifikate. Hersteller könnten über einen Zertifikathandel verpflichtet werden, entsprechend zu den über ihre Produkte in den Verkehr gebrachten Materialien, Zertifikate zu recycelten Stoffen zu kaufen. Dies kann sowohl Anreize liefern, Materialien mit guter Recyclingfähigkeit einzusetzen, als auch dazu führen, dass Recyclingmaterial in neuen Produkten eingesetzt wird.

2.4 Rahmenbedingungen

In Bezug auf die Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen insgesamt nimmt Deutschland weltweit eine Spitzenposition ein, darüber waren sich die Teilnehmenden einig. Zukünftig gilt es, diese Position zu halten und weitere Potenziale auszuschöpfen. Ein Hinderungsgrund ist offensichtlich die mangelnde Vernetzung aller Akteure, die an dem Lebenszyklus und der Wertschöpfungskette beteiligt sind. Es wurde nachdrücklich betont, wie wichtig es ist, dass die Hersteller mit Entwicklern, Zulieferern, Verwertungs-, Entsorgungs- und Recyclingunternehmen vernetzt und an der Technologieentwicklung beteiligt werden.

Erste Ansätze werden in den verschiedenen Plattformprojekten wie dem Forschungscampus Open Hybrid Lab Factory (OHLF), dem Forschungscampus ARENA 2036 oder dem Cluster MERGE umgesetzt, in denen Produktentwicklung und -realisierung entlang dem gesamten Lebensweg betrachtet und durchgeführt werden.

Auch in der unternehmensinternen Forschung und Entwicklung werden Lösungen für verschiedene technische und technologische Fragestellungen erarbeitet, die aber aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit nicht veröffentlicht werden. Trotz des Verständnisses dafür wurde bedauert, dass Hersteller – mit Ausnahme der Automobilindustrie – häufig keine Daten über Art und Menge der im Produkt verwendeten Materialien herausgeben, um sich gegenüber Wettbewerbern zu schützen. Im Sinne der Produktverantwortung, Produkthaftung und für das Recycling ist es aber durchaus sinnvoll und notwendig, diese Daten zur Verfügung zu stellen.

Neben dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) ebenfalls die Steigerung der Ressourceneffizienz in Deutschland auf vielfältige Weise. Beispielsweise werden eine Vernetzung und ein Wissenstransfer der Akteure in Form von Runden Tischen durchgeführt. Zudem wird derzeit an einem Kompetenzatlas Leichtbau gearbeitet, der Ende 2016 im Internet veröffentlicht werden soll und in den unter anderem Entsorgungs- und Recyclingunternehmen Eingang finden. Auch eine Studie des BMWi zum Thema Industrie 4.0, die Ende 2016 fertiggestellt wird, bietet Hinweise zur Verbesserung der Ressourceneffizienz. Die Förderbekanntmachung „Leichtbaukonzepte für Straßen- und Schienenfahrzeuge“ unterstützt mit 40 Millionen Euro die Erstellung umweltgerechter Konzepte in der Mobilität. In weiteren Förderbekanntmachungen wie der Gemeinschaftsforschung für die Praxis oder in der Mittelstandförderung ZIM werden Leichtbauprojekte ebenfalls gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

3. Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress, 25./26. September 2014, ZKM Karlsruhe. Session Konstruktiver Leichtbau - Ressourceneffizienz in der Gestaltung technischer Systeme, [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.convent2.de/convent/ressourcen/pdf/Tagungsunterlagen/140925_TU_Ressourcen/Forum_13_Gesamt.pdf

Airliners.de (2015): Airbus bereitet Flugzeugteilen aus dem 3D-Drucker den Weg [online]: Airliners.de [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.airliners.de/airbus-flugzeugteilen-3d-drucker-weg/36505.

Alfred-Wegener Institut (2016): ELiSE - Von der Natur zum fertigen Produkt. Internetauftritt ELiSE, [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: elise.de

Albrecht, R. und Lange, G. (2014): Glasfaserverstärkt: Pulvermetallurgisch hergestellte Aluminiumschäume, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 6/2014

AltfahrzeugV (2002): Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung - AltfahrzeugV) [online]: Altfahrzeug-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juni 2002 (BGBl. I S. 2214), die zuletzt durch Artikel 95 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist, [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.gesetze-im-internet.de/altautov/BJNR166610997.html

ARCH+ (1996): InFormation - Faltung in der Architektur Ausgabe 131, ARCH+ 1996 (Hrsg.), [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.archplus.net/home/archiv/ausgabe/46,131,1,0.html

ARENA2036 (2016): ARENA2036 [online]: ARENA2036 e. V. [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.arena2036.de/de/

Asche, S. (2016): Keramik aus dem Drucker, VDI nachrichten, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 29. Jan. 2016, 3/4, ISSN 0042-1758.

