EDUAR&D-Analyse: Leichtbau

30. September 2021

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Jessica Walther

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Eugen Kogon Straße 4

D – 64287 Darmstadt

Tel. + 49 (6151) 16 20478

Fax + 49 (6151) 16 20087

info@ptw.tu-darmstadt.de

Verfasser :innen der vorliegenden Untersuchung:

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), TU Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold
Astrid Weyand
Nico Bauer

Kontakt:

Astrid Weyand
Eugen-Kogon-Straße 4
64287 Darmstadt

06151 / 8229674
a.weyand@PTW.TU-Darmstadt.de

Abkürzungsverzeichnis

AM ..... *Additive Manufacturing*

BEV ..... *Battery Electric Vehicle*

BMWi ..... *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*

CAGR ..... *Compound Annual Growth Rate (jährliche Wachstumsrate)*

CFK ..... *Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff*

CO2 ..... *Kohlenstoffdioxid*

EDUAR&D ..... *Energiedaten und -analyse R&D*

GFK ..... *Glasfaserverstärkter Kunststoff*

kg ..... *Kilogramm*

LCIA ..... *life cycle impact assessment*

PKW ..... *Personenkraftwagen*

THG ..... *Treibhausgas*

WoS ..... *Web of Science*

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis 3
Inhaltsverzeichnis 4
0. Darstellung der genutzten Methodik und des Vorgehens 3
0.1. Kurzdarstellung der genutzten Methodik EDUAR&D 3
0.2. Vorbemerkung zum Vorgehen beim Thema Leichtbau 4
1. Beschreibung der untersuchten Technologie 4
2. Marktkontexturierung 7
3. Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung 14
4. Technologiezyklusanalyse 23
5. Innovationssystemanalyse 27
6. Ableitung möglicher Entwicklungsziele (technisch und ökonomisch) 28
7. Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen 29
8. Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen 30
Literaturverzeichnis 31

0. Darstellung der genutzten Methodik und des Vorgehens

Im Folgenden wird zunächst die genutzte Methodik mit Namen EDUAR&D vorgestellt. Ergänzt wird das Kapitel um Anmerkungen zum konkreten Vorgehen beim Thema Leichtbau, welches von anderen Analysen im Rahmen des Projekts EE4InG teilweise abweicht.

0.1. Kurzdarstellung der genutzten Methodik EDUAR&D

EDUAR&D, kurz für Energiedaten und -analyse R&D, ist die im Rahmen des Projekts EE4InG genutzte Methodik zur Bewertung von vielversprechenden Technologien, die potenziell zu einer erheblichen Senkung des Energiebedarfs und/oder der Treibhausgasemissionen in den betrachteten Forschungsfeldern (und teilweise darüber hinaus) beitragen könnten. EDUAR&D ist ein strukturierter Such- und Analyseprozess, der verschiedenste methodische Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung der Technologien miteinander verbindet. Dabei muss nicht zwangsläufig jede EDUAR&D-Analyse das gesamte Tableau der zur Verfügung stehenden Optionen nutzen. Dies ist teilweise abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationsquellen. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen (z. B. bzgl. thematischer Schwerpunktsetzungen, Intensivierung bestehender Förderungen, etc.) insbesondere für die zukünftige Energieforschung des Bundes abzuleiten. Die EDUAR&D-Methodik wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung entwickelt (Jochem et al. 2009).

Abbildung 0-1 zeigt den typischen Gesamtablauf des EDUAR&D-Prozesses.

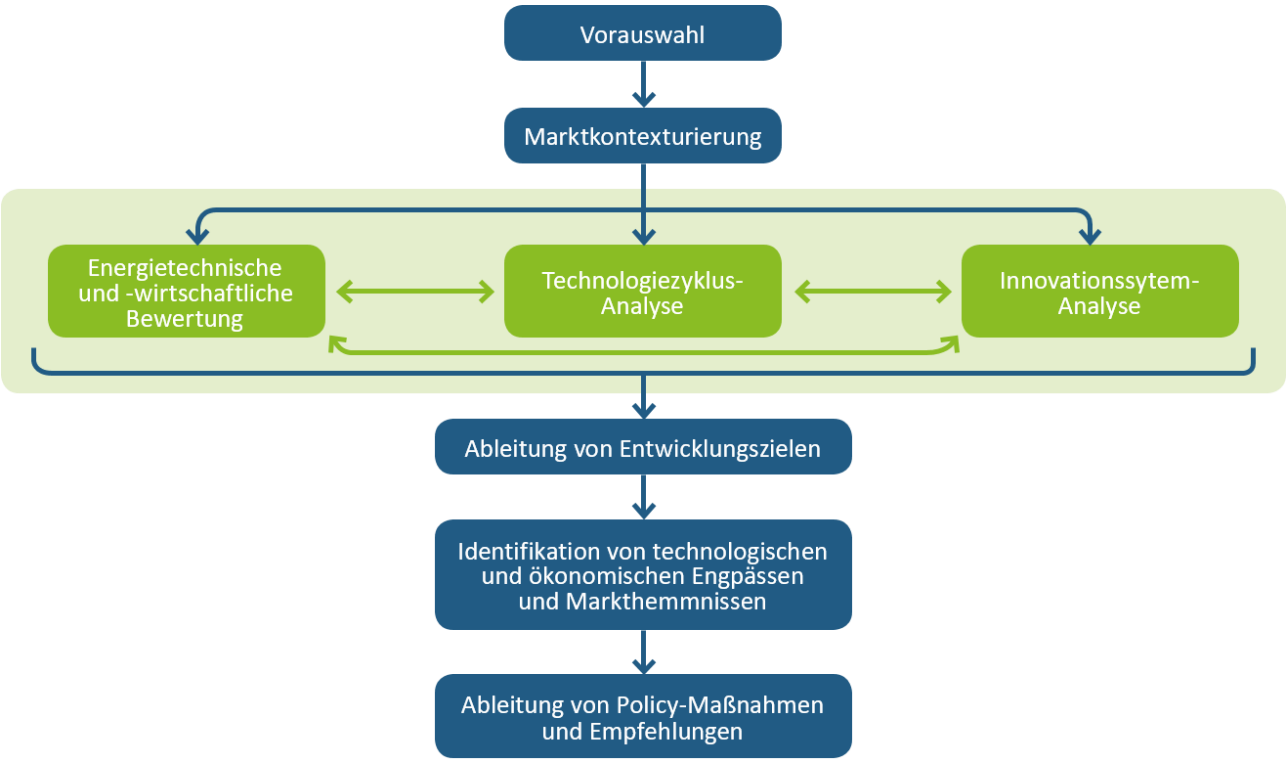

Abbildung 0-1: Typische Struktur von EDUAR&D (Quelle: Eigene Darstellung IREES)

Für die durch einen knappen Vorauswahl-Prozess identifizierte Technologie, beispielsweise anhand ihrer potenziellen Relevanz für den Energieverbrauch oder die Treibhausgas (kurz THG)-

Emissionen einer Branche oder eines bestimmten Produktionsprozesses, wird zunächst eine Marktkontexturierung durchgeführt. Diese beschreibt die Regionalität der denkbaren Märkte und die derzeitige oder absehbar überwiegende Marktform (bspw. Monopol – Polypol) sowie mögliche Konkurrenztechnologien und die hierdurch absehbare Wettbewerbsintensität.

Zentraler und komplexester Teil ist die dreigliedrige Analyse, die aus einer energietechnischen /-wirtschaftlichen Bewertung, einer Technologiezyklus-Analyse sowie einer Innovationssystem-Analyse besteht. Die energietechnische/-wirtschaftliche Bewertung kann verschiedene Komponenten beinhalten, wie eine erste Abschätzung des möglichen Einflusses der Technologie auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen (entsprechende Diffusion vorausgesetzt), die Angabe von Kosten-Nutzen-Indikatoren sowie weitere, auch qualitative, Bewertungen, z. B. bzgl. möglichem Exportpotenzial. Die Technologiezyklus-Analyse dient dazu, die technologische und ökonomische Marktnähe der Technologie besser verorten zu können Die sechs Phasen des Technologiezyklus können auch dazu dienen, je nach Verortung der Technologie zielgerichtetere Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Verortung im Technologiezyklus kann durch Patent- und Publikationsanalysen unterstützt werden (z. B. über das Verhältnis von Grundlagen zu Anwendungspatenten, Zunahme oder Abnahme von Patenten und Publikationen über die Zeit). Auch eine SWOT-Analyse kann Bestandteil der Technologiezyklus-Analyse sein. Gemäß der Definition in (Carlsson et al. 2002) generieren, verbreiten und nutzen Innovationssysteme Innovationen. Sie setzen sich zusammen aus Komponenten und Relationen, wobei erstere Akteure, Technologien und den regulatorischen Rahmen (inkl. Förderpolitik) umfassen, und letztere die vielfältigen formellen und informellen Beziehungen zwischen diesen Komponenten.

Die Analyse schließt mit der Identifikation möglicher Entwicklungsziele, von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen aus den vorherigen Analyseschritten. Hieraus werden dann wiederum Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Im Rahmen des Vorhabens EE4InG dienen die EDUAR&D-Technologieanalysen auch als Input für Expertengespräche und werden in Folge dieser Gespräche nach Bedarf angepasst.

0.2. Vorbemerkung zum Vorgehen beim Thema Leichtbau

Zusätzlich zur literaturbasierten Analyse wurden für das Thema Leichtbau ergänzende Interviews mit drei Experten geführt. Diese fanden virtuell und jeweils einzeln mit einem der Experten statt, die Dauer betrug zwischen einer und anderthalb Stunden. Dabei wurden Fragen zu möglichen Forschungs- und Entwicklungszielen sowie Hemmnisse diskutiert. Erkenntnisse der Gespräche dienten zum Abgleich der aus Literatur ermittelten Erkenntnisse und sind insbesondere in Kapitel 6 bis 8 eingeflossen. Eine Zusammenfassung der Gespräche sortiert nach den gestellten Fragen wird der Analyse beigefügt.

1. Beschreibung der untersuchten Technologie

Leichtbau bedeutet zunächst, Konstruktionen mit möglichst geringer Masse zu ermöglichen. Die primäre Anforderung an eine Struktur, die in Leichtbauweise konzipiert wird, stellt die Erfüllung der Funktionalität dar. Dies bedeutet, dass die zulässigen Belastungen nicht überschritten und die Anforderungen an Steifigkeit, dynamische Nachgiebigkeit, Festigkeit, Temperaturfestigkeit und Lebensdauer erfüllt werden. Leichtbaukonstruktionen zeichnen sich darüber hinaus dadurch aus, dass die Erfüllung dieser Ansprüche mit einer Optimierung des Bauteilgewichts einhergeht. (Fraunhofer IPA 2020a) Darüber hinaus weisen Leichtbauprodukte gegenüber herkömmlichen Produkten oft verbesserte Produkteigenschaften auf. Dank durchdachter Funktionsintegration, einer

last- und werkstoffoptimierten Konstruktion sowie dem Einsatz leichterer Materialien vereint Leichtbau moderne Produktionsprozesse und geringere Kosten mit einem schonenden Umgang von Ressourcen und verbesserter Funktionalität. (BMWi 2020e) Der Leichtbau kann weiterhin sich augenscheinlich widersprechende Anforderungen erfüllen: hohe Stabilität trotz geringem Materialeinsatz durch möglichst leichte, aber auch stabile und sichere Bauteile, Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und dennoch höhere Sicherheit. Das Ziel des Leichtbaus liegt also nicht nur in einzelnen Faktoren wie der Gewichtsreduzierung, sondern im Gesamtoptimum – technologisch, ökonomisch und ökologisch. (Fraunhofer IPA 2020b)

Leichtbau ist eine Schlüsseltechnologie, um den Herausforderungen der Energie- und Materialeffizienz zu begegnen und zugleich die Leistungsfähigkeit und Produktivität von Maschinen und Anlagen zu erhöhen. (Fraunhofer IPA 2020b) Da sowohl die Materialien als auch die Konstruktions-, Füge- und Fertigungsverfahren kontinuierlich neu- und weiterentwickelt werden, entstehen Güter mit gleichen oder sogar verbesserten Eigenschaften gegenüber dem ursprünglichen Produkt.

Leichtbau wird heute bereits vielfältig eingesetzt. Innovationstreiber sind die Luft- und Raumfahrt sowie die Automobil- und Transportindustrie. Jedes eingesparte Kilogramm bedeutet ein Kilogramm mehr Nutzlast. 100 Kilogramm weniger Gewicht reduziert den Kraftstoffverbrauch eines Autos um circa 0,5 Liter pro 100 Kilometer, und auch für Elektrofahrzeuge bedeutet jedes eingesparte Kilogramm mehr Reichweite. Bei einem Airbus A 320 entsprechen 100 Kilogramm weniger Gewicht fast 10.000 Liter weniger Kerosin pro Flugzeug und Jahr. Aber auch in der Bau-, Freizeit- und Sportindustrie, der maritimen Wirtschaft, der Medizintechnik sowie bei der Konstruktion großer Windkraftanlagen wird diese Zukunftstechnologie immer bedeutsamer. (BMWi 2020e)

Es existieren verschiedene Leichtbautechnologien, die oft miteinander kombiniert und im Folgenden beschrieben werden. Stoffleichtbau, Formleichtbau und funktionsintegrierter Leichtbau ergänzen einander, sodass Rohstoffe, Kosten und Energie optimal genutzt werden.

Stoffleichtbau

Hier werden schwere Materialien mit hoher Dichte durch leichtgewichtigere Materialien, wie zum Beispiel Leichtmetalle (Aluminium, Titan, Magnesium) oder Faserverbundwerkstoffe (Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)) ersetzt. Besonders effizient wird der Stoffleichtbau, wenn je nach Belastung und Funktion unterschiedliche Materialien kombiniert werden. In diesem Fall spricht man vom hybriden beziehungsweise Multimaterialleichtbau. (BMWi 2020e)

Die Auswahl des geeigneten Werkstoffs ist ein wesentlicher Faktor bei der Leichtbau-Konstruktion. Typische Werkstoffe im Leichtbau sind: Stahl, Eisen-Gusswerkstoffe, Aluminium, Magnesium, Titan, Kunststoffe sowie faserverstärkte Werkstoffe (Klein und Gänsicke 2019, S. 57). Jeder Werkstoff bietet unterschiedliche Vorteile. Durch eine Eigenschaftsmodifikation wie beispielsweise eine Wärmebehandlung oder die Verwendung von Legierungen lassen sich die Eigenschaften von Stahl geeignet verändern. So kann eine erhöhte Festigkeit des Werkstoffs, eine Materialeinsparung und damit eine Gewichtsreduktion ermöglichen. Aluminium ist der wichtigste Werkstoff metallischen Leichtbaus. Von Vorteil ist hier insbesondere die geringe Dichte, die an Stähle heranreichenden Festigkeitswerte, der relativ gute Elastizitätsmodul sowie die gute Zähigkeit. Zudem weist Aluminium eine gute Verarbeitbarkeit auf (Klein und Gänsicke 2019, S. 62f.). Magnesium weist unter den verwendeten metallischen Werkstoffen die geringste Dichte auf, hat allerdings einige nachteilige Eigenschaften, wie eine geringe Bruchdehnung und hohe Korrosionsanfälligkeit, sodass es nur wenig Anwendung über Luft- und Raumfahrt und den Fahrzeugbau hinaus gibt (Klein und Gänsicke

2019, S. 69). Polymere als eine Gruppe der Kunststoffe spielen für tragende Strukturbauteile im Leichtbau eine untergeordnete Rolle. Ursache hierfür sind die insgesamt geringen mechanischen Festigkeitswerte. Duromere hingegen sind als Matrixwerkstoff in Faser-Kunststoff-Verbunden von Bedeutung (Klein und Gänsicke 2019, S. 75). Das Prinzip der Faserverstärkung besteht darin, dass in einem Grundwerkstoff (genannt Matrix), in einer vorbestimmten Anordnung, Fasern eingebettet werden. Damit lassen sich die Werkstoffkennwerte modifizieren. Bei Faser-Kunststoff-Verbunden beispielsweise kann die Grundfestigkeit um 1 bis 2 Größenordnungen angehoben werden (Klein und Gänsicke 2019, S. 77f.).

Formleichtbau

Unter Formleichtbau werden komplexe Strukturen verstanden, die durch die Optimierung der räumlichen Anordnung (Topologie) von Verstärkungen oder Verstrebungen erreicht werden. Diese orientieren sich oft an Konstruktionsprinzipien der Natur, die unter dem Begriff Bionik zusammengefasst werden. Hierzu gehört beispielsweise die Form der sechseckigen Bienenwaben oder der lastoptimierte Aufbau von Knochen. Diese Formen können oftmals nur mit erheblichem Aufwand durch klassische Verfahren wie Gießen oder Fräsen hergestellt werden. Moderne additive Fertigungsverfahren wie der 3D-Druck erschließen völlig neue Formen und Designs für leichtere und leistungsfähigere Produkte. (BMWi 2020e) Die Topologieoptimierung spielt eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung von Leichtbauprodukten im Kontext des Formleichtbaus. Darunter werden rechnergestützte Verfahren verstanden, die eine topologieoptimierte Gestaltung eines konkreten Bauteils unter Berücksichtigung gewünschter Restriktionen ermöglichen. So lassen sich Bauteile materialreduziert herstellen, die den mechanischen Belastungen dennoch standhalten. Typische Restriktionen können dabei höchstmögliche Steifigkeit unter Einhaltung eines Maximalgewichts sein, das Minimieren von Spannungen, das Erhöhen der Eigenfrequenz oder die Reduktion der Bauteilmasse. Durch Topologieoptimierung ist es möglich, Ressourcen zu schonen und Bauteile kostengünstiger herzustellen. (Fraunhofer IPA 2021)

Funktionsintegrierter Leichtbau

Funktionsintegrierter Leichtbau meint, dass an einer Stelle, beispielsweise in Tragstrukturen, weitere Funktionen integriert werden können, die dann an anderer Stelle eingespart werden. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, durch additive Verfahren Kühlstrukturen im Bauteil zu erzeugen, statt von außen anzubringen. Durch Funktionsintegration entfallen Aufwendungen für das Material und die Montage. (BMWi 2020e). Dabei eignen sich insbesondere faserverstärkte Kunststoffe aufgrund ihres spezifischen Aufbaus und ihres Herstellungsprozesses zur Integration zusätzlicher Funktionen (Hoßfeld und Ackermann 2020) (Hoßfeld und Ackermann 2020). Am Beispiel eines automobilen Bodenmoduls wird das Potenzial deutlich: Im Vergleich zur funktional gleichwertigen Referenzstruktur mit 74 Teilen bei 113,2 kg Gesamtgewicht, kann der nach dem Prinzip der Funktionsintegration konzipierte Boden eine signifikante Gewichts- und Teilezahlreduktion verzeichnen. Die finale Struktur wiegt 70,5 kg bei 28 Teilen. Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von 38 Prozent bei einer gleichzeitigen Reduzierung der Teilezahl von 62 Prozent. Dabei wurden mechanische, thermische, sensorische sowie elektrische Funktionen integriert.

Der Leichtbau ist generell eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft, welche eine Vielzahl an Kombinationen aus unterschiedlichen Technologiefeldern, Materialien und Fertigungsverfahren nutzt (siehe Abbildung 1-1).

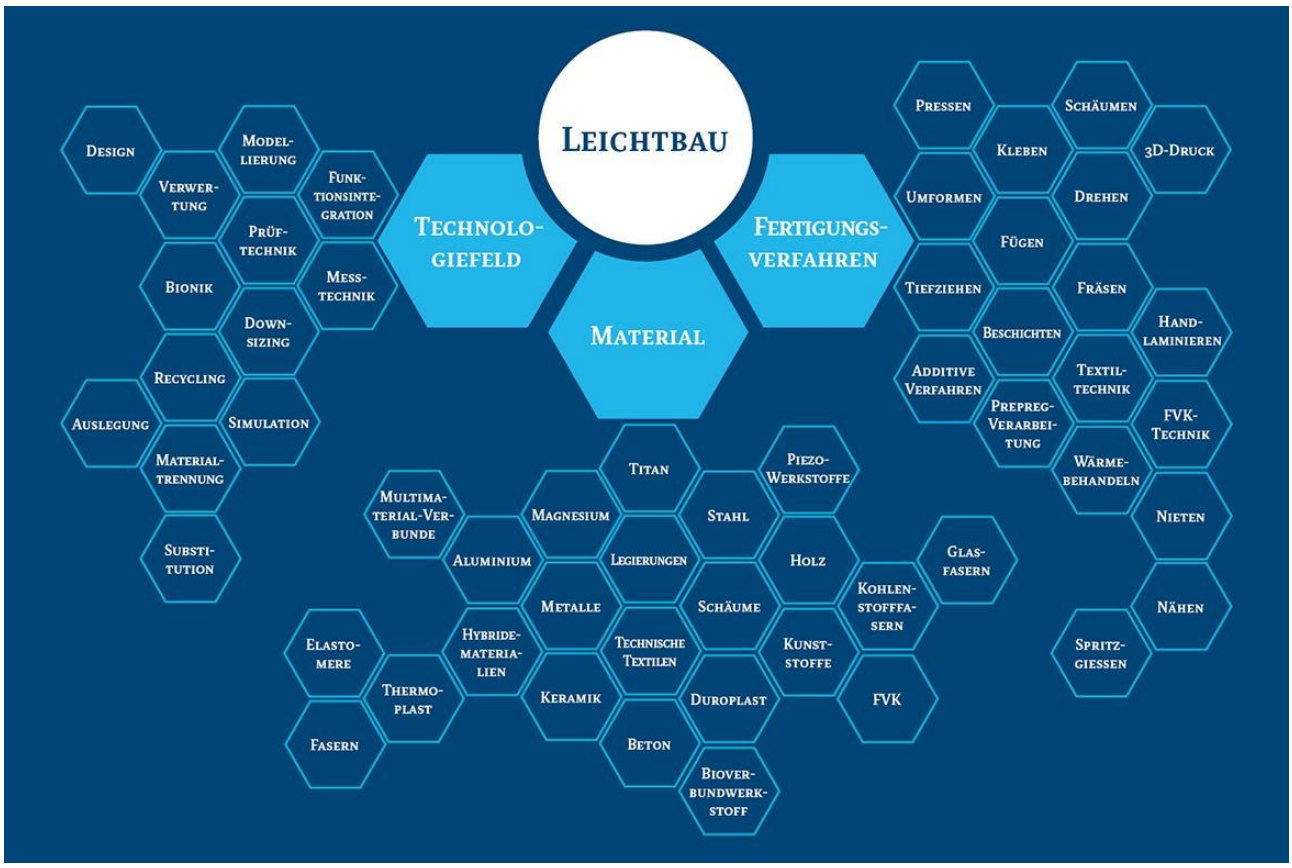

Abbildung 1-1: Übersicht über verschiedene Aspekte des Themas Leichtbau (BMWi 2020e)

2. Marktkontexturierung

Im Folgenden werden die Marktstrukturen des Leichtbaus in Deutschland beschrieben. Leichtbau findet in zahlreichen Branchen Anwendung, verwendet viele unterschiedliche Materialien sowie Kombinationen aus diesen und ist mit unterschiedlichen Prinzipien umsetzbar. Eine materialseitige Identifizierung der Märkte erweist sich, aufgrund der vielen verschiedenen verwendeten Materialien sowie dem zunehmenden Materialmix, als schwierig. (Thielmann et al. 2014). Es bietet sich an, den Leichtbaumarkt nach Branchen zu unterteilen und darüber hinaus die Verwendung einzelner Materialien zu betrachten.

Um ein Verständnis dafür zu entwickeln, welche Märkte in Europa und Deutschland relevant sind, folgt zunächst ein Blick auf die globalen Leichtbaumärkte, grafisch dargestellt in Abbildung 2-1. Anhand der angemeldeten Patente zieht die betrachtete Studie (Thielmann et al. 2014) Rückschlüsse auf die regionalen Schwerpunkte der globalen Leichtbaumärkte. In der Elektronikbranche liegen die regionalen Schwerpunkte in Asien und Amerika, Europa ist hier weniger stark vertreten. Im Maschinen- und Anlagenbau ist Amerika vor Asien und Europa am aktivsten. Neue Leichtbaumärkte in der Bauindustrie lassen sich basierend auf der Auswertung der Studie in Europa vor Amerika und Asien finden. Der Bereich Transportmittel (Kraftwagen) zeigt sich in Europa am aktivsten, Asien sollte hier ebenfalls als bedeutender Markt betrachtet werden. Ein Abgleich mit aktuelleren Zahlen zu den Patentanmeldungen erfolgt in Kapitel 4 bei der Betrachtung des Technikzyklus.

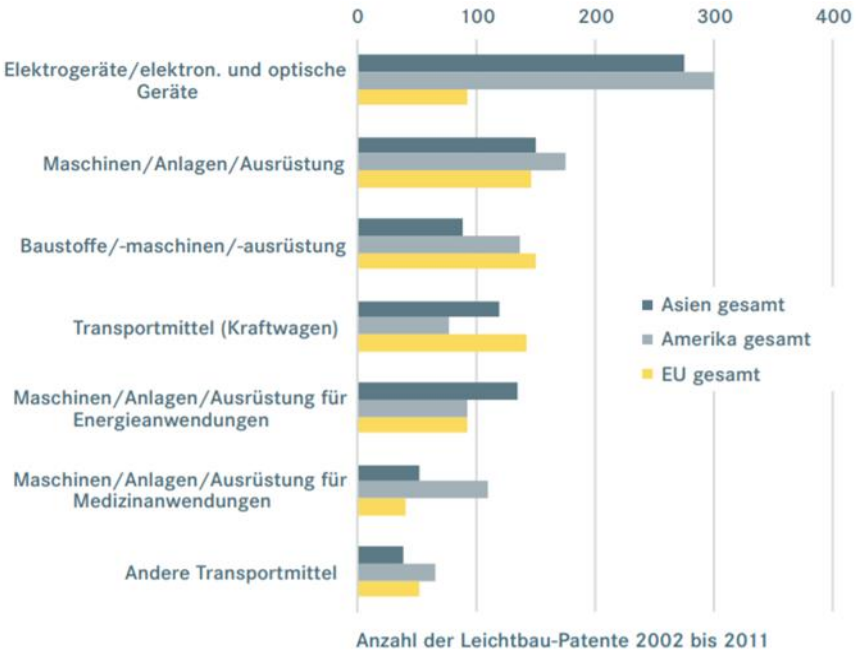

Abbildung 2-1: Übersicht über die Marktverteilung in verschiedenen Leichtbaubranchen (Thielmann et al. 2014)

Große Unternehmen mit mehr als 250 Beschäftigten und einem Umsatz über 50 Mio. Euro, die Leichtbauprodukte anbieten, konzentrieren sich in Deutschland in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Bayern. Dabei sind die Unternehmen, jeweils etwa 20, gleichmäßig auf die Länder verteilt (siehe Abbildung 2-2). Für kleine und mittlere Unternehmen, mit weniger als 250 Beschäftigten und einem Umsatz unter 50 Mio. Euro, ergibt sich eine ähnliche Konzentration. Bei einer breiteren Streuung der Unternehmen über die weiteren Länder, wobei sich in Bayern weniger und in Sachsen mit über 20 Unternehmen mehr Unternehmen finden als bei großen Unternehmen (siehe Abbildung 2-3).

Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, Universitäten und Hochschulen, die sich mit Leichtbau befassen, konzentrieren sich in Deutschland besonders in Sachsen, zahlreich vertreten sind außerdem Baden-Württemberg, Bayern und Nordrhein-Westfalen (Abbildung 2-4). In den vergangenen zehn Jahren wurden Leichtbauvorhaben in Bayern und Niedersachsen mit über 20 Mio. Euro vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) am stärksten gefördert. Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg wurden mit über 10 Mio. Euro gefördert (siehe Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5. Die größte Aktivität bei den geförderten Projekten zum Thema Leichtbau zeigt sich in Nordrhein-Westfalen mit über 30 geförderten Vorhaben, gefolgt von Bayern, Baden-Württemberg und Niedersachsen (siehe Abbildung 2-7).

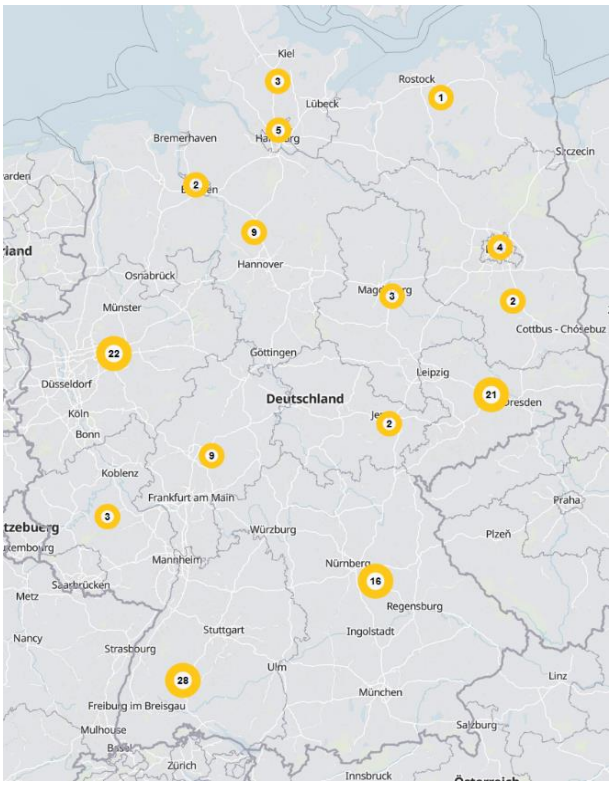

Abbildung 2-2: Verteilung große Leichtbau-Unternehmen (BMWi 2020f)

Abbildung 2-3: Verteilung kleine und mittlere Leichtbau-Unternehmen (BMWi 2020f)

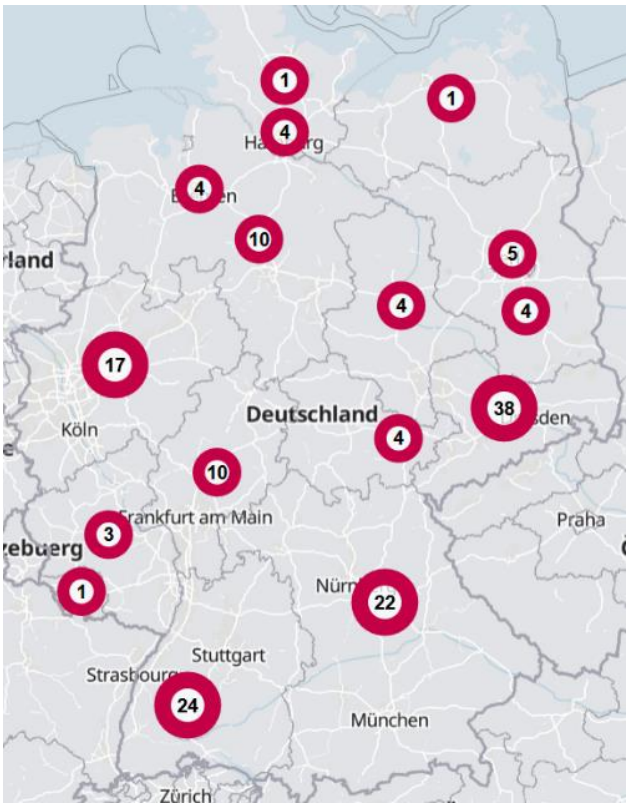

Abbildung 2-4: Verteilung von Leichtbau-Forschungseinrichtungen (BMWi 2020f)

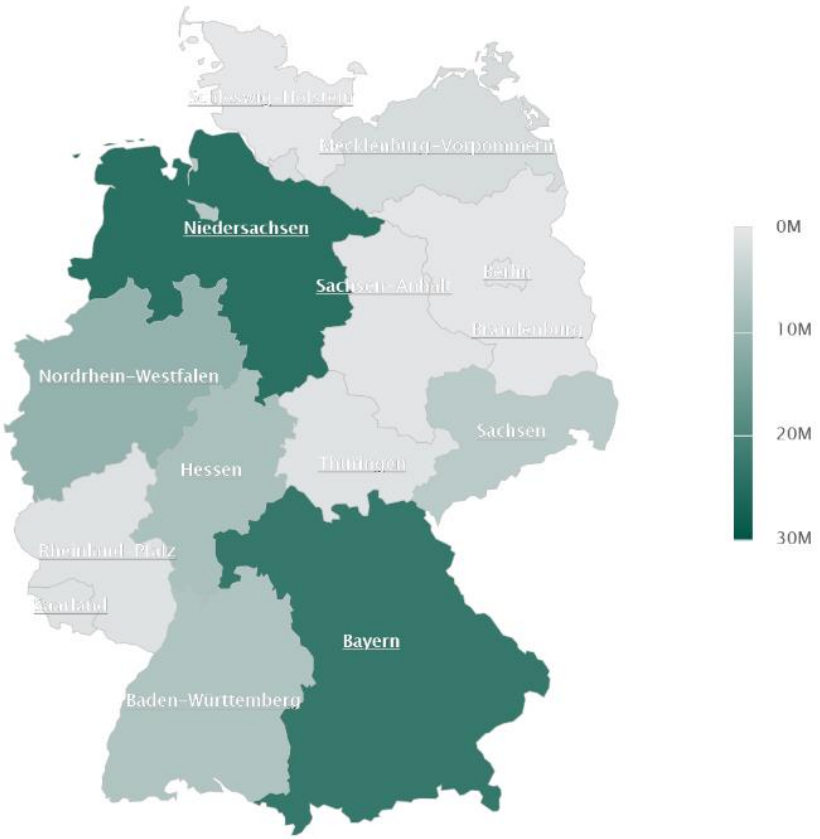

Abbildung 2-5: Bewilligte Fördersumme für Leichtbauprojekte von 2010-2020 (Projektträger Jülich und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi))

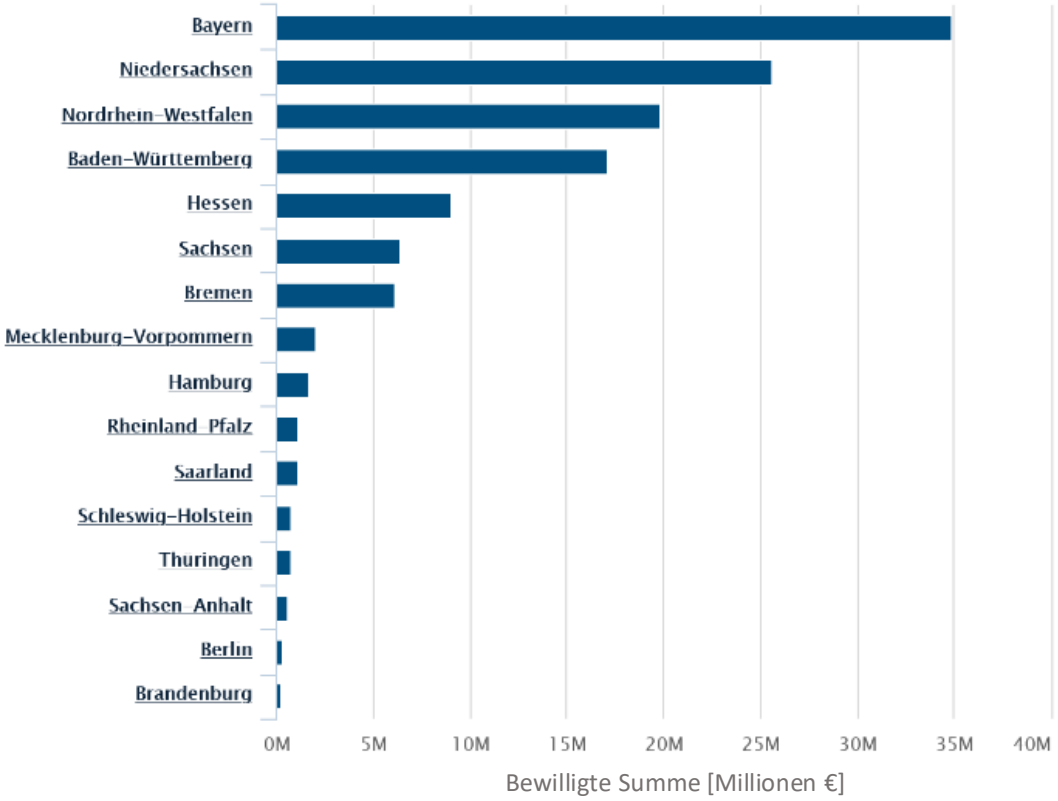

Abbildung 2-6: Leichtbauförderung je Bundesland. (Projektträger Jülich und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi))

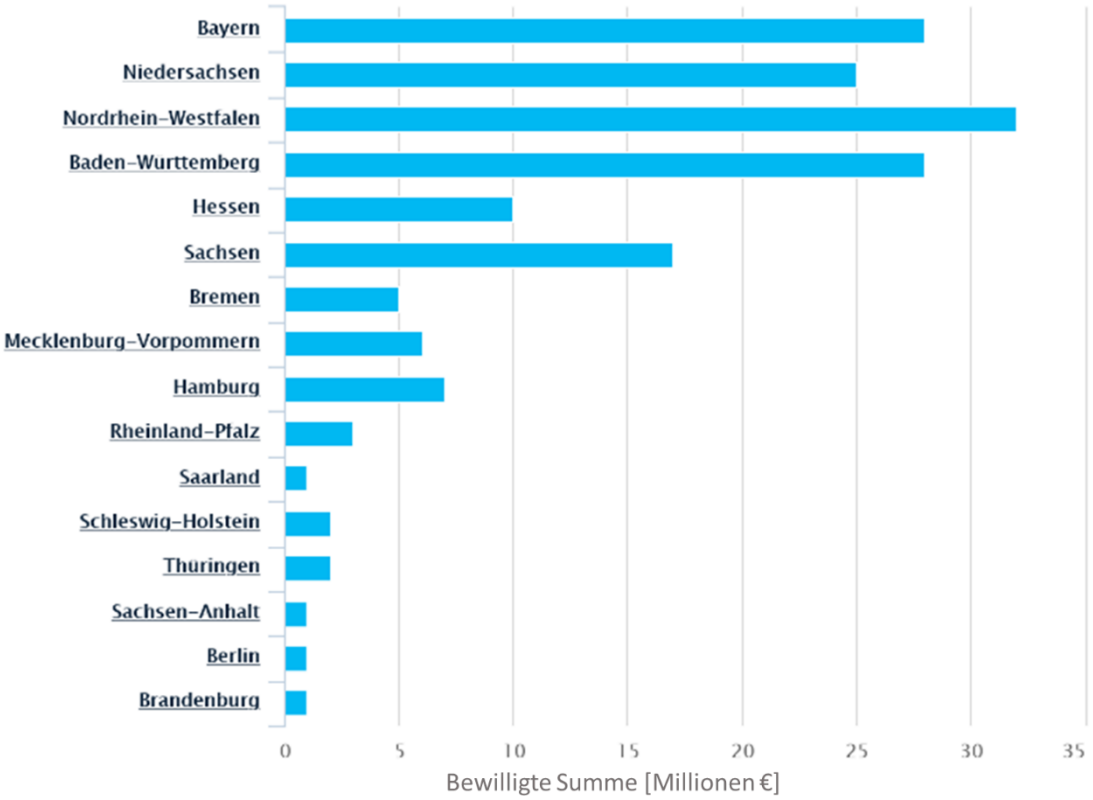

Abbildung 2-7: Anzahl Leichtbauvorhaben je Bundeland. (Projektträger Jülich 2020)

Eine Differenzierung der für Leichtbauprodukte deutscher Unternehmen bis 2020 relevanten Anwenderbranchen nach Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeiter:innen sowie Unternehmen mit mehr als 250 Mitarbeiter:innen zeigte in der betrachteten Studie, dass sich kleine Unternehmen auf eine große Breite an Märkten spezialisiert haben, die in Abbildung 2-8 dargestellt sind. Das Netzwerk Leichtbau BW geht davon aus, dass die Anzahl kleiner Unternehmen, welche sich auf das Thema Leichtbau fokussieren, weiter zunimmt. Damit sind Unternehmen umfasst, welche primär Abnehmer von Leichtbauwerkstoffen sind und Leichtbaulösungen anbieten. (Thielmann et al. 2014)

Basierend auf einer Publikationsanalyse der Leichtbau BW über die Jahre 1991-2013 lässt sich insgesamt eine Zunahme der Relevanz von Leichtbau feststellen (Abbildung 2-9). Im Vergleich der Branchen zeigt sich, dass der Bereich Luft- und Raumfahrt mit hohen Publikationsanteilen eine negative jährliche Wachstumsrate (CAGR) aufweist. Die Relevanz von Leichtbau in diesem Bereich nimmt Leichtbau BW zufolge also ab, die Schlussfolgerung ist, dass ein sehr hoher Reifegrad vorliegt. Der Transportbereich wächst jedoch nach wie vor dynamisch - die Branche Transport insgesamt, inklusive Luft- und Raumfahrt, weist im Mittel kein Wachstum auf. Die Branche Maschinenbau wächst beispielsweise durchschnittlich (Schlussfolgerung: relativ hoher Reifegrad), während der Bau- & Konstruktionsbereich, Textilien sowie Papier & Holz - mit dem Bezug zu nachwachsenden Rohstoffen - hingegen entsprechend zunehmend größere Wachstumsraten aufweisen. Bei heute noch geringeren Publikationsanteilen lässt sich damit auf geringere wissenschaftliche Reifegrade schließen. (Thielmann et al. 2014)

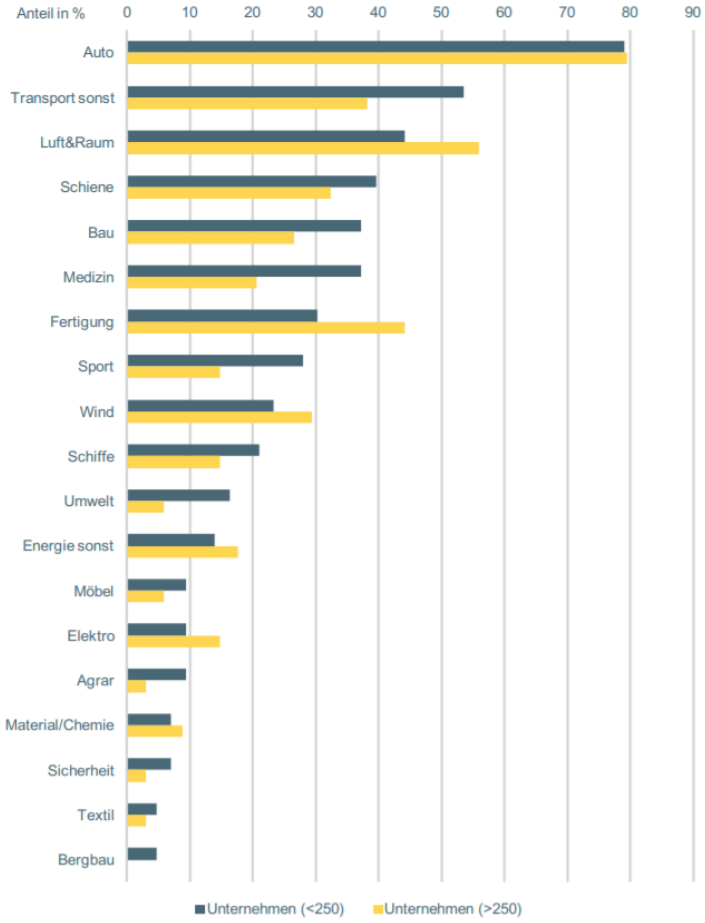

Abbildung 2-8: Anwenderbranchen deutscher Leichtbauunternehmen in 2020 bei unterschiedlichen Unternehmensgrößen (<250 im Vergleich zu >250 Mitarbeiter:innen) (Thielmann et al. 2014)

Abbildung 2-9: Vergleich der Leichtbau-Branchen anhand von Publikationen und Wachstum (2004-2013). (Thielmann et al. 2014)

Die Transportbranche war in der Studie von 2014 gemessen am Marktvolumen die wichtigste Branche für Leichtbaulösungen. Bis 2020 rechnet Leichtbau BW in der Studie mit einer globalen Marktgröße für Leichtbaumaterialien in dieser Branche von rund 140 Mrd. Euro. Die Marktgröße für Maschinenbau und Elektrotechnik soll darin 2020 im Bereich zwischen 25 und 40 Mrd. Euro liegen. Für die Windkraft wird mit einem globalen Leichtbaumarkt von über 10 Mrd. Euro gerechnet. Der Bauindustrie wird ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 10 Prozent und ein enormes Marktpotenzial von 450 Mrd. Euro prognostiziert. (Leichtbau BW GmbH 2015)

Unternehmen setzen dabei im Materialmix neben faserverstärkten Kunststoffen zunehmend auch auf nachwachsende Rohstoffe. Im Schnitt arbeiten die befragten Leichtbauunternehmen mit durchschnittlich sechs Materialien, so dass ein Trend zu einem hybriden Leichtbau festzustellen ist. Hybrider Leichtbau meint die sich ergänzende Kombination unterschiedlicher Werkstoffe zur optimalen Bauteilgestaltung - von besonderer Bedeutung sind dabei Faserverbundwerkstoffe (Klein und Gänsicke 2019). Der Automobilmarkt wird dominiert von Kunststoffen, hochfesten Stählen und Aluminium. Magnesium und Komposite finden sich nur in Nischenanwendungen. Die Studie rechnet mit einer Zunahme der Bedeutung von Hochleistungsstählen und Kunststoffen. Prognosen zeigen die Bedeutung von Stahl, Aluminium, Magnesium und herkömmlichen Kunststoffen wie auch Thermoplasten. CFK bildet ein hohes Wachstum ab, die absolute Marktgröße war jedoch bis mindestens 2020 als gering prognostiziert. (Leichtbau BW GmbH 2015)

Die Beschreibung der Marktsituation aller relevanten Branchen und Materialien würde den Rahmen dieser EDUAR&D-Analyse überschreiten, daher wird hier stellvertretend auf den Aluminiummarkt eingegangen. Aluminium zählt in der für den Leichtbau hochrelevanten Automobilbranche zu den wichtigsten Leichtbaumaterialien (Thielmann et al. 2014). Es wird angenommen, dass die Menge an verarbeitetem Aluminium in Fahrzeugkarosserien weltweit auf 16,9 Mio. Tonnen im Jahr 2030 steigen wird (McKinsey und Clearwater International 2016). Die weltweite Aluminiumnachfrage betrug im Jahr 2020 knapp 90 Mio. Tonnen, dabei entfielen 23 Prozent auf die Transportbranche (Norsk Hydro 2021). Der Aluminiumpreis ist sehr wechselhaft und schwankte in den vergangenen 10 Jahren zwischen 1.604,18 und 2.401,39 US-Dollar pro Tonne (World Bank et al. 2021). Auf den Preis hat die deutsche Aluminiumindustrie wenig Einfluss, er wird am Weltmarkt bestimmt, auf dem China die Hauptrolle spielt (Gesamtverband der Aluminiumindustrie 2017). China dominiert mit einer Produktion von 37 Mio. Tonnen Primäraluminium im Jahr 2019 den Weltmarkt. Australien, Guinea und China sind die größten Produzenten von Bauxit, welches zur Aluminiumgewinnung verwendet wird. (US Geological Survey 2021). Die durch staatliche Unterstützung induzierten Kostenvorteile chinesischer Aluminiumproduzenten drohen deutsche Produzenten auf nachgelagerte Wertschöpfungsstufen zu verdrängen. Deutschland hatte im Jahr 2019 einen Bedarf von knapp über 3 Mio. Tonnen Aluminium, dabei wurden 2,6 Mio. Tonnen Primäraluminium importiert (Gesamtverband der Aluminiumindustrie 2020). Es besteht folglich eine große Abhängigkeit vom Weltmarktpreis, weshalb insbesondere die chinesische industriepolitische Förderung beobachtet werden sollte.

Die beschriebene Verteilung und Anzahl der Unternehmen in Deutschland sowie die zahlreichen, sich aus der Vielzahl der möglichen Leichtbauausführungen ergebenden Geschäftsfelder, lassen auf eine polypole Marktstruktur auf Seite der Anbieter von Leichtbauprodukten schließen. Hohe F&E-Kosten verbesserter Materialien oder neu konzipierter Produkte erschweren den Markteintritt für kleine und mittelständische Unternehmen.

Leichtbauprodukte stehen häufig in Konkurrenz zu konventionell gefertigten Produkten. Dabei sind die nach Leichtbauprinzipien gefertigten Konstruktionen meist mit höheren Kosten in der Herstellung

verbunden. Inwiefern diese durch den Nutzen gerechtfertigt werden können, muss abhängig von der Branche und Anwendung bewertet werden.

3. Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung

Im Folgenden werden konkrete Beispiele genannt, bei denen die Verwendung von Leichtbau zu Effizienz- und Emissionsminderungs-Effekten führen konnte bzw. kann. Die unterschiedlichen Praxisbeispiele geben einen Eindruck, wie vielfältig die Einsatzmöglichkeiten von Leichtbaukonstruktionen sind. Das breite Anwendungsfeld erschwert jedoch eine Abschätzung der durch die Verwendung von Leichtbau insgesamt erzielbaren Energieeinsparpotenziale. Zweckmäßig erscheint hier die Unterteilung nach Branchen, für die dann anhand konkreter Anwendungsbeispiele eine Hochrechnung erfolgen kann. Dies folgt im Anschluss an die Praxisbeispiele.

Carbonbeton

Eine Eisenbahnbrücke aus dem Jahr 1910 musste für die weitere Nutzung saniert werden, da sich große Risse gebildet hatten, die mit Hilfe einer Bewehrung überbrückt werden mussten. Das architektonische Erscheinungsbild der Brücke durfte dabei nicht verändert werden. Es war die wirtschaftlichste Sanierungsvariante zu wählen. Durch die Verwendung von Carbonbeton konnte die Schichtdicke von ca. 8-10 cm auf 2 cm reduziert werden. Dadurch musste zuvor eine Schicht von 2 cm des ursprünglichen Bestandes abgetragen werden. Sowohl die geringere zu entsorgende Abtragsmenge, als auch der um 75 Prozent geringere Materialeinsatz der Verstärkungsschicht und die schnellere Ausführung führten zu einer höheren Ressourceneffizienz sowie zu den niedrigsten Kosten. Die Verwendung von Carbonbeton sparte im Vergleich zur konventionellen Stahlbetonlösung 75 Prozent des Gewichts ein, verbrauchte nur halb so viel Energie in Herstellung und Installation, kostete 30 Prozent weniger und brauchte nur 70 Prozent der Produktionszeit. (BMWi 2020c)

Carbonbeton bietet neben der Sanierung auch für Neubauten erhebliche Vorteile. Die Verwendung des Verbundwerkstoffs kann dort Material und damit Energie sparen und ein ressourcenschonendes Bauen ermöglichen. Zum Beispiel wiegen Fuß- und Radwegbrücken nur noch 50 Prozent sowie Fassadenplatten nur noch 30 Prozent im Vergleich zur Stahlbetonvariante. Es wird aktuell davon ausgegangen, dass Carbonbeton eine etwa doppelt so lange Lebensdauer (von weit über 100 Jahre) im Vergleich zu Stahlbeton aufweist. (BMWi 2020c)

Sandwich-Formteile

Sandwich-Formteile sind eine Konstruktion aus nachwachsenden Rohstoffen, die zu Formteilen gepresst und als tragende und flächige Elemente im PKW-Bereich eingesetzt werden (siehe Abbildung 3-1). Es gilt, nachwachsende Rohstoffe in tragende Leichtbauelemente zu integrieren und eine Gewichtsoptimierung für einen geringeren Energieverbrauch zu erreichen. Umgesetzt werden kann dies mit der Nutzung nachwachsender Fasern in verschiedenen Matrixsystemen zur Verformung für unterschiedliche Anwendungen. Die Verwendung der Sandwich-Formteile für die Konstruktion des Ladebodens eines PKWs erreichte im Vergleich zur konventionellen Ausführung aus Aluminium eine Gewichtsreduktion um 50 Prozent, die eine Treibstoffeinsparung zur Folge hat. (BMWi 2020d)

Abbildung 3-1: Sandwich-Formteil aus nachwachsenden Fasern. (BMWi 2020d)

Die Trägerplatten aus nachwachsenden Rohstoffen bieten gegenüber anderen Materialien vielerlei Vorteile. Der dreischalige Aufbau kombiniert die beiden aktuellen Trends Leichtbau und nachwachsende Rohstoffe. Durch ein mehrstufiges Fertigungsverfahren ist es möglich, die Trägerplatten individuell auf die erforderlichen Umgebungsbedingungen sowie Belastungssituationen auszulegen. Es werden somit neue innovative Mobilitätskonzepte geschaffen und die CO_2-Bilanz wird nachhaltig verbessert. (BMWi 2020d)

Leichtes Gehänge von Kettentransport-Anlagen

Bei der Pulverlackierung von Autoteilen in einem kleinen Betrieb wird die Transportkette sowie das Gehänge auf dem Weg durch Trockner und Ofen immer wieder aufgeheizt und anschließend wieder abgekühlt. Durch eine Neukonstruktion des Gehänges mit einem anderen Stahl konnte dessen Eigengewicht um 50 Prozent und damit das der Transportkette um 13,5 Prozent reduziert werden (von 11,9 kg je laufendem Meter Kette auf 10,3 kg/m). An Kettenband, Flanschen und Schrauben wurde keine Veränderung vorgenommen. Der Strombedarf der Antriebe der Transportkette wurde durch die Gewichtsreduktion um 12 Prozent vermindert und der Wärmebedarf von Bädern, Trockner und Ofen um 8 Prozent abgesenkt. Eine nähere Ausführung dieses Beispiels findet sich im Papier zum Know-How-Gefälle, welches im Rahmen des EE4InG-Projektes erstellt wurde. (EE4InG 2021)

Bodenplatten mit Schaumkern

Bodenplatten mit Schaumkern (siehe Abbildung 3-2) werden für die Anwendung als tragender Boden im Fahrzeugbau, z. B. in Schienenfahrzeugen, im Fernverkehr und im Nahverkehr, verbaut. Dabei muss die Platte trittfest, wärme- und schalldämmend sein und darüber hinaus höchsten Brandschutzanforderungen genügen.

Abbildung 3-2: Bodenplatte mit Schaumkern. (BMWi 2020b)

In die bisher verwendeten Sperrholzplatten werden, zur Gewichtsoptimierung und für einen geringeren Energieverbrauch, Schaumkerne eingesetzt. Die hochwertigen Eigenschaften der

Trägerplatten bleiben erhalten, bei zusätzlichen Vorteilen für die Wärmedämmung. Das erreichte Gewichteinsparpotenzial bei einer 18 mm dicken Bodenplatte liegt im Vergleich zur konventionellen Ausführung aus Sperrholz bei 5,4 kg/m². Damit kann im Beispiel eines Schienenfahrzeugs das Gewicht der Bodenplatten, im Vergleich zur konventionellen Ausführung aus Sperrholz, um 30 Prozent gesenkt werden, was den Energieverbrauch um 25 Prozent senkt. Eine Energieeinsparung in der Anwendung wird durch das geringere Gewicht und die Wärmedämmung erzielt. Nutzfahrzeug- und Schiffbau sind weitere Anwendungsgebiete für Bodenplatten mit Schaumstoffkernen. (BMWi 2020b)

Energieeffiziente Zerspanung

Das Drehfutter einer Drehmaschine wird als energieeffiziente Komponente durch die Verwendung nicht-metallischer Werkstoffe verbunden mit einem konsequenten Leichtbauansatz entwickelt (siehe Abbildung 3-3). Eine Reduzierung der reinen Strukturmasse des Drehfutters um 50 Prozent wird durch die Verwendung eines hybriden Aufbaus möglich. Zur Bereitstellung der notwendigen Steifigkeiten sollen faserverstärkte Kunststoffe verwendet werden. (Ali et al. 2019).

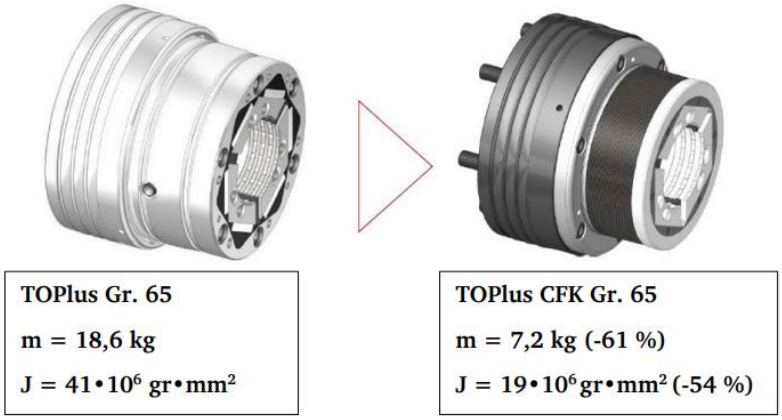

Abbildung 3-3: Reduktion der Masse und des Massenträgheitsmoment durch den Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen in Drehspannfutter, m=Masse, J=Trägheitsmoment. (Zur Verfügung gestellt von der Firma Hainbuch (Hainbuch GmbH 2021) im Rahmen von (ETA im Bestand 2019))

Dies führt zu einer Reduzierung der zur Beschleunigung des gesamten Drehfutters notwendigen Arbeit um 15 Prozent im Vergleich zum Referenzdrehfutter. Der Zusammenhang zwischen Reduktion der Strukturmasse und dem Energieeinsparpotenzial ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Die Leistungsaufnahme des Synchronmotors ist in beiden Fällen gleich, allerdings führt die verringerte Masse zu einer schnelleren Beschleunigung auf die gewünschte Drehzahl, was die genannte Energieeinsparung zur Folge hat. Neben dem geringeren Energieverbrauch verbessert die Massenreduktion das dynamische Verhalten der Maschine, die Verwendung alternativer Werkstoffe ermöglicht zudem eine Sensorintegration zur Prozessüberwachung.

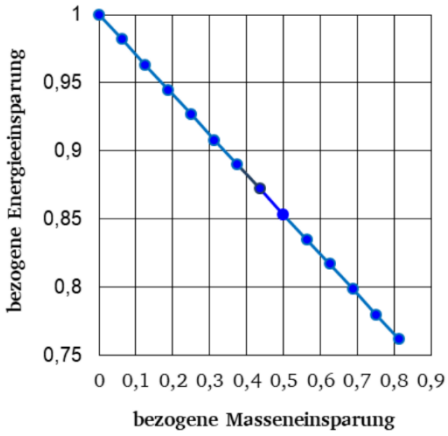

Abbildung 3-4: Verlauf der Energieeinsparung beim Hochlauf einer Synchronmaschine durch reduzierte Masse. (ETA im Bestand 2019)

Die Abschätzung des Energieeinsparpotenzials beruht auf den folgenden Annahmen, die dem Projektantrag zu entnehmen sind:

- Anteil Motorspindel an der Gesamtleistungsaufnahme einer Drehmaschine im Betriebszustand: 25 Prozent; elektrische Leistungsaufnahme: 9,73 kW
- 5 Arbeitstage/Woche; 50 Wochen/Jahr; 2-Schicht-Betrieb
- Energieersparnis pro gefertigtem Drehteil: 11,32 Prozent

Die erwartete Energieeinsparung beträgt unter den oben genannten Annahmen 1,1 MWh/a pro Maschine und 0,09 TWh/a in Deutschland. (ETA im Bestand 2019)

Abschätzung Energieeinsparpotenziale Transportbranche

Die folgende Ausführung konzentriert sich auf die Transportbranche, genauer auf PKW. Mit jeweils 30 Prozent macht die Transportbranche gemeinsam mit der Industrie den größten Anteil der weltweit verbrauchten Energie aus.(IEA 2020)

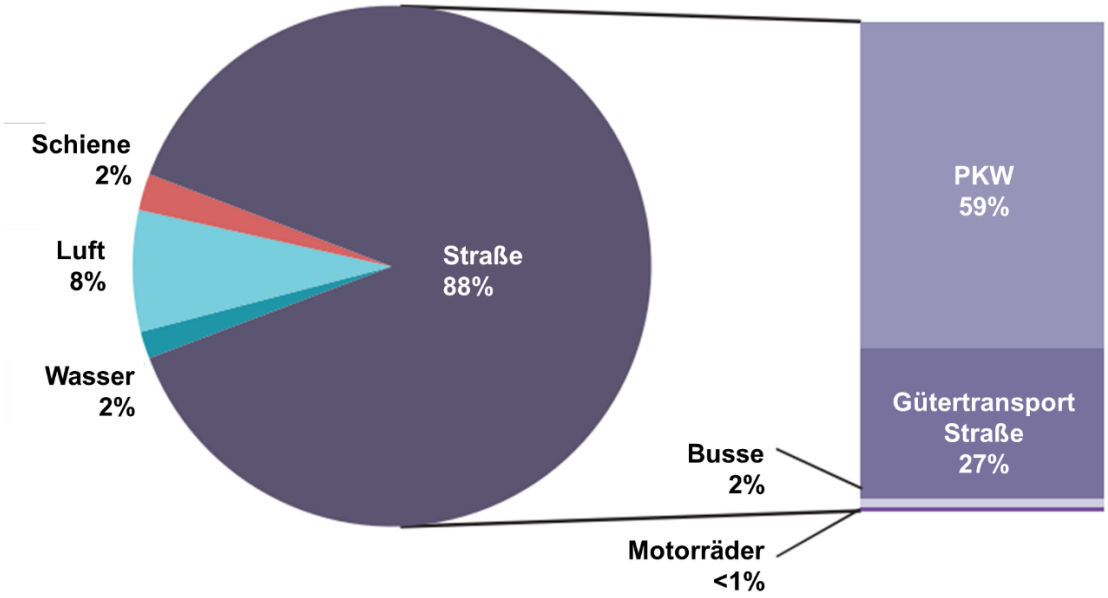

Abbildung 3-5: Energieverbrauch im Transport nach Art/Fortbewegungsmittel im Jahr 2017 (IEA 2019)

Der Straßentransport hat dabei einen Anteil von 88 Prozent und PKW wiederum einen Anteil von 59 Prozent (siehe Abbildung 3-5). (IEA 2019) Zudem hat die Automobilindustrie den größten Anteil im Verarbeitenden Gewerbe, dadurch und aufgrund des Umsatzes ist sie der bedeutendste Industriezweig in Deutschland (BMWi 2020a).

Abbildung 3-6 zeigt eine Abschätzung der Energieeinsparpotenziale für die Nutzungsphase verschiedener Transportmittel bei einer Gewichtsreduktion des Fahrzeugs von 100 kg. Schätzungen für Kraftstoffeinsparungen pro 100 km bei einer Gewichtsreduzierung von 100 kg reichen von 0,15 bis 1 l pro 100 km. Die Energieeinsparung wird hauptsächlich durch die Kilometerleistung in der Nutzungsphase bestimmt. Bei privaten PKW wird von einer Kilometerleistung von 200.000 km ausgegangen, bei kommerziell genutzten PKW wie Taxis von bis zu 800.000 km. Daraus ergibt sich eine Energieeinsparung von 27 GJ (Benzin) für private PKW und bis zu 115 GJ für Taxis. Ausgehend von einer durchschnittlichen Benzineinsparung von 0,5 l/100 km und einem CO_2-Ausstoß von 2,3 kg/l Benzin, ergibt sich eine CO_2 -Einsparung von 2.300 kg für einen PKW und 4.000 kg für kommerziell genutzte Fahrzeuge in der Nutzungsphase. (Helms und Lambrecht 2007)

Unter den Bodenfahrzeugen weisen PKW die geringste und Züge das höchste Energieeinsparpotenzial durch Gewichtsreduktion auf. Trotz begrenzter Vergleichbarkeit lässt sich feststellen, dass Hochgeschwindigkeits-Fähren eine zehnmal höhere Energieeinsparung als Züge erreichen und Flugzeuge wiederum eine zehnmal höhere Energieeinsparung als Fähren. (Helms und Lambrecht 2007)

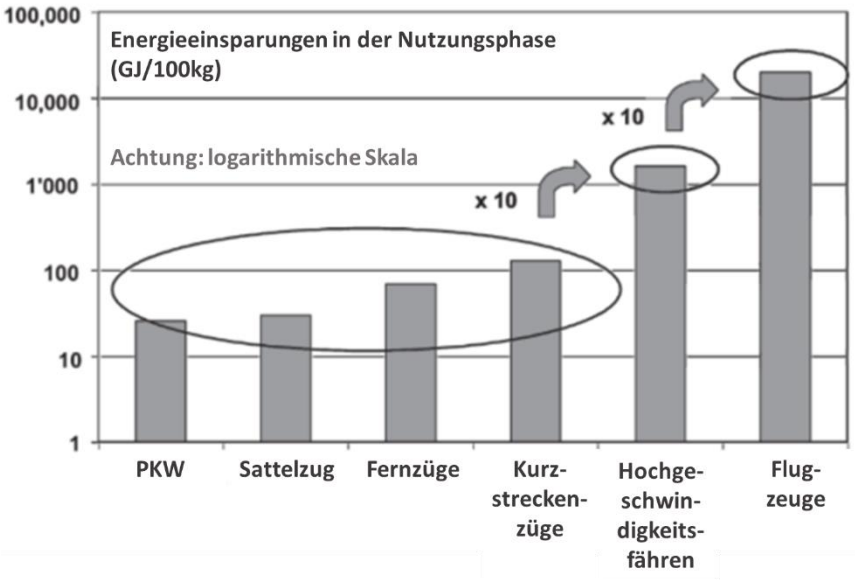

Abbildung 3-6: Durchschnittliche Energieeinsparung in der Nutzungsphase durch Gewichtsreduktion von 100 kg je nach Fahrzeuggruppe. (Helms und Lambrecht 2007)

Zur Abschätzung des gesamten Energieeinsparpotenzials in der Transportbranche werden neben der spezifischen Energieeinsparung bei einer Gewichtsreduktion von 100 kg auch das Gewichtsreduktionspotenzial und der Gesamtenergieverbrauch der jeweiligen Fahrzeugflotte berücksichtigt. Unter der Annahme, dass alle Fahrzeuge im Jahr 2000 nach Leichtbauweise auf dem damaligen Stand der Technik gebaut worden wären, schätzen Helms und Lambrecht in ihrer Arbeit aus dem Jahr 2007 eine Gesamtenergieeinsparung von 2.600 PJ für den gesamten Transportsektor, das entspricht etwa 200 Millionen Tonnen CO_2 (Helms und Lambrecht 2007). Zwar ist das absolute Energieeinsparpotenzial pro 100 kg Gewichtsreduktion bei einem Zug wesentlich höher als bei einem PKW, unter Berücksichtigung des gesamten Flottenverbrauchs ergibt sich aber das größte

Potenzial für PKW (Abbildung 3-7). Dabei wird lediglich der Energieverbrauch in der Nutzungsphase betrachtet, die aufgewendete Produktionsenergie muss gesondert betrachtet werden (Helms und Lambrecht 2007). Zur vollständigen Bewertung des Energieeinsparpotenzials muss zudem der Energieverbrauch des gesamten Lebenszyklus betrachtet werden, von der Gewinnung der Materialien bis zur Entsorgung oder dem anzustrebenden Recycling. Die insgesamt eingesparte Energie könnte durch einen Mehraufwand in der Produktion oder bei der Gewinnung der Materialien reduziert werden. Da die Nutzungsphase bei Fahrzeugen allerdings den größten Anteil der verbrauchten Energie ausmacht, wird hier nur auf diese eingegangen (Fritz et al. 2016).

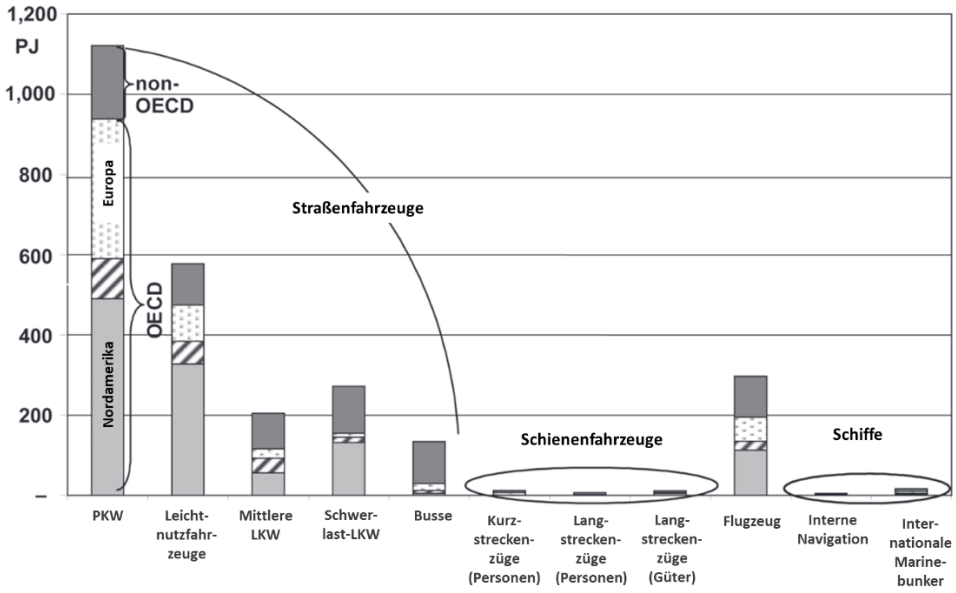

Abbildung 3-7: Potenzielle globale jährliche Primärenergieeinsparungen durch Leichtbau. (Helms und Lambrecht 2007)

Neben Energie- und Schadstoffeinsparung bietet Leichtbau auch Kostendegressionspotenziale. Auch hier ist eine Abschätzung des gesamten Kosteneinsparpotenzials für die Technologie Leichtbau schwer realisierbar, vielmehr muss jede Anwendung im Kontext ihrer individuellen Wettbewerbssituation bewertet werden.

Beispielhaft wird hier die Abschätzung von Potenzialen auf dem deutschen Markt durch Leichtbau BW betrachtet. Der deutsche Markt ist eher gesättigt, daher werden die Abschätzungen nicht durch überproportionale Wachstumsraten verzerrt. Das in den Fallbeispielen angegebene Marktpotenzial bezieht sich explizit auf den Mehrwert durch die beschriebene Leichtbaulösung und nicht auf den Umsatz mit dem Gesamtfahrzeug. Betrachtet werden die Potenziale am Beispiel des Konzeptleichtbaus eines batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV), bei dem eine neue Fahrzeugarchitektur und Bauplattform entwickelt und nicht auf konventionelle Plattformen aufgebaut wird. Hier bietet der Konzeptleichtbau, aufgrund der einsetzenden Marktentwicklung und der Entwicklung neuer Fahrzeugplattformen, eine bedeutende Möglichkeit, Ressourcen einzusparen. Die sich bietende Möglichkeit sollte zeitnah genutzt werden, da neue Plattformen aktuell bereits entwickelt werden. (Leichtbau BW GmbH 2019) Im Purpose Design können Karosserielastpfade optimiert und tragende Funktionen in Komponenten wie beispielsweise Batteriegehäuse integriert werden. Es ist von einem Masseneinsparpotenzial von ca. 10 Prozent in Bezug auf das gesamte Fahrzeug auszugehen. Basierend auf der Annahme eines Anteils von 25 Prozent an BEV an Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2030 – was 850.000 Fahrzeugen entspricht – ergeben sich folgende in Tabelle 3-1 dargestellte Einsparpotenziale für zwei verschiedene Szenarien.

Tabelle 3-1: Einsparpotenziale eines BEV in verschiedenen Szenarien (Leichtbau BW GmbH 2019)

		SZENARIO 1	SZENARIO 2
Rohstoff-/ Materialeinsparung (t)	2020	20.000	20.000
	2030	160.000	160.000
Energieeinsparung (kWh)	2020	58 Mio.	175 Mio.
	2030	485 Mio.	1.450 Mio
Emissionsreduktion (t CO_2)	2020	0	14.000
	2030	0	300.000

In Szenario 1 werden für den Leichtbau schlechte Rahmenbedingungen angenommen, in Szenario 2 möglichst günstige. Die Emissionsreduktion ist stark abhängig vom Stromix, der in Szenario 1 komplett regnerativ und für Szenario 2 der aktuelle Stromix angenommen wird. In Szenario 1 wird außerdem von einer Energieeinsparung durch Leichtbau von 0,2 kWh pro 100 kg und 100 km ausgegeangen, in Szenario 2 von 0,6 kWh. Die jährliche Laufleistung beträgt in beiden Fällen 15.000 km. Das Marktpotenzial pro Fahrzeug ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Je höher die Reichweite des Fahrzeugs, desto größer und schwerer ist die Batterie – demensprechend höher ist auch das Einsparpotenzial aufgrund von Sekundärgewichtseffekten. Das sind Gewichteinsparpotenziale, die durch die leichte Konstruktion einer anderen Komponente möglich werden. Gelingt es beispielsweise einen Motor 10 kg leichter zu konstruieren, dann ergeben sich daraus weitere Einsparungen, weil die Motoraufhängung weniger robust sein muss und sogar die Bremsen kleiner dimensioniert sein können. (Fuchs und Lienkamp 2013) Für eine Einsparung pro 100 kg Gewichteinsparung und 100 km Fahrleistung liegt das Kostenpotenzial in Szenario 1 zwischen 0,5 und 6 Euro pro kg, für Szenario 2 zwischen 1 und 17 Euro. (Leichtbau BW GmbH 2019)

Abbildung 3-8: Minimales Kostenpotenzial für Leichtbaumaßnahmen pro kg Fahrzeuggewicht. (Leichtbau BW GmbH 2019)

Das kummulierte Marktpotenzial für Deutschland ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Für das Jahr 2030 wird ein Marktwert zwischen 290 und 810 Mio. Euro für Leichtbaulösungen erwartet. (Leichtbau BW GmbH 2019)

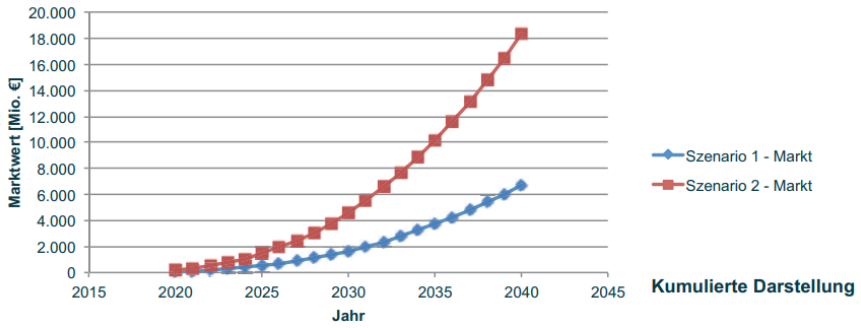

Abbildung 3-9: Marktpotenzial von Leichtbaulösungen in Deutschland abhängig von unterschiedlichen Szenarien. (Leichtbau BW GmbH 2019)

Leichtbaulösungen sind häufig mit Mehrkosten bei den initialen Investitionen verbunden. Das aufgeführte Beispiel zeigt aber, dass es sich lohnen kann, die Kosten über den gesamten Lebenszyklus zu betrachten, da die initialen Investitionen sich amortisieren und anschließend sogar Gewinne erzielt werden können. Darüber hinaus werden Kostenvorteile durch den Handel mit Emissionszertifikaten erwartet, die durch Leichtbau induzierte Energieeinsparung und die damit einhergehende Emissionseinsparung erzielt werden können. Durch den zunehmenden Einsatz regenerativer Energieträger wird sich der Mehrwert von Leichtbaumaßnahmen im Bereich der Mobilität verändern. Der Einfluss zur Emissionsreduktion im Betrieb, der bei Verbrennern den größten Anteil der Emissionen ausmacht, wird sinken und der Nutzen von Leichtbau langfristig vermehrt in der ressourcenschonenden Produktion liegen. (Leichtbau BW GmbH 2019) Aus Substituierungseffekten von Märkten und Technologien können sich zukünftig neue Rahmenbedingungen für Leichtbauanwendungen ergeben – etwa durch den Ersatz konventioneller Fahrzeuge durch elektrifizierte. Diese Neuorientierung bietet die Chance „Konzeptleichtbauansätze schon in einer frühen Produktentwicklungsphase mit zu integrieren und dürfen nicht übergangen werden“. (Leichtbau BW GmbH 2019)

Auswirkungen auf die Fertigung

Die Umsetzung von Leichtbauvorhaben bringt neue Anforderungen, auch an die Fertigungstechnik, mit sich. Dies betrifft die verwendeten Verfahren und Materialien sowie die Fertigungsplanung. Deutlich wird dies an einem Beispiel aus der Aluminiumindustrie. Zukünftig werden hier vermehrt sogenannte *Clean Sheet-Designs* entstehen. Eine ganze Komponente wird neu gedacht - unter Berücksichtigung neuer Möglichkeiten durch die Additive Fertigung (siehe Eduard-Analyse aus EE4InG zu diesem Thema (EE4InG 2021)) werden multifunktionale Designs erstellt. Eine Baugruppe zur Befestigung eines Hydrauliktanks im Flugzeug besteht bislang beispielsweise aus 126 Einzelteilen und mehr als 60 Verbindungselementen. Nun ist eine Serienlösung denkbar, die aus lediglich drei bis vier Teilen besteht und dabei ca. 30 Prozent des Gewichtes spart. (Gesamtverband der Aluminiumindustrie 2017) Hier spielen die verschiedenen Dimensionen des Leichtbaus zusammen. Aus Aluminium, als wichtigem Leichtbauwerkstoff, wird mittels Additiver Fertigung eine zuvor digital optimierte Komponente gefertigt. Zugleich wurde aus den Expertengesprächen deutlich. dass die Fertigungstechnik vor interdisziplinären Herausforderungen steht.

Die Kombination verschiedener Materialien zur optimalen Bauteilgestaltung im hybriden Leichtbau stellen neue Herausforderungen an die Fertigungsverfahren. Das Fügen artfremder Werkstoffe ist mit bisherigen Verfahren nur bedingt möglich. Bei Metall-Kunststoff-Verbindungen mittels Clinchen

kann es aufgrund der Reversibilität kaltumgeformter Kunststoffe zum Lösen der Verbindung kommen. Bestehende Fügeverfahren müssen weiterentwickelt und die Anforderungen von Anfang an in die Produktionsstrategie miteinbezogen werden. (Georgi et al. 2017)

Die Produktion von Leichtbaulösungen kann, verglichen mit herkömmlichen Lösungen, zu einem erheblichen Mehrenergieverbrauch führen (siehe Abbildung 3-10). Wird beispielsweise hochfester Stahl verwendet, sind zusätzliche Arbeitsschritte wie Umformen oder Wärmebehandlung nötig, um die gewünschten Werkstoffeigenschaft zu erreichen. Die Verwendung alternativer Werkstoffe kann ebenso einen erhöhten Energieverbrauch zur Folge haben, beispielsweise bei der Verwendung von Aluminium oder Magnesium anstatt Stahl. (Tekkaya 2018) Leichtbaumaterialien haben in der Produktionsphase meist einen höheren Energiebedarf und damit einen höheren korrespondierenden Treibhausgasausstoß als Stahl. Die Produktion von Aluminium benötigt beispielsweise etwa 207,5 MJ/kg und die von Magnesium 350,5 MJ/kg - im Vergleich dazu Stahl nur 32 MJ/kg. Entsprechend verhält es sich mit den CO_2-Emissionen. Aluminium und Magnesium kommen auf 12 und 22 kg CO_2-eq./kg, Stahl dagegen lediglich auf 2,5 kg CO_2-eq./kg. Neben der Energieeinsparung in der Nutzungsphase ist also auch der erhöhte Energieaufwand der Produktionsphase zu berücksichtigen. (He et al. 2021) Bei der Herstellung eines PKW ist der Energieaufwand für die Produktion der Materialien in den meisten Fällen deutlich höher als die Energie, die für die nachfolgenden Produktionsschritte benötigt wird. Im Schnitt werden 78 Prozent des gesamten Energiebedarfs bei der Rohmaterialherstellung benötigt. (Tekkaya 2018)

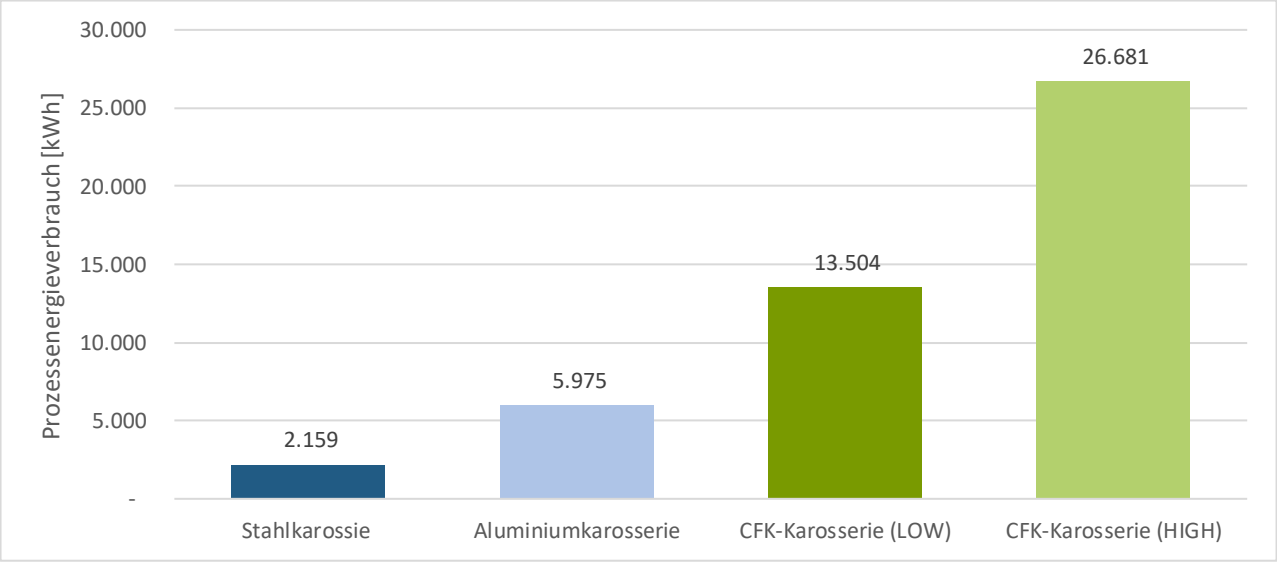

Abbildung 3-10: Prozessenergieverbrauch für eine Karosserie bei verschiedenen Materialien. (LOW und HIGH sind zwei verschiedene Szenarien basierend auf unterschiedlichen Daten, eigene Darstellung nach Zottler 2014)

Beim Vergleich des Energieverbrauchs der Karosserieherstellung aus Stahl, Aluminium und CFK zeigt sich in der Studie, dass die Fertigung in allen Fällen nur einen geringen Anteil am gesamten Energieverbrauch der Herstellung hat. Weniger als ein Viertel der Primärenergie, die zur Herstellung einer Stahlkarosserie benötigt wird, entfällt auf die Fertigung. Die zur Fertigung einer Aluminium- oder CFK-Karosserie benötigte Prozessenergie ist, aufgrund des sehr hohen Energieverbrauchs der Materialherstellung, mit weniger als einem Prozent der gesamten Produktionsenergie vernachlässigbar gering. Dennoch benötigt die Fertigung einer Aluminiumkarosserie etwa doppelt so viel Energie wie die Stahlalternative, die CFK-Karosserie hingegen weniger als die Hälfte (siehe Tabelle 3-2). In Bezug zu Abbildung 3-10 zeigt sich damit nochmal der hohe Anteil der Materialherstellung an der benötigten Prozessenergie bei CFK. (Zottler 2014)

Tabelle 3-2: Energieverbrauch der Karosseriefertigung (ohne Materialgherstellung) in kWh/kg. (Zottler 2014)

Stahl	Aluminium	CFK
1,67 kWh/kg	3,19 kWh/kg	0,64 kWh/kg

Ob sich der erhöhte Energieverbrauch in der Herstellung einer Leichtbaukarosserie über den gesamten Lebenszyklus amortisiert und eine CO_2-Einsparung möglich wird, hängt stark von den Rahmenbedingungen ab. Entscheidend sind das Nutzungsverhalten und der CO_2-Faktor des verwendeten Energieträgers. Ob ein erhöhter Energieverbrauch in der Produktion bei Leichtbaulösungen zu rechtfertigen ist, muss deswegen anhand einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse bewertet werden. (Zottler 2014)

Aufbauend auf den Ergebnissen schätzt Zottler das CO_2-Einsparpotenzial über den Lebenszyklus neuzugelassener PKW in Deutschland ab. Wären die 3,44 Mio. neu zugelassenen PKW in Deutschland im Jahr 2018 (Kraftfahrt-Bundesamt 2018) mit einer CFK-Karosserie anstatt einer Stahlkarosserie hergestellt worden, könnten etwa 10,6 Mio. t CO_2 über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge eingespart werden. (Zottler 2014)

Die energieintensive Produktion von Leichtbauwerkstoffen macht das Recycling dieser interessant. He et al. kommen zu dem Ergebnis, dass die Verwendung von recycelter Carbonfaser auch in der Cradle-to-Gate-Phase zu Energieeinsparungen führt. Verglichen mit der herkömmlichen Aluminiumausführung eines Seitenspiegelhalters wird mit einer recycelten, carbonfaserverstärkten Polyamidausführung der Primärenergiebedarf um über 60 Prozent und die Treibhausgasemission um über 50 Prozent reduziert. Dabei variiert das Einsparpotenzial in Abhängigkeit des Produktionsstandorts und des verwendeten Energieträgers sowie des Carbonfaseranteils. Die Produktion von Polyamid wurde als „Hotspot“, also als kritischer Prozess, im Lebenszyklus eines recycelten carbonfaserverstärkten Polymerbauteils identifiziert. (He et al. 2021)

Darüber hinaus kann der Einsatz von Leichtbau in den Produktionsmaschinen der Fertigung ein großes Potenzial zur Energieeinsparung und Kostensenkung bieten. Wesentlich ist auch hier, eine integrierte Lebenszyklusanalyse durchzuführen - den veränderten Energieverbrauch und die Kosten der Herstellung der Maschine mit dem Verbrauch und den Kosten im Betrieb abzugleichen (Fraunhofer IPA 2016). Laut einer Schätzung des Verbands Leichtbau BW könnte durch Leichtbau der Stahlverbrauch des gesamten Maschinenbaus in Deutschland um ca. 1,53 Mio. t pro Jahr reduziert werden, was einer Energieeinsparung von ca. 7.345 GWh pro Jahr und einer Vermeidung von 2,07 Mio. t CO_2-Emissionen pro Jahr entspricht (Leichtbau BW GmbH o.J.).

4. Technologiezyklusanalyse

Für die Einordnung des Themenfelds Leichtbau wird im Folgenden eine Publikations- und eine Patentanalyse für verschiedene Subthemen durchgeführt. Im Anschluss folgt die begründete Abschätzung der Einordnung.

Publikationsanalyse

Publikationen zu Leichtbauentwicklungen dienen als Indikator für wissenschaftliche/technische Trends und daher langfristige Entwicklungen. Entgegen einem klassischen Ansatz (z. B. gezielte Leichtbaumaterialien und -verfahren) wurde ein markt- bzw. branchenspezifischer Ansatz verfolgt.

Branchen bzw. Anwendungsfelder wurden über sogenannte Subjekt-Kategorien in der Publikationsdatenbank Web of Science (WoS) zusammengefasst. Diese Kategorien ordnen wissenschaftliche Artikel entsprechenden Themen zu, mit welchen diese sich befassen (z. B. Materialien für Textilanwendungen, Bau & Konstruktion, Transport). In Kombination mit dem Stichwort für Leichtbau (im Englischen: lightweight) und somit der vorrangigen Funktion, Gewicht zu reduzieren, lassen sich für den Leichtbau relevante Publikationen innerhalb einer jeweiligen Branche identifizieren. Die Publikationsanalyse wurde in der WoS durchgeführt. Dabei ergab sich der die Anzahl an Publikationen im Zeitverlauf nach Abbildung 4-1. Anders als bei Patenten zeigt sich hier ein deutlicher Zuwachs. Insbesondere von 2015 bis 2019 ist ein steiler Anstieg zu erkennen.

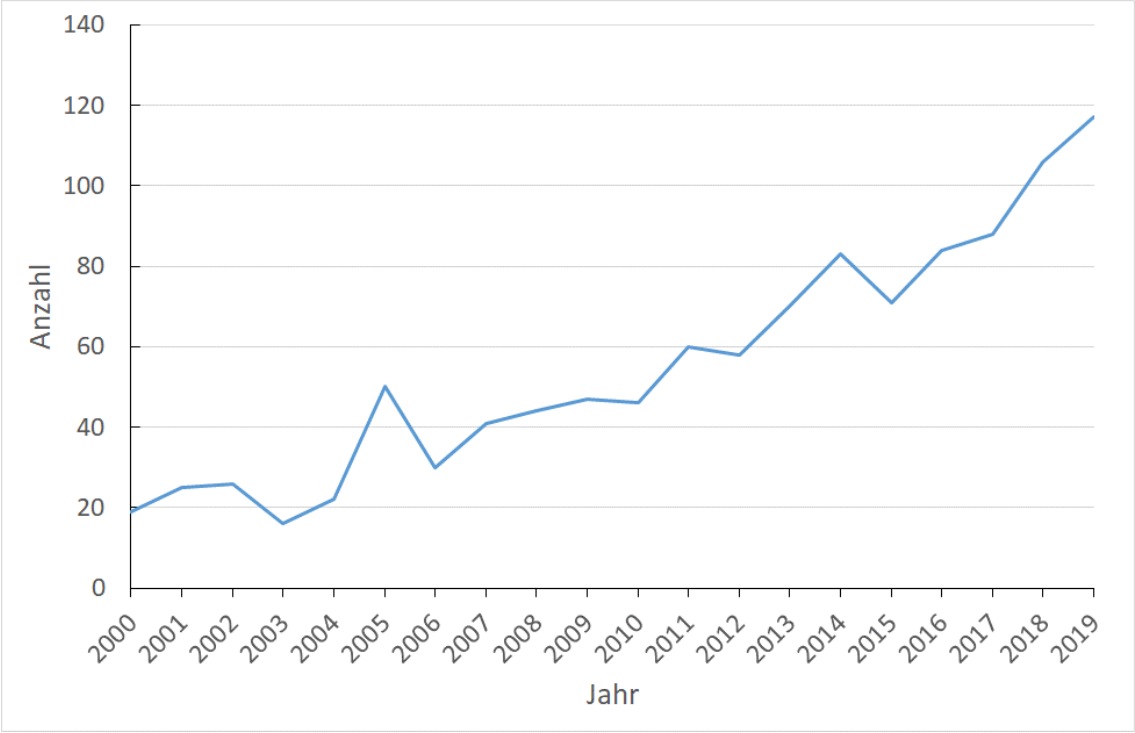

Abbildung 4-1: Anzahl von Leichtbaupublikationen im Zeitverlauf. Quelle: WoS, Schmoch 2020

Die n Länder mit den meisten Publikationen sind in Tabelle 4-1 aufgelistet. Hier liegt Deutschland klar an erster Stelle.

Tabelle 4-1: Leichtbaupublikationen nach Ländern, 2010-2019. (Schmoch 2020)

Land	Anzahl Publikationen
Deutschland	438
China	48
USA	42
Österreich	27
Italien	22

Patentanalyse

Patentanmeldungen zu Leichtbauentwicklungen dienen als Indikator für technische/ökonomische Trends und daher mittelfristig relevante Entwicklungen, da hier ein Interesse der Kommerzialisierung bei den Anmeldenden vorliegt. Analog zum Vorgehen wie bei der Publikationsanalyse beschrieben, wurden Branchen des verarbeitenden Gewerbes klassifiziert, hier anhand der sogenannten

International Patent Classification (IPC) Codes, welche ebenfalls Patente den jeweiligen technologischen Themen zuordnen, mit welchen diese sich befassen. Die Patentrecherche zu Leichtbau wurde in der Datenbank World Patents Index (WPI) durchgeführt. Es wurden transnationale Patentanmeldungen analysiert. Das sind Patentanmeldungen mit höherem Wert, die eine gute Vergleichbarkeit von Ländern erlauben. Es wurde mit der folgenden Suchstrategie gearbeitet: *lightweight construct? or light construct? or light weight construct?.*

Zwischen 2000 und 2010 zeigt sich eine Stagnation auf dem Niveau von etwa 40 Patentanmeldungen pro Jahr und anschließend bis 2018 eine Steigerung auf etwa 60 Anmeldungen (Abbildung 4-2).

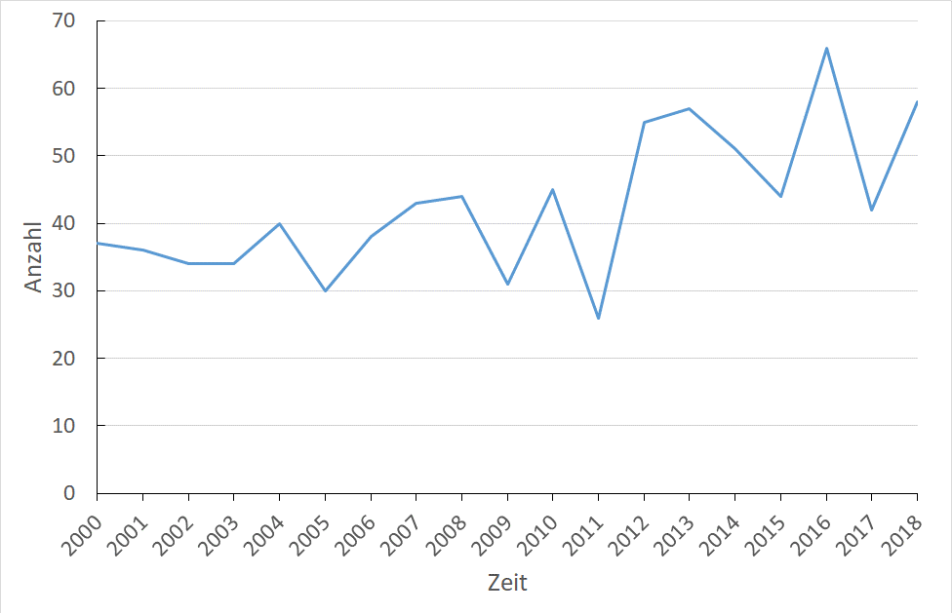

Abbildung 4-2: Transnationale Patentanmeldungen zu Leichtbau. (Schmoch 2020)

Bei der Aufteilung nach Branchen ergeben sich die Zahlen von Patentanmeldungen nach Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: Leichtbau Branchen, Patentanmeldungen 2009-2018 (Schmoch 2020)

Anbieterorientierte Branchen	Anzahl Patentanmeldungen
Metall und Metallwaren	29
Gummi- und Kunststoffprodukte	67
Glas, Keramik	20
Holz, Papier, Druckerzeugnisse	13
Anwenderorientierte Branchen	
Transport gesamt	89
PKW	54
Maschinen, Equipment	129
Konstruktion, Konstruktions/Baumaterialien	90
Elektrogeräte, elektr. optische Geräte	64
Energie	6
Landwirtschaft	17

In Tabelle 4-3 sind die wichtigsten Länder bei transnationalen Patentanmeldungen aufgelistet. Auch hier ist Deutschland klar auf Platz 1.

Tabelle 4-3: Transnationale Patentanmeldungen nach Ländern, 2009-2018

Land	Patentanmeldungen 2009-2018
Deutschland	253
USA	56
Schweiz	32
China	25
Großbritannien	24

Die durchgeführte Publikations- und Patentanalyse dienen der Einordnung der Technologie Leichtbau in den Technologiezyklus. Zugrunde gelegt wird das Technikzyklusmodell von Meyer-Krahmer und Dreher (2004), das den Technologiezyklus in 6 Phasen einteilt und dabei einen Doppel-Hype-Charakter aufweist. Im Verlauf des Technologiezyklus gehen wissenschaftliche Trends (Publikationen) technischen Trends stets um 5 bis 10 Jahre voraus. Die Publikationen erreichen noch vor dem ersten Patentboom eine Stagnationsphase und nehmen auch vor dem zweiten Patentboom wieder deutlich zu. Wissenschaftliche Aktivitäten sind beständiger und zeigen nicht so große Schwankungen auf wie technologische Entwicklungen. Der Abstand zwischen dem ersten und zweiten Anstieg kann über 15 Jahre betragen und der Technologiezyklus sich demnach über mehrere Dekaden erstrecken. (Dreher et al. 2005)

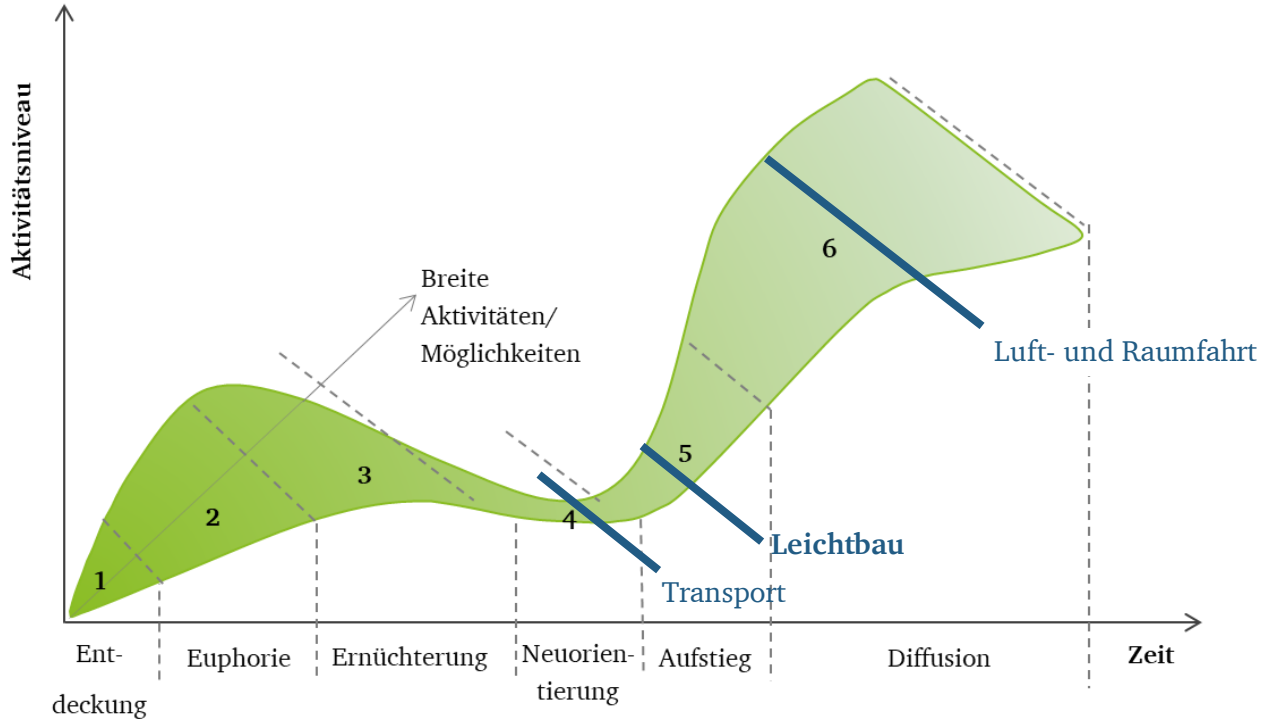

Abbildung 4-3: Einschätzung der Einordnung von Leichtbau (in verschiedenen Branchen) im Technikzyklus. (Eigene Darstellung in Anlehnung an Meyer-Krahmer und Dreher 2004)

Das Stagnieren der Patentanmeldungen bis 2010 (Abbildung 4-2) weist auf eine Phase der Neuorientierung hin. Aufgrund des anschließenden und aktuell anhaltenden Anstiegs der Patentanmeldungen sowie der stark ansteigenden Publikationszahlen kann die Technologie Leichtbau der Phase des Aufstiegs (Phase 5) zugeordnet werden (siehe Abbildung 4-3). Leichtbau ist keine neue Erfindung und weist beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt einen hohen Reifegrad

auf, gewinnt aber durch sich ändernde Rahmenbedingungen – Notwendigkeit der Reduktion von CO_2-Emissionen, die häufig eng verknüpft sind mit dem Energieverbrauch - in einigen Branchen an Relevanz. Anwendungen, die bisher nicht rentabel waren, werden realisierbar. Die verschiedenen Branchen können sich dabei in unterschiedlichen Phasen des Technologiezyklus befinden, da die Implementierung von Leichtbauansätzen unterschiedlich weit fortgeschritten ist. In der Luft- und Raumfahrt beispielsweise ist der Leichtbau notwendigerweise seit Jahren etabliert und nimmt eine Vorreiterrolle ein (Abbildung 4-3), während der Leichtbau in der Transportbranche in eine frühere Phase des Zyklus eingeordnet wird, da er hier zwar Anwendung findet aber erst in den letzten Jahren in der Breite zunehmend etabliert wird.

5. Innovationssystemanalyse

Die erfolgreiche und nachhaltige Umsetzung von Innovationen ist nicht allein abhängig von den am Markt agierenden Unternehmen, sondern insbesondere vom Zusammenspiel aller Akteure eines Innovationssystems. Innovationssysteme umfassen die Bereiche Bildung, Forschung, Industrie und Politik. Entscheidend für die Attraktivität eines Innovationssystems ist seine *dynamische Effizienz*, d. h. seine Fähigkeit, sich zielgerichtet auszurichten (Dreher et al. 2005). Die Politik kann durch ihren Einfluss auf die regulierenden Rahmenbedingungen und die Vergabe von Fördermitteln für Forschungsprojekte bedeutenden Einfluss auf das Innovationssystem ausüben.

Dem Innovationssystem des Leichtbaus können in Deutschland über 400 Unternehmen sowie knapp 200 Hochschulen und Universitäten zugeordnet werden. Darüber hinaus gibt es 79 außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und 69 Netzwerke. (BMWi 2020f) Eine Auswertung der EnArgus-Projektdatenbank der vergangenen 20 Jahre zum Stichwort *Leichtbau* ergab auf Seiten der Forschungseinrichtungen häufige Beteiligungen der Fraunhofer-Institute (13) und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (12) sowie der RWTH Aachen (4). (enArgus Projektdatenbank 2020)

In Abbildung 5-1 sind einige wesentliche Akteure, Netzwerke und Förderprogramme des Innovationssystems Leichtbau in Deutschland aufgeführt. Eine umfassende Auflistung der Akteure findet sich im Leichtbauatlas des BMWi (BMWi 2020f). Die Anwendung bietet die Möglichkeit nach verschiedenen Kategorien zu filtern und so relevante Akteure des Leichtbaus zu identifizieren. Mit der Initiative Leichtbau unterstützt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie den technologieübergreifenden und effizienten Wissenstransfer zwischen den verschiedenen, bundesweiten Akteuren beim Leichtbau. Die Geschäftsstelle Leichtbau dient als zentraler Anlaufpunkt, das *Forum Leichtbau* bietet den Akteuren regelmäßigen Austausch am Runden Tisch. (BMWi 2020e)

Industrie

3A Composites GmbH
Vorwerk Autotec GmbH & Co. KG
Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. KG
Gubesch Thermoforming GmbH
carboNXT GmbH

…

Forschung

Fraunhofer-Institut IPA
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
Aachener Zentrum für integrativen Leichtbau, RWTH Aachen
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden
LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH

Netzwerke & Förderung

Leichtbau BW
Composites United
Technologietransfer-Programm Leichtbau
Forum Leichtbau
European Lightweight Association
HYB-LB - Innovationsnetzwerk für den hybriden Leichtbau
Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien

…

Abbildung 5-1: Akteure des Innovationssystem Leichtbau

6. Ableitung möglicher Entwicklungsziele (technisch und ökonomisch)

Ein wesentliches Ziel beim Thema Leichtbau ist die Vernetzung der zahlreichen kleinen und mittelständischen Unternehmen in Deutschland untereinander und mit den Forschungseinrichtungen. Aufgrund der Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten und Ausführungen von Leichtbaulösungen ist die Koordination verschiedenster Kompetenzen von besonderer Bedeutung, um die Energieeffizienzpotenziale auszuschöpfen (siehe Kapitel *Hemmnisse* in Fraunhofer IPA 2016).

Die Herstellung von Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium oder CFK ist nur mit großem Energieaufwand möglich. Im Sinne einer nachhaltigen Leichtbaustrategie ist eine primäre Produktion der Werkstoffe unter Verwendung erneuerbarer Energieträger anzustreben. Darüber hinaus sollte der Anteil recycelter Werkstoffe gesteigert werden, da hier der hohe Energieaufwand der primären Produktion entfällt bzw. reduziert wird. Zudem ist insbesondere bei der Verwendung von Verbundwerkstoffen auf ein *Design for Recycling* zu achten – eine Produktgestaltung, die eine Trennung der kombinierten Materialien am Ende des Lebenszyklus ermöglicht und damit die Wiederverwendung der Werkstoffe erleichtert. Für Kunststoffe ist das mechanische Recycling bereits etabliert, chemische Verfahren finden bisher nur in Pilotanlagen Anwendung. Um das Potenzial zu schöpfen, muss die Forschung auf diesem Gebiet vorangetrieben werden (BMWi 2020g).

Stahl und Aluminium haben den größten Marktanteil an Leichtbauwerkstoffen, Faserverbundwerksstoffe dagegen einen geringen Anteil mit großem Wachstumspotenzial. (Fraunhofer IPA et al. 2012) Insbesondere in der günstigen Massenproduktion wird weiterhin

vorwiegend Stahl eingesetzt. Ob Faserverbundwerkstoffe insgesamt und aus energetischer Sicht zu bevorzugen sind, ist fallspezifisch mit einer ganzheitlichen Ökobilanz (LCA) zu prüfen. LCAs sind ein wichtiges Vorgehen zur Abschätzung der Energieeinsparpotenziale, welche sich mit Leichtbaulösungen erzielen lassen. Eine LCA durchzuführen ist allerdings sehr aufwendig und für kleine Unternehmen nur schwer darstellbar. Daher müssen einheitliche, standardisierte Vorgehensweisen erstellt und zugänglich gemacht werden. Dazu zählt beispielsweise die (kostenlose) Verfügbarkeit von LCIA-Daten (life cycle impact assessment) wie dem Treibhausgaspotential in der Einheit CO_2-Äquivalente für verschiedene Roh- und Betriebsstoffe oder die Erstellung von Fallbeispielen. Hier kann es hilfreich sein, Fallbeispiele neben den Vorteilen für bspw. die Produktivität (siehe Kapitel *Beispiele* in Fraunhofer IPA 2016) auch mit ihren energetischen Vorteilen zu quantifizieren.

Mit Hilfe eines Digitalen Zwillings ist eine schnelle und ressourcenschonende Prozess-, Verfahrens- und Produktoptimierung entlang des gesamten Lebenszyklus möglich (BMWi 2021). Daher müssen virtuelle Prozessketten für den Systemleichtbau sowie computergestützte LCA etabliert werden. Zudem sollten für eine automatisierte, evaluative Produktoptimierung die bei der Produktion anfallenden Daten gespeichert und beispielsweise mittels Künstlicher Intelligenz ausgewertet werden. (BMWi 2020g)

In der Literatur finden sich wenige Erkenntnisse über die Herausforderungen, die sich durch die Verarbeitung von Leichtbauwerkstoffen und durch hybriden Leichtbau für die Fertigungstechnologie ergeben. Auf diesem Gebiet besteht Forschungsbedarf.

Zertifizierungsverfahren für neue Leichtbauwerkstoffe müssen geschaffen werden, um den serienmäßigen Einsatz zu ermöglichen. Dazu müssen bestehende Rechtsnormen überprüft und angepasst werden. (Europäische Kommission 2016)

7. Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen

Synergieeffekte werden nicht ausgenutzt aufgrund des fehlenden Wissenstransfers zwischen Forschung und Unternehmen, zwischen Unternehmen untereinander und zwischen verschiedenen Branchen, die sich mit Leichtbau befassen. (Fraunhofer IPA et al. 2012). Grund für den mangelnden Wissenstransfer zwischen Unternehmen ist unter anderem das fehlende Vertrauen in die Zusammenarbeit untereinander aus Sorge eines Wettbewerbsnachteils durch Preisgabe von Erkenntnissen. Zudem besteht zwischen der Forschung, die sich mit Grundlagen beschäftigt, und der Anwendung in der Industrie eine Lücke, die es zu schließen gilt (BMWi 2020a).

Für eine realistische Bewertung der Umweltauswirkung von Faserverbundwerkstoffen mittels LCA fehlt es an verfügbaren Daten, insbesondere in der Produktionsphase und dem Recyclingprozess. Es fehlt außerdem an standardisierten Lebenszyklusmodelle zur Bewertung von Leichtbauvorhaben. Es besteht zudem ein Mangel an Erfahrung und etablierten Strukturen auf dem Gebiet des Recyclings von Verbundwerkstoffen. (Fraunhofer IPA et al. 2012 und Müller et al. 2019).

Die fehlende Ausbildung von Fachkräften in der „spezielle[n] Denkweise des Leichtbaus“ an Hoch- und Berufsschulen wird außerdem als großes Hemmnis für das Thema Leichtbau eingeschätzt. (Fraunhofer IPA et al. 2012)

Die Verwendung von Verbundwerkstoffen erfordert zudem die (Weiter-)Entwicklung neuer Fertigungsverfahren, da Schweißen zum Beispiel nicht möglich ist. (BMWi 2020g, siehe auch Ausführung in „Eduard-Analyse Additive Fertigung“ des EE4InG-Projektes (EE4InG 2021))

Fehlende Zertifizierungsverfahren auf EU-Ebene verlangsamen den Einsatz neuer Leichtbauwerkstoffe. (Europäische Kommission 2016). Bestehende Regelwerke wie Prüfverfahren für Werkstoffe sind nicht auf Leichtbau anwendbar und erschweren den Einsatz (Experteninterviews).

Leichtbaulösungen sind, verglichen mit herkömmlichen Lösungen, häufig zunächst mit (höheren) (Entwicklungs-)Kosten verbunden. Dies erschwert insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) den Einsatz von Leichtbaulösungen, da diese selten über finanzielle Rücklagen verfügen, um lange Entwicklungsvorhaben finanzieren zu können. (Fraunhofer IPA 2016) Zudem wird auf bestehende Verfahren und Abläufe gesetzt, da häufig kein Anreiz besteht, diese zugunsten von Leichtbaulösungen zu ändern.

8. Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen

Im Folgenden werden Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen aufgeführt, die sich aus der Analyse sowie den Experteninterviews ergeben haben.

Vernetzung

Die Vernetzung der Leichtbauakteure entlang des Wertschöpfungsprozess und über Branchengrenzen ist die zentrale Aufgabe zur Förderung des Leichtbaus. Das BMWi hat mit der Initiative Leichtbau bereits einige Angebote auf nationaler Ebene geschaffen. Auf europäischer Ebene entstehen gerade sowohl öffentlich-rechtliche und wissenschaftliche als auch unternehmensbasierte Netzwerke wie ELA (Wissenschaft) und ECGA/CU (Wirtschaft) für Leichtbau-Anbieter und -Abnehmer. Diese bestehenden Angebote gilt es weiter auszubauen und zugleich durch geeignete Öffentlichkeitsarbeit auf diese aufmerksam zu machen. Zudem sollte der Einfluss von Leichtbaulösungen auf den Energiebedarf in Unternehmen bei den Vorhaben stärker fokussiert und eingefordert werden.

Bildung

Zukünftig werden zahlreiche Fachkräfte im Leichtbau benötigt. Um eine Basis für innovativen Leichtbau in Deutschland zu schaffen, sollte die Vermittlung von ganzheitlichen und interdisziplinären Leichtbaukompetenzen in bestehende Lehrpläne integriert und eigene Ausbildungen geschaffen werden.

Standards

Um den Transfer von der Forschung in die Anwendung zu beschleunigen, müssen standardisierte Vorgehensweisen geschaffen werden, die es insbesondere KMU ermöglichen, LCAs durchzuführen und so mögliche Potenziale frühzeitig abzuschätzen. Dazu ist eine zentrale Plattform nötig, auf der qualitativ hochwertige Daten zum Energie- und Ressourcenverbrauch entlang des gesamten Lebenszyklus (inklusive End-of-Life) gesammelt, strukturiert und branchenübergreifend allen

Unternehmen zugänglich gemacht werden. Neben den Bilanzierungstools sollten außerdem Kennwerte und Verfahren zur Feststellung der dynamischen und statischen Festigkeit von Leichtbauwerkstoffen erarbeitet werden.

Recycling

Das volle Energieeffizienzpotential von Leichtbau wird ausgeschöpft, wenn die energieintensiven Werkstoffe wie Aluminium oder CFK recycelt werden. Die Entwicklung von Recyclingverfahren und recyclingfähiger Produkte sollte auch aus energetischer Sicht gefördert werden, mit dem Ziel, eine zirkuläre Wirtschaft zu etablieren. Da das Recycling von Werkstoffen, insbesondere der im Leichtbau verwendeten, häufig mit Qualitätseinbußen einhergeht, ist ein *Design for Circular Economy* anzustreben, welches eine Wiederverwendung von Produkten und Werkstoffen auf einer möglichst hohen Wertschöpfungsstufe anstrebt und konsequent von Anfang an mitberücksichtigt.

Forschung

Die Verwendung und insbesondere die Kombination von Leichtbauwerkstoffen stellen neue Anforderungen an die Fertigungstechnik. Die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren und Weiterentwicklung etablierter Verfahren sollte gefördert werden.

Zudem bietet der Leichtbau im Maschinenbau ein großes Potential zur Energieeinsparung. Am Beispiel der Drehmaschine konnte gezeigt werden, dass der Einsatz eines Leichtbau-Spannfutters bis zu 90 GWh pro Jahr in ganz Deutschland einsparen könnte. Für den gesamten Maschinenbau ergibt sich ein Einsparpotential von 7.345 GWh, das entspricht dem jährlichen Verbrauch von 1,5 Mio. Haushalten (Leichtbau BW GmbH o.J.).

Der Konzeptleichtbau bietet ebenfalls ein großes Potential, das gefördert werden sollte. Allein die Neuentwicklung von Fahrzeugarchitektur und Bauplattform von batterieelektrischen Fahrzeugen nach dem Prinzip des Konzeptleichtbaus ergibt ein Energieeinsparpotential von bis zu 1.450 GWh bis zum Jahr 2030 in Deutschland. (Leichtbau BW GmbH 2019) Die Forschungsförderung sollte dabei technologieoffen und werkstoffneutral erfolgen, da die Potentiale anwendungsfallspezifisch variieren können. Dabei bietet sich der Anreiz über die CO_2-Einsparung über den gesamten Produktlebenszyklus (inklusive End-of-Life) an.

Literaturverzeichnis

Ali, Fares; Birk, Frederik; Öztürk, Tuğrul; Abele, Eberhard; Weigold, Matthias (2019): Hybrider Leichtbau in Werkzeugmaschinen: Untersuchung des dynamischen Verhaltens von CFK-Mineralguss-Hybrid-Bauweisen. In: *wt Werkstattstechnik online* (109 (1/2)), S. 67-71.

BMWi (2020a): Automobilindustrie. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html, zuletzt geprüft am 29.09.2021.

BMWi (2020b): Best-Practice-Beispiel Bodenplatte mit Schaumkern. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/best-practice-beispiel-bodenplatte-schaumkern.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

BMWi (2020c): Best-Practice-Beispiel Carbonbeton. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/best-practice-beispiel-carbonbeton.pdf?__blob=publicationFile&v=14, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

BMWi (2020d): Best-Practice-Beispiel Sandwich-Formteil. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/best-practice-beispiel-sandwich-formteile.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

BMWi (2020e): Leichtbau. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/leichtbau.html, zuletzt geprüft am 28.09.2021.

BMWi (2020f): Leichtbauatlas. Online verfügbar unter www.leichtbauatlas.de, zuletzt geprüft am 15.09.2020.

BMWi (2020g): Abschlussveranstaltung: Leichtbau-Perspektiven für Deutschland. BMWi. BMWi. virtuell, 17.09.2020.

BMWi (2021): Leichtbaustrategie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) für den Industriestandort Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/leichtbaustrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=10, zuletzt geprüft am 28.09.2021.

Carlsson, Bo; Jacobsson, Staffan; Holmén, Magnus; Rickne, Annika (2002): Innovation Systems: Analytical And Methodological Issues. In: *Research Policy* 31 (2), S. 233–245.

Dreher, Carsten; Frietsch, Rainer; Hemer, Joachim; Schmach, Ulrich (2005): Die Beschleunigung von Innovationszyklen und die Rolle der Fraunhofer-Gesellschaft. In: *Veröffentlichungsdatenbank Fraunhofer-Publica*.

EE4InG (2021): EE4InG Projekthomepage. Online verfügbar unter https://ee4ing.de/, zuletzt geprüft am 29.09.2021.

enArgus Projektdatenbank (2020): Förderprojekte. Online verfügbar unter https://www.enargus.de/search/?q=leichtbau, zuletzt geprüft am 18.05.2021.

ETA im Bestand (2019): Projektantrag ETA im Bestand, FKZ: 03EN2048A-I. Technologie- und Methodenbaukasten zur Energieeffizienzsteigerung im Bestand der Metall verarbeitenden Industrie. Online verfügbar unter https://www.ptw.tu-darmstadt.de/forschung_ptw/fg_eta/aktuelle_projekte_eta/eta_im_bestand/index.de.jsp, zuletzt geprüft am 29.09.2021.

Europäische Kommission (2016): Stärkerer Einsatz neuer Materialien für leichtere und umweltfreundlichere Züge. Online verfügbar unter https://cordis.europa.eu/article/id/190771-wider-application-of-new-materials-for-lighter-and-greener-trains/de, zuletzt geprüft am 23.06.2021.

Fraunhofer IPA (2016): Leichtbau im Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau. Herausforderungen - Potenziale - Mehrwerte - Beispiele. Unter Mitarbeit von Anna Hansmersmann, Christoph Birenbaum und Jochen Burkhardt. Hg. v. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansel. Online verfügbar unter https://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/PDF/Studien/Leichtbau_BW_IPA_Leichtbau_im_Maschinenbau.pdf, zuletzt geprüft am 30.09.2021.

Fraunhofer IPA (2020a): Konstruktiver Leichtbau. Online verfügbar unter https://www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber_uns/Leitthemen/leichtbau/konstruktiver-leichtbau.html, zuletzt geprüft am 30.09.2021.

Fraunhofer IPA (2020b): Leichtbau. Online verfügbar unter https://www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber_uns/Leitthemen/leichtbau.html, zuletzt geprüft am 08.09.2020.

Fraunhofer IPA (2021): Topologieoptimierung. Online verfügbar unter https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/leichtbautechnologien/konstruktiver-leichtbau/topologieoptimierung.html, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

Fraunhofer IPA; Universität Stuttgart, IfW; DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte (2012): Leichtbau in Mobilität und Fertigung. Chancen für Baden-Württemberg. Unter Mitarbeit von Steve Rommel, Raphael Geiger, Ralph Schneider, Bergold, Dominik, Marco Schneider et al. Hg. v. e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg.

Fritz, David; Heinfellner, Holger; Lichtblau, Günther; Pölz, Werner; Schodl, Barbara (2016): Ökobilanz alternativer Antriebe. Fokus Elektrofahrzeuge. Wien: Umweltbundesamt GmbH (Report / Umweltbundesamt, REP-0572). Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationssuche/publikationsdetail/?pub_id=2177, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

Fuchs, Stephan; Lienkamp, Markus (2013): Parametrische Gewichts- und Effizienzmodellierung für neue Fahrzeugkonzepte. In: *ATZ Automobiltech Z* 115 (3), S. 232–239. DOI: 10.1007/s35148-013-0063-x.

Georgi, Wolf; Kaars, Jonny; Kaboli, Reza; Mayr, Peter (2017): Aktuelle Herausforderungen der Fügetechnik im Leichtbau. Online verfügbar unter https://werkstoffzeitschrift.de/aktuelle-herausforderungen-der-fuegetechnik-im-leichtbau/, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Gesamtverband der Aluminiumindustrie (2017): Aluminium Märkte der Zukunft. Online verfügbar unter http://www.aluinfo.de/files/_media/dokumente/Downloads/Jahresberichte/2017_GDA%20Jahresbericht.pdf, zuletzt geprüft am 28.09.2021.

Gesamtverband der Aluminiumindustrie (2020): Aluminiumbedarf weltweit. Online verfügbar unter http://www.aluinfo.de/bedarf-weltweit.html, zuletzt geprüft am 29.09.2021.

Hainbuch GmbH (2021): Vorreiter und Trendsetter für moderne Spannlösungen | Hainbuch GmbH. Unternehmenshomepage. Online verfügbar unter https://www.hainbuch.com/, zuletzt aktualisiert am 17.11.2021, zuletzt geprüft am 17.11.2021.

He, Di; Soo, Vi Kie; Kim, Hyung Chul; Doolan, Matthew (2021): Life Cycle Primary Energy Demand and Greenhouse Gas Emission benefits of vehicle lightweighting with recycled carbon fibre. In: *Procedia CIRP* 98, S. 43–48. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.003.

Helms, Hinrich; Lambrecht, Udo (2007): The Potential Contribution of Light-Weighting to Reduce Transport Energy Consumption. Online verfügbar unter https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.508.7635&rep=rep1&type=pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

Hoßfeld, Max; Ackermann, Clemens (2020): Leichtbau durch Funktionsintegration. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

IEA (2019): Energy Efficiency Indicators Highlights 2019. Online verfügbar unter https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-efficiency-indicators-highlights, zuletzt geprüft am 28.09.2021.

IEA (2020): Total final consumption (TFC) by sector, World 1990-2018. Online verfügbar unter https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCShareBySector, zuletzt geprüft am 28.09.2021.

Jochem, Eberhard; Bradke, Harald; Marscheider-Weidemann, Frank; Som, Oliver; Mannsbart, Wilhelm; Cremer, Clemens et al. (2009): Improving the Efficiency of R&D and the Market Diffusion of Energy Technologies. Heidelberg: Physica-Verlag.

Klein, Bernd; Gänsicke, Thomas (2019): Leichtbau-Konstruktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Kraftfahrt-Bundesamt (2018): Jahresbilanz der Neuzulassungen 2018. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n_jahresbilanz.html, zuletzt geprüft am 14.04.2021.

Leichtbau BW GmbH (o.J.): Material und Energie einsparen. Leichtbau ermöglicht enorme Ressourcen- und Emissionseinsparungen. Vortragsfolie, zur Verfügung gestellt im Rahmen des Expertengesprächs am 30.07.2021.

Leichtbau BW GmbH (2015): Trends und Märkte im Leichtbau. Online verfügbar unter https://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/Downloads/LeichtbauBW_Studie_Trends_und_Maerkte.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

Leichtbau BW GmbH (2019): Mit Konzeptleichtbau Ungenutze Potentiale Heben. Ökonomischer Und Ökologischer Nutzen. Online verfügbar unter https://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/PDF/Studien/LeichtbauBW_Studie_Konzeptleichtbau_2019.pdf, zuletzt geprüft am 28.09.2021.

McKinsey; Clearwater International (2016): Prognose zur Menge an verarbeitetem Aluminium in Fahrzeugkarosserien weltweit in den Jahren 2010 bis 2030 (in Millionen Tonnen). Hg. v. Statista Research Department. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/663340/umfrage/prognose-fuer-die-verarbeitete-menge-an-aluminium-in-fahrzeugkarosserien/, zuletzt geprüft am 29.09.2021.

Meyer-Krahmer, Frieder; Dreher, Carsten (2004): Neuere Betrachtungen zu Technikzyklen und Implikationen für die Fraunhofer-Gesellschaft. In: *Forschungs- und Technologiemanagement : Potenziale nutzen - Zukunft gestalten. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Hans-Jörg Bullinger*, 2004.

Müller, Michael; Liebsch, Alexander; Kupfer, Robert; Stegelmann, Michael; Gude, Maik (2019): Process chain based data capture for a flexible and reliable life cycle inventory of a glass fiber-reinforced thermoplastic lightweight structure. In: *Procedia CIRP* 85 (3-4), S. 32–36. DOI: 10.1016/j.procir.2019.09.001.

Norsk Hydro (2021): Global aluminium consumption by end use 2020. Hg. v. Hydro Geschäftsbericht 2020, S. 49. Online verfügbar unter https://www.hydro.com/globalassets/download-center/investor-downloads/ar20/annual-report-2020-new.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2021.

Projektträger Jülich; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): EnArgus. Förderdatenbank Energieforschung. Online verfügbar unter https://www.enargus.de/, zuletzt geprüft am 21.05.2021.

Schmoch, Ulrich (2020): Bericht zur Patent- und Publikationsanalyse Leichtbau, angefertigt 12/2020 im Rahmen von EE4InG. Hg. v. Fraunhofer ISI.

Tekkaya, A. Erman (2018): Energy saving by manufacturing technology. In: *Procedia Manufacturing* 21, S. 392–396. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.136.

Thielmann, Axel; Meister, Michael; Sauer, Andreas; Lerch, Christian; Jäger, Angela; Zanker, Christoph (2014): Leichtbau - Trends und Zukunftsmärkte. Online verfügbar unter https://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/PDF/RZ_LeichtbauBW_Studie_Trends_Zukunftsmaerkte_Web.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

US Geological Survey (2021): USGS - Mineral Commodity Summaries 2021. Aluminium. Online verfügbar unter https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2021.

World Bank; Thomson Reuters; Platts (2021): Entwicklung des Aluminiumpreises weltweit in den Jahren 1960 bis 2020 (in US-Dollar je Tonne). Hg. v. World Bank. Online verfügbar unter 20.09.2020.

Zottler, Michael Max (2014): Life-Cycle Analyse von Leichtbaukonzepten für den Automobilbau. Diplomarbeit. TU Graz. Institut für Innovation und Industrie Management.