

Quantifizierung des materialbezogenen ökologischen Impacts von topologieoptimierten Multimaterialbauteilen

Quantification of the material-related environmental impact of topology-optimized multi-material components

Kevin Herrmann^{1,*}, Behrend Bode¹, Johanna Wurst¹, Paul Christoph Gembarski¹, Iryna Mozgova¹, Roland Lachmayer¹

¹ Institut of Product Development, Leibniz University Hanover

* Korrespondierender Autor:

Kevin Herrmann
Institut für Produktentwicklung, Leibniz Universität Hannover
An der Universität 1
30823 Garbsen
0511 762 2552
✉ herrmann@ipeg.uni-hannover.de

Abstract

When developing products, engineers face challenges in solving technical, economical, but also ecological conflicts of objectives. A common technical conflict is the contradictory behaviour between the stiffness and mass of components. A possibility to resolve this contradiction is offered by multi-material components, which are made possible by a load-optimised design.

Taking the example of topology-optimised multi-material components, this article shows a method for taking the ecological impact of raw material extraction into account in selecting suitable designs by offsetting a performance index with the results of ecological impact assessment calculations. These results are analysed in order to identify a possible solution according to the technical-ecological conflict of objectives.

Keywords

topology optimization, environmental impact, life cycle assessment, tailored forming, light weight design

1. Motivation

Bei der Entwicklung von Produkten stehen Ingenieurinnen und Ingenieure vor der Herausforderung Zielkonflikte zu lösen. Klassische Zielkonflikte sind wirtschaftliche, wie Zeit-Kosten-Qualität, oder technischer Natur. Ein häufiger technischer Zielkonflikt ist das gegenläufig bedingende Verhalten zwischen der Steifigkeit und Masse eines Bauteils. Eine Möglichkeit zur Auflösung dieses Widerspruchs bieten Multimaterialbauteile. Die Nutzung unterschiedlicher Werkstoffe ermöglicht die lokale Anpassung von Bauteileigenschaften an ortsspezifische Anforderungen durch eine belastungsgerechte Konstruktion [1, 2]. Dadurch lässt sich gegenüber Monomaterialbauteilen eine besonders hohe Steifigkeit pro Masse erreichen, da spezifische Materialeigenschaften gezielt Orten innerhalb des Bauteils eingesetzt werden, an denen diese gemäß den Belastungen notwendig sind. Für die Herstellung von massiven Multimaterialbauteilen werden im Sonderforschungsbereich 1153 neuartige Prozessketten durch die Tailored Forming Technologie untersucht. Im Kontrast zu bestehenden konventionellen Fertigungstechnologien für massive Multimaterialbauteile findet der Fügeprozess nicht während der Umformung oder am Ende der Prozesskette statt, sondern wird dem Umformprozess vorgelagert [3].

Jedoch steigen mit dem Einsatz von Tailored Forming die Anzahl der notwendigen Fertigungsschritte und der Ressourceneinsatz innerhalb der Fertigung [4]. Besonders die Rohstoffgewinnung von Leichtbaumaterialien, wie Aluminium, erfordert einen aus energetischer und ressourcenorientierter Sicht höheren Herstellungsaufwand im Vergleich zur Stahlgewinnung [5]. Dadurch steigt der ökologische Impact von Multimaterialbauteilen mit einem zunehmenden Leichtbaumaterialanteil. Durch neue gesetzliche und marktspezifische Anforderungen im Bereich des Umweltschutzes ergeben sich neben den klassischen Zielkonflikten durch den ökologischen Impact eines Bauteils über den gesamten Produktlebenszyklus eine weitere Konfliktgröße. Um diese Konfliktgröße berücksichtigen zu können, erfordert es die Integration neuer Methoden und Werkzeuge in den bestehenden Entwicklungsprozess. Es müssen quantitative Metriken integriert werden, die bei der Auswahl geeigneter Bauteilgestalten, die Bewertung des ökologischen Impacts sowie deren Gegenüberstellung zu einem technischen Performance Index ermöglichen.

Tajs-Zielinska et al. (2021) sowie Munk und Miller (2021) stellen in diesem Zusammenhang das Potential der Nutzung von multimateriellen Strukturbauteilen heraus, um eine für die Nutzungsphase ausreichende Steifigkeit realisieren zu können [6,7]. Dennoch sollen durch eine Verringerung der Gesamtbauteilmasse Ressourcen innerhalb der Nutzungsphase minimiert und somit das Potential für die ökologische Nachhaltigkeit des Strukturbauteils erhöht werden [6,7]. Allgemein können beispielsweise Ansätze zum Generative Design [8] zur Untersuchung geeigneter Bauteilgestalten genutzt werden. Im Hinblick auf den Leichtbau und die Optimierung des Steifigkeit-Masse-Verhältnisses kommen Topologieoptimierungen zum Einsatz [9].

Am Beispiel von topologieoptimierten Multimaterialbauteilen zeigt dieser Beitrag eine Vorgehensweise, wie der ökologische Impact der Rohstoffgewinnung bei der Auswahl geeigneter Bauteilgestalten berücksichtigt werden kann [10]. Dafür wird zur Quantifizierung des technisch-ökologischen Zielkonflikts ein Performance-Index mit den Ergebnissen ökologischer Wirkungsabschätzungsberechnungen verrechnet. Diese Ergebnisse werden im Anschluss analysiert und gemäß des Zielkonfliktes eine Kompromisslösung identifizieren zu können.

2. Stand der Technik

2.1. Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung lasttragender Strukturkomponenten haben nicht nur das Ziel nicht-tragende Bereiche aus einer Struktur zu entfernen und somit die Gesamtheit der Struktur in besserer Form ausnutzen zu können. Vielmehr kann durch eine Optimierung der Topologie ein gutes Verhältnis aus Steifigkeit und Masse innerhalb des Strukturbauteils erzeugt werden. Gemäß des „SIMP“ (Solid Isotropic Material with Penalization)-Ansatzes beschreibt Bensoe (1989) einen dichtebasierten Ansatz zur effizienten Erzeugung von Strukturen innerhalb von Bauteilkomponenten. Unter Berücksichtigung des Ziels einer möglichst optimalen Struktur verweist Bensoe (1989) auf die Verwendung von multimaterielle Bauteilausführungen [9].

Eine weitere Methode gemäß dem SIMP-Ansatz stellt Tajs-Zielinska dar, in dem die Struktur zunächst in einzelne Bereiche zerteilt und anschließend gemäß der Eignung für Stahl oder Aluminium bewertet wird. Die Optimierung dieser Strukturbereiche erfolgt sequentiell auf Basis der Dichte [10].

Neben der Anwendung von derartigen dichtebasierten Ansätzen ermöglicht die „Bidirectional Evolutionary Structural Optimization“ (BESO)-Methode die schnelle Erzeugung von realistischen und effizienten Strukturen durch das Entfernen und Hinzufügen von Elementen. Aufbauend auf der BESO-Methode können durch Multimaterial-Ansätze die Verwendung eines Vollmaterials sowie einem Material deutlich geringerer Steifigkeit und Masse untersucht werden. Ein Beispiel für einen BESO-basierten Ansatz bildet die „Interfacial Zone Evolutionary Optimization“ (IZEO) mit Fokus auf die Untersuchung von Multimaterialbauteilen aus Stahl und Aluminium. Dieser ermöglicht eine Erzeugung von Strukturen, welche dem Optimum im Vergleich zu dem Ansatz von Bensoe (1989) näher sind [11]. IZEO bietet gegenüber anderen Topologieoptimierern den Vorteil, dass innerhalb der Topologieoptimierung auch Fertigungsrestriktionen integriert werden können. Damit lässt sich die Konformität der Produktgestalt mit der späteren Tailored Forming Prozesskette grundsätzlich sicherstellen [12]. Durch die Optimierung wird das beste Verhältnis zwischen der eingesetzten Masse und der Leistungsfähigkeit gesucht.

2.2. Nachhaltigkeitsbewertung

Um die Nachhaltigkeit basierend auf dem ökologischen Impact quantifizieren und bewerten zu können, ermöglicht die Anwendung des LCA (Life Cycle Assessment) einen häufig verwendeten generischen Ansatz [13]. Die Durchführung eines Life Cycle Impact Assessments als Bestandteil eines Life Cycle Assessments ermöglicht die systematische Untersuchung der Stoffströme innerhalb eines bspw. Produktlebens, um reproduzierbare Aussagen hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen eines Produktes auf Basis quantifizierbarer Daten formulieren zu können. Diese Quantifizierung erfolgt durch auswirkungsspezifische Kategorien, welche die für das Produkt notwendigen Stoffströme mit den resultierenden Umweltauswirkungen in ein Verhältnis setzt [14,15].

Die Berechnung des Life Cycle Impact Assessments (LCIA) basiert auf den Kategorien und Indikatoren der ReCiPe Methode. Innerhalb dieser Methode kann sowohl in 18 verschiedene Midpoint- (problemorientierte) als auch in 3 weitere Endpoint- (schadensorientierte) Kategorien unterschieden werden. Jede in Abbildung 1 dargestellten Verknüpfung aus Mid- und Endpoint-Kategorie ist mit individuellen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen hinterlegt, um Aussagen hinsichtlich der Schadenswege treffen zu können [15,16].

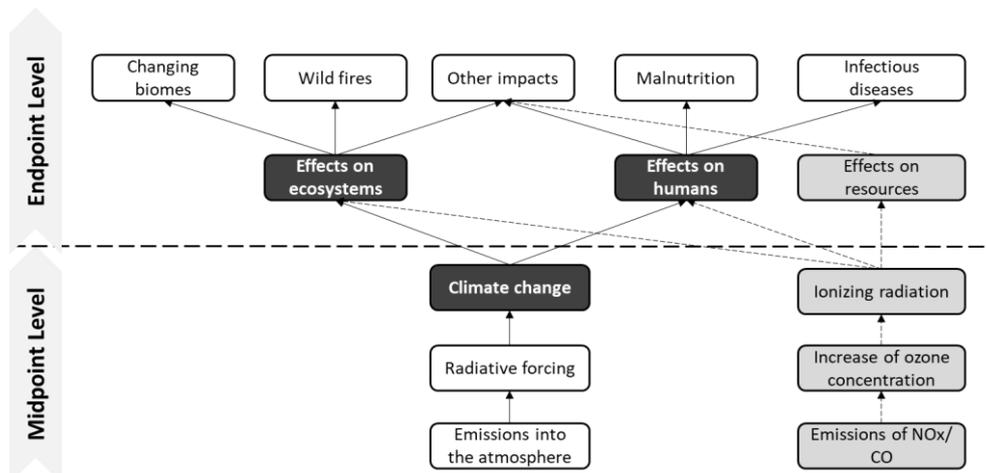


Abbildung 1: Ausschnitt der Mid- und Endpoint Level der LCIA-Kategorie „Climate Change“ nach [15] und [17]

Diese Ursache-Wirkungsbeziehungen beinhalten zudem die Entwicklung einzelner Umfeldsysteme und ermöglichen somit Aussagen hinsichtlich der Einflüsse von produkt-, bauteil- oder prozessspezifischen Parametern. Am Beispiel der häufig verwendeten LCIA-Kategorie „Climate Change“ kann die Änderung des globalen Erderwärmungspotentials (GWP) mit Hilfe des Anstiegs der Infrarotstrahlung eines bzw. mehrerer Treibhausgase quantifiziert und in Form von CO₂-Äquivalenten wiedergegeben werden [15,18]. Die Angabe dieser Stoffäquivalente dient der Erhöhung der Generalisierbarkeit der untersuchten Treibhausgase, um eine möglichst hohe Aussagekraft der quantifizierten Ergebnisse realisieren zu können. Zu diesen unterschiedlichen Ursache-Wirkungs-Beziehungen innerhalb der systematischen ökologischen Wirkungsabschätzung sind Input-Daten sowie Charakterisierungsmodelle und Flussdiagramme verfügbar, um die zukünftigen Auswirkungen auf den ökologischen Impact basierend auf unterschiedlichen Szenarien untersuchen zu können [17].

Neben der Wahl der Methode zur Berechnung der einzelnen Wirkungsabschätzungindikatoren (bspw. ReCiPe) kann innerhalb der strategischen Ausrichtung der durchgeführten LCA ebenfalls in zwei Methoden unterschieden werden. Zum einen ermöglicht die prozessbasierte LCA eine Quantifizierung einzelner Prozessschritte und deren In- und Outputs. Alle diese prozessschrittbezogenen Bilanzergebnisse werden gemäß der gewählten Berechnungsmethode indikatorspezifisch aggregiert (Mid- oder Endpoint). Für die Anwendung dieser Methode ist die Modellierung der Prozessschritte in Form von verknüpften Flussmodellen notwendig. Die softwaregestützte Modellierung (bspw. mit GaBi oder Umberto LCA+) beinhaltet zudem die Möglichkeit historische Datensätze in Prozessschritten zu ergänzen, um ein möglichst ganzheitliches Modell der Prozesskette aufstellen zu können [19,20]. Die „In- und Output“ Methode erlaubt hingegen Aussagen hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen in Abhängigkeit des ökonomischen Profits. Ziel ist es, mit diesem Ansatz alle Auswirkungen der umliegenden Umfeldsysteme in einer Kennzahl zu integrieren [21].

3. Forschungsproblem und Forschungsziel

Die zielgerichtete Entwicklung von Produkten mit einem möglichst geringen ökologischen Impact erfolgt aktuell primär durch die masseorientierte Optimierung der Nutzungsphase durch den Leichtbau [7,22,23]. Auch innerhalb der Produktion gibt es Ansätze, um den ökologischen Impact der Prozesskette zu minimieren [24,25]. Eine Optimierung konkreter Bauteiltopologien hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit innerhalb der frühen und somit der Produktionsphase vorgelagerten Phasen des Produktlebenszyklus beinhalten diese Ansätze jedoch nicht

[7,22,23]. Ziel dieses Beitrags ist es, einen weiteren Ansatz zur nachhaltigkeitsorientierten Optimierung von Bauteilen auf Basis der Steifigkeit bei gegebener Masse zu beschreiben. Bezogen auf das formulierte Potential einer Masse-Reduktion beispielsweise im Bereich des Leichtbaus, liegt aus Materialsicht der Fokus zunächst auf dem ökologischen Impact der Nutzungsphase eines Produktes. Peppas et al. (2021) untersuchen in diesem Zusammenhang nicht nur die Leichtbaupotentiale der Materialveränderungen von Stahl zu Aluminium innerhalb der Nutzungsphase, sondern auch die vorgelagerte Phase der Produktion sowie die nachgelagerte Phase des Recyclings [26]. Zwar konnten für diese drei untersuchten Phasen quantitative Aussagen bezogen auf den ökologischen Impact des Produktes, in diesem Fall ein Diesel-PKW, basierend auf unterschiedlichen berechneten LCIA-Kategorien formuliert werden, doch wird weder die Rohstoffgewinnung noch die -veredelung in die Betrachtung integriert [26]. Der Vergleich des ökologischen Impacts der Rohstoffgewinnung und -veredelung von Stahl und Aluminium auf Basis der Berechnung von CO₂-Äquivalenten beschreiben Backes et al. (2021). Demnach werden im Rahmen der Herstellung von Stahl 2,1 kg CO₂-Äq. / kg Stahl gegenüber 10,8 kg CO₂-Äq. / kg Aluminium emittiert [27]. Mit Blick auf die in Abbildung 2 dargestellte gesamte Prozesskette stellt sich somit die Frage, inwieweit diese der Produktion und Nutzung vorgelagerte Phase einen signifikanten Einfluss auf den ökologischen Impact des gesamten Bauteils haben. In diesem Zusammenhang erzeugt die Produktentwicklung die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Ausprägung des ökologischen Impacts über den gesamten PLC. Im Hinblick auf die ökologischen Auswirkungen eines Bauteils fungiert der ökologische Impact als Entscheidungsunterstützung hinsichtlich nachhaltigeren Bauteilauslegungen.

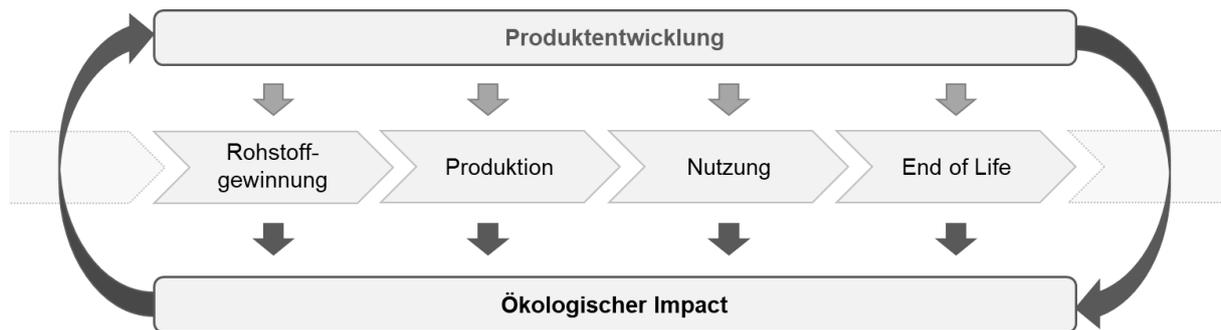


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Produktentwicklung und dem ökologischen Impact

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Phase der Rohstoffgewinnung als erste Phase der Prozesskette untersucht, da innerhalb der folgenden Phasen der ökologische Impact sowohl erhöht als auch verringert werden kann [26]. Um dennoch ein hohes Maß an Generalisier- sowie Vergleichbarkeit des Einflusses der Rohstoffgewinnung erzeugen zu können, dienen CO₂-Äquivalente basierend auf der Life Cycle Impact Assessment Kategorie des climate change (GWP100) gemäß der ReCiPe(H)-Methode als Referenzgröße. Zwar kann die Quantifizierung des ökologischen Impacts analog durch eine Vielzahl an LCIA-Kategorien durchgeführt werden, doch finden CO₂-Äquivalente häufig Verwendung [27].

Das Ziel dieser Arbeit ist einerseits die Quantifizierung von Leistungsvorteilen einer multimateriellen BauteilAusführung hinsichtlich des Steifigkeit-Masse-Verhältnisses und andererseits in diesem Zusammenhang die Auswirkungen des Mehraufwands auf die ökologische Nachhaltigkeit des Bauteils abschätzen zu können. Durch diese Berechnungen soll eine Grundlage für Product Lifecycle (PLC) Analysen geschaffen werden.

Forschungsfragen:

Aus diesen Aspekten resultieren für diese Arbeit zwei Forschungsfragen, die untersucht werden:

- Wie kann der (Leichtbau-)Leistungsvorteil von multimateriellen Bauteilstrukturen gegenüber monomateriellen Bauteilausführungen erfasst und bewertet werden?
- Wie kann der ökologische Impact eines Bauteils ausgehend einer Topologieoptimierung (Leichtbau) nicht nur für die Produktionsphase, sondern auch die vorgelagerten Phasen des PLC quantifiziert werden?

4. Vorgehensweise zur Betrachtung der Nachhaltigkeit

Um das Leichtbau-Leistungsvermögen von Multi- und Monomaterialbauteilen miteinander vergleichen zu können, bietet der Ansatz von Ashby eine umfangreiche Methode zur Bewertung der Leichtbau-Leistungsfähigkeit eines Bauteils. Anhand des Performance Index wird eine Beispielgeometrie als Multi- und Monomaterialkonstruktion dargestellt und miteinander verglichen [2]. Als Performance Index wird innerhalb dieses Beitrags die massenspezifische Steifigkeit (Steifigkeit / Masse) genutzt. Der quantitative Vergleich von verschiedenen Bauteilen ermöglicht die Gegenüberstellung des Leichtbau-Leistungsvermögen von Multimaterialbauteilen und Monomaterialausführungen gleicher Bauteilgestalt. Dafür wird als Beispielgeometrie im Folgenden ein multimaterieller Biegebalken, bestehend aus dem Baustahl S235 und der Aluminiumlegierung EN AW 6082, untersucht. Dieser wird an einem Balkenende fest eingespannt und an dem anderen mit einer senkrechten Kraft belastet (s. Abbildung 3). Durch den Einsatz von IZEO wird darauffolgend eine optimale Materialverteilung hinsichtlich des Steifigkeit-Masse-Verhältnisses gesucht, um eine belastungsgerechte Bauteilauslegung realisieren zu können [12].

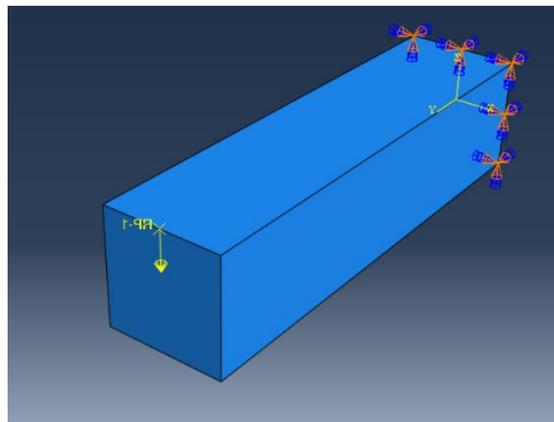


Abbildung 3: Lastfall des Biegebalkens

Zu Beginn der Topologieoptimierung wird ein Gewichts- und Volumenzielwert in Relation zum Ursprungsgewicht bzw. -volumen vorgegeben. Die Optimierung startet mit einem monomateriellen Biegebalken aus Stahl und tauscht innerhalb des Optimierungsprozesses Stahl- zu Aluminiumelementen oder entfernt ganze Bauteilelemente, um das Zielgewicht zu erreichen. Als Zielfunktion ist die Maximierung der Steifigkeit definiert. Neben den multimateriellen Topologieoptimierungen werden auch gleichartige Monomaterialbauteile als Referenz topologieoptimiert. Um das Leichtbau-Leistungsvermögen von monomateriellen und multimateriellen Bauteilausführungen gegenüberzustellen, wird der Performance Index genutzt. Dabei wird die Steifigkeit mit der Masse des Bauteils in Relation gesetzt.

Zur Quantifizierung des ökologischen Impacts der Produktion vorgelagerter Phasen des Produktlebenszykluses eines Bauteils wird ausgehend von der Topologieoptimierung ein Filter über die Ergebnisse gelegt. Dabei bildet der Performance Index die Grundlage für die Bewertung des ökologischen Impacts des Materialaufwandes. Die Bewertung erfolgt mittels eines Life Cycle Assessments (LCA) gemäß der ISO 14040ff., dem die Masse der untersuchten topologieoptimierten Bauteilausführung als funktionelle Einheit zugrunde liegt [28]. Der ökologische Impact wird über CO₂-Äquivalente repräsentiert. Durch den Vergleich des Performance Indexes mit den CO₂-Äquivalenten einer Bauteilgestalt kann das technisch-ökologische Spannungsfeld quantifiziert werden und bietet die Grundlage zur Identifikation von Kompromisslösungen.

5. Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchung der Forschungsfragen erfolgt über eine simulative Versuchsreihe. Dafür wurden eine Reihe von Topologieoptimierungen durchgeführt. Als Referenz zu den Multimaterialbauteilen wurden ebenfalls Topologieoptimierungen mit den verwendeten Monomaterialien S235 und EN AW 6082 untersucht. Abbildung 4 zeigt die Iterationsergebnisse aller Steifigkeitsoptimierungen, indem die Steifigkeit der resultierenden Bauteilgestalt über deren Masse aufgetragen wieder. Damit wird durch die Abbildung die massenspezifische Steifigkeit (Performance Index) der Bauteilausführungen veranschaulicht.

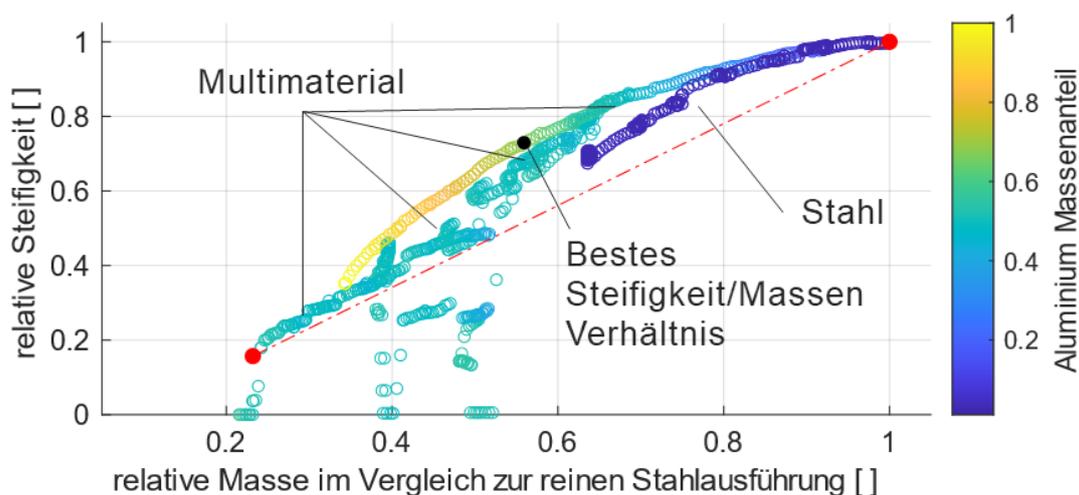


Abbildung 4: Gegenüberstellung von Steifigkeit und Masse topologieoptimierter Biegebalken

Die rot-markierten Punkte in der Abbildung zeigen reine, nicht topologieoptimierte Monomaterialausführungen des Biegebalkens. Die angrenzenden Indigo farbigen Punkte sind wiederum topologieoptimierte monomaterielle Biegebalken aus Stahl. Die in Rot eingezeichnete Linie verbindet als Referenz eine reine Stahl- mit einer reinen Aluminiumausführung und stellt den Performance Index von nicht optimierten Monomaterialbauteilen dar. Durch Topologieoptimierungen lassen der Performance Index von Monomaterialbauteilen verbessern. Der Einsatz von Multimaterialien verstärkt den Effekt, wie die Ergebnisse zeigen. Die Multimaterialkonstruktionen liegen über dieser Linie und weisen damit ein besseres Verhältnis zwischen Steifigkeit und Masse auf.

Unter Hinzunahme der Betrachtung des ökologischen Impacts von Monomateriellen und multimateriellen Bauteilen kann eine Tendenz aufgezeigt werden, inwieweit die Material- und Gestaltungsentscheidungen einen Einfluss auf die LCIA-Kategorie des „Climate Change“ haben.

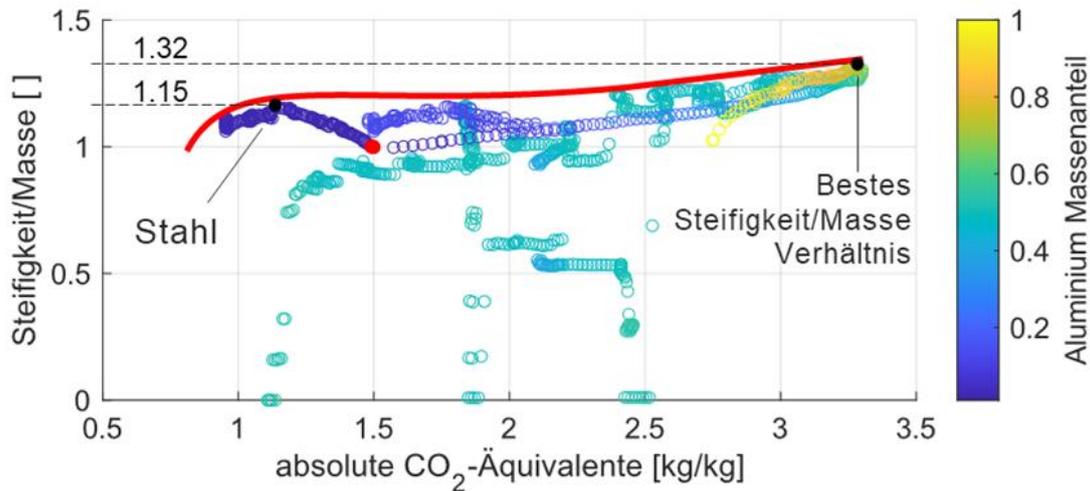


Abbildung 5: Paretofront des Steifigkeit-Masse-Verhältnisses über die absoluten CO₂-Äquivalente

In Abbildung 5 wird der Zusammenhang zwischen dem Steifigkeit-Masse-Verhältnis und den absoluten CO₂-Äquivalenten der Optimierungsergebnisse dargestellt. Die ökologischen Auswirkungen des Bauteils werden als Ergebnis der masseabhängigen Wirkungsabschätzung der LCIA-Kategorie „Climate Change“ wiedergegeben. Resultierend steigt bei einem zunehmenden Steifigkeit-Masse-Verhältnis (Performance Index/PI) der ökologische Impact für den Biegebalken. Der farbliche Verlauf in Abbildung 5 zeigt den Massenanteil von Aluminium. Zudem ist der Initialpunkt von Stahl mit einem PI von 1 und einem CO₂ Äquivalent von 1,5 durch einen roten Punkt markiert. Zu erkennen ist, dass der höchste PI von 1,32 für den vorgestellten Balken bei einem Aluminiumanteil von 67% erreicht wird. Eine weitere Steigerung des Aluminium-Anteils reduziert dieses Verhältnis wieder. Im Vergleich zu den multimateriellen Lösungen erreicht eine optimierte reine Stahlkonstruktion ca. 87% dieser Performance. Dieser Vorsprung der Multimaterialkonstruktion erzeugt aus ökologischer Sicht jedoch eine fast verdreifachte Menge an CO₂-Äquivalenten pro kg. Die rote Linie in Abbildung 5 zeigt die Paretofront der durchgeführten Optimierung und gilt für Aluminium- und Stahl-Mono- sowie Multimaterialkonstruktionen. Besonders bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass unterhalb eines Steifigkeits-Massenverhältnisses von 1,15 mehrere Konstruktionen aus Aluminium existieren und dennoch eine reine Stahlkonstruktion durch den geringeren CO₂ Ausstoß einen signifikanten Vorteil hat.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag veranschaulicht den technisch-ökologischen Zielkonflikt von multimateriellen Strukturkomponenten. Mit Hilfe einer simulativen Versuchsreihe von multimateriellen Topologieoptimierung konnte gezeigt werden, dass mit der Optimierung des Steifigkeits-Masse Verhältnisses der ökologische Impact der eingesetzten Materialien steigt.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse ist das Ziel der weiteren Forschung, die Entwicklung einer Topologieoptimierungsumgebung, die als weitere Zielfunktion die CO₂-Äquivalente mitberücksichtigt, um somit eine Optimierung auf Grundlage von Nachhaltigkeitskennwerten

zu ermöglichen. Andererseits soll eine Berücksichtigung der gesamten Prozesskette des Tailored Formings implementiert werden, um einen höheren Detaillierungsgrad des Produktlebenszyklus zu erreichen. Gegenüber den Berechnungen der ökologischen Auswirkungen des Biegebalkens an die Optimierung anschließend, soll durch die Integration einer Mehrzieloptimierung eine Entscheidungsunterstützung zur Formulierung einer Kompromisslösung ermöglicht werden.

Mit Blick auf den Produktlebenszyklus ist es für eine ganzheitliche Betrachtung notwendig die der Rohstoffgewinnung anschließenden Phasen des PLCs zu berücksichtigen. Dadurch kann untersucht werden, ob der erhöhte Ressourceneinsatz der Produktentstehung sich über die nachfolgenden Phasen amortisiert.

Danksagung

Die Ergebnisse dieser Publikation sind im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1153 „Prozesskette zur Herstellung hybrider Hochleistungsbauteile durch Tailored Forming“ innerhalb des Teilprojekts C2 und der School for Additive Manufacturing (SAM) entstanden. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (Projektnummer: 252662854) und dem Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) für die finanzielle und organisatorische Unterstützung der Projekte.

Literaturverzeichnis

- [1] Brockmüller, T.; Siqueira, R.; Mozgova, I.; Lachmayer, R.: Rechnergestützte Entwicklungsumgebung zur Konstruktion von tailored-forming-bauteilen. In: DFX 2019: Proceedings of the 30th Symposium Design for X, 18-19 September 2019, Jesteburg, Germany, (2019).
- [2] Ashby, M.F.; Cebon, D.: Materials selection in mechanical design. In: Le Journal de Physique IV Vol. 03(C7), S. 7–179 (1993).
- [3] Behrens, B.-A.; Breidenstein, B.; Duran, D.; Herbst, S.; Lachmayer, R.; Löhnert, S.; Matthias, T.; Mozgova, I.; Nürnberger, F.; Prasanthan, V.; Siqueira, R.; Töller, F.; Wriggers, P.: Simulation-aided process chain design for the manufacturing of hybrid shafts. In: HTM Journal of Heat Treatment and Materials Vol. 74(2), S. 115–135 (2019).
- [4] Herrmann, K.; Brockmüller, T.; Gembarski, P.; Mozgova, I.; Lachmayer, R.: Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell für mechanische Bauteile. In: Proceedings of the of the Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021, 20. May 2021, Stuttgart, Germany, (2021).
- [5] Backes, J.G.; Suer, J.; Pauliks, N.; Neugebauer, S.; Traverso, M.: Life Cycle Assessment of an Integrated Steel Mill Using Primary Manufacturing Data: Actual Environmental Profile. In: Sustainability 2021 Vol. 13, 3443, (2021).
- [6] Tajs-Zielinska, K.; Bochenek, B.: Multi-Domain and Multi-Material Topology Optimization in Design and Strengthening of Innovative Sustainable Structures. In: Sustainability 2021 Vol.13, 3435, (2021).
- [7] Munk, D.J.; Miller, J.D.: Topology Optimization of Aircraft Components for Increased Sustainability; In: AIAA Journal Vol. 60, No.1, (2022).
- [8] Herrmann, K.; Altun, O.; Wolniak, P.; Mozgova, I.; Lachmayer, R.: Methodischer Aufbau von Entwicklungsumgebungen nach dem Generative Parametric Design Approach. In: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X (DFX2021), 27. and 28. September 2021, Tutzing, Germany, (2021).
- [9] Siqueira, R.S., Lachmayer, R.: A Manufacturing constrained Design methodology application for a tailored forming hybrid component. In: Dröder, K., Vietor, T. (eds) Technologies for economical and functional lightweight design. Zukunftstechnologien für den multifunktionalen Leichtbau. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, (2019).
- [10] Ehlers, T.; Wurst, J.; Lachmayer, R.: Bewertung der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit in der Additiven Fertigung. In: Lachmayer, R. et al.: Konstruktion für die Additive Fertigung, S. 177–199, (2020).
- [11] Bendsoe, M.P.: Optimal shape design as a material distribution problem; In: Structural Optimization Vol. 1, S. 193-202, (1989).
- [12] Siqueira, Renan; Mozgova, Iryna; Lachmayer, Roland: An interfacial zone evolutionary optimization method with manufacturing constraints for hybrid components. In: Journal of Computational Design and Engineering 6 (2019), Vol. 3, S. 387–397, (2019).

-
- [13] Wurst, J.; Mozgova, I.; Lachmayer, R.: Sustainability Assessment of Products manufactured by the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Process. In: *Procedia CIRP* Vol. 105, S. 243– 248, 2022.
- [14] Andersen, O.: Consequential Life Cycle Environmental Impact Assessment. In: *Unintended Consequences of Renewable Energy*. In: *Green Energy and Technology*. Springer, London, (2013).
- [15] Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.F.; et al.: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level; In: *International Journal of Life Cycle Assessments*, vol. 22, pp. 138-147, (2017).
- [16] Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.F.; et al.: ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization, RIVM Report 2016-0104, National Institute for Public Health and the Environment, (2016).
- [17] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators, EUR 24586 EN, Luxembourg, Publications Office of the European Union, (2010).
- [18] Acero, A.P.; Rodriguez, C.; Ciroth, A.: LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, *GreenDelta*, v. 1.5.4, (2015).
- [19] Reich-Weiser, C.; Vijayaraghavan, A.; Dornfeld, D.: Appropriate use of Green Manufacturing Frameworks; UC Berkeley Green Manufacturing and Sustainable Manufacturing Partnership, (2010).
- [20] Treloar, G. J.; Love, P.E.D.; Faniran, O.O.; Iyer-Raniga, U.: A hybrid life cycle assessment method for construction, In: *Construction Management & Economics* Vol. 18:1, S. 5-9, (2000).
- [21] Crawford, R.H.: Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method; In: *Journal of Environmental Management* Vol. 88, Issue 3, S. 496-506, (2008).
- [22] Liu, J.; Ma, Y.: Sustainable Design-Oriented Level Set Topology Optimization. In: *ASME. J. Mech. Des.* January 2017 Vol. 139(1): 011403, (2016).
- [23] Gebisa, A.W., Lemu, H.G.: Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability. In: *Procedia Manufacturing* Vol. 13, S. 724-731, (2017).
- [24] Tavakoli, H.; Barkdoll, B.D.: Sustainability-based optimization algorithm; In: *Int. J. Environ. Sci. Technol.* Vol. 17, S. 1537–1550, (2020).
- [25] Schwab, J.: Using Multi-Objective Optimization for Improving the Sustainability of Urban Development, (2018).
- [26] Peppas, A.; Kollias, K.; Dragatogiannis, D.A.; Charitidis, C.A.: Sustainability analysis of aluminium hot forming and quenching technology for lightweight vehicles manufacturing; In: *International Journal of Thermofluids* Vol. 10, (2021).
- [27] Backes, J.G.; Suer, J.; Pauliks, N.; Neugebauer, S.; Traverso, M.: Life Cycle Assessment of an Integrated Steel Mill Using Primary Manufacturing Data: Actual Environmental Profile. In: *Sustainability* 2021 Vol. 13, 3443, (2021).
- [28] International Standard Organization: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, (2020).