Auto-Service.de (2015): Origami-Auto von Lexus: Verrückte Papp-Limousine mit Elektromotor – Ein Papp-Auto, das fährt! [online]: Auto-Service.de [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.auto-service.de/news/lexus/64732-origami-auto-lexus-verrueckte-papp-limousine-elektromotor.html

Bansemir, H. et al. (2007): Themenheft Forschung No. 3 – Leichtbau ISSN 1861-0269 [auch online]. Universität Stuttgart 2007 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.uni-stuttgart.de/hkom/publikationen/themenheft/03/leichtbau_03.pdf

Bayern Innovativ (2015): Bericht Material Innovativ 2015, Neue Werkstoffkonzepte für eine nachhaltige Mobilität. Bayern Innovativ Bayerische Gesellschaft für Innovation und Wissenstransfer GmbH [abgerufen am 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.bayern-innovativ.de/material2015/bericht

Bertau, M.; Müller, A.; Fröhlich, P. und Katzberg, M. (2013): Industrielle Anorganische Chemie. 4. Auflage, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN 978-3527330195.

Biokon (2015): 3D-Druck im zivilen Flugzeugbau – eine Fertigungsrevolution hebt ab [online]. BIONIKON – Bionik-Kompetenznetz, Berlin, 17. Dez. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.biokon.de/newsuebersicht/3-d-druck-im-zivilen-flugzeugbau-eine-fertigungsrevolution-hebt-ab/

Bonten, C. und Skrabala, O. (2015): Der Prozess bestimmt die Eigenschaften, chemie&more, Succidia AG, Darmstadt, Aug. 2015, 4 (2015), ISSN 2191-3803.

Bougueche, A. (2015): ... jetzt kommt das hybride Massenbauteil, Meisenbach GmbH Verlag, UMFORMtechnik 8/2015.

Cherif, C. (2011): Textile Werkstoffe für den Leichtbau – Techniken – Verfahren – Materialien – Eigenschaften. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, ISBN 978-3-642-17992-4.

Continental Emitec GmbH (2016): Der Leichtbaukatalysator ist flexibler, widerstandsfähiger und leichter [online]: Continental Emitec GmbH [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.emitec.com/technik/katalysatortraeger/leichtbaukatalysator

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2015): Der Standort Augsburg des DLR [online]. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) [abgerufen am 03. Nov. 2016] verfügbar unter: www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10298/439_read-929/#/gallery/13265

DIN EN ISO 14040:2009-11: Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement; Ökobilanz; Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006 (Environmental management; Life cycle assessment; Principles and framework); German and English version EN ISO 14040: 2006). Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 14044:2006-10: Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement; Ökobilanz; Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006 (Environmental management; Life cycle assessment; Requirements and guidelines); German and English version EN ISO 14044:2006. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Dlugosch, G. (2016): Besser kleben dank schneller Simulation, VDI nachrichten, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 12. Feb. 2016, 6 (2016), ISSN 0042-1758.

DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (2015): Mobile Robotersysteme für flexible Leichtbau-Produktionstechnik [online]. DLR, 10. Nov. 2016 [abgerufen am 12. Sep. 2016], verfügbar unter: www.dlr.de/fa/desktopdefault.aspx/tabid-10731/13411_read-44738/

Drechsler, K.; Kirmes, S. (2016): Ressourceneffizienz der Fügeverfahren [online]: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH [abgerufen am: 03. Nov. 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI-ZRE-Kurzanalyse_Nr_16_Ressourceneffizienz-der-Fuegeverfahren.pdf

Duwe, S. (2015): Herausforderung Magnesiumrecycling: Pyrometallurgische Entfernung kritischer Verunreinigungen [online]. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Nietwerder, 5. Mrz. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.vivis.de/phocadownload/2015_rur/2015_RuR_421-428_Duwe.pdf

Ehrenstein, G. W.; Amesöder, S.; Fernández Díaz, L.; Niemann, H. und Deventer, R. (2003): Werkstoff- und prozessoptimierte Herstellung flächiger Kunststoff-Kunststoff- und Kunststoff-Metall-Verbundbauteile. In: Tagungsband zum Berichts- und Industriekolloquium 2003 des SFB 396, „Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile“, Meisenbach Bamberg 2003.

