

BETRACHTUNGEN ZUR KONZEPTPHASE IM KONSTRUKTIONSPROZESS VON LEICHTBAUTEILEN

Winfried Schmidt, Werner Puri

Zusammenfassung

In der Flugzeugtechnik und der Automobilindustrie spielt Leichtbau bereits eine wichtige Rolle und ist ein wesentlicher Innovationstreiber u.a. in der Motorentwicklung. In anderen Bereichen, wie der Medizintechnik hält der Leichtbau aber nur begrenzt Einzug. Die Gründe für dieses schwere und langsame Durchdringen sind mannigfaltig. Kosten beispielsweise sind nicht oder nur schwer schätzbar. Insbesondere das Fehlen von Know-how entlang des gesamten Produktlebenszyklus und so auch speziell in der Planung und Konzeption, welche in diesem Beitrag aus Sicht der Konstruktionsmethodik näher betrachtet werden sollen ist ein weiterer Grund.

1 Aufgabenstellung

Leichtbau ist zur Zeit meistens eine Optimierungsaufgabe, d.h. ein bestehendes Produkt oder Bauteil ist aus ökonomischen, funktionellen oder ökologischen Gründen leichter zu gestalten. Des Weiteren kann behauptet werden, dass Leichtbau fast ausschließlich auf Bauteil- wenn nicht Bauelementebene betrieben wird. Einzelbauteile wie z.B. Träger, Pleuel, Motor- oder Getriebegehäuse usw. werden unter Anwendung einer in den späten Phasen des Konstruktionsprozesses greifenden Leichtbaustrategie [Symp2000] modifiziert. Doch bei genauerer Betrachtung wird festgestellt, dass die Anwendung einer dieser „einfachen“ Strategien z.B. Werkstoffsubstitution nur selten zum 100% Erreichen des gewünschten Zieles führt.

Im Wege einer durchgängigen konstruktionsprozessumspannenden Leichtbau-Produktentwicklung stehen mehrere Hemmnisse wie in nachfolgender Liste zusammengetragen:

1. Konstruktionsregeln (z.B. für neue Werkstoffgruppen) fehlen
2. Neue Fertigungstechnologien sind erforderlich z.B. Innenhochdruckumformen von Rohren
3. Kosten- und zeitintensive Versuche bzw. die Erstellung von Prototypen sind trotz Simulationstechniken erforderlich
4. Weiterentwickelte Verbindungstechnologien sind erforderlich wie z.B. das Löten von Aluminium für Wärmetauscher und Autokühler komplett aus Aluminium [6]
5. Reine Werkstoffsubstitution ist oft nicht möglich bzw. hat nur eingeschränktes Potential zur Gewichtsreduktion wie z.B. der Werkstoffwechsel bei Schmiede- oder Gussteilen von Stahl auf Aluminium

6. Oftmals erhöhte Kosten (z.B. für Entwicklung, Werkstoff, Fertigung, Recycling usw.) müssen durch deutliche Vorteile und Verbesserungen am Produkt gerechtfertigt werden wie z.B. das verbesserte Crashverhalten des Aluminium Space Frame

Die erfolgreiche Entwicklung von Leichtbauteilen und –produkten muss i.d.R. deutlich mehr beinhalten als den Einsatz von einzelnen Strategien. Eine punktuelle bauteilzentrierte Strukturoptimierung oder eine Werkstoffsubstitution sind des weiteren eher bei Änderungs- oder Anpassungskonstruktionen erfolgsversprechend. Bei Neuentwicklungen muss eine allgemeinere umfassende Vorgehensweise verfolgt werden. Diese muss dem Entwickler ermöglichen, im Rahmen einer systematischen und methodischen Konstruktion zielgerichtet zu einer optimalen Leichtbaulösung zu gelangen.

Dazu soll in diesem Beitrag die Frage gestellt werden, an welcher Stelle im Konstruktionsprozess denn eigentlich die Weichen für Leichtbau gestellt werden bzw. wo überhaupt Leichtbau in der Konstruktionsmethodik speziell zu Tage tritt und welche Rolle dabei die Leichtbaustrategien spielen. In diesem Rahmen werden sich die Betrachtungen insbesondere auf die beiden frühen Phasen des Planens und Konzipierens und auf den Übergang zwischen diesen Phasen konzentrieren.

