

## LEITFADEN ZUR ENTWICKLUNG VON LEICHTBAUENERGIEABSORBERN IN FLUGZEUGKABINEN

*Marc Pein, Dieter Krause*

### Zusammenfassung

Um den Grundforderungen nach geringem Gewicht und kurzer Entwicklungszeit von Energieabsorbern für Anwendungen in der Flugzeugkabine gerecht zu werden, wird ein Leitfaden zur zielgerichteten Entwicklung unter Verwendung innovativer Materialien dargestellt. Die Ergebnisse einer exemplarischen Anwendung verdeutlichen die Vorgehensweise.

### 1 Einleitung

Im Hinblick auf die immer höher werdenden Sicherheitsstandards sowohl im Kfz- als auch Luftfahrtsektor müssen innovative kraftbegrenzende Konzepte entwickelt werden, um diese Standards unter der Prämisse des Leichtbaus möglichst gewichtsneutral oder sogar gewichtssparend zu erfüllen. Um die hierfür notwendigen grundlegenden Material- und Konzeptuntersuchungen systematisch und zielorientiert durchzuführen, wird im vorliegenden Bericht ein spezifisch angepasster Entwicklungsprozess für Energieabsorber mit dem Anwendungsbereich Flugzeugkabine dargestellt.

Die zur Verdeutlichung gezeigten Ergebnisse der Prozessanwendung entstanden in Zusammenarbeit mit Airbus Deutschland und der EADS Forschung im Rahmen der von der Behörde für Wirtschaft und Arbeit der Freien und Hansestadt Hamburg geförderten Projekte "Optimierung und Simulation des Crashverhaltens von Flugzeugkabinen" und "Integrierte Technologien für crash-sicheres Flugzeugkabineninterieur".

#### 1.1 Passive Sicherheit in Flugzeugkabinen

Zur Optimierung der passiven Sicherheit sind die möglichen Schädigungsarten auf den Passagier während eines Absturzes zu betrachten. Neben dem direkten Einwirken von Kräften während eines Unglücks durch den Sitz können sich Teile der Kabine von der Flugzeugstruktur lösen und direkt zu Verletzungen führen, oder indirekt den Passagier durch Blockieren von Fluchtwegen schädigen. Bild 1 zeigt Überkopfgepäckfächer (Hatracks) die aufgrund der räumlichen Nähe zu den Passagieren und der teilweise hohen Massen ein Gefahrenpotential aufweisen können.

Die bisher verwendeten Vorschriften zur Konstruktion der Gepäckfächer verwenden statische Beschleunigungsannahmen, z.B. 9 g (Vorwärts-Richtung), die den transienten Charakter der im Crash auftretenden Beschleunigungen nicht widerspiegeln. Unter Annahme von über der Zeit veränderlichen Beschleunigungen, z.B. entsprechend den Vorschriften zur Auslegung von Flugzeugsitzen mit 16 g Maximalbeschleunigung, werden sehr hohe Lagerkräfte berechnet, welche die derzeitigen Hatrackhalterungen nur bedingt standhalten.

Das übliche Vorgehen der Strukturverstärkung zur Erhöhung der Festigkeit widerspricht der Grundforderung des Leichtbaus nach Gewichtsreduktion. Unter Verwendung innovativer Energieabsorptionsmaterialien soll daher innerhalb des Verbundprojekts untersucht werden,

inwieweit eine Kraftbegrenzung in den Hatrackhalterungen gewichtsneutral implementierbar ist, bzw. ob durch die Kraftbegrenzung ein Potential zur Gewichtsreduktion durch gezielte Festigkeitsverringering besteht.

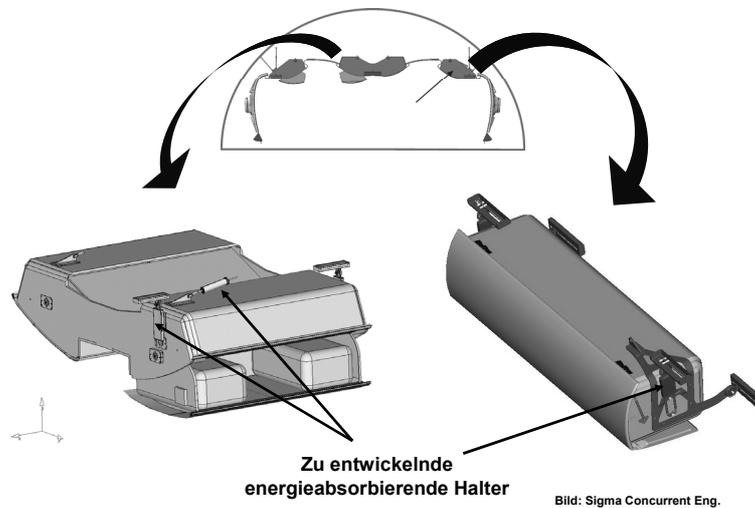


Bild 1: Einbausituation von Überkopfgepäckfächern (Hatracks) in Flugzeugkabinen

## 2 Entwicklungsprozess für Energieabsorber

Um eine effiziente und schnelle Entwicklung von Energieabsorbern für Flugzeugkabinen zu ermöglichen, wird ein Entwicklungsprozess definiert, der eine Konstruktion von Absorbern unter Nutzung allgemeingültiger Gestaltungsrichtlinien ermöglicht (Anwendungsentwicklung), sofern die nötigen Material- und Wirkprinzipinformationen verfügbar sind. Für den Fall, dass die verfügbaren Informationen für die Entwicklung nicht ausreichen, wird ein parallel ablaufender Prozess zur Untersuchung der Grundlagen weiterer Wirkprinzipien und Materialien integriert (Grundlagenentwicklung, Bild 2).

Energieabsorber sind in den meisten Fällen Bestandteil eines übergeordneten Produkts (Hatracks), sodass im Vergleich zur geforderten Hauptfunktion die Teilfunktionen „Energie absorbieren“ lediglich eine untergeordnete Rolle einnimmt. Die Entwicklung der Funktion „Energieabsorption“ kann aufgrund der schwierigen Berechnung bzw. Vorhersage des Verhaltens jedoch den Entwicklungsfortschritt des übergeordneten Produkts verzögern, sodass die Verwendung eines auf den Ergebnissen und Wissen bereits durchgeführter Entwicklungen aufbauenden Prozesses die Gefahr von Verzögerungen verringert.

### 2.1 Anforderungen an den Prozess

Die Gliederung und Darstellung des spezifisch angepassten Entwicklungsprozesses baut sich daher auf aus

- den Grundregeln der Konstruktionsmethodik,
- den Zulassungsvorschriften der Luftfahrtregulierungsbehörden, sofern diese auf den Konstruktionsprozeß anwendbar sind,
- der Forderung der sinnvollen Erweiterbarkeit bei fortschreitendem Stand der Technik, um die bereits gewonnenen Information strukturiert in den Prozess einzubinden bzw. zu archivieren.

Der Prozess sollte nach [1] eine strukturierte Form des Sachwissens darstellen, die anwendungsspezifisch einen möglichst günstigen Informationszugriff erlaubt. Dies bedeutet in praktischer Hinsicht

- die mechanischen Grundlagen der Wirkungsweise von Energieabsorbern als Basisinformation zu erarbeiten (hier nicht dargestellt),
- Teilschritte zur Ermittlung der geltenden Vorschriften für die passive Sicherheit von Flugzeugkabinen zu integrieren,
- bekannte Methoden und Konzepte des Leichtbaus und des Konstruktionsprozesses zu integrieren.

## 2.2 Kopplung der Prozesse

Die VDI 2221 bildet das Gerüst der in Bild 2 dargestellten Abfolge von Entwicklungsphasen, in die Informationen bereits durchgeführter bzw. der parallel durchgeführten Grundlagenentwicklung einfließen.

Basis der Absorberentwicklung ist die auf Grundlage eines (internen / externen) Entwicklungsauftrags definierte Anforderungsliste. Für die Entwicklung von Energieabsorbern ist die Anforderungsliste von besonderer Bedeutung, da hiermit die wichtigste Entscheidung getroffen wird, was die zu schützenden Bauteile sind und wo der Einbauort liegt. Durch die Festlegung welche Bauteile nach einem Energieabsorber angeordnet werden, ergeben sich für den Absorber in Verbindung mit den maximal zulässigen Kräften bzw. Beschleunigungen die funktionalen Kriterien, wie z.B. Auslösekraft und der Absorptionsweg. Der Einbauort legt damit zum einen die geometrischen Abmaße und die Massen fest und kann die Anzahl der möglichen einsetzbaren Energieabsorptionsprinzipien und -konzepte einschränken, zum anderen werden durch die Wahl des Ortes die Schnittstellen definiert.

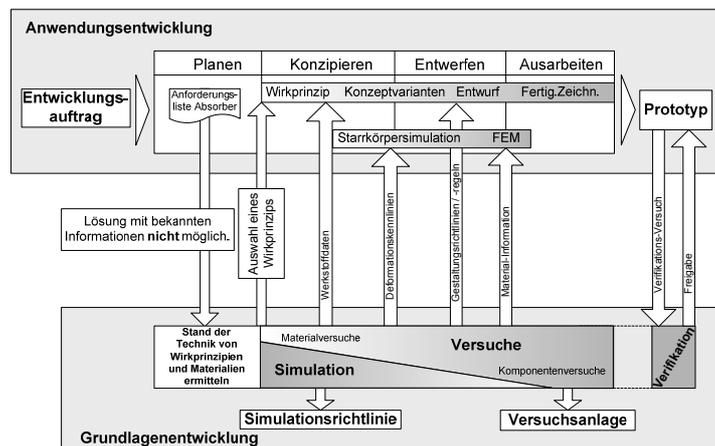


Bild 2: Kopplung der Anwendungs- und Grundlagenentwicklung

Sind die mit der Liste definierten Forderungen mit den bekannten Materialien und Konzepten nicht zu erfüllen, wird ein parallel ablaufender Grundlagenentwicklungsprozess angestoßen, in dem die benötigten Informationen erzeugt werden.

Innerhalb des Grundlagenprozesses wird zuerst der Stand der Technik, sowie die anwendbaren Wirkprinzipien bzw. Materialien untersucht. Anschließend werden auf Basis eines ausgewählten Wirkprinzips zum einen Simulation zur Ermittlung der auftretenden Kräfte und Beschleunigungen durchgeführt, zum anderen erste Materialversuche vorgenommen, da

aufgrund der Verwendung neuer und innovativer Materialien bzw. Konzepte die Möglichkeit der Simulation des Material- bzw. Konzeptverhaltens unter Crash-Bedingungen nicht garantiert ist. Die Ergebnisse werden in Form von Werkstoffdaten bzw. Deformationskennlinien in die Anwendungsentwicklung zurückgeführt. Weiterhin kann durch die frühzeitig stattfindenden Versuche die Qualität der Simulationen verbessert werden, wodurch in späteren Phasen mit steigendem Detaillierungsgrad des Konzepts bzw. des Entwurfs aussagefähigere Modelle und Simulationen, typischerweise mit Finite-Element-Methoden, erstellt werden können. Die innerhalb dieser Prozessphase gewonnenen Informationen werden in einer Simulationsrichtlinie dokumentiert. Die für die Materialuntersuchungen notwendigen Versuchsanlagen werden dem Fortschritt der Entwicklung angepasst, sodass zur Verifikation des Prototypen entsprechende Ausrüstung und Erfahrung besteht. Weiterhin werden die durch die Versuche gewonnenen Erfahrungen in Gestaltungsregeln bzw. -richtlinien in die Anwendungsentwicklung zurückgeführt.

Um den Absorber innerhalb der Anwendungsentwicklung hinsichtlich der auftretenden Kräfte auslegen zu können, müssen in den frühen Phasen der Konzeption abstrakte Simulationen, z.B. Starrkörpersimulationen, verwendet werden, da eine analytische Beschreibung des Verhaltens aufgrund der Nicht-Linearitäten nicht sinnvoll ist. Innerhalb des Forschungsprojekts wurde hierfür das Simulationstool Matlab/SimMechanics genutzt, das erste Aussagen über Kräfte und Absorptionswege ermöglichte.

### 2.3 Anwendung des Grundlagenentwicklungsprozesses

Zu Beginn des Verbundforschungsvorhabens wurde festgestellt, dass die existierenden Energieabsorptionskonzepte und -materialien entweder nicht an die spezifischen Randbedingungen der Kabine anpassbar waren, oder die verfügbare Informationsgrundlage nicht für eine Anwendungsentwicklung ausreichte. Die daher durchgeführte gekoppelte Grundlagenentwicklung soll im Folgenden mit exemplarischen Beispielen aus dem Projekt näher erläutert werden. Bild 3 zeigt die erste Phase des Grundlagenprozesses zur Ermittlung des Wirkprinzips.

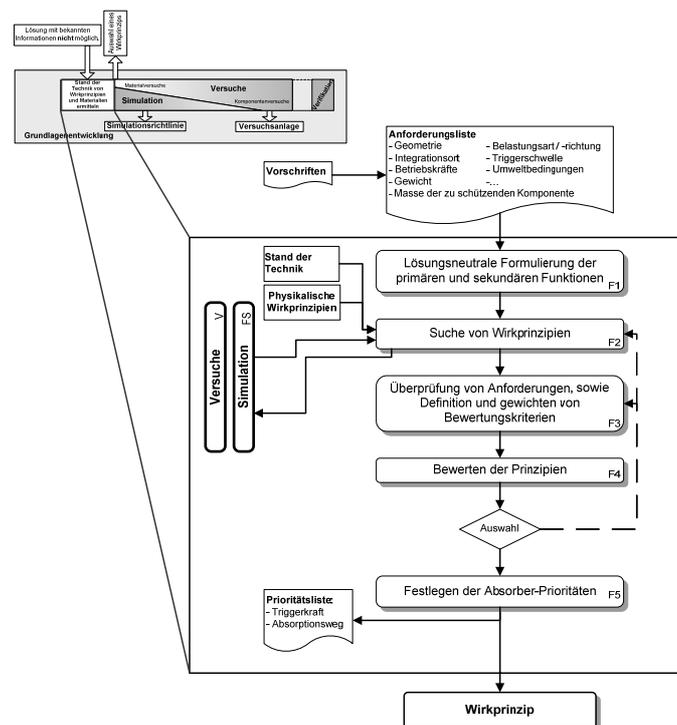


Bild 3: Grundlagenentwicklungsprozess - Wirkprinzip

Neben der primären Funktion der Energieabsorption sollten durch Verwendung von Integralbauweisen weitere sekundäre Funktionen (z.B. Körperschallabsorption) mit in den Absorber eingefasst werden, um ein niedriges Gewicht zu erreichen. Für die Funktionen „Energieabsorption“ ist auf Basis der in Bild 4 dargestellten Wirkprinzipien die Auswahl eines Prinzips zu treffen.

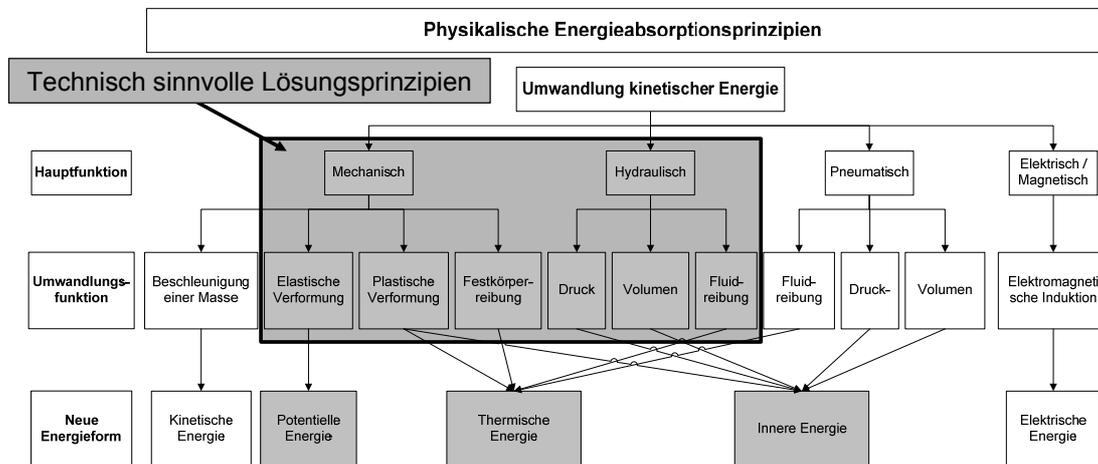


Bild 4: Physikalische Wirkprinzipien zur Energieabsorption

Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Patent- und Literaturrecherche zeigte, dass  $\frac{3}{4}$  der untersuchten Patente das Prinzip der plastischen Verformung von Materialien als Wirkprinzip zur Energieumwandlung verwenden. Aufgrund einer mit Airbus zusammen methodisch durchgeführten Bewertung ([2], [3]) der technisch sinnvoll anwendbaren Prinzipien wurde die plastische Deformation als zu verwendendes Prinzip ausgewählt.

Die im nächsten Schritt zu treffende Wahl der Absorberpriorität ist durch die in der Kabine zur Verfügung stehenden Bauräume auf den Absorptionsweg gefallen, da hierdurch die maximal möglichen Wege vorgegeben werden. In diesem Zusammenhang wird auf das Gestaltungsprinzip 1 auf der nächsten Seite verwiesen.

Mit der Rückführung des Wirkprinzips und der Aktualisierung der Anforderungsliste kann die Konzeption und der Entwurf des Energieabsorbers begonnen werden (Bild 5). Die hierfür notwendigen Grundlagenuntersuchungen sind eng mit den entsprechenden Schritten der Anwendungsentwicklung gekoppelt und richten sich nach dem gewählten Umformkonzept und –material, weshalb im Folgenden die informationsanfordernden Schritte der Anwendungsentwicklung näher betrachtet werden.

Aufgrund des großen Einflusses der Bauposition des Absorbers auf die Konzeption sollte zu Beginn der Konzeption eine Festlegung der Bauposition und der zu haltenden Massen (Design Freeze) erfolgen. Für die Hatracks bedeutet dies, die Masse, die Anbindungspunkte und den Absorptionsweg (< 100 mm) festzulegen.

Mit der Erstellung der Konzeptvarianten auf Basis des Wirkprinzips erfolgt gleichzeitig (obwohl Energieabsorber relativ einfache Baustrukturen aufweisen) eine Gliederung des Absorbers in verschiedene Baugruppen, um eine parallele Bearbeitung zu ermöglichen. Typische Baugruppen sind Anbindung, Führung und integrierte Funktionen. Innerhalb des Projekts bedeutete dies, Teilkonzepte für die Anbindung des Absorbers an die Hatrackstruktur und zur Primärstruktur des Flugzeugs zu entwickeln, sowie Möglichkeiten der Integration von Elastomerlagern zur Körperschallreduzierung vorzusehen.

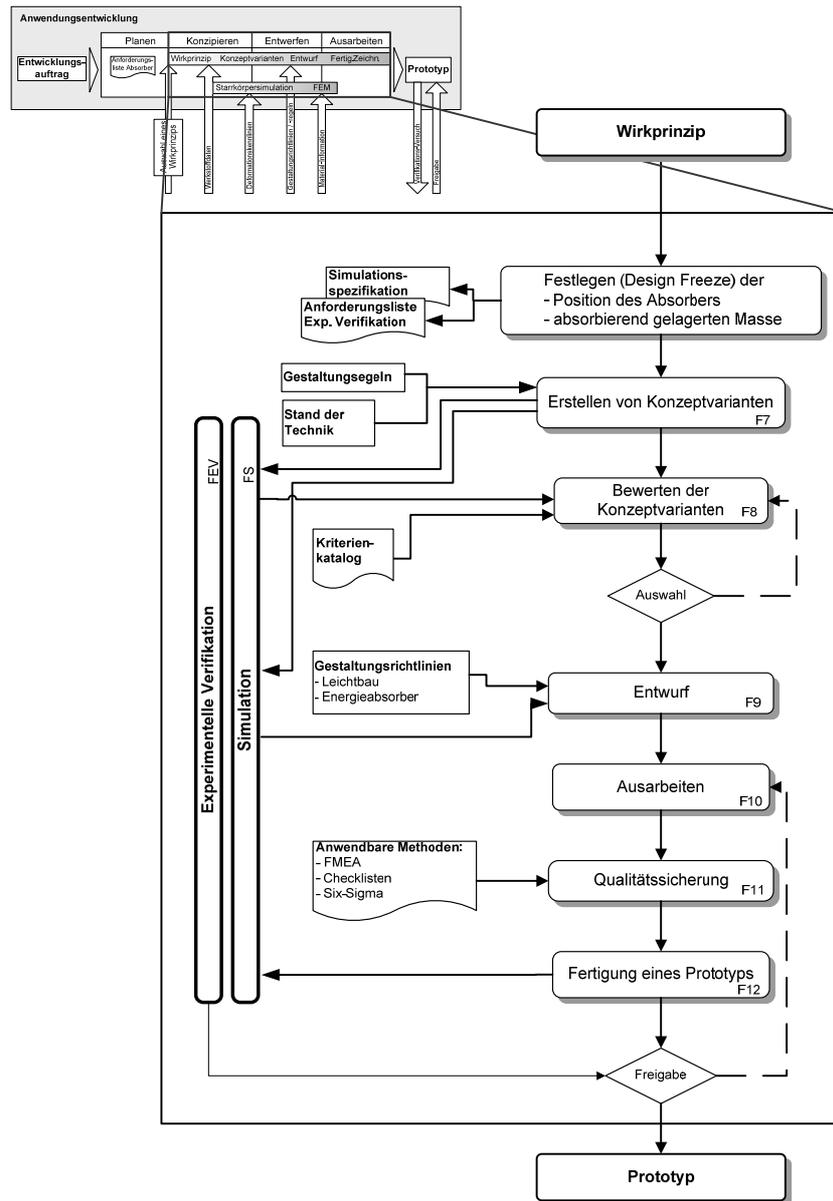


Bild 5: Anwendungsentwicklungsprozess – Konzeption & Entwurf

Für die Konzeptvarianten müssen die aus der Grundlagenentwicklung abgeleiteten und beispielhaft dargestellten Gestaltungsprinzipien auf Basis der physikalischen Wirkzusammenhänge von Absorbern berücksichtigt werden. Mit steigender Konkretisierung sind für die Entwürfe die später dargestellten, ebenfalls aus der Grundlagenentwicklung abgeleiteten Gestaltungsregeln zu berücksichtigen.

### Gestaltungsprinzip 1: Geringe Masse absorbierend lagern

Die umzusetzende Energie und damit das Gewicht des Absorbers ist eine annähernd lineare Funktion der absorbierend gelagerten Masse. Daher sollte der Einbauort des Absorbers möglichst dicht an der zu haltenden Masse liegen, um möglichst wenig Energie absorbieren zu müssen. Als Beispiel ist zum Schutz eines Insassen anstelle der Anordnung eines Energieabsorbers außerhalb eine schweren Struktur, der Energieabsorber möglichst dicht am Insassen anzuordnen (Bild 6).

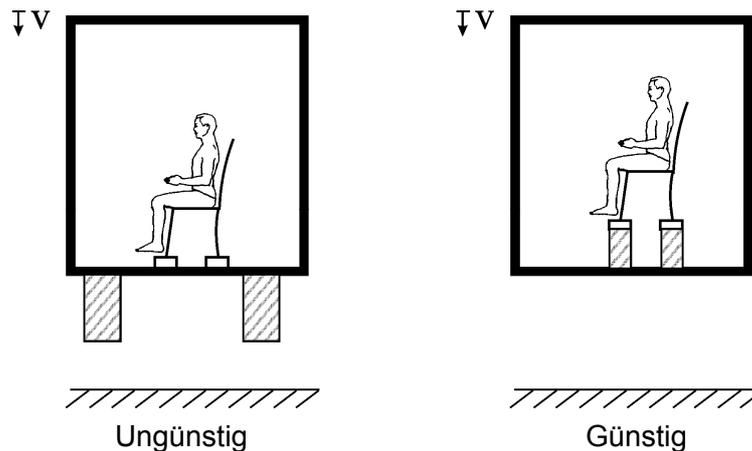


Bild 6: Gestaltungsprinzip 1: Minimal benötigte Masse lagern

Im Falle der Anbindung von Hatracks bedeutet dies, die Hatrackstruktur selbst so leicht wie möglich zu machen und die Absorber so dicht wie möglich am Hatrack zu platzieren.

### Gestaltungsprinzip 2: Lange Absorptionswege vorsehen

Die Priorisierung der funktionalen Randbedingungen „Deformationskraft“ und „Deformationsweg“ legt einen der Parameter fest, der andere Parameter wird durch die Größe der aufzunehmenden Energie bestimmt. In diesem Zusammenhang wird auf den „negativen Schneeball-Effekt“ nach *Schmidt* [4] verwiesen. Unter dem negativen Schneeballeffekt wird ein durchgehende Verringerung der Belastungen (und damit benötigter Massen) entlang eines Kraftpfades aufgrund einer Massenverringernungen am Ende eines Kraftpfades verstanden, z.B. kann durch Verringerungen der Masse des Schweißgeräts eines Schweißroboters die Ausführung und das Lager des Roboterarms verkleinert werden, sodass sich in der Gesamtbilanz eine größere Masseneinsparung ergibt. Dieser Effekt tritt insbesondere bei Verwendung von Energieabsorbern auf, die die Kraft begrenzen und damit die nachfolgende Struktur entlasten, womit diese lediglich bis zur maximalen Kraft (zzgl. Sicherheitsfaktor) des Energieabsorbers ausgelegt werden muss. Folglich ist die Triggerkraft möglichst gering zu wählen, wobei mit Hinblick auf die damit steigende Energiemenge und der dafür benötigten Absorbermasse ein anwendungsspezifisches Optimum gefunden werden muss.

Sind mehrere Konzeptvarianten erstellt worden, sollten diese bereits zu diesem, im Vergleich zu üblichen Entwicklungsprozessen sehr frühen Zeitpunkt (mit entsprechenden Abstraktionen) simuliert werden. Die Simulationen sind dabei mit dem Ziel durchzuführen, zu überprüfen ob die Konzepte die berechnete Energie aufnehmen, inwieweit eine Kraftüberhöhung auftritt, bzw. welcher Absorptionsweg voraussichtlich benötigt wird.

Stehen bei der Bewertung der Konzeptvarianten verschiedene Energieabsorptionsmaterialien oder konkrete Konzepte zur Auswahl, sollten diese experimentell untersucht werden, um frühzeitig detaillierte Informationen über das Verhalten des Materials zu besitzen, die erheblichen Einfluss auf den Entwurf haben können. Des Weiteren eignen sich die Informationen zur Kalibrierung von Simulationen, z.B. Materialmodellen in FEM-Simulationen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden sowohl metallische Energieabsorptionsstrukturen, als Strukturen aus Faserverbundwerkstoffen hinsichtlich der spezifischen Anwendbarkeit untersucht, u.a Aluminiumschäume, Metall-Hohl-Kugeln und Faserverbundwerkstoffe (Bild 7).



Bild 7: Exemplarische Auswahl untersuchter Energieabsorptionsmaterialien

Aufgrund der Möglichkeit die Werkstoffeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen in definierte Raumrichtungen gezielt verbessern zu können, kann unter Nutzung der einaxialen Belastung der Halterung eine rohrförmige Struktur erstellt werden, die bezogen auf das Gewicht der Probe im Vergleich zu Aluminiumschäumen eine 23-fach höhere Menge an Energie absorbieren kann [5]. Die untersuchten Materialien sind jedoch nur auf Druck deformierbar, sodass entsprechende Kraftumlenkungen notwendig sind. Um trotzdem leichte Halterungen zu erzielen sind vorzugsweise Energieabsorptionsmaterialien zu verwenden, die eine hohe Energiemenge bei gleichzeitig geringem Gewicht umsetzen können. Bild 8 stellt exemplarisch eine Umlenkungsstruktur für eine energieabsorbierende Halterung eines Hatracks dar, die eine Faserverbundröhre als Energieabsorptionsmaterial benutzt.



Bild 8: Prototyp einer energieabsorbierenden Tie-Rod Halterung

Die erstellten Konzeptvarianten sind mit einem aus den Anforderungen abgeleiteten Kriterienkatalog zu bewerten.

Das ausgewählte Konzept ist anschließend zu entwerfen; bei Verwendung der plastischen Deformation von Werkstoffen sollten dabei die folgenden Regeln beachtet werden.

### Gestaltungsregel 1: Ausdehnungsgerecht gestalten

Bei der Verwendung von typischen Energieabsorptionsmaterialien mit positivem Querkontraktionskoeffizienten die durch Druck deformiert werden, muss innerhalb des Absorbers Raum zum Ausdehnen der Probe während der Absorption vorgesehen werden. Insbesondere poröse Metallstrukturen dehnen sich unter Druckbelastung bei großen Verformungen aus oder können knicken, wodurch es zu Kontakten zwischen Material und Führung kommen kann. Da eine Vorhersage der auftretenden Kontaktkraft nur ungenau möglich ist, diese jedoch in hohem Maße das Verhalten des Absorbers beeinflusst, sollte entsprechender Raum

für das Ausdehnen vorgesehen werden, um einen Kontakt sicher zu verhindern (Bild 9). Bei der Verwendung von Faserverbundwerkstoffen muss darauf geachtet werden, dass die bei der Zerstörung entstehenden Fragmente abfließen und sich nicht verhaken/verklemmen können, weil die entstehenden Reibkontakte ebenfalls erheblich die Kraft-Weg-Kennlinie beeinflussen (Bild 10).

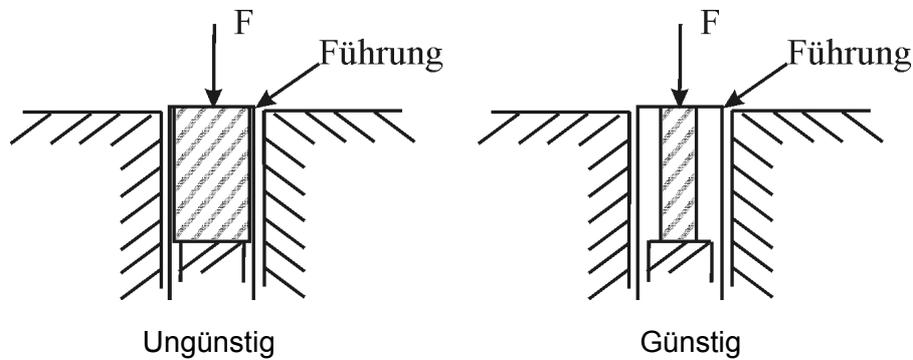


Bild 9: Gestaltungsregel 1: Ausdehnungsgerecht gestalten

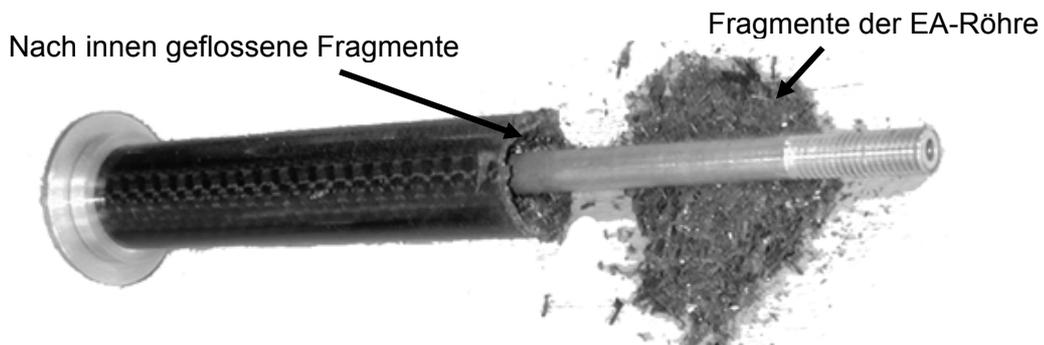


Bild 10: Prototyp nach Test

### Gestaltungsregel 2: Betriebskräfte beachten

Um ein optimales Verhältnis zwischen benötigter Funktion und Masse des Absorbers zu erreichen, sollte der Absorber direkt in den Kraftfluss des Produkts integriert werden. Bei der Auslegung der Auslösekraft (Triggerkraft) ist darauf zu achten, dass die Betriebskräfte einen (anwendungsspezifischen) Mindestabstand zur Triggerkraft haben, um unnötiges Auslösen des Absorbers zu vermeiden (Bild 11). Der Betrag des Abstandes der Kräfte ist entsprechend der Anwendung, bzw. entsprechend der Sicherheitsrelevanz und der mit dem Austausch verbundenen Kosten zu definieren.

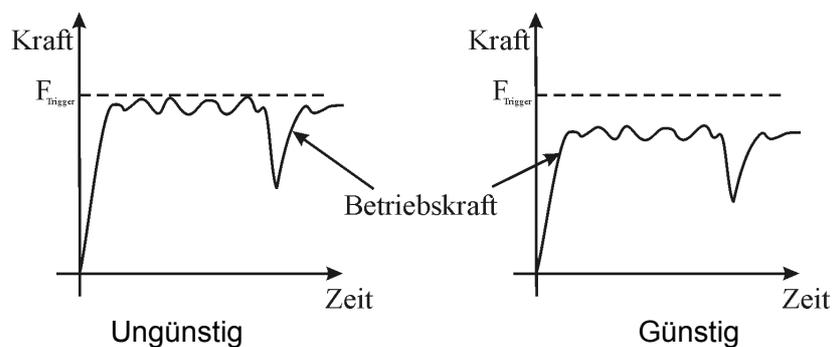


Bild 11: Gestaltungsregel 2: Betriebskräfte beachten

Die Entwürfe der Konzepte sind im nächsten Arbeitsschritt für eine Fertigung von Prototypen auszuarbeiten, wobei mit qualitätssichernden Maßnahmen, z.B. FMEA, eine entsprechende Konstruktionsgüte sichergestellt werden sollte. Der Prototyp des Absorbers ist experimentell zu testen, um das Verhalten und die Kennwerte mit den Anforderungen bzw. mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen. Sofern die Ergebnisse die Anforderungen erfüllen, kann der Prototyp freigegeben werden und in den übergeordneten Produktentwicklungszyklus zurückgeführt werden.

### 3 Zusammenfassung

Der vorgestellte Entwicklungsprozess erlaubt die systematische und wissensbasierte Entwicklung von Energieabsorptionsstrukturen, die spezifisch an die Flugzeugkabine angepasst sind. Die exemplarische Durchführung des Prozesses im Rahmen eines Verbundforschungsprojekts mit Airbus Deutschland und EADS bildet die Basis für die zukünftige Entwicklung innovativer energieabsorbierender Halterungen, zum einen durch die Bereitstellung einer systematischen Vorgehensweise, zum anderen durch die Dokumentation der Untersuchungsergebnisse der untersuchten Materialien und die konstruktorgerechte Bereitstellung des erworbenen Wissens der Grundlagenentwicklung, beispielsweise in Form von Gestaltungsrichtlinien, -regeln und Werkstoffkennwerten. Die entwickelten Prototypen werden zurzeit mit Impulsbelastungen getestet, die Untersuchung des Verhaltens bzw. des Versagens über bzw. nach einer Kabinenlebensdauer, sowie eine konstruktive Anpassung für einen Versuch mit Hatracks stehen noch aus.

### 4 Literatur

- [1] Hubka, Vladimir, Eder W.E.: Einführung in die Konstruktionswissenschaft, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1992.
- [2] Breiing, A., Flemming, M.: Theorie und Methoden des Konstruierens, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [3] Pahl, Beitz: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen, Springer Verlag, 1993.
- [4] Schmidt, W.: Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-Produkte, VDI-Verlag, VDI-Fortschritts Berichte, Reihe 1, Nr. 369, Friedrich-Alexander Universität Erlangen, Dissertation, 2004.
- [5] Pein, M; V. Laukart; D. Krause, D.G. Feldmann: Concepts for energy absorbing support structures and appropriate Materials, Conference proceedings of the 25<sup>th</sup> international congress for aeronautical sciences, Hamburg, ICAS 3.-8.Sep. 2006.

Dipl.-Ing. Marc Pein  
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
TU Hamburg-Harburg  
Denickestrasse 17, D-21073 Hamburg  
Tel: +49-40-42878-3666  
Fax: +49-40-42878-2296  
Email: m.pein@tu-harburg.de  
URL: <http://www.tuhh.de/pkt>