Effizienzagentur NRW (2014): Innovative Wärmebehandlung steigert Energieeffizienz [online]: Effizienzagentur NRW [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.ressourceneffizienz.de/fileadmin/user_upload/Loseblatt/EFA_Loseblatt_Alunorf_RZ_web.pdf

Egger, P. (2014): Spritzgießtechnik steigert Effizienz in Faserverbundfertigung, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 1/2014.

Eickenbusch, H. und Krauss, O. (2013): Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien [online]: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf

Ellert, F. (2015): Eine Instandsetzungssystematik für Bauteile aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff. In Fortschritte in Konstruktion und Produktion: Rieg, F. und Steinhilper, R. (Hrsg.) ISBN: 978-3-8440-3441-7, M rz. 2015.

e-mobil BW GmbH (2012): Leichtbau in Mobilität und Fertigung – Ökologische Aspekte [online]: e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html?file=files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Leichtbau-Studie-Oekologische-Aspekte-150.pdf

European Aluminium Association (2013): Aluminium in cars – Unlocking the light-weighting potential [online]: European Aluminium Association [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2013/10/EAA-Aluminium-in-Cars-Unlocking-the-light-weighting-potential_September2013_03.pdf

Finus, F. (2015): Werkstofftrends: Alter Stahl neu erfunden [online]. MaschinenMarkt, 17. Aug. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.maschinenmarkt.vogel.de/werkstofftrends-alter-stahl-neu-erfunden-a-501108/

Fischer, A.; Finus, F. (2014): CFK-Composites aus dem 3D-Drucker [online]: Maschinenmarkt, Vogel Business Media [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.maschinenmarkt.vogel.de/cfk-composites-aus-dem-3d-drucker-a-455259/

Fleischer, J. et al. (2015): Materialeffiziente hybride Preforms aus Lang- und Endlosfasern, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 6/2015.

Fleischer, J. et al. (2016): Materialeffizienz im Resin-Transfer-Moulding-Prozess, VDI-Zeitung 158 (2016), Nr. 1/2.

FLUG REVUE (2015): Neues Reparaturverfahren - Reparatur von CFK-Bauteilen bei Lufthansa Technik [online]: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.flugrevue.de/flugzeugbau/maintenance/reparatur-von-cfk-bauteilen-bei-lufthansa-technik/633590

Förster, J. (2014): Der Mix macht's [online]. In: thyssenkrupp Steel Europe AG Duisburg: compact steel, 1/2014 [abgerufen am 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.thyssenkrupp-steel.com/download?p=497872A2A1336C33BB2485AA205A71E3DB0F4F8AD27E6AB5C017B4202CFE79CD67898B116D555FC56334B076174796E6A4EE1BA6A06AE59E1801CC462CB9D4DA

Foldcore GmbH (2016a): Foldcore EU [online]: [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.foldcore.eu/

Foldcore GmbH (2016b): Luftfahrt: Foldcore EU [online]: [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.foldcore.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=47:anwendungen-luftfahrt&catid=35:anwendungen-luftfahrt&Itemid=57

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF (2016): Produktkennblatt [online] Fraunhofer LBF [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.lbf.fraunhofer.de/content/dam/lbf/de/documents/Projekte-Datenblaetter/faserverbundrad-produktblatt.pdf

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2016): Leichtbauteile aus dem 3D-Drucker [online]: Fraunhofer IPA, Presseinformation März 2016 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.ipa.fraunhofer.de/leichtbauteile_3d-drucker.html

Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC: Smart Materials [online]: Fraunhofer ISC [abgerufen am: 26. Okt. 2016], verfügbar unter: www.isc.fraunhofer.de/arbeitsgebiete/smart-materials/?tx_sgzz_pi1_cc=22&L=0

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU: Leichtbau durch Hybrid-Bauweisen [abgerufen am: 26. Okt. 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/de/documents/Infoblatt/Infoblatt-Leichtbau-durch-Hybrid-Bauweisen.pdf

Friedrich, H. E. (2013): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. 1. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-1467-8.

Geltinger, A. (2014): PP-Multimaterialsysteme. Gewichtsoptimiertes Polypropylen-Hybridbauteil für das automobile Interieur: Vortrag beim Technologiegespräch Dresden, 27. Nov. 2014.

Gosch, W. (2014a): NASA nutzt Origami-Faltkunst für Solarpanels im Weltall [online]. ingenieur.de, VDI Verlag GmbH, 20.08.2014 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.ingenieur.de/Branchen/Luft-Raumfahrt/NASA-Origami-Faltkunst-fuer-Solarpanels-im-Weltall

Gosch, W. (2014b): Roboter aus Papier baut sich selbst zusammen und läuft los [online]. ingenieur.de, VDI Verlag GmbH, 08.08.2014 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.ingenieur.de/Fachbereiche/Robotik/Roboter-Papier-baut-selbst-laeuft-los

Gude, M. et al. (2015): Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität [auch online]. Forel-Studie. ISBN 978-3-00-049681-3. [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: plattform-forel.de/wp-content/uploads/2015/05/FOREL-Studie.pdf

Gutbrod, M. (2015): Tolle Oberflächen auf dem Schaum [online]. K-Zeitung, Giesel Verlag GmbH, Hannover, 17. Okt. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.k-zeitung.de/tolle-oberflaechen-auf-dem-schaum/150/4314/90871/

Hamm, C. (2005): Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodell-daten für eine technische Leichtbaustruktur. Patent DE 10356682A1, 2005.

Harzheim, L. (2007): Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendungen. Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, ISBN 978-3-8171-1809-0.

Haubert, K. (2012): CFK-Rad mit Elektromotor als Zukunftsidee ausgezeichnet. Maschinenmarkt Vogel 16.03.2012 [online]: [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.maschinenmarkt.vogel.de/cfk-rad-mit-elektromotor-als-zukunftsidee-ausgezeichnet-a-357186/

Heidenreich, B. und Göring, J. (2008): Die CMC-Werkstoffe des DLR und ihre Einsatzmöglichkeiten [online]. Vortrag [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.dlr.de/Portaldata/35/Resources/dokumente/Die_CMC-Werkstoffe_des_DLR_und_ihre_Einsatzmoeglichkeiten.pdf

Herrmann, A. und Witte, T. (2014): Für die Luftfahrt – Entwicklung von CFK-Recyclinghalbzeugen, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 5/2014.

Hochschule Landshut (2015): Grundlage für industriellen Einsatz von Magnesiumblechen geschaffen [online]. Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut, 20. Aug. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.haw-landshut.de/aktuelles/news/news-detailansicht/article/grundlage-fuer-industriellen-einsatz-von-magnesiumblechen-geschaffen.html

Hohmann, A. et al. (2015): MAI Enviro – Vorstudie zur Lebenszyklusanalyse mit ökobilanzieller Bewertung relevanter Fertigungsprozessketten für CFK-Strukturen, Fraunhofer Verlag.

Hombergmeier, E. (2014): Hybrid Füge-technologien für Leichtbauweisen bei Transportanwendungen: Vortrag beim Technologiegespräch Dresden, 27. Nov. 2014.

Hopmann, C. und Fecher, M. L. (2014): Verschnittfreie Fertigung lokal angepasster Preforms für RTM-Strukturbauteile, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 1/2014.

Hören, B. et al. (2015): Leichtbau-Aluminiumkarosserie mit neuen Legierungen, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 6/2015.

Horoschenkoff, A. (2014): Sensorelemente für funktionelle Faserverbundwerkstoffe. Lightweightdesign 2/2014, Springer Vieweg Verlag.

Ingenieur.de (2015): Aluminium mit Sonnenenergie schmelzen [online]: Ingenieur.de [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.ingenieur.de/Branchen/Stahl-Metallverarbeitung/Aluminium-Sonnenenergieschmelzen

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover (2014): Hybrid und maßgeschneidert: Neues Leichtbau-Konzept für die Autoindustrie [online]. IPH gGmbH Hannover, 25. Jun. 2014 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.iph-hanno-ver.de/de/presse/pressemitteilungen/index.php?we_objectID=1429

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (2016): ITV Denkendorf [online]: Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.itv-denkendorf.de/

IZTK – Informationszentrum Technische Keramik (2001): Foliensatz Technische Keramik für Hochschulen [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.keramverband.de/keramik/pdf/Foliensatz75dpi.pdf

Jäger, H. und Haider, P. (2014): PAN – Chancen und Strategien zur Bereitstellung alternativer C-Faser-Precursorsen, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 3/2014, S. 24 – 28.

Kaiser, O. S. (2014): Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Automobilbau. VDI ZRE Publikationen – Kurzanalyse Nr. 5 [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz, Mrz. 2014 [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-05-KFZ.pdf

Kawalla, R. (2015): Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet umformtechnisch erzeugter und verarbeiteter Magnesium-Leichtbauwerkstoffe. Vortrag auf dem 8. Nano und Material Symposium Niedersachsen – Material und Prozessinnovationen für eine ressourcenschonende Mobilität. 25. – 26. Nov. 2015, Salzgitter.

Kim, S.-H. et al. (2015): Brittle intermetallic compound makes ultrastrong low-density steel with large ductility, Macmillan Publishers Ltd., Nature 518, 77 - 79.

Kindervater, C. (2014): Ressourceneffizienz durch Leichtbau [online]. Vortrag [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.bw.igm.de/downloads/artikel/attachments/ARTID_65726_1UCbaI?name=kindervater.pdf

KlimaExpo.NRW: Aluminiumelektrolyse als virtuelle Batterie [online]: KlimaExpo.NRW [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.klimaexpo.nrw/mitmachen/projekte-vorreiter/vorreitergefunden/tri-met/

Klose, R. (2014): High-End-Bremsen für den Cinquecento? [online]. Informationsdienst Wissenschaft e.V., 2. Okt. 2014 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: idw-online.de/de/news606371

Knuth, L. (2015): Aluminiumschaum: Recyclingfähiges Material für den Leichtbau, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 3/2015, S. 20 - 25.

Koeser, O. et al. (2015): Schleuderguss von großen Ti-6Al-4V-Strukturkomponenten, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 3/2015, S. 12 - 18.

KrWG (2012): Kreislaufwirtschaftsgesetz: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen [online]: Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 1a des Gesetzes vom 20. Nov. 2015 (BGBl. I S. 2071) geändert worden ist [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf

Langen, R. (2015): Hanf ersetzt Kunststoff im Spritzguss, VDI nachrichten, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 31. Jul. 2015, 31/32 (2015), ISSN 0042-1758.

LANXESS Deutschland GmbH (2006): Anwendungsinformation. Hybridbauteil in der Serienfertigung [online]. LANXESS Deutschland GmbH, 20. Sept. 2006 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/docguard/TI_2006-003_DE_Hybridbauteile_in_der_Serienfertigung_.pdf?docId=63414

Lässig, R. et al. (2012): Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen – Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau [online], Roland Berger Strategy Consultants [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Serienproduktion_hochfester_Faserverbundbauteile_20120926.pdf

Leichtbau BW GmbH (2014): Leichtbau – Trends und Zukunftsmärkte und deren Bedeutung für Baden-Württemberg. 1. Auflage, Leichtbau BW GmbH, Stuttgart, [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/PDF/RZ_LeichtbauBW_Studie_Trends_Zukunftsmaerkte_Web.pdf

Leichtbau-Zentrum-Sachsen GmbH (2016): Funktionsintegration [online]: Leichtbau-Zentrum-Sachsen GmbH [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.lzs-dd.de/de/funktionsintegration/

Lightweightdesign (2013): Nachrichten: Intelligenter Leichtbau durch Funktionsintegration [online]: Lightweightdesign 29.08.2013 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.lightweight-design.de/index.php;do=show/site=lwd/sid=1608920189569cbe671b297746415754/alloc=135/id=17654

Lightweightdesign (2015): Kooperation: CFK-Reparatur 4.0 – RWTH Aachen startet Großprojekt, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 05/2015.

Lippky, K. et al. (2016): Integrierte Produktionstechnologien zur Herstellung hybrider Leichtbaustrukturen, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 2/2016.

Lithoz GmbH (2012): 3D-Printer für technische Keramik, Mikroproduktion, MIKROvent GmbH, Mainburg, 6/2012, ISSN: 1614-4538.

Lüdemann, L. und Feig, K. (2014): Vergleich von Softwarelösungen für die Ökobilanzierung – eine softwareergonomische Analyse. Logistics Journal, ISSN 1860-5923.

Lufthansa Technik: Im Fokus: Kompositmaterialien: Reparaturen am schwarzen Gold, Teil 1 [online]: Lufthansa Technik, kein Datum [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.lufthansa-technik.com/de/composite-materials-repair-1

Lufthansa Technik: Projekte: „Rapid Repair“ wird mit CAIRE mobil [online]: Lufthansa Technik, kein Datum [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.lufthansa-technik.com/de/caire

Maier, M. et al. (2015): Eine Konstruktionsmethodik des bionischen Leichtbaus, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 3/2015.

Manfredi, D. et al. (2014): Additive Manufacturing of Al alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs) [online]. Intech, 11. Jun. 2014 [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: cdn.intechopen.com/pdfs-wm/46882.pdf

Manz, H. (2015): Intelligenter Fahrwerkleichtbau mit Hilfe innovativer Simulationstechniken, Volkswagen AG Braunschweig. Vortrag auf dem 8. Nano und Material Symposium Niedersachsen – Material- und Prozessinnovationen für eine ressourcenschonende Mobilität. 25. – 26. Nov. 2015, Salzgitter.

Martens, H. (2011): Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-8274-2640-6

Meiners, D. und Eversmann, B. (2014): Recycling von Carbonfasern, Recycling und Rohstoffe 7 (2014), TK Verlag – Fachverlag für Kreislaufwirtschaft.

Mirtsch, F. (2016): Referenzen – Internetseite: SLK [online]: Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.woelbstruktur.de/referenzen.php#slk

Neugebauer, S. und Finkbeiner, M. (2012): Ökobilanz nach ISO 14040/44 für das Multirecycling von Stahl [online]: Wirtschaftsvereinigung Stahl [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/120621_Finkbeiner_Multi-Recycling_von_Stahl.pdf

Nestler, D. (2012): Beitrag zum Thema Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde: Status quo und Forschungsansätze. Habilitation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik, Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe, Chemnitz, 17. Okt. 2012 [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/13445/Habilitation_Nestler_Daisy.pdf

Nestler, D. et al. (2015): Funktionalisierte hybride Lamine auf Thermoplastbasis, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 4/2015.

Nolis, P. (2016): SLM mit neuen Materialien: Magnesiumlegierungen eröffnen weitere Anwendungsgebiete [online]. Informationsdienst Wissenschaft e. V., 1. Mrz. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: idw-online.de/de/news646920

Oberndorfer, D. (2015): Additive Fertigung – Bionik als Konstruktionsmodell für Leichtbauflugzeuge [online]: ke NEXT, verlag moderne industrie GmbH, 16. Feb. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.ke-next.de/panorama/schneller-fliegen-bionik-als-konstruktionsmodell-fuer-leichtbau-flugzeuge-123.html

Planck, H. (2013): Textiler Leichtbau: Möglichkeiten der Funktionsintegration [online]: Vortag VDI-Tagung Tuttlingen, 23. Jan. 2013 [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.zim-bmw.de/dateien/presentationen/6%20-%20Planck%20-%20ITV%20Denkendorf.pdf

Raedt, H.-W., Wilke, F. und Ernst, C.-S. (2014): Initiative Massiver Leichtbau – Leichtbaupotenziale durch Massivumformung, ATZ 03/2014.

Rasche, M. und Lange, E. (2016): Probleme beim Fügen und bei Temperaturänderungen, Springer Vieweg Verlag, Lightweightdesign 1/2016.

Reichert, F.; Langhof, N. und Krenkel, W. (2015): The Evaluation of Thermoplastic Precursors for C/C-SiC Manufactured by Liquid Silicon Infiltration (LSI), Materials Science Forum, Vols. 825 – 826, pp. 232 – 239, Jul. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.scientific.net/MSF.825-826.232

Reitter, G.K. (2013): Leichtbau durch Sicken[online]: 4Ming Technologies 2013 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.4ming.de/index.php/leichtbau-durch-sicken-fachbuch#Definition_des_Leichtbaus

ReLei (2016): Fertigungs- und Recyclingstrategien für die Elektromobilität zur stofflichen Verwertung von Leichtbaustrukturen in Faserkunststoffverbund-Hybridbauweise [online]: FOREL-Forschungsprojekt [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: plattform-forel.de/relei

Reussmann, T. et al. (2014): rCF-Organobleche – Verbundwerkstoffe aus Recyclingcarbon. Lightweightdesign 6/2014, Springer Vieweg Verlag.

Reussmann, T. et al. (2015): Granulate mit Carbonfaserverstärkung - Verbundwerkstoffe aus Recyclingcarbon. *Lightweightdesign 5/2015*, Springer Vieweg Verlag.

Richter, S. und Wischmann, S. (2016): Additive Fertigungsmethoden - Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei Forschung und Entwicklung [online]: Begleitforschung AUTONOMIK für Industrie 4.0 iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH [abgerufen am 12. Sep. 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.vdivde-it.de/publikationen/studien/additive-fertigungsmethoden/at_download/pdf

Rischer, L (2015): BMBF ernennt Projekt „ReLei“ zum Leuchtturmprojekt [online]: Pressemitteilung der Technischen Universität Bergakademie Freiberg vom 27. Apr. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: tu-freiberg.de/presse/bmbf-ernennt-projekt-relei-zum-leuchtturmprojekt

RoboFold (2016): robofold.com [online]: RoboFold [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.robofold.com/

Salzgitter Flachstahl GmbH (2012): HSD-Stahl - Hochinnovativer Leichtbauwerkstoff [online], Salzgitter Flachstahl GmbH [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktmagazin_und_broschueren/deu/hsd_brosch_re.pdf

Schuck, M. (2015): Vereinte Prozesse für hohe Funktionsintegration. *Lightweightdesign 5/2015*, Springer Vieweg Verlag, S. 14 - 19.

Schulte, T. et al. (2015): Strukturauslegung einer Multimaterialstruktur für Automobilanwendungen. *Lightweightdesign 6/2015*, Springer Vieweg Verlag.

Sedlmayr, A. (2015): Gepresste Alu-Späne statt teurem Rohstoffeinkauf, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, *UmweltMagazin*, Mrz. 2015.

Seitz, H. (2013): Bionik: Evolution - Natur - Technik. VDI Verlag GmbH (Hrsg.).

Stahlinstitut VDEh, Wirtschaftsvereinigung Stahl (2015): Stahl und Nachhaltigkeit - Eine Bestandsaufnahme in Deutschland [online]: Wirtschaftsvereinigung Stahl [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/12/Stahl_Nachhaltigkeit_2015_web.pdf

Sterzing, A. (2005): Bleche mit Wölbstruktur: Wie praxistauglich sind sie? [online]: Blech inForm, 3/2015, [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.bbr.de/fileserver/henrich/files/2703.pdf

Strauß, O. (2015): Leichtbau bionisch - aber mit System, Industrieanzeiger, Konradin-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 22. Jun. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.industrieanzeiger.de/maschinenbau-und-konstruktion/-/article/32571342/40865255/Leichtbau-bionisch-%E2%80%93-aber-mit-System/art_co_INSTANCE_0000/maximized/

Technische Universität Bergakademie Freiberg (kein Datum): TRIP-Matrix-Composite - Teilprojekt S1 [online]: Technische Universität Bergakademie Freiberg [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: tu-freiberg.de/fakult5/gi/forschung/projekte/trip-matrix-composite

Technische Universität Dortmund (2015): Anwendung der laseradditiven Fertigungstechnologie zur Verarbeitung einer hochfesten Aluminium-Legierung (EN AW-7075) für Luftfahrtanwendungen - ALOHA [online]: TU Dortmund [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.wpt.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/projekte/additive-fertigung/index.html

Technische Universität Dresden (2016): Spitzenforschung aus Sachsen: Wissenschaftler der TU Dresden gründen Forschungszentrum für Kohlenstofffasern [online]: Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ilk/news/spitzenforschung_aus_sachsen_wissenschaftler_der_tu_dresden_gruenden_forschungszentrum_fuer_kohlenstofffasern

Technische Universität Hamburg Harburg (2015): Low Cost and Reliable Production of Ceramic Matrix Composites [online]: Technische Universität Hamburg Harburg [abgerufen am 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.tuhh.de/gk/research/processing/low-cost-ceramic-matrix-composites.html

The Boston Consulting Group (2010): CO₂-Bilanz Stahl - Ein Beitrag zum Klimaschutz [online]: Wirtschaftsvereinigung Stahl [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: [www.stahl-online.de//wp-content/uploads/2013/09/Report-CO₂-Bilanz-Stahl_20100226_adjusted-final.v21.pdf](http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/Report-CO2-Bilanz-Stahl_20100226_adjusted-final.v21.pdf)

ThyssenKrupp: Hochfeste Leichtbaustähle [online], ThyssenKrupp [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.thyssenkrupp.com/de/produkte/hochfester-stahl.html

Trechow, P. (2014): Hochleistungskunststoff mit integrierter Schmierung, VDI nachrichten, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 16. Mai 2014, 20, ISSN 0042-1758.

Tschätsch, H.-U. (2012): Vom Sorgenkind zum Musterknaben [online]. Automobil Konstruktion, Konradin-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 8. Nov. 2012 [abgerufen am: 12. Mai 2016], www.autokon.de/home/-/article/16537511/34897258/Vom-Sorgenkind-zum-Musterknaben/art_co_INSTANCE_0000/maximized/

TU Clausthal (2014): TU Clausthal für Deutschen Zukunftspreis nominiert [online]: Pressemitteilung vom 17.09.2014 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.tu-clausthal.de/presse/nachrichten/de-tails/1727.html

Umweltbundesamt: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme (ProBas) [online] [abgerufen am 16. Sep. 2016], verfügbar unter: www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php

Universität Hannover (2015): RETURN - Prozesskette Recycling von Titanspänen [online]: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, 7. Dez. 2015 [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.ifw.uni-hannover.de/1972.html?&tx_tkforschungsberichte_pi1%5BshowUid%5D=314&tx_tkforschungsberichte_pi1%5Bbackpid%5D=2598&cHash=19964560b64f166e9f4e1c5df5f7311c

VDI 4600:2012-01: Verein Deutscher Ingenieure e.V. Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e.V. Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 2:2016-03 (Entwurf): Verein Deutscher Ingenieure e.V. Ressourceneffizienz; Bewertung des Rohstoffaufwands. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6224 Blatt 1:2012-06: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Bionische Optimierung – Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (2014): Industrie 4.0 Statusreport – Wertschöpfungsketten [online]: Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Düsseldorf [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/sk_dateien/VDI_Industrie_4.0_Wertschoepfungsketten_2014.pdf

VDI-Z (2016): 3D-Druck im zivilen Flugzeugbau – eine Fertigungsrevolution hebt ab, VDI-Z Integrierte Produktion, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 3 (2016).

VDMA (2013): Energie- und Ressourceneffizienz – Nachhaltige Hütten- und Walzwerktechnologie [online]: VDMA Hütten- und Walzwerkeinrichtungen [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: metal-lurgy.vdma.org/documents/105861/1671153/Energie-%20und%20Ressourceneffizienz%20-%20Nachhaltige%20Huetten-%20und%20Walzwerktechnologien_2013.pdf/6b0ca1b2-d79a-437f-8263-f54c6e0732ee

Vogt, M; Malanowski, N.; Glitz, R. und Stahl-Rolf, S. (2015): Bestandsaufnahme Leichtbau in Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/bestandsaufnahme-leichtbau-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf

Wallentowitz, H. (2015): Pkw-Leichtbau und seine Auswirkungen. Vortrag in der Sektion Leichtbau. 8. Nano und Material Symposium Niedersachsen – Material- und Prozessinnovationen für eine ressourcenschonende Mobilität. 25. – 26. Nov. 2015, Salzgitter.

Wiedemann, M. (2011): Funktionsintegration im Leichtbau - Aktuelle Forschungsprojekte im DLR [online]: Vortrag bei der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 31. Januar 2011 [abgerufen am: 12. Mai 2016], auch verfügbar als PDF unter: elib.dlr.de/71812/1/Funktionsintegration_im_Leichtbau_MW2.pdf

WorldAutoSteel (a): Super Light Car Life Cycle Assessment [online], WorldAutoSteel [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/case-studies/super-light-car-life-cycle-assessment/

WorldAutoSteel (b): FutureSteelVehicle Provides Lightweight, Low Carbon Footprint Vehicle Options [online]: WorldAutoSteel [abgerufen am: 12. Mai 2016], verfügbar unter: www.worldautosteel.org/projects/future-steel-vehicle/phase-2-results/

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-27 59 506-0
Fax +49 30-27 59 506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE