

VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit



STRATEGIEN UND MAßNAHMEN

Steigerung der Ressourceneffizienz im Unternehmen

Leichtbau

<https://www.ressource-deutschland.de/instrumente/strategien-und-massnahmen/produktbezogen/leichtbau/>

1 RESSOURCENEFFIZIENZ, ANWENDUNGSBEREICH, GRENZEN

Ziel und Funktion

Leichtbauweisen zielen darauf ab, ein Produkt mittels intelligenter Werkstoffauswahl und struktureller sowie topologischer Optimierung so zu gestalten, dass es allen gängigen Beanspruchungen in der Nutzungsphase standhalten kann und dabei gleichzeitig der Materialaufwand und das Gewicht minimal ausfallen. Hierdurch können Kosten für die Herstellung bzw. den Betrieb des Produktes in nennenswertem Umfang gesenkt werden.

Bezug zur Ressourceneffizienz

Die Motivationen für Leichtbau ergeben sich einerseits durch Einsparungen von Material und Energie in der Produktion (z. B. durch Materialausparungen an wenig belasteten Bauteilen). Darüber hinaus stellt im Fall bewegter Produkte (z. B. bei Fahrzeugen oder Flugzeugen) eine Verringerung des Energieaufwandes und der daraus resultierenden Emissionen und Umweltwirkungen in der Nutzungsphase ein wesentliches Entwicklungsziel dar. Beispielsweise können über 180 Liter Treibstoff auf einem einzelnen Flug mit einem Airbus A350 (Berlin - Teneriffa) eingespart werden, wenn nur 1 % des Flugzeug-Leergewichts verringert wird (1,3 t/130 t) [1]. Leichtbau ist damit auch ein wirksames Instrument, um den gesetzlichen Forderungen der Emissionsminderung nachzukommen. Dieser Effekt greift ebenfalls im Transport der Rohstoffe, Halbzeuge, Zwischenprodukte und vollständigen Güter, da hier jeweils weniger Masse bewegt werden muss.

Anwendungsbereiche und Akteure

Bei der Herstellung mobiler Produkte, wie von Fahrzeugen und Flugzeugen, sind Leichtbautechnologien am stärksten etabliert. Am Beispiel von Elektrofahrzeugen kann Leichtbau auch dafür verwendet werden, um die hohen Massen durch den Einbau großer Batterien auszugleichen. Ein weiterer Treiber in Unternehmen aus dem Bereich diskreter Fertigung ist die Reduzierung der Kosten im Herstellungsprozess.

Die Planung und Umsetzung einer Leichtbaustrategie erfolgen in der Produktentwicklung.

Grenzen

Bei vielen Leichtbaulösungen findet eine Betrachtung der Ressourceneffizienz primär im Hinblick auf die Nutzungsphase des Produkts statt. Für eine ganzheitliche Beurteilung der Ressourceneffizienz müssen jedoch alle Phasen des Produktlebenszyklus einbezogen werden. Beispielsweise ist es oftmals schwierig, neue leichtbauoptimierte Verbundmaterialien zu recyceln. Hierfür sind neue werkstoffgerechte Recycling-Technologien notwendig, welche Werkstoffverbünde kostengünstig und automatisiert separieren und anschließend recyceln können. Die Entwicklung dieser Ansätze ist jedoch komplex, wodurch zunächst weiterer Forschungsbedarf notwendig wird.

Darüber hinaus können durch Leichtbau auch Rebound-Effekte verursacht werden. Dies bedeutet konkret, dass die Verringerung des Gewichtes durch die Nutzung von Leichtbaumaterialien mit anderen Modifikationen am Fahrzeug, z. B. durch Hinzufügen einer Sonderausstattung, ausgeglichen wird [2].

Einordnung der Strategie/Maßnahme

Bezug	Produkt
Einflussnehmender Akteur	Produktentwicklung
Lebensphasen mit relevanten Auswirkungen	Rohmaterialherstellung, Nutzung, Transport
Lebensweganalyse	bedingt erforderlich

2 WEGE DER UMSETZUNG

2.1 Werkstoffauswahl

Die Auswahl von Werkstoffen ist ein wesentlicher Stellhebel für die Umsetzung einer Leichtbaustrategie. Hierfür kommen insbesondere Materia-

lien infrage, die eine hohe Steifigkeit und Festigkeit bei möglichst geringer Dichte aufweisen. Diese Kriterien erfüllen vor allem Materialien wie Stahl, Aluminium, Magnesium, Titan sowie Faserverbundstoffe. Eine kurze Charakterisierung dieser Werkstoffe wird im Folgenden gegeben. Die Ausführungen sind an die VDI ZRE Kurzanalyse Ressourceneffizienz im Leichtbau angelehnt [3]. Diese Studie wird auch für eine weiterführende Information zum Thema leichtbaugerechte Materialien empfohlen, beispielsweise werden hier Kunststoffe oder Keramiken als weitere gängige Leichtbaumaterialien vorgestellt.

Stahl genießt vor allem im Fahrzeugbau noch immer einen hohen Stellenwert. Der Energieaufwand zur Herstellung, die Materialkosten sowie die Recyclingfähigkeit von Stahl sind insgesamt als vorteilhaft im Vergleich zu anderen für den Karosseriebau gängigen Leichtbaumaterialien, wie Aluminium oder Faserverbundstoffe, einzuschätzen. Um den Nachteil des größeren Gewichts zu umgehen, werden hochlegierte Stähle mit hoher Festigkeit verwendet. Hierdurch ist es möglich, die Stahlbauteile mit dünnen Wandstärken zu versehen und dennoch den hohen Sicherheitsanforderungen im Automobilbau gerecht zu werden [4]. Es wird geschätzt, dass 10 - 40 % Gewichtseinsparungen pro Bauteil möglich sind [5].

Aluminium zeichnet sich gegenüber Stahl durch eine geringere Dichte und bessere Umformeigenschaften aus. Neben stetig steigender Anwendung im Automobilbau wird Aluminium vorrangig in der Luftfahrt eingesetzt. Aus Sicht der Ressourceneffizienz kann Aluminium insbesondere vorteilhaft sein, wenn möglichst geschlossene Recyclingkreisläufe vorliegen, da die Herstellung von Aluminium sehr energieintensiv ausfällt. Voraussetzung für ein effizientes Recycling ist eine genaue Kenntnis der Legierungselemente, da der Prozess ansonsten schwer durchführbar ist. In einigen Fällen bietet sich auch der Einsatz von Aluminiumschäumen an, die zwar über keine große Festigkeit verfügen, dafür aber eine sehr geringe Dichte aufweisen [3].

Magnesium zeigt im Vergleich zu Aluminium bei ähnlichen mechanischen Eigenschaften nochmals eine geringere Dichte auf (35 % geringer). Der Rohstoffpreis ist dabei bezogen auf die Masse bis zu 30 % höher. Sobald jedoch das Volumen als Bezugsgröße gesetzt wird, fallen die Kosten ver-

gleichbar aus. Anwendungen im Bereich Luftfahrt sind bis jetzt noch eher begrenzt, wachsen jedoch stetig. Ein Wachstum von 30 % bis 2020 wird prognostiziert [6]. Im Fahrzeugbau hat der Werkstoff bereits eine längere Tradition. Schon im VW Käfer wurden Bauteile aus Magnesiumlegierungen verwendet. Die Magnesiumherstellung erfordert im Vergleich zu unlegiertem Stahlwerkstoff in der Herstellung im Hochofen ungefähr den siebenfachen Energieaufwand [7].

Die Dichte von Titan ist höher als die von Aluminium und Magnesium. Gegenüber Stahl lassen sich hier allerdings noch immer bis zu 40 % der Masse einsparen. Kennzeichnend für Titan ist die Festigkeit, welche auch bei hohen Temperaturen Bestand hat und daher für Anwendungen im Motor- und Triebwerksbau vor allem in der Luftfahrt und seit einigen Jahren auch im Automobilbau infrage kommt [8]. Titan benötigt in der Herstellung im Vergleich zu unlegiertem Stahlwerkstoff in der Hochofenroute ca. zwanzigmal so viel Energie [7]. Eine Tonne Titan (5500 \$/t) ist doppelt so teuer wie Aluminium (2100 \$/t) oder Magnesium (2214 \$/t) [9].

Faserverstärkte Kunststoffe (FKV), insbesondere hochfeste kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), bieten aufgrund ihres geringen Gewichts und der ausgeprägten mechanischen Belastbarkeit hervorragende Potenziale für den Leichtbau. Im Vergleich zu einem Referenzbauteil aus Stahl lassen sich durch den Einsatz von CFK bis zu 79 % des Gewichtes einsparen [10]. Während CFK bereits in umfassendem Maße im Flugzeugbau eingesetzt wird, nimmt auch der Einsatz im Automobilbau immer mehr zu (z. B. Karosserie des BMW I3). Daher wird bis 2020 von einem jährlichen Nachfragewachstum für CFK von bis zu 17 % ausgegangen [11]. Ein Hemmnis für einen weitreichenderen Einsatz von CFK bilden die hohen Herstellkosten, die sich aufgrund eingeschränkter Möglichkeiten für den Einsatz von Prozessautomatisierung ergeben. Aus Sicht des Ressourcenaufwandes sind außerdem der hohe Energieaufwand der Herstellung sowie die schlechte Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit des Werkstoffs ein Problem.

Multimaterialbauweise im Karosseriebau

Die verschiedenen Materialien, die für Leichtbauanwendungen im Karosseriebau infrage kommen, unterliegen jeweils zahlreichen Vor- und Nachteilen. Statt sich auf einen Werkstoff festzulegen und entsprechende Kompromisse eingehen zu müssen, richtet sich der Trend mehr auf eine Kombination verschiedener Materialien. So werden z. B. im Fahrgestell des aktuellen Audi A8 vier unterschiedliche Leichtbaustoffe verwendet. Hierbei kommen Aluminium, Stahl, Magnesium und kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zum Einsatz, die mit 14 unterschiedlichen Verfahren zusammengefügt werden. Mit 79.6 % bildet Aluminium den größten Anteil am Material-Mix. Damit ergibt sich ein Gewicht von nur 208 Kilogramm für das gesamte Fahrgestell.

Den Einsparungen im Gewicht steht ein höherer Aufwand des Recyclings gegenüber, da die verschiedenen Materialien am Lebensende wieder sortenrein getrennt werden müssen. Darüber hinaus ergeben sich aufgrund der aufwändigeren Herstellung zusätzliche Kosten, so dass sich derartige Multimaterialbauweisen derzeit nur für Oberklassefahrzeuge eignen [12][13].

2.2 Strukturoptimierung

Neben der Werkstoffauswahl bietet auch die strukturelle Auslegung einer Konstruktion ein großes Potenzial zur Gewichtssenkung.

Auf Ebene der Baustruktur wird entschieden, wie die zu erarbeitende Struktur grundsätzlich definiert werden soll. Hierbei spielt unter anderem auch die Entscheidung eine Rolle, ob eine Differenzial- oder Integralbauweise gewählt werden soll. Die Verringerung der Bauteilanzahl in Form einer Integralbauweise kann ein einfacher Weg sein, um das Gewicht einer Baugruppe zu reduzieren. Hierbei müssen allerdings auch die anderen Konstruktionsziele an eine Baustruktur, wie z. B. Reparierbarkeit, beachtet werden.

Die Topologieoptimierung eines Bauteils spielt eine Rolle, um schon frühzeitig nichtbelastete Bereiche in einem Bauraum zu identifizieren und die

Strukturen eher am Kraftfluss auszurichten. Hierfür können auch Softwaretools aus dem Bereich Computer Aided Optimization verwendet werden.

Bei der Gestaltoptimierung wird die Form innerhalb der vorgegebenen Bauteiltopologie an die Belastungen angepasst. Hierbei werden die Knotenpunkte der Elemente als Gestaltungsvariablen festgelegt.

Im Rahmen der Parameteroptimierung erfolgt eine Feinjustierung einzelner Konstruktionsparameter, wie z. B. der Wanddicke [14].

Bionisches Design einer Flugzeugtrennwand

Ein Flugzeughersteller hat gemeinsam mit einem Architekturbüro eine Flugzeugtrennwand entwickelt, die auf bionischen Prinzipien beruht. Hierbei wurde als Grundlage für den strukturbildenden Optimierungsalgorithmus das Ausbreitungsverhalten eines Schleimpilzes (biologisches Vorbild) gewählt. Die hierdurch erzeugten diffizilen Strukturen wurden hinsichtlich des Gewichts und unter der Randbedingung angemessener statischer Belastungsfähigkeit (Durchbiegung) optimiert. Insgesamt konnten durch den Entwurf 45 % des Gewichts der Trennwand eingespart werden. Die Fertigung der Trennwand erfolgt mit additiven Verfahren [15].

3 METHODEN

3.1 Materialdatenbanken

Für die Auswahl eines passenden Leichtbaumaterials müssen zahlreiche Parameter gleichzeitig betrachtet und gegeneinander abgewogen werden. Hierbei sind neben dem Gewicht und den klassischen Faktoren der beanspruchungsgerechten Werkstoffauswahl (Härte, Festigkeit, Gewicht, Viskosität etc.) weitere Aspekte der Ressourceneffizienz zu berücksichtigen, wie der Energieaufwand bei der Werkstoffherstellung oder die Recyclingfähigkeit. Gerade für die Ressourceneffizienz Aspekte ist jedoch eine angemessene Datenlage erforderlich. Hierfür wurden kommerzielle Materialdatenbanken entwickelt, welche entsprechende Werte beinhalten (z. B. GRANTA

CES Selector). Der Zugang und die Nutzung dieser Datenbanken sind in der Regel einfach gestaltet und verlangen wenige Vorkenntnisse.

3.2 Konstruktive Gestaltungsprinzipien des Leichtbaus

Eine Anleitung zur leichtbaugerechten Konstruktion wurde von Kranz, J. [16] auf Grundlage der Empfehlungen von Schmidt, W. [17] und Klein, B. [18] entwickelt. Die hier entwickelten Regeln werden im Folgenden in verkürzter Form dargestellt (siehe [16]).

Direkte Krafteinleitung und Kraftausgleich

Die Einleitung von Kräften sollte möglichst direkt in die Haupttragstruktur erfolgen. Unnötige Kraftumlenkungen führen zu komplizierten Spannungszuständen, die eine größere Dimensionierung und ein höheres Gewicht nach sich ziehen. Konstruktionen sollten zudem möglichst symmetrisch, geschlossen und segmentiert vorliegen.

Maximierung des Flächenträgheits- bzw. Widerstandsmoments

Bei minimaler Fläche sollten große Trägheitsmomente bzw. Widerstände angestrebt werden, insbesondere bei torsions-, biege- und knickgefährdeten Strukturen. Anstelle von Vollprofilen sollten Hohlprofile eingesetzt werden.

Verwendung feingliedriger Strukturen

Durch eine aufgelockerte Bauweise können Flächentragwerke bei gleichzeitig kleiner Querschnittsfläche deutlich versteift werden. Durch den Einsatz von Unterstützungsrippen, Untergurten oder Sandwichkonstruktionen kann die Steifigkeit im Vergleich zu massiven Tragwerken bei gleichem Materialaufwand deutlich erhöht werden.

Erhöhung der Stützwirkung durch Krümmung

Die Knick-, Biege- und Beulsteifigkeit kann durch eine gezielte Vorkrümmung von Bauteilen erhöht werden. Die Krümmung vergrößert das Flächenträgheitsmoment und verringert gleichzeitig die strukturelle Instabilität der Konstruktion.

Konstruktionen in Hauptbelastungsrichtung versteifen

Durch die Verwendung von Ortho- oder Anisotropien kann die Steifigkeit eines Bauteils in den Hauptbelastungsrichtungen erhöht werden. Konstruktive Maßnahmen, wie Sicken oder Rippen, helfen dabei, Anisotropien zu erreichen. Weitere Optionen hierfür beinhalten die Wahl unterschiedlicher Blechdicken sowie die Auswahl verschiedener Werkstoffe.

Nutzung einer Integralbauweise

Die Verringerung der Bauteilanzahl in Form einer Integralbauweise kann ein einfacher Weg sein, um das Gewicht einer Baugruppe zu reduzieren. Hierbei müssen allerdings auch die anderen Ziele einer Baustruktur, wie z. B. Reparierbarkeit, beachtet werden.

Materialeinsparung in niedrig belasteten Bereichen

Material sollte an den Stellen eingespart werden, die sich nicht im Kraftfluss befinden. Hierdurch sinkt der Materialaufwand bei gleichbleibender Steifigkeit der Konstruktion.

Vollständige Ausschöpfung einer Konstruktion

Die Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung eines Bauteils sollten stets minimal gehalten werden. Hierfür ist eine umfassende Kenntnis der zu erwartenden Belastung notwendig (z. B. durch Simulation).

3.3 Topologieoptimierung

Besondere Potenziale lassen sich durch Topologieoptimierung erreichen. Mit dieser rechnergestützten Optimierungsform ist es möglich, die Bauteilgeometrie direkt aus den zu erwartenden Lasten abzuleiten. Die hierbei generierten bionisch anmutenden Strukturen lassen sich aufgrund ihrer Komplexität allerdings zumeist nur über additive Fertigungsverfahren realisieren. Funktionen zur Topologieoptimierung sind bereits in vielen kommerziellen CAD-/CAE-Tools, wie ANSYS oder SolidWorks 2018, integriert.

4 LITERATUR

- [1] **Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. (2018):** CO2 eingespart mit Leichtigkeit [online]. Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. [abgerufen am: 14. November 2018], verfügbar unter: <https://www.klimaschutzportal.aero/verbrauch-senken/am-flugzeug/gewicht-einsparen/>
- [2] **Haan, P. de; Basler, E.; Partner, Z.; Peters, S. A.; Fraunhofer, I. S. I.; Semmling, K. E.; Marth, H. und Kahlenborn, K. W. (2014):** Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik [online]. Umweltbundesamt [abgerufen am: 14. November 2018], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rebound-effekte-ihre-bedeutung-fuer-die>, S.76
- [3] **Kaiser, O., Krauss, O., Seitz, H., & Kirmes, S. (2016):** Kurzanalyse Nr. 17: Ressourceneffizienz im Leichtbau. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.
- [4] **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: 14. November 2018], verfügbar unter: www.emobilbw.de/de/service/publikationen.html?file=files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Leichtbau-Studie-Oekologische-Aspekte-150.pdf, S. 9
- [5] **The Boston Consulting Group (2010):** CO2-Bilanz Stahl - Ein Beitrag zum Klimaschutz [online]: Wirtschaftsvereinigung Stahl [abgerufen am: 7. November 2018], verfügbar unter: www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/Report-CO2-Bilanz-Stahl_20100226_adjusted-final.v21.pdf, S.23
- [6] **Leichtbau BW GmbH (2014):** Leichtbau - Trends und Zukunftsmärkte und deren Bedeutung für Baden-Württemberg. 1. Auflage, Leichtbau BW GmbH, Stuttgart, [abgerufen am: 14. November 2018], verfügbar unter: www.leichtbau-

bw.de/fileadmin/user_upload/PDF/RZ_LeichtbauBW_Studie_Trends_Zukunftsmaerkte_Web.pdf, S. 32f.

- [7] **Umweltbundesamt (2018):** Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-systeme (ProBas) [online] Umweltbundesamt [abgerufen am 14. November 2018], verfügbar unter: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>
- [8] **Friedrich, H. E. (2013):** Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. 1. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-1467-8. S. 336-347.
- [9] **IKB (2017):** Rohstoffpreis-Information [online]. IIKB, Dezember 2017 [abgerufen am: 14. November 2018], verfügbar unter: <https://www.ikb.de/research/wechselkurse-rohstoffe>
- [10] **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], verfügbar unter: www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html?file=files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Leichtbau-Studie-Oekologische-Aspekte-150.pdf, S. 19
- [11] **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], verfügbar unter: www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Serienproduktion_hochfester_Faserverbundbauteile_20120926.pdf, S.3
- [12] **Köllner, C. (2017):** Audi verrät erste Details zur Karosserie des neuen A8 [online]. Springer Professional [abgerufen am: 7. April 2017, 12:00], verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/leichtbau/karosserie/audi-verraet-erste-details-zur-karosserie-des-neuen-a8/12206086>

- [13] **Audi AG (2016):** Multimaterial Audi Space Frame [online], 10. April 2016 [abgerufen am: 12. November 2018], verfügbar unter: <https://www.audi-mediacyber.com/en/power-all-along-the-line-the-audi-r8-spyder-v10-6848/multimaterial-audi-space-frame-6853>
- [14] **Schmit, L. A. (1984):** Structural Optimization – Some Key Ideas and Insights. In: New Directions in optimum structural design, Tucson, ed. by E. Atrek, John Wiley.
- [15] **Micallef, K. (2016):** Airbus entwickelt bionisches Design für die Zukunft des Fliegens [online]. Redshift by Autodesk, 2. August 2016 [abgerufen am: 14. November 2018], verfügbar unter: <https://www.autodesk.de/redshift/bionisches-design/>
- [16] **Kranz, J. (2017):** Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen. Springer Vieweg., S. 30.
- [17] **Schmidt, W. (2004):** Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [18] **Klein, B. (2009):** Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.