2 Leichtbau und Planungsphase

Die Rolle des Leichtbaus im Entwicklungsprozess eines Produktes wird schon in der Planungsphase während des Klärens und Präzisierens der Aufgabenstellung, des Formulierens der Hauptaufgabe und der Generierung der Anforderungsliste (Summe sämtlicher Anforderungen) festgelegt. Durch die quantitative Beschreibung der Anforderungen z.B. Gewicht kleiner als 10 kg [Roth] und die Festlegung möglicher Gewichtungsfaktoren werden die Weichen für den Einsatz von Leichtbaustrategien gesetzt. Hier sei auch erwähnt, das bereits in den 5 Grundprinzipien von Kesselring der Leichtbau in Form des „Prinzips vom minimalem Gewicht“ auftaucht [1]. Grundsatz des Leichtbaus ist die Reduktion von Gewicht. Roth führt in der „Suchmatrix zum Klären der Aufgabe, zur Analyse der Produktlebenslaufphasen, zur Informationsgewinnung für das Formulieren einer präzisen Aufgabenstellung und das Aufstellen der Anforderungsliste“ den Begriff „Gewicht“ nur 3 mal explizit auf.

Eigenschaften und Bedingungen / / Lebenslaufphase	Technisch - physikalische	Menschbezogene physisch psychisch	Wirtschaftliche Kosten:	Normative
Herstellung		Montage: Gewicht		
Verteilung	<i>Lagerung:</i> Gewicht	<i>Transport:</i> Gewichte,		
Verwendung				
Rückführung				

Tabelle 1: Gewicht in „Suchmatrix zum Klären der Aufgabe“ [5], Auszug

Dennoch werden Hinweise für den möglichen Einsatz von Leichtbau implizit genannt:

- Herstellung: Materialkosten, Berücksichtigung von Trends und politischen Entwicklungen
- Verteilung: Ergonomische Vorzüge, Firmenimage, erzielbare Verkaufserlöse, Werbeaufwand, Transportkosten

- Verwendung: Funktion, Wirkungsgrad, Rücksicht auf Nachbarsysteme, Betriebsbedingte Belastungen, Wartung, Kraft bei Reparaturen, Leistungen von Konkurrenzprodukten
- Recycling: Allgemein gestiegenes Umweltbewusstsein.

Wie bei Roth [5] steht auch bei Pahl/Beitz [1] am Ende der Planungsphase die Anforderungsliste mit Hauptmerkmalen. Betrachtet man die zugehörigen Ausprägungen dieser Hauptmerkmale, so können bereits hier, obwohl das Gewicht auch hier explizit nur selten aufgeführt wird, zahlreiche Zusammenhänge bzw. Einflüsse bezüglich Leichtbau und Strategien festgestellt werden.

Hauptmerkmal	Beispiele	Leichtbau
Geometrie	Größe, Höhe, Breite, Länge, Anordnung, Anschluss...	Schnittstellen von Teilstrukturen wichtig für Steifigkeit, Bauraum für Baustruktur (Hohlstruktur) → Form-, Konzeptleichtbau
Kinematik	Bewegungsart, -richtung, Geschwindigkeit, Beschleunigung	→ Bedingungsleichtbau
Kräfte	Kraftgröße, -richtung, Gewicht, Last, Verformung, Steifigkeit, Federeigenschaften, Stabilität, Resonanzen	→ Bedingungsleichtbau
Energie	Leistung, Wirkungsgrad, Verlust, allg. Zustandsgrößen Anschlussenergie, Arbeitsaufnahme	→ allg. Leichtbau
Stoff	Physikalische und chemische Eigenschaften des Eingangs- und Ausgangsprodukts, vorgeschriebene Werkstoffe (Nahrungsmittelgesetz u.ä.)	→ Stoffleichtbau (z.B. in der Medizintechnik)
Ergonomie	Bedienung, Bedienungsart, Übersichtlichkeit, Beleuchtung, Formgestaltung	→ Formleichtbau
Transport	Begrenzung durch Hebezeuge, Bahnprofil, Transportwege nach Größe und Gewicht, Versandart und –bedingungen	Leistungssteigerungen durch Leichtbau

Tabelle 2: Hauptmerkmale in der Anforderungsliste nach [1], Auszug

Denkt man beispielsweise an die Geometrie, so wird durch die Festlegung/Einteilung des Bauraums oder der Schnittstellen schon Einfluss auf die Möglichkeiten des Leichtbau genommen, mit denen eine optimale Gesamtlösung nicht zu erreichen ist. Der Einsatz von Formleichtbau [2] als eine sehr geometriebasierte Strategie und der dadurch erzielbaren Ergebnisse können beispielsweise sehr davon betroffen sein.

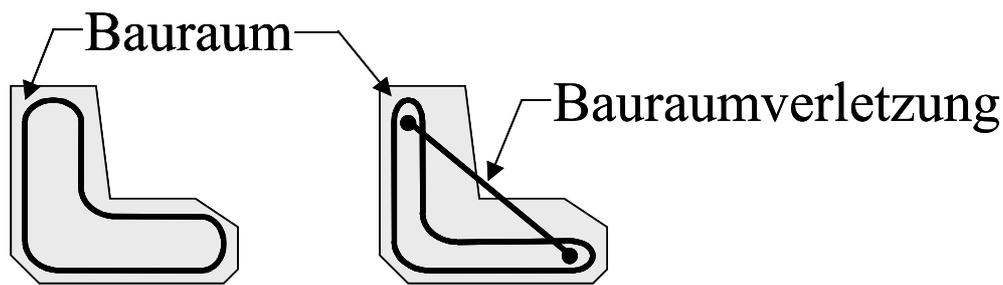


Bild 1: Bauraum - Formleichtbau

Als weiteres Beispiel seien hier die Kinematik und die Kräfte herausgegriffen. Zur Auslegung von Fahrwerksteilen sind genaue Belastungsverläufe enorm wichtig für eine sichere und zugleich optimale Auslegung. (siehe Beispiel Nutzfahrzeug: unterer Querlenker, bei dem durch genauere Kenntnisse der Kräfte und Simulation 20% des Gewichtes eingespart werden konnten). Von diesen Anforderungen ist offensichtlich der Bedingungsleichtbau [2] massiv betroffen.

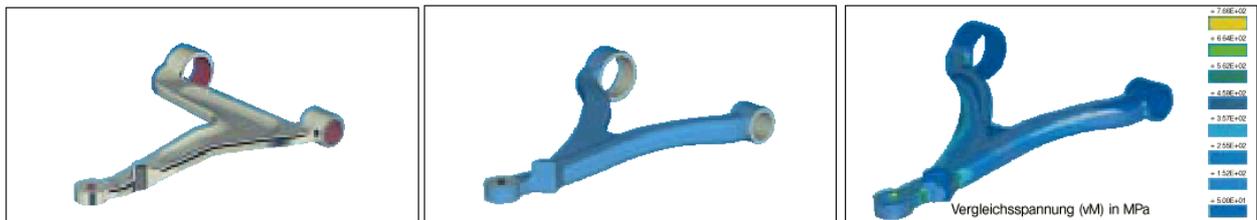


Bild 2: Unterer Querlenker eines Nutzfahrzeugs [4]

Bei anderen Hauptmerkmalen aus der Anforderungsliste sind derlei Zusammenhänge nur schwieriger herauszufiltern. In wie weit ist beispielsweise Leichtbau von der Instandhaltung betroffen? Denkt man an die Einführung des Space Frame, so war dieser Bereich ein wichtiger Punkt in der Diskussion, denn das Schweißen von Aluminium forderte ganz andere Bedingungen von den Werkstätten als das Schweißen von Stahlblechen. Denkt man nun an ein Produkt mit Sandwich beispielsweise, so sind hier wiederum andere Kontroll-, Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich.

An diesen ausgesuchten wenigen Beispielen wird deutlich, dass bereits bei den Anforderungen massiv Einfluss auf die späteren Möglichkeiten des Leichtbau genommen wird bzw. u.U. sehr große und eventuell unnötige Einschränkungen gemacht werden können. In den Hauptmerkmalen taucht also Leichtbau i.d.R. nur implizit auf, es wird jedoch durch die Anforderungen gegebenenfalls stark auf die späteren Möglichkeiten und damit auf das Leichtbaupotential Einfluss genommen.

Im Leichtbau findet immer eine mehr oder minder intensiv betriebene Optimierung statt. Eine solche Optimierung wiederum macht nur dann Sinn, wenn die Grenzen dafür genau bekannt bzw. bestimmt sind. Dies ist ein weiteres Grundproblem, für das bereits in den Anforderungen die Basis gelegt wird, indem diese Grenzen zuverlässig quantitativ bestimmt werden.

Daraus leiten sich je nach Bedeutung des Leichtbaus folgende Punkte als Hilfestellung bereits für das Erstellen der Anforderungsliste in der Planungsphase ab:

1. Ist Leichtbau mit die Hauptaufgabe für die Entwicklung, sollte dies auch ein Hauptmerkmal in der Anforderungsliste sein.

2. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die oben beispielhaft dargestellten Einflüsse und Zusammenhänge deutlich hervorzuheben oder in einer separaten verfeinerten Anforderungsliste zusammenzutragen.
3. Wenn Leichtbau nicht als ein eigenes Hauptmerkmal ergänzt wird, jedoch von Bedeutung für das Produkt oder Bauteil ist, dann sollte dem zumindest bei der Verfeinerung der Anforderungen Rechnung getragen werden.
4. Quantifizierung der qualitativen Festforderungen (z.B. tragbar) sind so früh und genau als möglich als qualitative Zielforderungen (z.B. Eigenmasse kleiner 10 kg) auszuarbeiten und in die Anforderungsliste aufzunehmen.

3 Leichtbau und Konzeptphase

Nach der Planungsphase wird nun die Konzeptphase näher betrachtet. Hier sind nach [1] 8 Teilschritte unterschieden. Klein [3], der sich in der prinzipiellen Vorgehensweise auch an der Konstruktionsmethodik orientiert, spricht von Elementen bzw. wesentlichen Inhalten beim Konzipieren und zählt deren 8 auf. Hier soll es darum gehen, Einflüsse hinsichtlich Leichtbau herauszufiltern und darzustellen und weniger um die Ausarbeitung von Unterschieden der beiden Sichtweisen. Für die nachfolgenden Betrachtungen sind die Teilschritte bzw. Inhalte von Klein herangezogen.

Beide sprechen beim ersten Teilschritt von der **Abstraktion auf die Kernprobleme**. *Leichtbau* kann dabei sicherlich eines der Kernprobleme oder sogar das Kernproblem v.a. bei einem Bauteil oder einer Baugruppe selbst sein. Hierbei kann bereits festgestellt werden, in welche der drei Leichtbauarten die Entwicklungsaufgabe fällt. Damit erfolgt eine erste Priorisierung hinsichtlich Kosten, Funktion, Wirtschaftlichkeit und Ökologie. Im Leichtbau wird im allgemeinen durch die alleinige Reduktion des Gewichtes keine oder nur kleine Kostenverbesserungen erreicht. Nur durch die gleichzeitige Betrachtung der Probleme und integrierte Lösung weiterer Schwachpunkte einer Konstruktion sowie den Einsatz von mehreren Leichtbaustrategien kann diese erreicht werden. Beispielsweise kann neben zu geringer Steifigkeit auf Grund zu hohem Gewichtes auch die Dämpfung oder wie im Automobilbau die Energieaufnahme eine Rolle spielen und durch entsprechende Leichtbau-Lösungen beeinflusst werden. Als zweiter Schritt folgt das Erstellen der Funktionsstruktur. In den Funktionen selbst steckt direkt keine Information über das spätere Gewicht der Funktionsträger. Es kann sogar sein, dass man ein „Funktionsgewicht“, selbst wenn das Bauteil bzw. Produkt fertig ist, gar nicht feststellen kann, da z.B. bei Funktionsintegration dies unmöglich wird. Zunächst sind die Funktionen, da geometrielos, gewichtsfrei zu sehen. Die Abbildung der Hauptaufgabe bzw. der ihr entsprechenden Hauptfunktion eines technischen Systems durch die allgemeine Funktionsstruktur bietet wegen der hohen Abstraktionsebene keinen Ansatzpunkt für Leichtbaumaßnahmen. Dennoch sind aus Roth [5] Beispiele für technische Gebilde bekannt, die eine bestimmte Umsetzung als Hauptfunktion erfüllen z.B. Speichern: Stoffumsetzer a) statisch - Behälter, Konservendose, b) kinetisch – Drachen usw. und somit über eine wenn auch nur ungenaue Gewichtsinformation verfügen.

Des Weiteren können verschiedene Funktionsstrukturen (Grad der Konkretisierung) wesentliche Unterschiede im späteren Gewicht der Konstruktion ergeben, wenn Funktionen bzw. ganze Funktionsgruppen durch einfache mechanische Elemente (detaillierte Funktionsstruktur) oder mit Software realisiert werden können. Hier kann man sich beispielsweise Steuerungen von Prozessen und Abläufen vorstellen, die statt mit aufwendigen (Kurven-) Getrieben durch softwaregesteuerte elektrische Lösungen ersetzt werden. Solche Differenzierung

gen können v.a. beim Herunterbrechen der Funktionen hineinkommen, da es beim Herunterbrechen immer schwieriger wird, die Funktionen lösungsneutral zu halten.

Bei der **Suche und Kombination von Lösungen** werden u.a. auch Kataloge eingesetzt. Zur Entwicklung des Wirkprinzips werden geeignete Effekte ausgewählt. Entsprechende Effekträger werden ausgesucht und zusammengefasst. Die Effekträger müssen an den Verbindungsstellen kompatibel sein. Da hier Effekträger mit geometrischen und i.d.R. impliziten stofflichen Information eingesetzt werden, eröffnet sich die erste Möglichkeit diese auf Leichtbaueignung hin zu untersuchen.

Funktion	Wirkprinzip	Wirkstruktur			
Allg. Funktionen	Mech. Effekte	Geeignete Teillösungen mit Effekträgern			
Stoff leiten	Führungs-Effekt	Schubgelenk	Drehgelenk	Viergelenk	Schraubführung

Tabelle 3: Morphologischer Kasten zur Auswahl von Effekten und Effekträgern [5], Auszug

Ein Katalog von erfolgreichen Lösungen und Lösungsprinzipen im Leichtbau könnte eine systematische Leichtbaukonstruktion in dieser Phase aktiv unterstützen. Eine derartige Sammlung von erfolgreichen Beispielen mit entsprechenden Daten wie:

- Kosten bzw. Kostenentwicklung
- einhergehende Verbesserungen wie z.B. bei der Dämpfung
- erzielte Massenreduktion
- zielführende Maßnahmen
- eingesetzte Strategien
- u.a.

aus unterschiedlichen Bereichen (z.B. Sparleichtbau) kann nicht nur helfen, eine Lösung zu finden, sondern kann auch zur Abschätzung des Leichtbaupotentials ein wichtiger Ansatz sein. Hierbei sollte auch eine Auswahl der Bauweise bzw. Struktur enthalten sein.

Das Element **Voraussetzung ist die Kenntnis der Kräfte** sieht Klein beim Konzipieren als sehr wesentlichen Inhalt an. Hier kommt die Sicht des Leichtbaus deutlich zum Tragen. Eine Optimierung beispielsweise durch Simulationen der Steifigkeit oder gar eine Topologieoptimierung, wie sie i.d.R. für eine Reduktion des Gewichtes erforderlich sind, kann nur dann gute Ergebnisse liefern, wenn man die Randbedingungen zu diesen Simulationen also auch die auftretenden Kräfte und Kraftverläufe usw. genau kennt. Insbesondere beim Bedingungsleichtbau ist die optimale Ausnutzung des Bauteils durch genaue Kenntnis der Belastungsverhältnisse die Grundlage der Strategie.

Nun kommt ein Schritt, der auf den ersten Blick streitfähig scheint. Es soll bereits beim Konzipieren die **Wahl der Werkstoffe** erfolgen. Dies wird an einem Beispiel verständlicher. Entscheidet man sich, wie dies beim Space Frame der Fall ist, für eine Rahmenbauweise aus geschweißten Teilen, wird die Zahl der einsetzbaren Werkstoffe bzw. Werkstoffgruppe für die Karosserie bereits deutlich reduziert. Normalerweise wählt der Konstrukteur relativ spät im Konstruktionsprozess seinen Werkstoff aus. Im Leichtbau kann man aber auch v.a. bei Neuentwicklungen eine andere Tendenz feststellen. Dabei wird zunächst eine Grundauswahl der Werkstoffe verbunden mit einer Berücksichtigung der Verbindungstechnik getroffen, um dann in einem weiteren Schritt den Werkstoff nicht auszuwählen, sondern sogar für den je-

weiligen Einsatzfall den Werkstoff noch anzupassen. Dies ist z.B.: bei faserverstärkten Werkstoffen der Fall, wenn die Faserrichtungen oder die Zahl der Gewebelagen festgelegt wird. Doch nicht nur dort ist dies möglich. Man denke beispielsweise an die spezielle Entwicklung von Aluminiumlegierung für das Strangpressen und ein anschließendes Biegen der Strangpressprofile, wo durch Zugabe bestimmter Legierungselemente die Umformbarkeit zum Biegen verbessert wird. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung von Legierungen für Strangpressprofile zum Innenhochdruckumformen. Damit stehen einander zwei Sichtweisen, wie im folgenden Bild dargestellt, gegenüber. Nicht nur für Leichtbau sind diese beiden Sichten möglich.

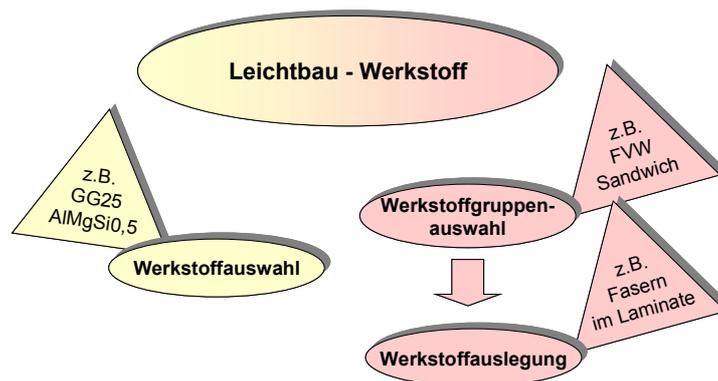


Bild 3: Auswahl und Anpassung von Werkstoffen im Leichtbau

Weiter wird dann bereits die **Überschlägige Dimensionierung** genannt. Mit fortschreitender Entwicklung der Rechnerunterstützung und Software in der Konstruktion werden die Möglichkeiten besser, diese erste Dimensionierung genauer zu machen und auf breiterer Front einzusetzen. Mit einer derartigen Dimensionierung wird auch eine erste Abschätzung von Gewichten möglich, um so beispielsweise Grundlagen für eine Bewertung unter dem Aspekt Leichtbau zu erhalten. Dies wiederum ist ein möglicher Zeitpunkt für eine Potentialabschätzung hinsichtlich Masseneinsparung gegenüber Vergleichsprodukten, -baugruppen oder -bauteilen. Obwohl diese Bewertung alternativer Lösungen auf Bauteil- und Baugruppenebene kaum Probleme bereitet, sei darauf hingewiesen, dass sie bei komplexen Produkten schwieriger durchzuführen ist.

Im Anschluss erfolgt die **Auswahl von Leichtbauelementen** wie z.B. ausgesteiften Kasten-trägern für Tragwerke [3]. In wie weit sich diese Auswahl von Leichtbauelementen tatsächlich nur auf Elemente wie Profile oder Schubfeldkonstruktionen usw. beschränkt, kann hier nicht abschließend gesagt werden. Unter Umständen kann man auch andere, auf höherer Ebene liegende Leichtbauelemente definieren, bei denen es zum Beispiel um Bereiche aus dem sogenannten „Weichen Maschinenbau“ geht. Dazu wäre ein entsprechender Leichtbauelemente-Katalog als Unterstützung von Vorteil.

Nicht zuletzt hat die Verbindungstechnik und damit die eingesetzten Verbindungselemente einen Einfluss auf eine gewichtsoptimale Lösung. Deshalb sollen auch Verbindungselemente in einem solchen Katalog von Leichtbauelementen vorhanden sein.

Abschließend für die Konzeptphase ist noch die **Berücksichtigung von technologischen Gegebenheiten** zu nennen. Dabei geht es nicht nur um die Frage, ob ein Bauteil prinzipiell herstellbar ist, sondern mit welchen Verfahren und damit auch mit welchen Kosten, was ja bei Sparleichtbau im Gegensatz zum Flugzeugbau wesentlich von Bedeutung ist. (Handelt es sich um eine Fertigung im Handlaminierverfahren mit vielen manuellen und speziell abgestimmten Arbeitsschritten, ergibt sich eine andere Kostensituation als bei allgemein übli-

chen Verfahren wie Giessen.) Eine wichtige Frage kann unter Umständen sein, wie weit ein neues Verfahren, wie die Herstellung von Bauteilen mit Schaumkern, tatsächlich schon ausgereift ist und nicht erst mit dem Bauteil zusammen entwickelt werden muss.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Um den Leichtbau auch in Bereichen außerhalb des Transportwesens insbesondere des Automobilbaus und der Luft- und Raumfahrt voranzutreiben, ist der Abbau des Informations- und Wissensdefizits hinsichtlich Gestaltung, Werkstoffen und Fertigung erforderlich. Wie allgemein in der Konstruktion geht es auch hier darum, dem Konstrukteur möglichst viel Wissen rechtzeitig zur Verfügung zu stellen.

Auf Grund der obigen Betrachtungen lässt sich folgern, dass in der Konzeptphase massiv auf die späteren Möglichkeiten des Einsatzes von Leichtbaustrategien zur Gewichtsreduzierung genommen wird. V.a. für einen Konstrukteur, der sich in der Konzeptphase einer Neuentwicklung mit der Aufgabe der Massenreduktion außerhalb der klassischen Bereichen des Leichtbaus befindet und nicht auf vorhandene Effekträger oder Lösungen und Erfahrung mit Leichtbau zurückgreifen kann, wäre eine Sammlung von vergleichbaren LB-Lösungen und LB-Effekträgern bzw. Beispielen sicherlich eine große Unterstützung. Des Weiteren sollten diese auf die einsetzbaren Strategien hinweisen. Kataloge von klassifizierten Fertigungsverfahren können dem Konstrukteur sicherlich auch wertvolle Hilfestellung geben. Eine Vorgehensweise zur Potentialabschätzung wäre ein weiterer Baustein für eine sicherere Entwicklung.

Aus unserer Sicht ist dies ein möglicher erster Schritt für eine zielsichere, strukturierte, verkürzte Entwicklung und eine sichere Beurteilung bzw. Bewertung von Leichtbaukonstruktionen in den frühen Phasen der Produktentwicklung.

5 Literatur

- [1] Pahl G. Beitz W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin 1997
- [2] Wiedemann, J.: Leichtbau Band 1. Elemente, Springer-Verlag, Berlin, 1986
- [3] Klein, B.: Leichtbau – Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, Verlag Vieweg&Son, Braunschweig 1989
- [4] Schmiedejournal, September 1998, Seite 8
- [5] Roth K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Springer-Verlag, Berlin 1994
- [6] Vernier F.: Aluminium in allen Automobil-Marktsegmenten. In: Konstruktion, Seite 31, April 2001

Dipl.-Ing. Werner Puri, Dipl.-Ing. Winfried Schmidt
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, FAU Erlangen-Nürnberg
Martensstraße 9 - D-91058 Erlangen
Tel: xx49-9131-85-23216
Fax: xx49-9131-85-23223
Email: puri@mfk.uni-erlangen.de
schmidt@mfk.uni-erlangen.de
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>