

Modularer Leichtbau – Chancen und Herausforderungen im digitalisierten Entwicklungsprozess

Michael Hanna¹, Johann Schwenke¹, Dieter Krause¹

¹ Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design (PKT), Hamburg University of Technology (TUHH), Germany

Abstract

In this paper the modular lightweight design is introduced as a solution to combine the contrary aspects of modularization and lightweight design. Therefore, the definition and classification of Modular Lightweight Design as well as its challenges and opportunities in application are shown. Because the two different topics are linked a consistent data management is required. Based on a combined product and process model for digital data consistency, a model-based methodical approach for the development of the Modular Lightweight Design is presented. As a demonstration example to explain and to discuss the main aspects of Modular Lightweight Design an aircraft galley is used.

Keywords: Modularization, Lightweight Design, Model-Based Data Management, Aircraft galley

1 Einleitung

Das Anwendungsfeld Luftfahrt ist geprägt durch die gegensätzlichen Ziele nach Gewichtseinsparung und gleichzeitiger hoher Individualisierung. Einerseits soll für den ressourcensparenden Einsatz der Flugzeuge die

Produktstruktur hinsichtlich des Gewichts optimiert werden. Andererseits führen individuelle Kundenwünsche der Airlines dazu, dass die am Markt angebotene Vielfalt an unterschiedlichen Varianten hoch ist. Besonders treten diese Wünsche in der Flugzeugkabine auf, da sich die Airlines hier am meisten den Kunden gegenüber voneinander differenzieren müssen. Eine modulare Produktstruktur führt hierbei zu standardisierten und damit überdimensionierten Schnittstellen, welche insgesamt ein höheres Gewicht aufweisen. [1, 2]

Darüber hinaus ist bei solch einer historisch gewachsenen Produktstruktur variantenreicher Produktfamilien das Datenmanagement häufig ineffizient, da zum einen laufend Veränderungen vorgenommen werden die häufig unzureichend dokumentiert werden und zum anderen die Datenbasis meist dokumentenbasiert vorliegt, womit der Aufwand des Pflegeprozesses hoch ist. Es liegen nur wenige Modelle aktueller Entwicklungsstände vor, was sich besonders in der FE-Modellierung und der Produktstruktur zeigt.

Ein einheitlicher Entwicklungsprozess fehlt. Innerhalb des Konstruktionsprozesses sollen FE-Modelle standardisiert werden, um ihren Berechnungs- und Modellierungsaufwand zu begrenzen. Allerdings liegen durch zahlreiche Produktvarianten unterschiedliche Belastungsfälle und damit zahlreiche FE-Modelle vor, die bei einer weiter wachsenden Anzahl an Varianten noch weiter zunimmt. Dieses führt zu erheblichem Aufwand, da für jede neu entwickelte Variante ein kompletter Entwicklungsprozess durchlaufen werden muss, der meist nicht klar definiert ist. Ein einheitlicher leichtbauoptimierter und modularisierungsgerechter Prozess kann hierbei insbesondere bei der Weiterentwicklung Abhilfe schaffen, besonders wenn dieser durch ein durchgängiges, ganzheitliches und digitalisiertes Datenmanagement unterstützt wird.

Das Ziel dieses Papers ist daher einerseits die Einordnung des modularen Leichtbaues innerhalb des Spannungsfeldes Modularisierung und Leichtbau und seine Herausforderungen und Chancen zu klären, andererseits ein methodisches Vorgehen aufzuzeigen, mit dem der modulare Leichtbau im Entwicklungsprozess umgesetzt werden kann. Dazu wird zu Beginn der Stand der Wissenschaft und Technik erläutert. Anschließend erfolgt die begriffliche Einordnung im Begriffsfeld Leichtbau und Modularisierung. Danach wird ein methodisches Vorgehen basierend auf seine besonderen Randbedingungen aufgezeigt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Um das oben beschriebene Problem zu behandeln, sind die Themen modulare Produktfamilien, ihre methodische Entwicklung, grundlegende Bauweisen, Leichtbau, Auslegung per FEM sowie eine modellbasierte Entwicklung relevant.

Dazu erfolgt in diesem Kapitel die Herleitung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Modularisierung, des Leichtbaus, ihrer bisherigen Verknüpfung sowie des Datenmanagements und der Flugzeugkabinenentwicklung.

2.1 Modularisierung

Modulare Produktstrukturen werden häufig zur Verringerung der internen Varianz bei hoher externer Varianz verwendet [3]. Nach Salvador kann Modularisierung als eine graduelle Eigenschaft verstanden werden, welche durch die fünf graduellen Eigenschaften Entkopplung, Schnittstellenstandardisierung, Kommunalität, Kombinierbarkeit und Funktionsbindung beschrieben werden kann [4]. In der Literatur werden verschiedene Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien vorgestellt [3]. Diese Methoden können in zwei Strategien unterteilt werden: technisch-funktionale Modularisierung und produktstrategische Modularisierung. Der Integrierte PKT-Ansatz kombiniert diese beiden Strategien und beinhaltet zahlreiche Methodenbausteine zur Reduzierung der internen Varianz. Dabei kann eine modulare Produktstruktur Vorteile in allen Lebensphasen erreichen, aber mitunter zu einer Überdimensionierung und durch die standardisierten Schnittstellen einer Gewichtszunahme führen [3].

2.2 Leichtbau

In der Literatur werden bezüglich der Ziele des Leichtbaus zwischen Spar-, Zweck- und Ökoleichtbau unterschieden [5, 6]. Beim Zweckleichtbau erfordert die Realisierung der Funktion eine Gewichtsreduktion, während beim Sparleichtbau eine Kostenreduzierung durch Verringerung des benötigten Materials und beim Ökoleichtbau eine indirekte Kosteneinsparung über Lebenszyklus des Produktes angestrebt wird. Des Weiteren wird der Leichtbau in drei unterschiedliche Strategien unterteilt [5, 7]. Beim Materialleichtbau werden Materialien mit hohen gewichtsspezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten z.B. Faserkunststoffverbunden oder Sandwichstrukturen eingesetzt. Beim Strukturleichtbau hingegen wird das Lastkollektiv durch eine Optimierung der Struktur mit minimalem Eigengewicht erfüllt, während beim Systemleichtbau durch eine Integration weiterer Funktionen in die lastragende Struktur Materialaufwand und Verbindungsstellen reduziert werden. Bei den Bauweisen, die eine Umsetzung der Produktarchitektur darstellen, kann zwischen Integral-, Differential- und Integrierende Bauweisen unterschieden werden [7, 8, 9]. Bei der Integralbauweise wird durch eine Vereinigung von Bauteilen eine Verdichtung der Funktionen bei minimalen Schnittstellen erreicht. Bei der Differentialbauweise werden im Gegensatz Teilfunktionen durch einzelne Bauteile realisiert und über Schnittstellen zu einer Gesamtfunktion zusammengefügt. Die Integrierende Bauweise versucht die Vorteile der Integral- und Differentialbauweise u.a. durch gezielte

Positionierung einzelner Schnittstellen zu vereinen. Diese muss aber von der Modulbauweise, die die Variantenvielfalt sinnvoll abbildet, unterschieden werden, bei der Produkte in Module gegliedert sind, die im inneren enge Beziehungen aufweisen, während die Module stark entkoppelt sind [3].

2.3 Modularisierung in Kombination mit Leichtbau

Um den Gegensatz von Leichtbau und Modularisierung zu lösen, wurde bisher der Modulleichtbau als ein erster Ansatz vorgeschlagen. Gumpinger entwickelte dazu ein methodisches Vorgehen aus vier Phasen. Dazu wird zuerst ein Systemmodell erstellt, eine Modulaufteilung überarbeitet, eine Anpassung der Moduldimensionierung vorgenommen und erst anschließend modulspezifische Leichtbaumaßnahmen abgeleitet [1]. Haldenwanger bezieht den Modulleichtbau auf den Automobilbereich und zeigt auf, dass durch die Funktionsintegration auf Modulebene Synergien zur Kostensenkung und Gewichtsreduktion erzielt werden können [10]. Schmidt beschreibt die Vorteile bei modularen Leichtbauprodukten, dass dort ganze Module, die vom Zulieferer bestellt werden, leichtbauoptimiert werden können [11].

2.4 Grundlagen in der Flugzeugkabinenentwicklung

Kabinenkomponentenhersteller müssen eine hohe Variantenvielfalt anbieten, um die Nachfrage der Airlines nach individuellen Kabinenmonumenten nachkommen zu können. Insbesondere bei Galleys und Lavatories ist der Individualisierungsgrad hoch. Dadurch wird ein flexibler Produktionsprozess und eine variantenberücksichtigende Produktentwicklung nötig, womit mit einer Standardisierung an Komponenten und Prozessen begegnet werden kann, wenn sie überdimensioniert sind und damit schwerer werden. Andererseits wird aus ökonomischen und ökologischen Gründen versucht, über eine Gewichtseinsparung Treibstoff zu sparen. Um leichte Kabinenmonumente anbieten zu können, werden ihre Komponenten in Sandwichbauweise gefertigt. [12]

2.5 Grundlagen des modellbasierten Datenmanagements

Durch die modellbasierte Produktentwicklung kann anstelle des dokumentenbasierten Vorgehens durch die Verwendung durchgängiger Produktmodelle die Konsistenz erhöht werden. Nach Alt kann ein Modell als abstrakte Beschreibung der Realität verstanden werden [13]. Eigner unterscheidet dabei zwischen Produkt- Prozess und Konfigurationsmodellen [14]. Dabei beinhalten die Produktmodelle alle relevanten Informationen eines Produktes. Prozessmodelle werden als Abbildungen von technischen oder organisatorischen Geschäftsprozessen verstanden. Das methodische Gerüst der Kombination aus beiden wird

als Konfigurationsmodell verstanden. Petzold beschreibt, dass Prozessmodell und eines Produktdatenmodell verwendet und konsequent miteinander gekoppelt werden sollten, wobei Workflow-Ansätze zur Dokumentation und Kommunikation verwendet werden können [15]. Allerdings wird die Verwendung des Workflow-Ansatzes für die Produktentwicklung als unzureichend angesehen, da die Produktdaten und der Prozess eng miteinander verknüpft und dynamisch sind. Ein Datenmodell zur konsistenten und durchgängigen Verwendung der Daten bei der methodischen Entwicklung modularer Produktfamilien wurden schon entwickelt [16] und auf eine Produktstruktur angewendet [17], um modellbasiert eine modulare Produktstruktur zu entwickeln.

3 Definition des Modularen Leichtbaus

Die im Stand der Wissenschaft und Technik erklärte Beschreibung des Modulleichtbaus reicht nicht aus, um gleichzeitig eine modulare und leichtbaugerechte Bauweise zu entwickeln. Der beschriebene Modulleichtbau hat nicht das Ziel, das Datenmanagement im Entwicklungsprozess zu modellieren und standardisieren [1]. Besonders bei historisch gewachsenen Produktstrukturen mit unzureichend dokumentierter Datenlage ist der Modulleichtbau nicht ausreichend, da dort nicht das Datenmanagement unterschiedlicher Daten begegnet wird, wie sie einerseits durch methodische Werkzeuge der methodischen Produktentwicklung und andererseits Daten der Leichtbauoptimierung vorliegen. Deswegen wird an dieser Stelle der Modulare Leichtbau eingeführt. In Bild 1 ist der Bereich zwischen Modularisierung und Leichtbau aufgezeigt und die verwendeten Begriffe eingeordnet.



Bild 1: Einordnung des Modularen Leichtbaus

Zwischen der Entwicklung modularer Produktfamilien und der Leichtbau kann sich ein Bereich finden, der hier als Modularer Leichtbau bezeichnet wird, weswegen der Modulare Leichtbau graduell ist. Andererseits kann er an sich als graduell angesehen werden, vergleichbar mit der Definition zur Modularisierung. Bei Produktfamilien kann einerseits der Grad an Modularen Leichtbau stärker oder aber auch schwächer ausgeprägt sein. Die Leichtbaumodularisierung ist als Teilbereich des Modularen Leichtbaus näher am Leichtbau angelehnt, da die Basis der Modularisierung eine Leichtbauoptimierung ist und dort die Modularisierung noch nicht berücksichtigt wird. Der Modulleichtbau hingegen berücksichtigt im starken Umfang die Modularisierung, nimmt aber auf die

leichtbauspezifischen Randbedingungen erst im Nachgang Rücksicht, weswegen er hier als Teil des Modularen Leichtbaus mit starker Orientierung an der Modularisierung angesehen wird. Einerseits kann er einen höheren Grad an Modularisierung oder einen höheren Grad an Leichtbau besitzen.

In Bild 2 werden Vorgehensweisen für die drei oben definierten Begriffe zur Entwicklung modularer und leichtbaugerechter Bauweisen vorgestellt.

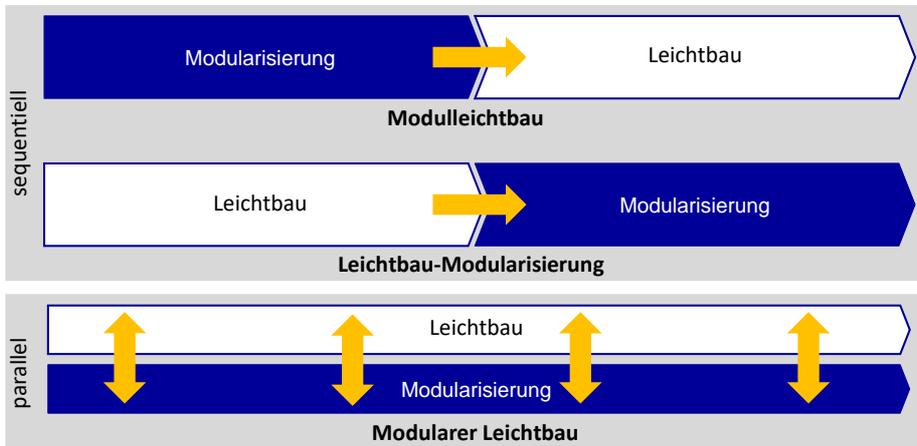


Bild 2: Vorgehensweisen beim Entwickeln modularer und leichtbaugerechter Bauweisen

Das Vorgehen des Modulleichtbaus zeichnet sich dadurch aus, dass dort erst eine Modularisierung der Produktstruktur (blau hinterlegt) und anschließend eine Leichtbauoptimierung (weiß hinterlegt) vorgenommen wird. Eine Leichtbau-Modularisierung hingegen kann so verstanden werden, dass basierend auf einer leichtbauoptimierten Produktstruktur (weiß hinterlegt) die Entwicklung einer Modularen Produktfamilie (blau hinterlegt) erfolgt. Der Datenaustausch erfolgt in beiden Vorgehensweisen nur sequentiell (oranjer Pfeil). Im Gegensatz zu diesen beiden Formen des Modularen Leichtbaus, in der einer der beiden Bereiche fokussiert wird, werden bei der parallelen Form die Aspekte Modularisierung und Leichtbauoptimierung nicht hintereinander, sondern zeitgleich betrachtet. Dadurch ist ein durchgängiger und kontinuierlicher Datenaustausch über den gesamten Produktentwicklungsprozess hinweg möglich (orange Pfeile), im Gegensatz zur einmaligen Übergabe der Daten beim sequentiellen Vorgehen.

4 Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des modularen Leichtbaus

In diesem Kapitel wird die methodische Vorgehensweise des Entwicklungsprozesses des modularen Leichtbaus erläutert. Dabei wird insbesondere auf die von Produkt- und Prozessdaten Rücksicht genommen.

4.1 Herausforderungen für ein methodisches Vorgehen bei der Entwicklung des Modularer Leichtbaus

In Kapitel 3 wurde aufgezeigt, dass der modulare Leichtbau sich dadurch auszeichnet, dass die Modularisierung und der Leichtbau gleichzeitig und nicht nacheinander berücksichtigt werden sollen. Dazu ist ein Vorgehen nötig, das beiden Sichtweisen gerecht wird und sie geschickt kombiniert. Allerdings besteht die besondere Herausforderung darin, dass in beiden Bereichen unterschiedliche Daten verwendet werden. Um den divergierenden Anforderungen beider Bereiche Genüge zu tun, muss für eine optimale modulare Leichtbaustrategie ein umfassendes Anforderungsmanagement vorgenommen werden, bei dem alle relevanten Anforderungen aufgenommen, analysiert und in Bezug zur entwickelten Produktstruktur gesetzt werden sollte. Die methodische Produktentwicklung sollte von den Kundenanforderungen ausgehen, um die modulare Produktstruktur an die varianten kundenrelevanten Produkteigenschaften auszurichten [3]. Hinsichtlich des Leichtbaus sollte die Produktentwicklung vom benötigten Auslegungsprozess ausgehen. Beispielsweise die verwendeten Finite Elemente Modelle und die durchgeführten Tests sind hierbei für die Gewinnung der Daten zu berücksichtigen. Implizites Wissen sollte vollständig dokumentiert und gemeinsam mit explizitem Wissen vernetzt werden, um das Datenmanagement zu unterstützen. Da durch die gleichzeitige Entwicklung und Änderung von Produktstrukturkonzepten für Modulbauweise und Leichtbauweise die Produktdaten dynamisch sind, sollte nach *Petzold* (siehe Abschnitt 2.2) ein konsistentes Produktdatenmodell verwendet werden, welches mit dem Prozessmodell verknüpft ist. Die vorhandenen methodischen Vorgehen im Bereich Modularisierung und Leichtbau fokussieren allerdings nur die Prozessmodellierung. Deswegen erfordert ein methodisches Vorgehen zur modularen Leichtbauweise ein durchgängiges Prozessmodell mit einem vernetzten Produktdatenmodell. Eine digitale Umsetzung kann hierbei als Unterstützung dienen.

4.2 Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Modulare Leichtbaus

Das methodische Vorgehen zum Modulare Leichtbau kann sich in 6 Schritte einteilen lassen und stellt ein generisches Prozessmodell dar. In diesem werden einerseits die Produktdatenmodelle durchgängig untereinander integriert verknüpft und andererseits mittels eines konkreten Prozessmodells des Anwendungsfalls vernetzt (siehe Bild 3).

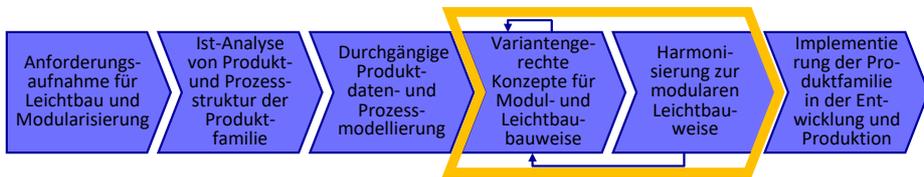


Bild 3: Methodisches Vorgehen des Modulare Leichtbaus

Im ersten Schritt erfolgt die detaillierte Anforderungsaufnahme, um die Anforderung aller relevanten Stakeholder zu berücksichtigen. Dabei müssen die spezifischen Anforderungen aus Leichtbau- und Modularisierungssicht ermittelt und analysiert werden. So sind aus der variantengerechten Produktgestaltung die varianten kundenrelevanten Eigenschaften und deren Ausprägungen wesentlich, die beispielsweise mit einem Vielfaltsbaum ermittelt und visualisiert werden können. Aus Leichtbauoptimierungsgesichtspunkten sind Gewichtsbeeinflussende Anforderungen entscheidend. Dazu zählen beispielsweise die auf die Struktur wirkenden auslegungsrelevanten Lasten, die verwendeten Materialien und deren mechanischen Eigenschaften sowie die Position und Anzahl der Lasteinleitungspunkte.

Für den zweiten Schritt, die Analyse des Ist-Standes der Produktstruktur, werden Konstruktionsdaten wie CAD-Modelle berücksichtigt, sowie bei Verwendung des Integrierten PKT Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien der Module Interface Graph, in dem alle Komponenten der Produktfamilie, die Art ihrer Varianz, ihre Lage sowie ihre verbindenden Flüsse gekennzeichnet sind. Hinsichtlich des Leichtbaus werden vorhandene Auslegungsprozesse und vorhandene Daten, beispielsweise aus FE-Modellen, analysiert.

Die gesammelten Daten und Dokumente werden anschließend in einem durchgängigen Datenmodell umgesetzt. Dadurch wird ein konsistentes Datenmanagement für den Anwendungsfall ermöglicht, in dem die vorhandenen Modelle der unterschiedlichen Bereiche verknüpft werden. Auf dieser Grundlage

kann ein konkretes Prozessmodell des Anwendungsfalls mit der Vernetzung des Produktmodells erstellt werden.

Auf dieser Basis wird mit der Entwicklung der Produktstruktur begonnen, wobei Konzepte für Modul- und Leichtbaubauweise iterativ erarbeitet werden. Im Sinne der modularen Produktstrukturierung werden einerseits Konzepte für eine Modulbauweise, andererseits für eine Leichtbauweise entwickelt. Innerhalb des in Schritt 3 erstellten konkreten Produktdatenmodells werden die in beiden Bereichen entwickelten Konzepte modelliert und vorhandene Daten adaptiert. Die modulare Produktfamiliengestaltung sollte hierbei neben technisch-funktionalen auch produktstrategische Aspekte berücksichtigen, um die Vorteile aller Lebensphasen zu berücksichtigen. Beispielsweise sind in der Lebensphase Produktion zahlreiche Modultreiber vorhanden, die in der modularen Produktstruktur berücksichtigt werden sollten.

Anschließend erfolgt die Harmonisierung zur modularen Leichtbauweise, in dem das Modul- und das Leichtbaukonzept zusammengeführt werden. Im iterativen Vorgehen werden die Konzepte angeglichen, um eine optimale Gradualität zwischen Modularisierung und Leichtbau zu erreichen. In der modularen Leichtbauweise können beispielsweise einzelne Module in unterschiedlichen Leichtbauweisen ausgeführt sein, was zu einer hybriden Bauweise führt. Das daraus resultierende Konzept wird im Produktdatenmodell wieder in die Modularisierung und Leichtbau konsistent eingepflegt. Der vierte und fünfte Schritt (in Bild 3 orange umrandet) sind die Kernschritte des modularen Leichtbaus. In ihnen erfolgt durch die Datenvernetzung der konsistente Datenaustausch der parallel entwickelten Produktstrukturen und deren Harmonisierung.

Abschließend wird die Produktfamilie in der Entwicklung und Produktion implementiert. Dazu soll das Entwicklungsvorgehen die Pflege und Weiterentwicklung der Produktfamilie ermöglichen. Die Anwendung der modularen Leichtbauweise auf weitere Produktfamilien innerhalb des Produktprogramms kann durch das vorhandene durchgängige Datenmanagement des modularen Leichtbaus über die Schritte des methodischen Vorgehens einfach adaptiert werden, da die aufgenommenen Daten zu den Anforderungen, der Produkt- und Prozessstruktur, der Konzepte sowie des harmonisierten modularen Leichtbauweise konsistent übernommen und angepasst werden kann.

5 Modularer Leichtbau in der Flugzeugkabinenentwicklung

In der Flugzeugkabinenentwicklung kann der modulare Leichtbau die beiden dort wesentlichen Ziele leichteres Gewicht und variantengerechte Produktstruktur ermöglichen. So wird in dem Luftfahrtforschungsprojekt MICHEL

(Multifunktionales Leichtbaudesign für variabel konfigurierbare Monumente) erstmalig eine Modulare Leichtbauweise entwickelt.

Dazu werden zu Beginn die Anforderungen aller Stakeholder (Airline, Passagier, Kunden, etc.) und spezielle Anforderungen hinsichtlich der Modularisierung (z.B. die Ausstattung der Galley) und dem Leichtbau (z.B. Anbindungspunkte ans Flugzeug) aufgenommen. Ebenfalls wird die interne Vielfalt auf Produktstrukturebene sowie die Prozesskomplexität wird aufgenommen und analysiert und in ein Produkt- und Prozessmodell im Sinne des Modulare Leichtbaus implementiert. Anschließend werden verschiedene Konzepte für variantengerechte Modul- und lastpfadoptimierte Leichtbauweisen entwickelt und anhand von luftfahrtspezifischen Kriterien (z.B. Zulassungsfähigkeit) bewertet. Auf dieser Grundlage erfolgt die Harmonisierung zu einem Modulare Leichtbaukonzeptes. In Bild 4 sind Produktstrukturkonzepte für das Beispiel einer Flugzeuggalley dargestellt.

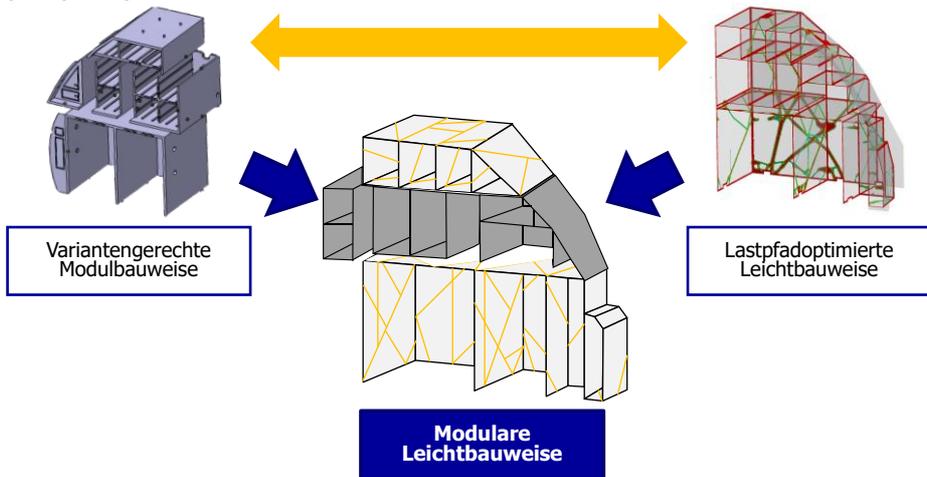


Bild 4: Konzept einer Modulare Leichtbauweise auf Produktstrukturebene

Auf der linken Seite ist die variantengerechte Modulbauweise der Produktfamilie gezeigt, während auf der rechten Seite eine Produktstruktur für eine lastpfadoptimierte Leichtbauweise abgebildet ist. Durch die parallele Entwicklung und den konsistenten Datenaustausch (orangener Pfeil) werden die beiden Sichten in der Mitte in eine Modulare Leichtbauweise zusammengeführt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der modulare Leichtbau zeichnet sich dadurch aus, dass Modularisierung und Leichtbau gleichzeitig zur Erstellung einer neuen Bauweise berücksichtigt

werden können. Im Gegensatz zum Modulleichtbau, bei dem zunächst modularisiert und anschließend Leichtbau betrieben wird, werden die Bereiche gleichzeitig betrachtet, zusätzlich die Prozessstruktur berücksichtigt und das Datenmanagement durch die Implementierung durchgängiger Produkt- und Prozessmodelle verbessert.

Potenziale des modularen Leichtbaus sind die Möglichkeit eine hohe externe Vielfalt einer Produktfamilie anzubieten bei gleichzeitiger Ausreizung des Leichtbaupotentials. Durch standardisierte Prozesse und das durchgängige Datenmanagement, kann somit die Entwicklung neuer Varianten beschleunigt, die Anzahl an Fehlern reduziert und ein Innovationsprozess einfacher implementiert werden. Damit ist der modulare Leichtbau insbesondere für die Luftfahrt geeignet. Allerdings bestehen die besonderen Herausforderungen, dass die Anforderungen klar definiert sein und eine explizite Dokumentation der Produkt- und Prozessstruktur vorliegen müssen.

Zukünftig sollte der modulare Leichtbau weiter ausgearbeitet und angewendet werden, um weitere Verknüpfung von methodischen und strukturanalytischen Aspekten zu modellieren. Dazu können die Ergebnisse des MICHEL Projektes den Modularen Leichtbau insbesondere des methodischen Vorgehens weiter zu detaillieren. Eine Vernetzung mit dem Produktionsprozess und der Kostenstruktur erscheint hier ebenfalls sinnvoll.

Literatur

- [1] Gumpinger, T.: „Modulleichtbau - Methodische Unterstützung des Leichtbaus modularer Produktfamilien“, Dissertation TUHH, 2015.
- [2] Krause, D. et al.: “New Trends in the Design Methodology of Modularization”, 11th IDE Workshop, 5. – 7. April 2017, Magdeburg.
- [3] Krause, D.; Gebhardt, N.: „Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien“, Springer-Verlag, Berlin, 2018
- [4] Salvador F.; „Towards a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization“, in: IEEE Transactions on Engineering Management, 2007, 54; S. 219-240.
- [5] Krause, D. et al.: Leichtbau. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): „Handbuch Konstruktion“, Carl Hanser Verlag, München, 2018, S. 487-507.

-
- [6] Wiedemann, J.: „Leichtbau. Elemente und Konstruktion“, Springer Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2007.
- [7] Klein, B.: „Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung“, Springer Vieweg, Wiesbaden, 10. Auflage, 2013.
- [8] Pahl, G., Beitz, K., Feldhusen, J., Grote, K.-H.: „Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen“, Springer Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2007.
- [9] Ehrlenspiel, K., Meerkamm, H.: „Integrierte Produktentwicklung. Denkbahnen, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit“, Carl Hanser Verlag, München, 6. Auflage, 2017.
- [10] Haldenwanger, H.-G.: „Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von PKW-Rohkarosserien“. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 1997.
- [11] Schmidt, W.: „Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-Produkte“. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen. VDI Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [12] Krause, D.; Jonas, H.; Gumpinger, T.; Rasmussen, O.: „Modularisierungs- und Leichtbaustrategien für optimierte Kabinenkomponenten zukünftiger Flugzeuggenerationen“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010 - DLRK2010, Hamburg, 2010.
- [13] Alt, O.: „Modellbasierte Systementwicklung in SysML“, Hanser, München, 2012.
- [14] Eigner, M., Roubanov, D., Zafirov R.: „Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung“ Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2014.
- [15] Paetzold, K.: „Workflow-Systeme im Produktentwicklungsprozess“ Design for X, Beiträge zum 15. DfX-Symposium, Neukirchen, 2004.
- [16] Hanna, M.; Schwede, L.-N.; Krause, D.: „Model-Based Consistency for Design for Variety and Modularization“, 20th International DSM Conference, DSM 2018, Trieste, 2018, S. 239-248.
- [17] Hanna, M.; Krause, D.: „Modellbasierte Unterstützung der Entwicklung modularer Produktfamilien“. Design for X, Beiträge zum 29. DfX-Symposium, Tutzing, 2018.