Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75

Lösungswissen systematisch nutzen

Musterbasierte Entwicklung von Leichtbauprodukten

P. Busch, M. Lorenz, P. Schleicher, T. Bauernhansl

ZUSAMMENFASSUNG Steigende Kosten und der Klimawandel bedingen ein Umdenken im Umgang mit Ressourcen. Ressourcenschonende Entwicklungsansätze wie der Leichtbau sind branchenübergreifend gefragt. Das Wissen zur Leichtbauoptimierung ist in vielen Unternehmen jedoch nicht oder nur implizit vorhanden. Um die Vorteile des Leichtbaus zu heben, muss Leichtbaulösungswissen bereitgestellt werden. Infolgedessen wurde ein Ansatz zur musterbasierten Entwicklung von Leichtbauprodukten entwickelt.

STICHWÖRTER

Leichtbau, Produktentwicklung, Wissensmanagement

Pattern-based development of lightweight products – Systematic use of solution knowledge

ABSTRACT Rising costs and climate change are forcing us to rethink how we use resources. Resource-saving development processes such as lightweight design are in demand across industries. However, the knowledge of lightweight optimization is often not or only implicitly available. To emphasize the added value of lightweight design, it takes approaches that provide solution knowledge. Therefore, an approach for the pattern-based development of lightweight products was developed.

1 Einleitung und Problemstellung

Globale Herausforderungen wie der Klimawandel und steigende Rohstoffkosten verschärfen die schwierige konjunkturelle Lage von Unternehmen in rohstoffintensiven Branchen [1]. Umso wichtiger ist es, vorhandene Ressourceneinsparpotenziale bei der Produktentstehung und -nutzung zu erarbeiten, diese maximal auszuschöpfen und so die organisationale Resilienz der beteiligten Unternehmen aufrechtzuerhalten [2]. Dies kann etwa durch den Einsatz von Leichtbau erreicht werden. Primäres Ziel ist dabei nicht die Reduktion der vorhandenen Bauteilmasse, sondern das Erreichen sogenannter Leichtbaumotivatoren, um den übergeordneten Problemstellungen wie dem Klimawandel entgegnen zu können [3]. Diese Motivatoren sind vielfältig und erstrecken sich über den gesamten Produktlebenszyklus. Beispielsweise kann eine Massenreduktion den Materialeinsatz in der Produktion reduzieren. Folglich ist die Nutzungsphase des Produkts ressourceneffizienter und zugleich kann die Maschinendynamik erhöht werden.

Trotz der durch Leichtbau generierbaren Mehrwerte findet eine ganzheitliche Anwendung in der Produktentwicklung häufig nicht statt. Dies lässt sich auch darauf zurückführen, dass Mitarbeiter kein leichtbauspezifisches Wissen besitzen oder keine einfachen Vorgehensweisen durch die Wissenschaft geboten werden, die sich effizient in den Entwicklungsprozess integrieren lassen [4]. Zudem mangelt es an der Darstellung aufbereiteter, nachvollziehbarer Leichtbaulösungen, etwa in Form leichtbauspezifischer Wissenskataloge, die den Anwendenden einen praktischen Zugang zu Leichtbauwissen anhand erfolgreich umgesetzter Beispiele bietet [5].

Um leichtbauunerfahrenen Anwendenden die Umsetzung von Leichtbau und unternehmensspezifischen Leichtbaumotivatoren zu ermöglichen, wird im Folgenden ein Ansatz zur musterbasierten Entwicklung von Leichtbauprodukten vorgestellt. Der Ansatz basiert auf einer umfänglichen Analyse erfolgreich umgesetzter Leichtbauprodukte und schlägt direkte Lösungsideen vor. Die Praxistauglichkeit des entwickelten Ansatzes wird in Kapitel 5 anhand der Leichtbauoptimierung einer Sondermaschinenbau-Baugruppe beispielhaft erklärt und validiert.

2 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen zur Erarbeitung des Ansatzes stützt sich auf die in vier Phasen aufgeteilte Design Research Methodology nach *Blessing und Chakrabarti* [6]. Zuerst erfolgt in Kapitel 1 mittels der Research Clarification die Klärung der Problemstellung. Im zweiten Schritt, der Descriptive Study I, werden der aktuelle Stand der Technik sowie Forschungslücken und der Handlungsbedarf (Kapitel 3) dargestellt. In Phase 3, der Prescriptive Study (Kapitel 4), wird der entwickelte Ansatz zur musterbasierten Entwicklung von Leichtbauprodukten vorgestellt. Zuletzt werden in Phase 4, der Descriptive Study I, der Ansatz validiert (Kapitel 5) und darauf aufbauend Optimierungspotenziale (Kapitel 6) abgeleitet.

3 Stand der Technik

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik zu Ansätzen in der Leichtbauproduktentwicklung und Ansätzen zur musterbasierten Produktentwicklung beschrieben. Vorhandene

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Forschungslücken und der resultierende Handlungsbedarf werden abschließend abgeleitet und als Grundlage für den in Kapitel 4 entwickelten Ansatz verwendet.

3.1 Ansätze zur Entwicklung leichtbauoptimierter Produkte

Leichtbau ist seit Jahrzehnten ein fester Bestandteil der methodischen Produktentwicklung, der in einer Vielzahl an Branchen, wie etwa dem Maschinen-, Flugzeug- oder Automobilbau angewendet wird. Die verwendeten Leichtbauansätze konzentrieren sich zumeist auf die Massenreduktion innerhalb einer bestimmten Produktentwicklungsphase oder setzen den Fokus auf eine bestimmte Branche in welcher der Leichtbau besondere Mehrwerte bietet.

Als Pionier der methodischen Leichtbauproduktentwicklung verwendet *Feyerabend* [7] die Wertanalyse-Kosten und projiziert diese auf die Masse von Produkten. *Feyerabend* versucht in sechs aufbauenden Schritten die Masse eines Industrieroboters systematisch zu reduzieren – jedoch ohne vorhandenes Lösungswissen zu integrieren. Eine Ausnahme bildet die Verwendung von Leichtbauleitregeln für Schraubenverbindungen, die aber nicht auf weitere Komponenten übertragen werden.

Auch *Schmidt* [8] konzentriert sich auf die methodische Entwicklung innovativer Leichtbauprodukte. Er stellt einen zweistufigen Prozess aus Analyse- und Synthesephase vor. Diese Phasen dienen als Basis für ein Konzept zum systematischen Leichtbauinnovationstransfer, das vorhandenes Leichtbauwissen einbezieht. *Schmidt* zeigt nicht spezifisch auf, wie dieses Wissen aus Leichtbauprodukten extrahiert wird und bietet keinerlei Leichtbaubeispiele in Form von Musterkarten oder Ähnlichem. Die aufgeführten Konzeptschritte werden nur stellenweise in Form von Graphic User Interfaces (GUIs) einer fiktiven Software aufgezeigt. *Schmidt* schließt mit einer Validierung anhand einer Windkraftanlage, wobei Leichtbaumaßnahmen präsentiert werden. Es bleibt jedoch offen, wie diese systematisch anhand von nachvollziehbar dargestellten Leichtbaubeispielen abgeleitet wurden.

Entgegen der bisherigen Ansätze nutzen *Ponn* und *Lindemann* [9] einen systematischen Produktentwicklungsprozess zur Erstellung von Leichtbauprodukten. In der Konzeptphase wenden *Ponn und Lindemann* die Funktionskostenanalyse (vergleiche Wertanalyse-Gewicht) und eine Variation von Funktionsprinzipien an, um das leichteste Funktionsprinzip zu finden. Die Ideen werden in der Entwurfsphase mit Maßnahmen, etwa Leichtbauregeln, umgesetzt. Vorhandenes Leichtbaulösungswissen wird nicht für die Lösungsfindung verwendet, weshalb die Anwendenden über Erfahrung im Leichtbau verfügen müssen.

Ähnlich wie *Ponn* und *Lindemann* [9] stellt *Lüdeke* [10] in seiner Dissertation einen neuartigen Produktentwicklungsprozess für die massenoptimierte Entwicklung mechatronischer Produkte auf Basis der VDI 2206 [11] vor. Er führt einen an *Roth* [12] angelehnten Konstruktionskatalog ein, der aus Struktur-, Haupt-, Zugriffs- und Anmerkungsteil besteht. *Lüdeke* macht vorhandenes Lösungswissen nutzbar und unterstützt unerfahrene Anwendende. Die Anwendung beschränkt sich jedoch ausschließlich auf mechatronische Lösungen. Zudem gibt *Lüdeke* keine Erläuterungen der für den Katalog analysierten Produkte, wodurch die Nachvollziehbarkeit fehlt.

In einer weiteren Dissertation stellt *Posner* [13] eine Methodik zum leichtbaugerechten Konzipieren vor. Diese basiert auf einem Baukasten, welcher verschiedene Leichtbaumaßnahmen für die konzeptionelle Phase enthält. *Posner* präsentiert die Function Mass Estimation (FME), mit welcher Lösungen auf Funktions- oder Wirkebene anhand der Analyse ähnlicher Produkte gefunden werden können. Der Analyseprozess bezieht nur Produkte aus ähnlichen Branchen mit ein und erfordert die eigene Ableitung von Funktions- oder Wirkalternativen durch die anwendende Person. Eine Darstellung erfolgreicher Leichtbaubeispiele und die Ableitung von Lösungswissen finden nicht statt.

Albers et al. [14] führen einen ETWA-Ansatz (Extented Target Weighing Approach) ein, bei welchem sie den vorhandenen Funktionen Masse zuweisen. Zusätzlich zu den Kriterien Masse und Kosten berücksichtigt der ETWA auch die CO_2-Emissionen. Spezifische Leichtbaumaßnahmen, -beispiele oder -wissen werden nicht beschrieben. In einem weiteren Ansatz bieten *Albers et al.* [15] einen Rahmen für die kontinuierliche Unterstützung im Leichtbauentwicklungsprozess. Es wird kein systematischer Entwicklungsprozess, sondern eine Sammlung von Leichtbaumethoden und Prozessen, die den Benutzer während der Leichtbauproduktentwicklung unterstützen sollen, vorgestellt. Je nach Anwendungsfall schlagen *Albers et al.* bereits vorhandene Maßnahmen (beispielsweise ETWA) für jeden Fokusbereich vor. Explizite Leichtbaulösungen werden nicht thematisiert.

Zuletzt stellt *König* [16] eine Methodik zur Integration von Leichtbaukreativitätsmethoden in den Produktentwicklungsprozess vor. Durch Nutzung von Kreativitätstechniken versucht *König*, Anwendende bei der Generierung von leichtbaufördernden Ideen zu unterstützen. Die anwendende Person muss demnach selbst Ideen generieren und für eine erfolgreiche Umsetzung sorgen. Explizites Leichtbauwissen anhand von analysierten und erklärten Leichtbaubeispielen findet keine Anwendung.

3.2 Ansätze zur musterbasierten Produktentwicklung

Die musterbasierte Entwicklung ist eine spezielle Vorgehensweise zur Nutzung von vorhandenem Lösungswissen für die effiziente Umsetzung eines Entwicklungsvorhabens. Dabei wird das Lösungswissen in Form von Lösungsmustern genutzt, die durch die Extraktion implizit vorhandenen Wissens von Personen gebildet werden können [17]. Die Lösungsmuster stellen demnach explizites Wissen bereit, das Anwendende trotz fehlenden impliziten Wissens dazu befähigt, Problemstellungen selbstständig zu lösen [18].

Die Nutzung von Mustern, um vorhandenes Wissen für wiederkehrende Problemstellungen bereitzustellen, geht auf den Architekturtheoretiker *Alexander* [19] zurück. Er nutzte das Prinzip in der Architektur zur Gestaltung von Bauwerken. Seitdem wurde dieses Vorgehen in eine Vielzahl an weiteren Anwendungsfällen übertragen.

Besonders hervorzuheben ist die Nutzung von Mustern im Software Engineering, die spätestens durch die Design Patterns von *Gamma* [20] Bekanntheit erlangten. Auch das Systems Engineering bietet eine Vielzahl an Arbeiten, etwa *Cloutier* [21] oder *Weilkins* [22], in welchen Muster für Entwicklungsvorhaben genutzt werden. Ähnlich zum Systems Engineering werden in den Bereichen Maschinenbau, Konstruktion und Mechatronik Muster für die Entwicklung physischer Produkte genutzt. Bedeutende Arbeiten, die unter anderem für den vorliegenden Ansatz relevant sind, präsentieren *Suhm* [23], *Roth* [12] oder *Lüdeke* [10]. Weitergehend bietet *Lehner* [24] einen Ansatz, der an der Schnittstelle

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

zwischen Produktentwicklung und Geschäftsmodellgestaltung anzusiedeln ist. Die für den vorliegenden Ansatz relevanten Arbeiten werden, sofern noch nicht geschehen, im Folgenden skizziert.

Altschuller [25] führte bereits 1973 die Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ) ein. Dabei werden spezielle Probleme abstrahiert, um eine allgemeingültige Beschreibung zu ermöglichen. Auf Basis dieser allgemeinen Problemstellung leitet *Altschuller* allgemeine Lösungen ab, die wiederum durch Konkretisierung eine spezielle Lösung bieten können. TRIZ enthält ebenso Lösungswissen in Form von 40 Prinzipien, die gemeinsam mit der Nutzung einer Widerspruchsmatrix bei der Lösungsfindung unterstützen. Explizite ideenfördernde Produktbeispiele mit Lösungen werden durch *Altschuller* jedoch nicht bereitgestellt.

Weiterführende Ansätze zur Nutzung von Lösungswissen in der Konstruktion bieten *Roth* [12] und die VDI 2727 [26] mittels Konstruktionskatalogen. Anwendende können auf eine Vielzahl an fertigen Katalogen mit bewährten Lösungen, etwa aus dem Bereich der Verbindungstechnik (*Roth*) oder der Getriebetechnik (VDI 2727), zurückgreifen, um Problemstellungen effizient zu lösen. Die Anwendung ist jeweils auf eine bestimmte Kategorie (beispielsweise Wälzlager) beschränkt, sodass diese Ansätze nur auf Bauteilebene unterstützend genutzt werden können. *Suhm* [23] vertieft den Ansatz der Konstruktionskataloge durch detailliert beschriebene Lösungsmuster aus dem Maschinenbau, die spezifische Lösungen in Abhängigkeit von Voraussetzungen und Umgebungsbedingungen liefern. Auch hier werden vornehmlich die Bauteilebene und zugleich eine sehr spezifische Problemstellung adressiert, sodass ein Übertrag der Lösungsmuster auf andere Bauteile oder gar Baugruppen sehr komplex erscheint. [23]

Ein ähnliches, nicht mit Mustern unterlegtes Vorgehen schlägt *Salustri* [27] anhand der Engineering Design Pattern vor. Er definiert sechs Cluster (unter anderem Problembeschreibung) und gibt so einen Rahmen für die Erstellung von Lösungsmustern im Maschinenbau vor. Jedoch werden keine Lösungsmuster beispielhaft gezeigt, sodass eine Unterstützung in einem Entwicklungsvorhaben nicht gegeben ist.

Lehner [24] bietet einen an die TRIZ von *Altschuller* [25] angelehnten Prozess zur lösungsmusterbasierten Entwicklung von Frugal Innovations. Auf Basis abstrahierter realer Problemstellungen aus 31 Frugal Innovations und 55 daraus abgeleiteter Lösungsmuster erweitert das entwickelte Lösungsmustersystem die TRIZ um Regeln zur Bildung und Nutzung von Lösungsmusterkombinationen. Dabei konzentriert sich *Lehner* sowohl auf die Gestaltung von Geschäftsmodellen als auch auf die Entwicklung frugaler Produkte. *Lehner* lässt offen, weshalb „nur" 31 erfolgreich umgesetzte Frugal Innovations für die Entwicklung des Lösungsmustersystems analysiert worden sind. Eine höhere Anzahl kann zur Zunahme der Lösungsmuster und zur effizienteren Nutzung von Lösungswissen beitragen. Sofern nicht geschehen, bietet sich die Identifikation von Beispielen bis zum Einsetzen der theoretischen Sättigung an.

3.3 Forschungslücken und Handlungsbedarf

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Entwicklung leichtbauoptimierter Produkte, etwa *Feyerabend* [7], *Albers* [14], *König* [16], oder zur Nutzung von Lösungswissen, zum Beispiel in Form von Lösungsmustern für die Entwicklung von Produkten, Geschäftsmodellen (siehe auch *Altschuller* [25], *Salustri* [27], *Lehner* [24]). Eine gemeinsame Betrachtung der Leichtbauproduktentwicklung und der Nutzung von explizitem Lösungswissen durch Lösungsmuster konnte hingegen nicht gefunden werden.

Auch wenn einige Leichtbauansätze (*Schmidt* [8], *Lüdeke* [10], *Posner* [13]) vereinzelt Lösungswissen miteinbeziehen, setzen die meisten Expertenwissen voraus und berücksichtigen nicht den variierenden Erfahrungsschatz der Anwendenden. Ebenso konzentrieren sich nur vereinzelt Ansätze zur Nutzung von Lösungswissen auf dessen explizite Nutzung in der Konstruktion beziehungsweise im Maschinenbau (VDI 2727 [26], *Suhm* [23], *Roth* [12]). Der Leichtbau wird dabei nicht betrachtet.

Vor diesem Hintergrund, den Mehrwerten des Leichtbaus und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich durch den Rückgang der MINT (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik)-Absolventen der Fachkräftemangel verschärft und ein Verlust an implizitem Wissen wahrscheinlich ist, muss dieses Wissen in Zukunft verstärkt gesammelt und für unerfahrene Mitarbeiter aufbereitet werden. Es besteht somit ein dringender Bedarf an einem musterbasierten Ansatz zur Entwicklung leichtbauoptimierter Produkte.

4 Ansatz zur musterbasierten Entwicklung leichtbauoptimierter Produkte

Der Ansatz orientiert sich an der TRIZ-Vorgehensweise nach *Altschuller* [25], der von konkreten Problemen mit abstrakten Beschreibungen der Probleme und zugehörigen Lösungen auf konkrete Lösungen schließt. Dazu werden im vorliegenden Ansatz zuerst erfolgreich umgesetzte Leichtbauprodukte analysiert. Anschließend wird die „Motivator-Potenzial-Matrix" (MPM) vorgestellt, die als Transfereinheit von bisherigen Lösungen für neue Entwicklungen genutzt wird. Die aus den identifizierten Leichtbauprodukten generierten Informationen werden in Form einer Leichtbau-Produkt-Karte (LPK) festgehalten. Die dokumentierten Lösungen dienen als Grundlage zur Ableitung von Lösungsmustern, die in Lösungsmuster-Karten (LK), angelehnt an das Dokumentationsschema nach *Alexander* [19], dokumentiert werden. Anhand der Sammlungen an LPK und LK sowie der MPM wird abschließend die Anwendung des Ansatzes verdeutlicht.

4.1 Identifizieren erfolgreich umgesetzter Leichtbauprodukte

Als Datengrundlage für die Erstellung des Ansatzes zur musterbasierten Entwicklung leichtbauoptimierter Produkte dienen erfolgreich umgesetzte Leichtbauprodukte, die aus dem Internet, wissenschaftlichen Veröffentlichungen (siehe Veröffentlichungen in Kapitel 3.1) oder unternehmensinternen Leichtbauprojekten zusammengetragen werden. Zu diesen Leichtbauprodukten gehören Produkte, bei deren Entwicklung eine Massenreduktion sowie das Heben von zugehörigen Leichtbaumotivatoren als primäres Ziel verfolgt werden und bei denen eine quantifizierte Massenreduktion ausgewiesen wird. Einen Auszug der 52 bisher identifizierten Leichtbauprodukte mit einer produktspezifischen Charakterisierung zeigt **Bild 1**.

Da kontinuierlich weitere Leichtbauprodukte publiziert werden, ist die Sammlung „offen" gestaltet. Dies bedeutet, dass eine ständige Erweiterung möglich ist. Die Erweiterbarkeit um neue Leichtbauprodukte bis zu einem gewissen Grad der theoretischen Sättigung, erlaubt eine noch passgenauere Unterstützung bei der

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

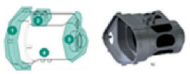
#	Name	Charakterisierung	Jahr
3	Getriebegehäuse	*Das Getriebegehäuse ist eine fest im Getriebestrang von Fahrzeugen verbaute Komponente, das das innenliegende Getriebe umschließt. Das Gehäuse besteht aus vier miteinander verschweißten Bauteilen.* 	2018
...			
6	Antennenhalterung	*Die Antennenhalterung wird in einem Satelliten, welcher im Weltraum zur Erdbeobachtung genutzt wird, verbaut. Die bisherige Baugruppe besteht aus mehreren Einzelteilen und ist über eine Vielzahl an Schnittstellen gefügt.*	2016
...			
18	Transportgabel	*Die Transportgabel ist eine bewegliche Einheit einer Wellpappenverarbeitungsmaschine. Sie besteht aus drei Baugruppen und wird beim Herstellungsprozesses kontinuierlich in zwei Richtungen beschleunigt und abgebremst. Primär werden Werkstücke aus Pappe bewegt.*	2020
...			

Bild 1. Sammlung der identifizierten Leichtbauprodukte (Auszug). *Grafik: Fraunhofer IPA*

Leichtbauentwicklung basierend auf den im Folgenden erklärten Schritten. Demnach kann ein Anspruch auf Vollständigkeit der dargestellten Sammlung zu keinem Zeitpunkt erhoben werden.

4.2 Analysieren der Leichtbaumotivatoren und -potenziale

Für die passgenaue Zuweisung der in Kapitel 4.4 abgeleiteten Lösungsmuster zu neuen Leichtbauproduktentwicklungen wird eine Transfereinheit benötigt. Anders als bei TRIZ [25] ist die übergeordnete Problemstellung bei der Leichtbauproduktentwicklung stets die Masse und somit invariabel. Eine Problembetrachtung auf dieser Ebene ist für die Ableitung von Lösungsmustern nicht zielführend. Als konkrete Problemebene wird auf das die Massenreduktion bedingende, für den vorliegenden Fall spezifische Problem zurückgegriffen (beispielsweise „Werkzeugbeschleunigung zu gering“).

Auf Basis der identifizierten Leichtbauprodukte konnte so eine Vielzahl an verschiedenen konkreten Problemen erarbeitet werden, welche sich wiederum in Form der Leichtbaumotivatoren kategorisieren lassen (etwa „Maschinendynamik erhöhen“). Die Kategorisierung in Leichtbaumotivatoren erlaubt eine abstrakte Darstellung der gefundenen konkreten Probleme mittels lösungsorientierter anstatt problembehafteter Art. Aus den Problemen der bisher identifizierten Leichtbauprodukte wurden insgesamt 25 Leichtbaumotivatoren (Auszug siehe **Bild 2**) abgeleitet.

Der Zusammenhang zwischen aufgezeigten Leichtbaumotivatoren und eingesetzten Lösungen, die explizit in den identifizierten Leichtbauprodukten vorliegen, könnte erste Lösungen für ein neu zu entwickelndes Leichtbauprodukt mit gleichen Leichtbaumotivatoren liefern. Die betrachtete Lösungsebene ist dabei aber noch zu spezifisch (zum Beispiel „substituiere Stahl mit Aluminium“), sodass eine Übertragbarkeit auf andere Leichtbauentwicklungen nicht gegeben ist (nicht überall wird Stahl eingesetzt oder nicht überall ist Aluminium nutzbar). Eine weitere Abstraktion, wie in Kapitel 4.4 vorgestellt, ist notwendig.

Auch ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht klar, ob diese Lösungen bei einem neuen Leichtbauprodukt tatsächlich einsetzbar sind. So könnte beispielsweise die Lösung „Werkstoffsubstitution“, aufgrund der potenziellen Vorschrift Edelstahl zu verwenden in der Pharmabranche obsolet werden – eine weitere Berücksichtigung dieser Lösung würde Ressourcen verschwenden, da sie nicht anwendbar ist. Somit ist es im Leichtbau zielführend, vor einer Lösungsfindung tatsächliche Änderungs- beziehungsweise Leichtbaupotenziale zu identifizieren. So können Ressourcen möglichst zielgerichtet eingesetzt werden.

Dafür werden 13 Potenzialkriterien eingeführt (etwa Wirkstruktur, Bauelement oder Werkstoff), die aus der Analyse und dem Clustering der in den identifizierten Leichtbauprodukten tatsächlich genutzten Lösungen resultieren. Die Potenzialkriterien geben an, welches Kriterium Potenzial für eine Massenreduktion des Produktes bietet – also was während der Produktentwicklung tatsächlich geändert werden kann, um die Masse des Produktes zu reduzieren. Die Potenzialidentifikation erfolgt mit einem einfachen binären Bewertungsbogen zur Bewertung der Potenzialkriterien hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit im durchzuführenden Entwicklungsvorhaben. Bereits gehobene Kriterien entfallen somit.

Mit den erarbeiteten Leichtbaumotivatoren und Potenzialkriterien wird für jedes identifizierte Leichtbauprodukt und für jedes Lösungsmuster eine MPM, eine zweidimensionale, in Gliederungs- und Zugriffsteil [12] aufgeteilte Matrix, erstellt. Wie in Bild 2 erläutert, geben die farblich markierten Zellen in der MPM an, inwiefern Interferenzen zwischen den Leichtbaumotivatoren (Zeile) und Potenzialkriterien (Spalte) vorliegen. Die MPM werden in die LPK und die LK (Kapitel 4.4) integriert und ermöglichen den Transfer passender Lösungsmuster und Leichtbaubeispiele zur Unterstützung neuer Leichtbauentwicklungsvorhaben (Kapitel 4.5). Bild 2 gibt einen Auszug aus der globalen MPM der identifizierten Leichtbauprodukte wieder. Diese enthält eine Überlagerung der erstellten Leichtbauprodukt-MPM. Eine gleiche Darstellung dieser MPM gibt es für die Lösungsmuster.

Die Erstellung der produkt- beziehungsweise lösungsmusterspezifischen MPM werden in Kapitel 4.3 und 4.4 ausführlich erläutert.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

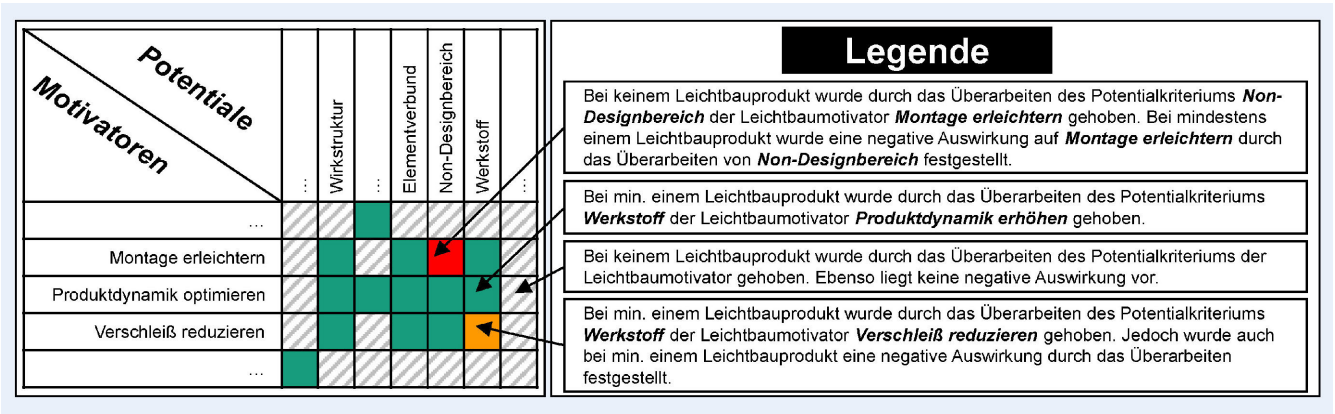


Bild 2. Globale Motivator-Potenzial-Matrix der Leichtbauprodukte (Auszug). *Grafik: Fraunhofer IPA*

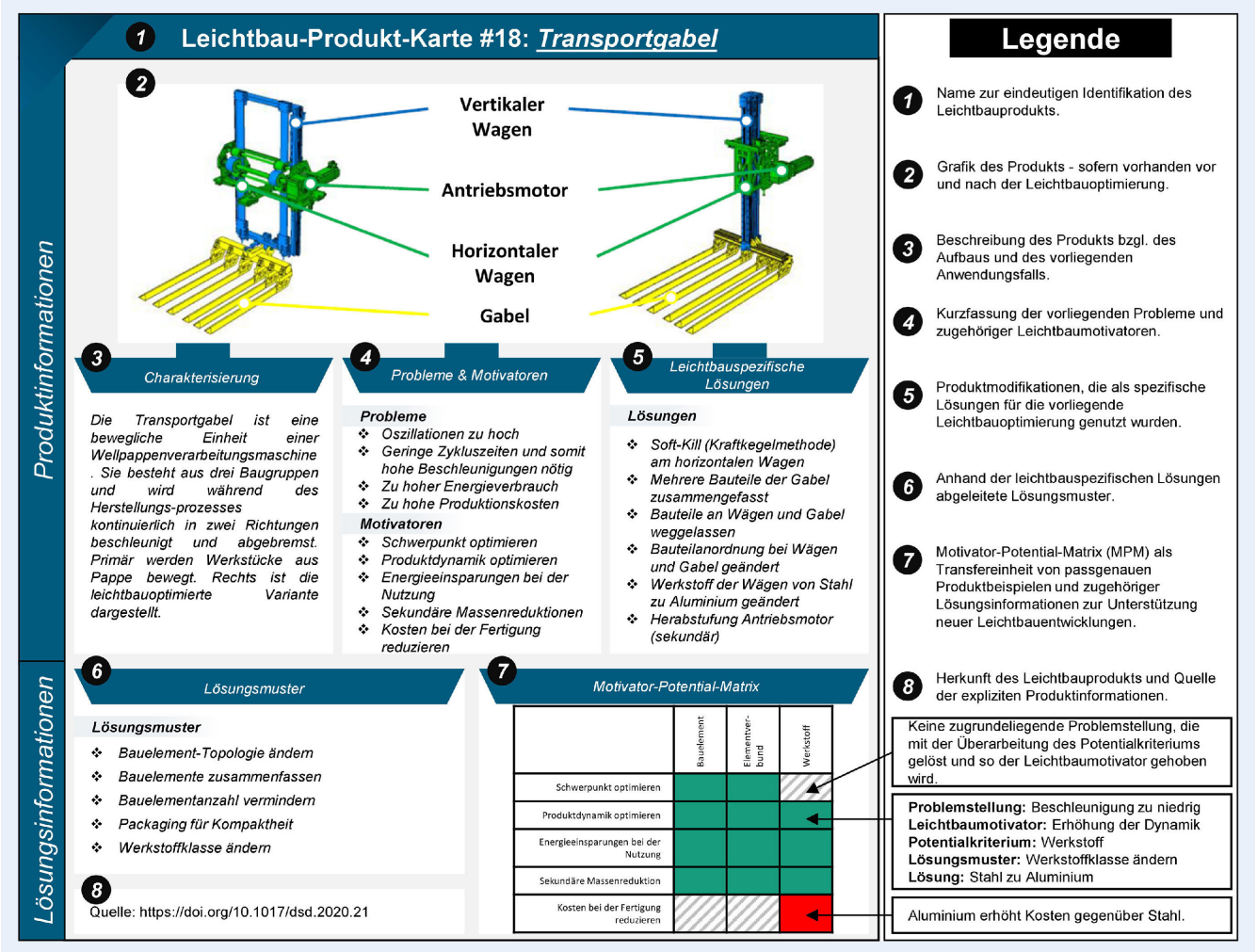


Bild 3. Leichtbau-Produkt-Karte und Legende zur Erläuterung der acht Cluster. *Grafik: Fraunhofer IPA*

4.3 Erstellen der Leichtbau-Produkt-Sammlung

Die folgend vorgestellte Leichtbau-Produkt-Sammlung (LPS), bestehend aus einzelnen LPK, bietet eine einheitliche und die Leichtbauentwicklung unterstützende Darstellung der aus den in Kapitel 4.1 identifizierten Leichtbauprodukten zu extrahierenden Informationen. Zur Erstellung der LPK werden die Leichtbauprodukte auf acht verschiedene Informationscluster, die den Kategorien Produkt- oder Lösungsinformationen zugeordnet werden, analysiert (**Bild 3**). Dabei enthalten die Produktinformationen explizites Lösungswissen und die Lösungsinformationen aus dem expliziten Wissen abgeleitetes implizites Wissen.

Mit den leichtbauspezifischen Lösungen in der LPK werden durch Abstraktion dieser Lösungen allgemeingültige Lösungsmuster, angelehnt an TRIZ [25], abgeleitet. So lässt sich etwa auf Werkstoffebene aus der leichtbauspezifischen Lösung „Verwen-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

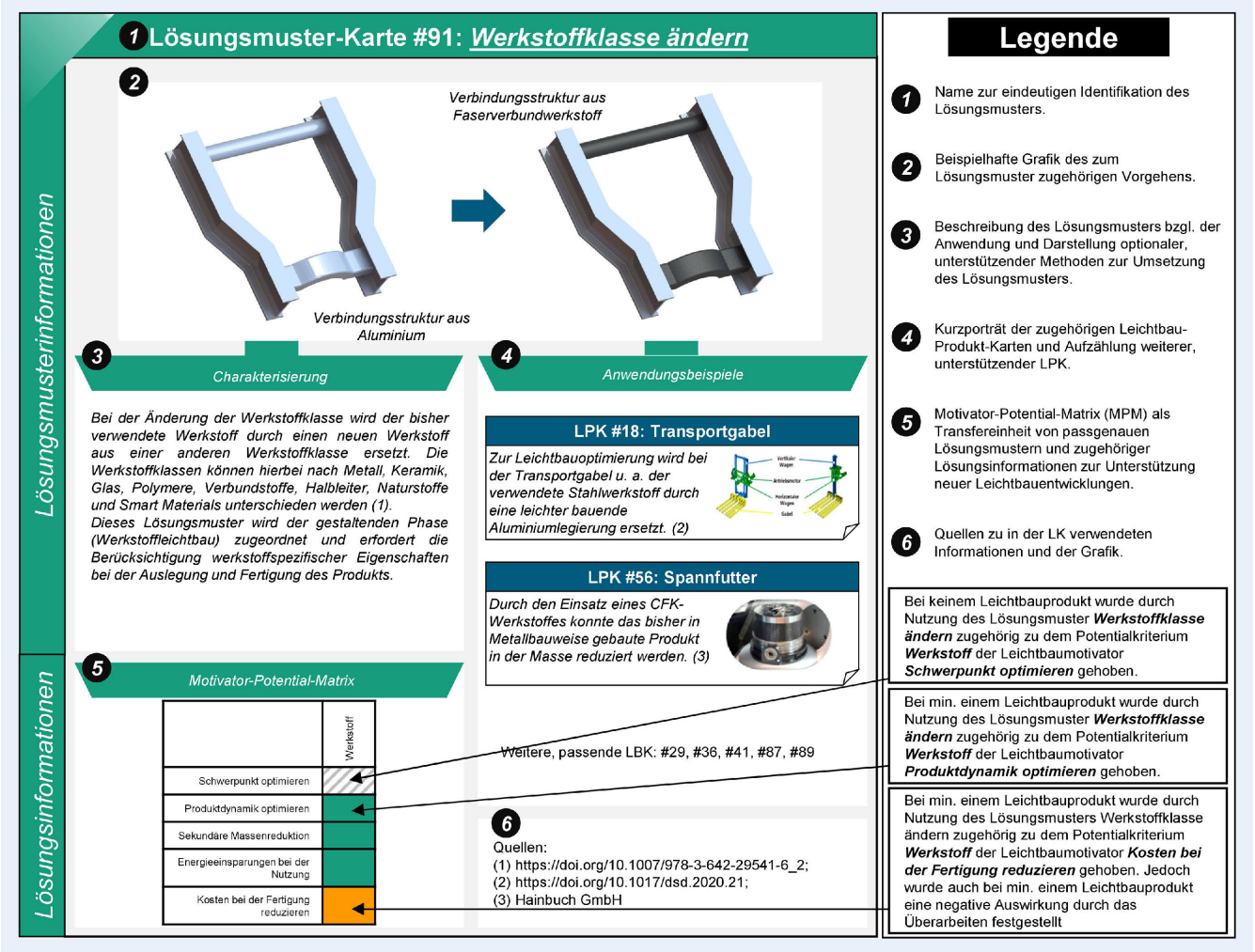


Bild 4. Lösungsmuster-Karte und Legende zur Erläuterung der sechs Cluster. *Grafik: Fraunhofer IPA*

dung eines Faserverbundwerkstoffs an Stelle eines Stahlwerkstoffs“ durch Abstraktion das Lösungsmuster „Werkstoffklasse ändern“ oder auf gestalterischer Ebene aus „Nutzung einer dreieckigen Kontur anstelle einer fünfeckigen Kontur“ das Lösungsmuster „Konturflächenanzahl verringern“ ableiten. Diese Art und Weise der Lösungsabstraktion führt bereits in der Produktentwicklung vorhandenes Lösungswissen mit neuem, anhand der Leichtbauprodukte identifizierten Leichtbaulösungswissen zusammen und ermöglicht eine alternative Art, die dargestellten Lösungen auf neue Leichtbauproduktentwicklungen zu transferieren.

Für den Transfer wird die beschriebene MPM genutzt. Die Leichtbaumotivatoren aus Cluster 4 werden in die Zeilen und die Potenziale in die Spalten eingetragen. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden die nicht nötigen Leichtbaumotivatoren und Potenzialkriterien nicht dargestellt. Anschließend erfolgt die farblich unterlegte Bewertung der Zellen, die explizit die vorliegenden Probleme zellenfein zuweist. So wird aufgezeigt, mit welchem Potenzialkriterium im vorliegenden Fall das Problem gelöst oder verstärkt wurde. Eine vollständig ausgefüllte LPK inklusive Legende ist in Bild 3 zu sehen.

Die erstellten LPK werden in Form einer LPS gesammelt. Diese wird in Kombination mit der in Kapitel 4.4 dargestellten Lösungsmuster-Sammlung (LS) für die Entwicklung neuer Leichtbauprodukte genutzt, ausführlich erläutert in Kapitel 4.5.

4.4 Ableiten der Lösungsmuster-Sammlung

Auf Basis der spezifischen Lösungen in den LPK werden Lösungsmuster abgeleitet. Diese dienen der Abstraktion expliziter Lösungen und ermöglichen, wie in Kapitel 4.2 ausgeführt, eine Übertragung bestehender Lösungen auf neue Entwicklungsvorhaben. Die Dokumentation der Lösungsmuster erfolgt in Form der LK, die in ihrer Gesamtheit die LS bilden. Insgesamt umfassen die LK sechs Cluster, aufgeteilt in Lösungsmusterinformationen und Lösungsinformationen. Erstere beschreiben das Lösungsmuster und erklären dessen Anwendung. Zweitere dienen dem Transfer passgenauer Lösungsmuster auf neue Entwicklungsvorhaben und unterstützen bei deren Umsetzung.

Cluster 4 „Anwendungsbeispiele“ in **Bild 4** zeigt reduzierte LPK erfolgreich umgesetzter Leichtbauprodukte, welche durch Anwendung des Lösungsmusters leichtbauoptimiert wurden. Es werden jeweils zwei exemplarische LPK dargestellt und weitere, passende LBK aufgezählt.

Für den Transfer wird erneut die beschriebene MPM genutzt. Jedes Lösungsmuster lässt sich spezifisch einem Potenzialkriterium zuordnen, das in der Spalte gelistet ist. Die Zeilen enthalten alle Leichtbaumotivatoren, die mit der Anwendung des Lösungsmusters in der Gesamtheit aller identifizierten Leichtbauprodukte gehoben werden können. Anschließend erfolgt die farblich unter-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

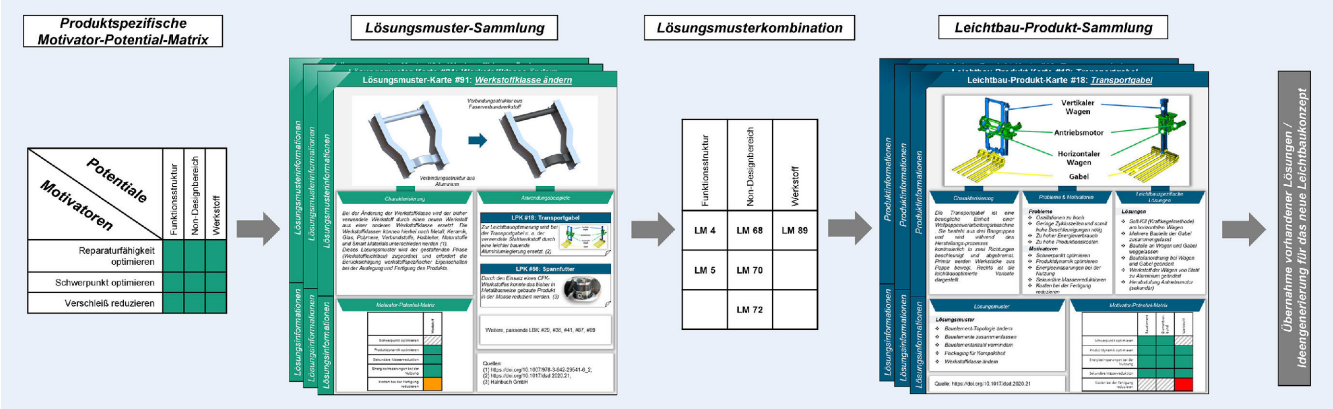


Bild 5. Ansatz zur musterbasierten Entwicklung von Leichtbauprodukten. *Grafik: Fraunhofer IPA*

legte Bewertung der Zellen. Bisher konnten so 91 Lösungsmuster abgeleitet werden, deren Inhalte in Form der LK in Bild 4 erläutert sind.

4.5 Anwenden des Ansatzes

Die in Kapitel 4.3 und 4.4 vorgestellten Sammlungen werden für die ganzheitliche Entwicklung von Leichtbauprodukten in Form von Änderungs- oder Anpassungskonstruktionen genutzt. Die Nutzung für Neukonstruktionen ist in einer abgewandelten Vorgehensweise ebenso möglich, ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Ausarbeitung.

Zu Beginn wird die MPM für das zu entwickelnde Leichtbauprodukt anhand des bestehenden, noch nicht leichtbauoptimierten Produktes ermittelt. Die Leichtbaumotivatoren werden, sofern noch nicht im bisherigen Projektverlauf geschehen, aus den konkreten Problemstellungen abgeleitet und in den Zeilen der MPM festgehalten. Ebenso werden die Potenzialkriterien mittels der binären Bewertung bewertet und zutreffende in den Spalten der MPM notiert. Daraus ergibt sich eine spezifische, produktabhängige MPM, mit der nun systematisch passende Lösungsmuster identifiziert werden können.

Hierfür wird die Lösungsmustersammlung quantitativ nach Lösungsmustern mit spaltenweise übereinstimmenden MPM durchsucht. Eine Übereinstimmung liegt vor, sobald zwei identische Zellen einer Spalte sowohl bei der produktabhängigen als auch bei der Lösungsmuster-MPM grün oder orange markiert sind. Je mehr Zellen übereinstimmen, desto hilfreicher können die identifizierten Lösungsmuster für die vorliegende Produktentwicklung sein. Diese Lösungsmuster müssen nun durch das Unternehmen auf Umsetzbarkeit beurteilt werden. Nicht in Frage kommende Lösungsmuster werden nicht weiterverfolgt. Es verbleibt eine Lösungsmusterkombination, für die zugehörige LPK aus der LPS extrahiert werden. Passende LPK können auch direkt aus den LK der gewählten Lösungsmuster entnommen werden. Die schrittweise Anwendung ist in **Bild 5** grafisch dargestellt.

Mittels der Lösungsmusterkombination und der LPS können wissensbasiert innovative Leichtbaukonzepte abgeleitet werden. Die Produkt- beziehungsweise Entwicklungsinnovation entsteht durch die Projektion von Lösungswissen bezüglich eines oder mehrerer Leichtbauprodukte auf ein potenziell vollkommen variierendes Produkt (beispielsweise Lösung aus Automobilbau in Maschinenbau genutzt). Je nach Übereinstimmungsgrad der MPM der Lösungsmuster und der LPS mit der MPM des zu entwickelten Produktes (farbig markierte Zellen) erlaubt der vorliegende Ansatz eine direkte Übernahme von Lösungen, ohne selbst Ideen generieren zu müssen. Sollte dies nicht möglich sein, unterstützt das dargestellte Lösungswissen anhand der in der Praxis umgesetzten Leichtbaubeispiele und der Erklärungen in den LK die Ideengenerierung.

5 Evaluation des Ansatzes

Der Ansatz zur musterbasierten Entwicklung leichtbauoptimierter Produkte wurde an einer Baugruppe, dem sogenannten Klappenöffner, eines mittelständischen Sondermaschinenbauers angewendet und validiert. Der Klappenöffner ist ein dynamisch bewegter Bestandteil einer Containerhubsäule, der in der Pharma- oder Nahrungsmittelindustrie für das Manipulieren von mit Rohstoffen gefüllten Containern verwendet wird. Dabei wird der Klappenöffner zum automatisierten Öffnen und Schließen der Container genutzt und trägt so maßgeblich zur Funktionsfähigkeit der Containerhubsäule bei.

Die Masse des Klappenöffners beeinflusst zum einen den Energieverbrauch und somit den CO_2-Ausstoß in der Nutzungsphase. Zum anderen ist die Herstellung kosten- und materialintensiv. Um diese massenabhängigen Eigenschaften zu verbessern, wird eine Leichtbauoptimierung der Baugruppe angestrebt. Dazu wurden die vorgestellten Schritte des Ansatzes zur musterbasierten Entwicklung leichtbauoptimierter Produkte in drei Workshops mit zwei Ingenieuren des beteiligten Unternehmens durchgeführt.

Im ersten 60-minütigen Workshop wurden die bereits im Projekt festgehaltenen Probleme (werkstoffintensive Fertigung, kostenintensive Fertigung, hoher Energieverbrauch) genutzt, um zu verfolgende Leichtbaumotivatoren abzuleiten. Zudem konnten neun änderbare Potenzialkriterien mittels der binären Bewertung identifiziert werden. Mit diesen Informationen wurde die produktspezifische Motivator-Potenzial-Matrix für das Entwicklungsvorhaben erstellt. Im zweiten Workshop wurden innerhalb von 150 Minuten durch Überlagerung der Motivator-Potenzial-Matrix mit der Lösungsmuster-Sammlung insgesamt 17 übereinstimmende Lösungsmuster identifiziert. Hiervon sind 16 für die vorliegende Entwicklung nutzbar, sodass diese in die Lösungsmusterkombination überführt und zugehörige Leichtbau-Produkt-Karten aus der Leichtbau-Produkt-Sammlung extrahiert wurden. Ein Auszug der beschriebenen Ergebnisse ist in **Bild 6** grafisch dargestellt.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

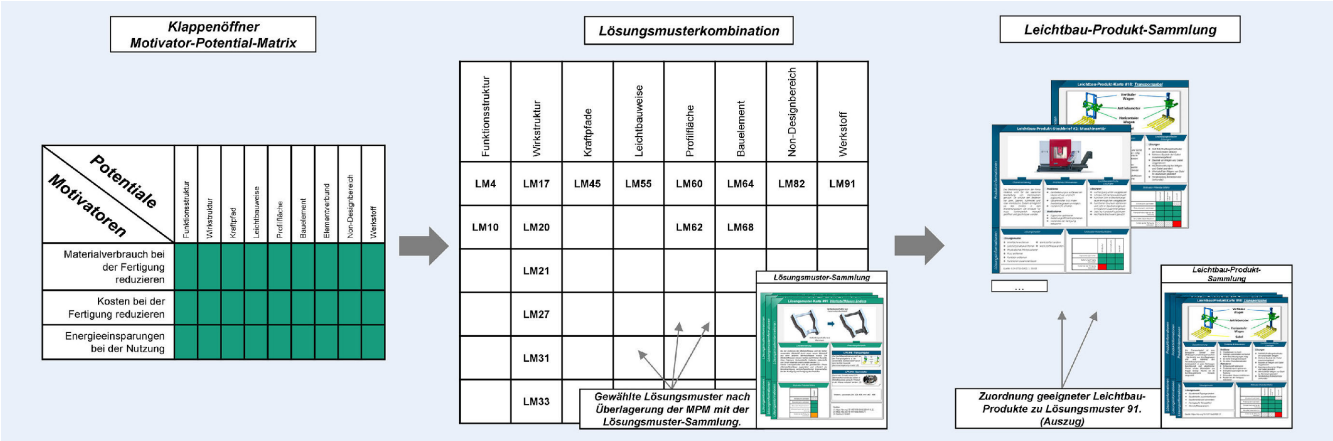


Bild 6. Auszug der Anwendungsergebnisse für den Klappenöffner. *Grafik: Fraunhofer IPA*

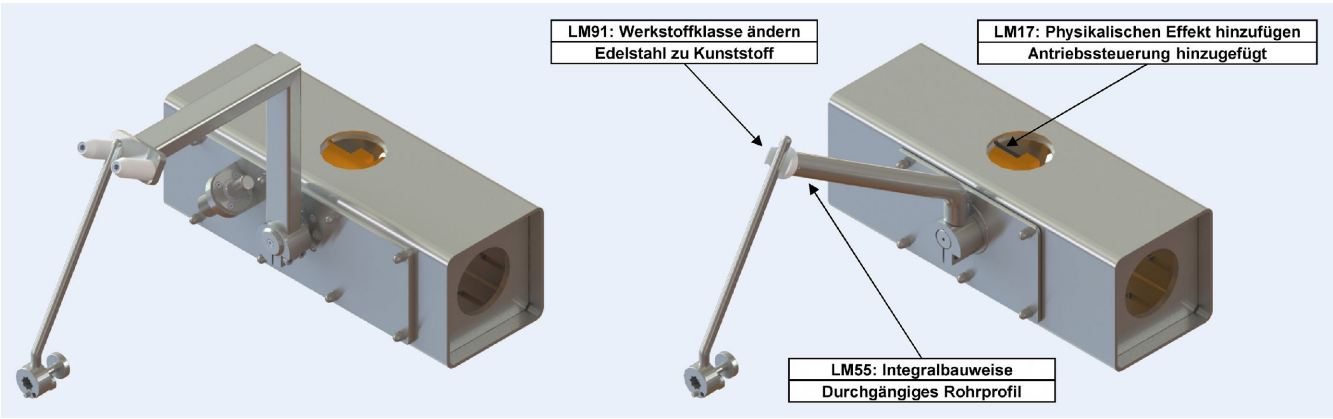


Bild 7. Bisheriges Konzept (links) und leichtbauoptimiertes Konzept (rechts). *Grafik: Fraunhofer IPA*

Durch Nutzung der 16 Lösungsmuster und zugehöriger LPK wurden systematisch, beginnend bei „Funktionsstruktur“ bis hin zu „Werkstoff“, gemeinsam zwei leichtbauoptimierte Konzepte ausgearbeitet. Dabei wurden sowohl direkt vorhandene Lösungsideen aus den Leichtbau-Produkt-Karten übernommen als auch weitere Ideen generiert.

Im abschließenden etwa 60-minütigen Workshop konnten die Leichtbaukonzepte hinsichtlich projekt- und unternehmensinterner Anforderungen bewertet werden. Die bisherige Baugruppe und das gewählte leichtbauoptimierte Konzept sowie die Schnittstelle zu dem Containerhebel sind zusammen mit drei ausgewählten Lösungsmustern in **Bild** 7 dargestellt.

Die Masse der optimierten Bauteile konnte um 33 % reduziert und so die drei verfolgenden Leichtbaumotivatoren positiv beeinflusst werden. Eine genaue Quantifizierung der Leichtbaumotivatoren steht aufgrund des laufenden Projektes noch aus. Zusätzlich wurde mit diesem Ansatz gezeigt, dass kein Leichtbaulösungswissen bei den Anwendenden nötig ist, um leichtbauoptimierte Produkte zu entwickeln. Der Ansatz liefert passgenau Wissen für die Leichtbauproduktentwicklung und trägt so zudem zu einem leichtbauspezifischen Wissensaufbau bei den Anwendenden bei.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit hat gezeigt, dass trotz der Mehrwerte, die eine musterbasierte Entwicklung bietet, eine solche Vorgehensweise für den Leichtbau noch nicht vorhanden ist. Daher wurde ein Ansatz zur musterbasierten Entwicklung von Leichtbauprodukten entwickelt, der leichtbauunerfahrenen Anwendenden ein systematisch auf vorhandenem Lösungswissen basierendes Vorgehen bietet. Die Nutzbarkeit des Ansatzes konnte an einer Baugruppe eines KMUs aus dem Sondermaschinenbau erfolgreich evaluiert werden. Durch die Anwendung des Ansatzes wurde eine Leichtbauoptimierung um 33 % und die Umsetzung von mehreren Leichtbaumotivatoren erreicht. Zudem wurde bei den beteiligten Personen Leichtbauwissen generiert, das in weiteren Projekten genutzt werden kann.

Durch die Anwendung des Ansatzes wurden Optimierungspotenziale identifiziert: Zukünftig wird ein Fokus auf die Erweiterung des Lösungsmuster- und des Leichtbau-Produkt-Katalogs gelegt und Interferenzen zwischen einzelnen Lösungsmustern herausgearbeitet. Es hat sich gezeigt, dass die Menge an potenziell in Frage kommenden Lösungsmustern zu umfangreich für eine subjektive Beurteilung nutzbarer Muster werden kann. Demnach ist ein systematisches Vorgehen nötig, das die Beurteilung beschleunigt. Zudem gibt es für einzelne Lösungsmuster eine Vielzahl an zugehörigen Leichtbau-Produkt-Karten, sodass auch hier die Darstellung der geeignetsten Leichtbauprodukte möglichst systematisch unterstützt werden sollte. Dies und auch der Umfang der erarbeiteten Karten lassen eine digitale Unterstützung des Ansatzes zielführend erscheinen. Dafür sollen die bereits digitalisierten Inhalte des Ansatzes verknüpft und eine automatisierte Anwendung ermöglicht werden.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Außerdem wurde, aufgrund der Konzentration auf die frühen Phasen der Produktentwicklung (Planen, Konzipieren, Entwerfen), die Ausarbeitung beziehungsweise das Fertigen potenzieller Leichtbauprodukte in dem vorgestellten Ansatz nicht berücksichtigt. In weiteren Forschungsaktivitäten könnten Informationen zur Fertigung von Leichtbauprodukten analysiert und ein Vorgehen zur Integration dieser in die gezeigten Karten ausgearbeitet werden. Dies könnte besonders dann Mehrwerte heben, wenn klare Fertigungsrestriktionen vorhanden sind und nur auf spezifische Fertigungsverfahren zurückgegriffen werden kann.

FÖRDERHINWEIS UND DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem „Technologie-Transfer-Programm Leichtbau (TTP LB)" des Ministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Unterstützung der Forschungsarbeit im Projekt „RegemoLe".

Literatur

[1] Die Bundesregierung: Umwelt, Nachhaltigkeit, Rohstoffe. Stand: 2024. Internet: www.foerderinfo.bund.de/foerderinfo/de/foerderung/bund/klima-energie-nachhaltigkeit/umwelt-nachhaltigkeitrohstoffe/umwelt-nachhaltigkeit-rohstoffe_node.html. Zugriff am 26. 09.2024
[2] Cronenberg, B.: Organisationen digital und resilient transformieren. Ein Kompass zur ganzheitlichen Organisationsentwicklung. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2020, doi.org/10.1007/978–3–658–30241–2
[3] Laufer, F.; Roth, D.; Binz, H.: Eine Methodik zur Identifizierung der leichtbaugetriebenen Massenpotentiale für die frühe Konzeptphase. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2021, Stuttgart, 2021, S. 281–292
[4] e-mobil BW GmbH; Fraunhofer IPA; DLR et al.: Leichtbau in Mobilität und Fertigung – Chancen für Baden-Württemberg. Stand: 2012. Internet: elib.dlr.de/76749/1/Leichtbau_in_Mobilit%C3%A4t_und_Fertigung.pdf. Zugriff am 26. 09.2024
[5] Hansmersmann, A.; Birenbaum, C.; Burkhardt, J. et al.: Leichtbau im Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau. Stand: 2016. Internet: www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Leichtbau technologien/IPA_Leichtbaustudie_Leichtbau_im_Maschinenbau.pdf. Zugriff am 26. 09.2024
[6] Blessing, L.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. Dordrecht: Springer-Verlag 2009, doi.org/10.1007/978–1–84882–587–1
[7] Feyerabend, F.: Wertanalyse Gewicht – Methodische Gewichtsreduzierung am Beispiel von Industrierobotern. Dissertation, Universität Paderborn, 1991
[8] Schmidt, W.: Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-Produkte. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2003
[9] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. Berlin: Springer-Verlag 2011
[10] Lüdeke, T. F.: Beitrag zur gewichtsoptimierten Entwicklung mechatronischer Produkte. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2016
[11] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2206: Design methodology for mechatronic systems. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004
[12] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Braunschweig: Springer-Verlag 2000
[13] Posner, B.: Methodik zum leichtbaugerechten Konzipieren. Dissertation, Universität Stuttgart, 2016
[14] Albers, A.; Revfi, S.; Spadinger, M.: Extended Target Weighing Approach – Identification of Lightweight Design Potential for new Product Generations. Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 4: Design Methods and Tools. Vancouver: 2017, p. 367
[15] Albers, A.; Holoch, J.; Revfi, S. et al.: Lightweight design in product development: A conceptual framework for continous support in the development process. Procedia CIRP 100 (2021), pp. 494–499, doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.109
[16] König, K.; Zeidler, S.; Walter, R. et al.: Lightweight creativity methods for idea generation and evaluation in the conceptual phase of lightweight and sustainable design. Procedia CIRP 119 (2023), pp. 1170–1175, doi.org/10.1016/j.procir.2023.05.008
[17] Anacker, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dissertation, Universität Paderborn, 2016
[18] Amshoff, B.: Systematik zur musterbasierten Entwicklung technologieinduzierter Geschäftsmodelle. Dissertation, Universität Paderborn, 2016
[19] Alexander, C.: The Timeless Way of Building. New York: Oxford University Press 1979
[20] Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R. et al.: Design patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing 1995
[21] Cloutier, R.: Applicability of patterns to architecting complex systems. Dissertation, Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey, 2006
[22] Weilkins, T.: Systems Engineering mit SysML/UML – Modellierung, Analyse, Design. Heidelberg: Dpunkt-Verlag 2006
[23] Suhm, A.: Produktmodellierung in wissensbasierten Konstruktionssystemen auf Basis von Lösungsmustern. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993
[24] Lehner, A.-C.: Systematik zur lösungsmusterbasierten Entwicklung von Frugal Innovations. Dissertation, Universität Paderborn, 2016
[25] Altschuller, G.-S.: Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme. Berlin: VEB Technik Verlag 1986
[26] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2727 Blatt 1: Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben; Grundlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991
[27] Salustri, F. A.: Using Pattern Languages in Design Engineering. Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED2005), Melbourne, 2005

Philipp Busch, M.Sc.
philipp.busch@ipa.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-1319
Foto: Autor

Michael Lorenz, M. Eng.

Dipl.-Ing. Philipp Schleicher

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-75 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -