



Ralph Stelzer (Hrsg.)

# ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung  
und Konstruktionstechnik



Ralph Stelzer (Hrsg.) **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016  
Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik



Ralph Stelzer (Hrsg.)

# **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung  
und Konstruktionstechnik

Dresden · 30. Juni – 1. Juli 2016

## **Programmkomitee Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionstechnik**

Prof. Dr. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt

Prof. Dr. Martin Eigner, Universität Kaiserslautern

Prof. Dr. Detlef Gerhard, TU Wien

Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, KIT Karlsruhe

Prof. Dr. Rainer Stark, TU Berlin

Prof. Dr. Sandor Vajna, Universität Magdeburg

Prof. Dr. Sandro Wartzack, Universität Erlangen

Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016.  
Beiträge zur Virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Herausgeber: Ralph Stelzer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind  
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche  
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the  
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-062-0

© 2016 w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel  
Eckhard Richter & Co. OHG  
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden  
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19  
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von w.e.b.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.  
Layout und Satz: Technische Universität Dresden.  
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration © 2016 TU Dresden  
Printed in Germany.

Erscheint zugleich auf QUCOSA der SLUB Dresden  
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203878>



© 2016 SAP SE oder ein SAP-Konzernunternehmen. Alle Rechte vorbehalten.



**KOMPLEXITÄT  
DREHT SICH IMMER  
NUR IM KREIS.**



**EINFACH  
TRIFFT  
ENTSCHEIDUNGEN.**

Komplexität bremst Ihr Business aus. Denn je gewaltiger die Informationsflut, desto schwieriger die Entscheidungsfindung. SAP arbeitet daran, Dinge zu vereinfachen. Damit aus Daten Wissen und aus Wissen fundierte Entscheidungen werden, die Ihr Unternehmen weiterbringen. Finden Sie heraus, wie gemeinsam einfach möglich wird auf [sap.de/runsimple](https://www.sap.de/runsimple)

**SAP**  
Run Simple



# Produktarchitekturgestaltung unter Berücksichtigung additiver Fertigungsverfahren

Timo Richter · Hagen Watschke · David Inkermann · Thomas Vietor

## 1 Einleitung

Die Produktarchitektur ist ein Modell zur Abbildung der Verknüpfung zwischen funktionaler und physischer Sichtweise auf ein Produkt und Ausgangspunkt für eine Vielzahl von Methoden, u. a. zur Funktionsintegration oder Modularisierung. Die dabei adressierten Ziele der Produktentwicklung sind sehr unterschiedlich und fokussieren bspw. die Reduktion der Teilezahl und des Gesamtgewichts oder eine effiziente Variantenerzeugung durch Produktbaukästen.

Der Lösungsraum bei der Produktarchitekturgestaltung wird maßgeblich durch bekannte und nutzbare Technologien und deren Restriktionen bestimmt. So geht die spanende Fertigung mit steigender geometrischer Komplexität der Bauteile oftmals mit einer erheblichen Kostensteigerung einher. Werkzeugererfordernde Fertigungstechnologien wie bspw. das Druckgießen sind in der Regel nur für größere Bauteilstückzahlen rentabel. Die Einführung additiver Fertigungsverfahren bietet neue Möglichkeiten zur Überwindung dieser Restriktionen und zur Realisierung zusätzlicher Freiheiten in Bezug auf die geometrische Gestaltung sowie Materialzusammensetzung bei der Produktarchitekturgestaltung.

Während der Produktentwicklung werden die Potentiale additiver Fertigungsverfahren jedoch oft nicht umfassend berücksichtigt, wodurch besonders bei der Gestaltung der Produktarchitektur große Potentiale unerschlossen bleiben. Stattdessen erfolgt die Gestaltung der Produktarchitektur implizit und Möglichkeiten bspw. zur Funktionsintegration werden nur vereinzelt genutzt. Aus diesem Defizit leitet sich die zentrale Fragestellung dieses Beitrags ab:

*Wie können Potentiale additiver Fertigungsverfahren bei der Gestaltung der Produktarchitektur systematisch berücksichtigt werden?*

Zur Beantwortung dieser Frage wird in Abschnitt 2 die Produktarchitekturgestaltung in den Produktentwicklungsprozess eingeordnet und aufgezeigt, wie verschiedene Zielstellungen einer Produktentwicklung durch sie adressiert werden können. Technologische Einflüsse auf die Produktarchitekturgestaltung werden in Abschnitt 3 am Beispiel von additiven Fertigungstechnologien erläutert, bevor in Abschnitt 4 ein methodisches Rahmenwerk vorgestellt wird, welches die Nutzung von Potentialen additiver Fertigungsverfahren durch die Bereitstellung von Prinzipien unterstützt. Die Anwendung des Rahmenwerks wird in Abschnitt 5 am Beispiel eines adaptiven Drehgelenks für Parallelroboter verdeutlicht.

## 2 Gestaltung der Produktarchitektur in der Produktentwicklung

Der Begriff der Produktarchitektur wird in unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet. Dieser Abschnitt grenzt das Verständnis der Produktarchitektur ab und gibt einen Überblick über Effekte und Methoden der Produktarchitekturgestaltung.

### 2.1 Definition

Die Produktarchitektur ist ein Modell, welches die Funktions- und die Baustruktur eines Produkts sowie deren Verknüpfungen abbildet (Ulrich 1995). Sie umfasst somit sowohl die funktionale Sichtweise bspw. als Funktionsstruktur als auch die physische Sichtweise bspw. als Bauteile, Baugruppen und deren Schnittstellen. Abbildung 1 zeigt schematisch eine Produktarchitektur, in der die Teilfunktionen 1 bis 5 den Bauteilen 1 bis 6 zugeordnet sind.

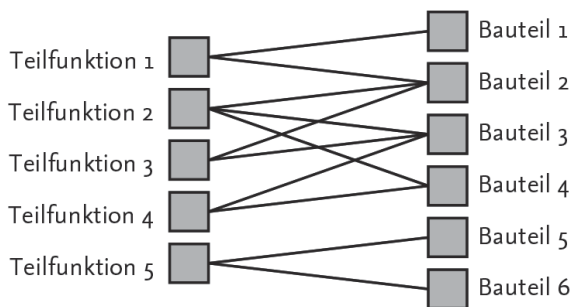


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung der Produktarchitektur als (polyhierarchische) Verknüpfung von Funktionen und Bauteilen

Es wird deutlich, dass einzelne Bauteile Träger mehrerer Teilfunktionen sein können. Bspw. trägt Bauteil 2 zur Erfüllung der Teilfunktionen 1, 2 und 3 bei. Dies wird nach Roth (2000) als "polyhierarchische Zuordnung" bezeichnet. Andere Bauteile wie 1, 5 und 6 können hingegen eindeutig Teilfunktionen zugeordnet werden. Aufgabe des Konstrukteurs ist es, unter Berücksichtigung verschiedener Anforderungen und Restriktionen (bspw. der Fertigung und Montage) eine geeignete Zuordnung von Funktionen zu Bauteilen vorzunehmen. Dabei wird Funktionsintegration als der Vorgang bezeichnet, bei dem ein technisches System derart verändert wird, dass es entweder zusätzliche Funktionen erfüllen kann und/oder die Anzahl der Bauteile reduziert wird (Ziebart 2012). Dagegen bezeichnet die Funktionstrennung bzw. Funktionsdifferenzierung eine Verringerung der Bauteileigenschaften, um bspw. unerwünschte Funktionen auszuschließen (Roth 2000).

Die Gründe für die Anwendung dieser Basisprinzipien der Produktarchitekturgestaltung können sehr unterschiedlich sein, da die Effekte in vielen Unternehmensbereichen spürbar sind (Yassine et al. 2007). Von Richter et al. (2015) wurde deshalb ein Modell vorgestellt, welches die Effekte der Produktarchitekturgestaltung in den übergeordneten Zielbereichen *Kundenzufriedenheit*, *Unternehmensstrategie* und *Unternehmenseffizienz* spezifiziert. Beispielsweise kann eine differenziale Produktarchitekturgestaltung dazu beitragen, die Kundenzufriedenheit durch bessere Anpassbarkeit des Produkts zu steigern. Das Unternehmen kann zudem von einer breiteren und effizienteren Gestaltung des Produktportfolios durch ein Baukastensystem profitieren.

## 2.2 Methoden zur Produktarchitekturgestaltung

Die zahlreichen Effekte der Produktarchitekturgestaltung werden durch eine Vielzahl von Methoden adressiert, auf die der Produktentwickler zurückgreifen kann. Die Methoden unterstützen die Analyse und Synthese der Verknüpfungen zwischen den geforderten Eigenschaften des Produkts (wie Funktionen, Zuverlässigkeit, Kosten usw.) und den beeinflussbaren Produktmerkmalen (wie Abmessungen und Material von Komponenten), da die Eigenschaften nicht unmittelbar festgelegt werden können, vgl. Property-Driven Development nach Weber (2012). Während jeder Produktentwicklung erfolgt die Festlegung der Produktarchitektur, indem Lösungen zur Realisierung von Funktionen definiert werden. Diese Festlegung geschieht jedoch oftmals implizit, ohne Potentiale verschiedener Prinzipien wie Funktionsintegration oder Funktionstrennung zur Erreichung der genannten Entwicklungsziele explizit zu berücksichtigen.

Neben allgemeinen Prinzipien können auch spezielle Prinzipien, bspw. zur Nutzung von Potentialen spezieller Technologien wie der Mechatronik, dem Einsatz von Wandlerwerkstoffen oder additiven Fertigungsverfahren, Anwendung finden. Abbildung 2 zeigt das Zusammenspiel von Entwicklungszielen, der Produktarchitektur und Technologie-Potentialen durch Methoden zur Produktarchitekturgestaltung.

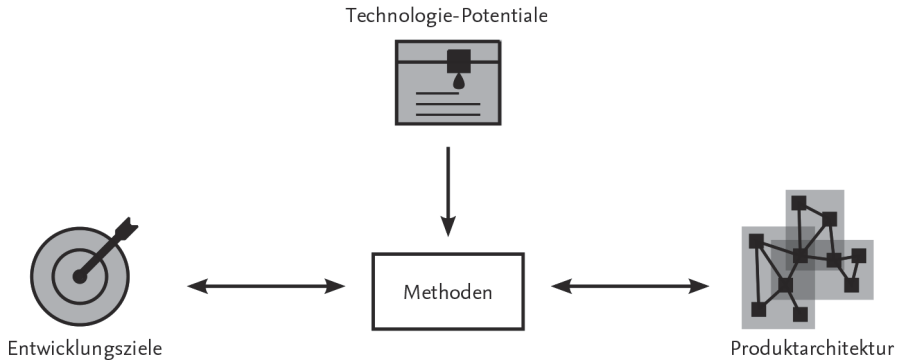


Abbildung 2: Zusammenspiel zwischen Entwicklungszielen, der festzulegenden Produktarchitektur und Technologie-Potentialen durch Methoden

In Anlehnung an die Definition vieler Methoden der Produktentwicklung nach deren primären Zielen ("Design for X"), können auch Methoden zur Produktarchitekturgestaltung anhand dieser Ziele kategorisiert werden. Bspw. existiert eine Vielzahl von Methoden, die vorrangig die Entwicklung von Baukastensystemen zur effizienten Erreichung einer hohen externen Variantenvielfalt unterstützen (Renner 2012). Methoden zur Modularisierung fokussieren die Bildung von Modulen, die sowohl funktional als auch physisch möglichst entkoppelt sind und berücksichtigen insbesondere auch produktstrategische Aspekte (Ericsson et al. 1999). Methoden zur Funktionsintegration verfolgen hingegen die übergeordneten Zielsetzungen der Funktionserweiterung/-innovation und/oder einer Teilezahlreduktion, um bspw. Kosten zu senken (Ziebart 2012).

### 3 Potentiale additiver Fertigungsverfahren bei der Architekturgestaltung

Die Berücksichtigung additiver Fertigungsverfahren als gezielte Ergänzung zu herkömmlichen Fertigungstechnologien bietet aufgrund des element- bzw. schichtweisen Materialauftrags neue Möglichkeiten für die Produktarchitekturgestaltung. Besonders hervorzuheben sind die Freiheiten hinsichtlich der geometrischen Gestaltung und der Materialzusammensetzung.

Bezogen auf die zuvor eingeführten Basisprinzipien der Produktarchitekturgestaltung, ergeben sich die nachfolgend beschriebenen Potentiale zur Integration und Differenzierung.

### 3.1 Integrale Produktarchitekturgestaltung

In Hinblick auf fertigungsbedingte Bauteiltrennungen wird bspw. durch die Herstellbarkeit von Hinterschnitten eine Realisierung integrierter Baugruppen/Komponenten ermöglicht und somit eine Reduzierung der Teileanzahl und des Montageaufwands erreicht (Becker et al. 2006). Weiterhin erlaubt das Prinzip des schichtweisen Materialauftrags die Herstellung beweglicher und funktionsfähiger Baugruppen wie Lagerungen oder Verzahnungen und kann zur Reduzierung des Montageaufwands beitragen (Yang et al. 2015a). Um bspw. den Bauraumbedarf und den Montageaufwand zu minimieren, lassen sich darüber hinaus gradierte innenliegende (Gitter-)Strukturen ohne anschließenden Fügevorgang herstellen (Yang et al. 2015b) und durch geeignete Geometrie und Materialwahl nachgiebige Federelemente, Filmscharniere oder Gelenke integrieren (Wegner et al. 2012).

Weitere Möglichkeiten zur Realisierung integraler Produktarchitekturen ergeben sich durch eine Unterbrechung des Fertigungsprozesses und die Einbettung zusätzlicher Komponenten. Dies erlaubt bspw. die Integration von Modulen wie elektrischen Schaltkreisen oder Aktoren, aber auch mechanischen Konstruktionselementen wie Muttern oder Kugellagern (Mayer et al. 2015, Yang et al. 2015a, Glasschröder et al. 2015). Die sich aufgrund des beheizten Bauraums ergebenden thermischen Ausdehnungen der Materialien können zudem genutzt werden, um die nach der Abkühlung induzierte Schrumpfung direkt zur Einspannung der integrierten Elemente zu nutzen (Mayer et al. 2015).

Die additive Fertigung bietet gegenüber konventionellen Fertigungstechnologien die Möglichkeit, verschiedene Materialien ohne einen anschließenden Fügeprozess zu verarbeiten und auf diese Weise gradierte Bauteile mit element- bzw. schichtweise variierender Materialzusammensetzung zu erzeugen (Rosen 2014, Yang et al. 2015a). Durch die Verwendung verschiedenfarbiger sowie transparenter Ausgangsmaterialien in Kombination mit variierenden Wandstärken lassen sich bspw. optische Eigenschaften einstellen. Die Verarbeitung von elektrisch leitfähigen Filamenten ermöglicht eine Integration von elektrischen Funktionen wie Leitungen oder Widerständen.

### 3.2 Differentiale Produktarchitekturgestaltung

Neben integrierten Produktarchitekturen ist die additive Fertigung aufgrund der direkten, werkzeuglosen Bauteilerzeugung in Kombination mit den

vergleichsweise geringen geometrischen Grenzen zur Herstellung individueller Bauteile in geringer Stückzahl geeignet. Dies erlaubt bspw. eine Abbildung von Exotenvarianten im Bereich der Baukastenentwicklung (Lindemann et al. 2006). Erfolgversprechende Produkte mit modularen Produktarchitekturen können kundenindividuelle Produkte sein, u. a. im Bereich der Orthetik.

Darüber hinaus ermöglicht der Andruck von Material an bestehende z. B. metallische Bauteile die Individualisierung konventionell gefertigter Grundkörper. Sogenannte Hybridmaschinen, eine Kombination aus ab- und auftragenden Fertigungsprozessen, erweitern die Individualisierungsmöglichkeit durch den Aspekt der Reparatur. Durch das Abtragen von Material von bestehenden Produkten kann die vorhandene Produktstruktur aufgebrochen und einzelne Elemente gezielt ersetzt werden. Auf diese Weise lassen sich bspw. in der Luftfahrt einzelne teure Module reparieren und gleichzeitig der logistische Aufwand in Bezug auf die Lagerhaltung von Ersatzmodulen reduzieren (Deppe et al. 2014).

## **4 Rahmenwerk zur integrierten Produktarchitekturgestaltung**

Um die aufgezeigten Potentiale additiver Fertigungsverfahren bei der Produktarchitekturgestaltung nutzen zu können, muss das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten den Produktentwicklern zur Verfügung gestellt werden. Dafür wird in diesem Abschnitt ein Rahmenwerk vorgestellt, welches die Produktarchitektur als zentrales Hilfsmittel nutzt, um Prinzipien zu additiven Fertigungsverfahren zu formulieren und anzuwenden.

### **4.1 Ebenen für die Gestaltung der Produktarchitektur**

In Abschnitt 2 wurde die Produktarchitektur als Modell für die Verknüpfung von Funktionen zu Bauteilen eingeführt. Als ein Basisprinzip der Produktarchitekturgestaltung wurde die Integration eingeführt, durch welche der "Ausnutzungsgrad" (Roth 2000) von Bauteilen erhöht werden kann. Im Gegensatz dazu wurde das Basisprinzip der Differenzierung zur Unterstützung der Baukastenbildung und Modularisierung vorgestellt. Diese Basisprinzipien bilden den Kern des Rahmenwerks, indem sie die Verknüpfung von Elementen auf unterschiedlichen Ebenen der Produktarchitekturgestaltung unterstützen. Die hierfür genutzten Ebenen sind in Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 1: Ebenen der Produktarchitekturgestaltung

Ebene	Repräsentation von Informationen
Funktionen	Zweck, für den ein Produkt geschaffen wird, bspw. technische Funktionen zur Umwandlungen von Stoff, Fluss, Information sowie ästhetische und semantische Funktionen, vgl. (Gero et al. 2004, Pahl et al. 2007, Crilly et al. 2004)
Prinzipien	Allgemeine Gesetzmäßigkeiten oder Ideen, von denen Effekte zur Erfüllung von Funktionen abgeleitet werden können, vgl. (Pahl et al. 2007)
Funktionsträger	Abstrakte Beschreibungen technischer Elemente, durch die Prinzipien realisiert werden können, vgl. (Pahl et al. 2007)
Komponenten	Physische fertigbare Elemente, aus denen ein Produkt zusammengesetzt werden kann, vgl. (Hubka et al. 1988)
Module	Zusammenfassung von Komponenten zu Teilsystemen des Gesamtprodukts, die je nach Sichtweise (Entwicklung, Herstellung, Nutzung, Reparatur usw.) variieren kann, vgl. (Ericsson et al. 1999, Brees 2011)

Die Abbildung der Produktarchitektur auf fünf Ebenen soll eine differenzierte Unterstützung von Entscheidungen ermöglichen, da in jeder Ebene Produktmodelle Anwendung finden, die unterschiedliche Aspekte der Produktentwicklung abbilden. Somit können auf den Ebenen spezifische Informationen als Grundlage für die Anwendung von Prinzipien genutzt werden. Demnach kann zwischen jeder dieser Ebenen entschieden werden, ob eine Integration oder Differenzierung vorgenommen werden soll. Abbildung 3 zeigt diese Prinzipien exemplarisch anhand von in Abschnitt 3 erläuterten Potentialen additiver Fertigungsverfahren.

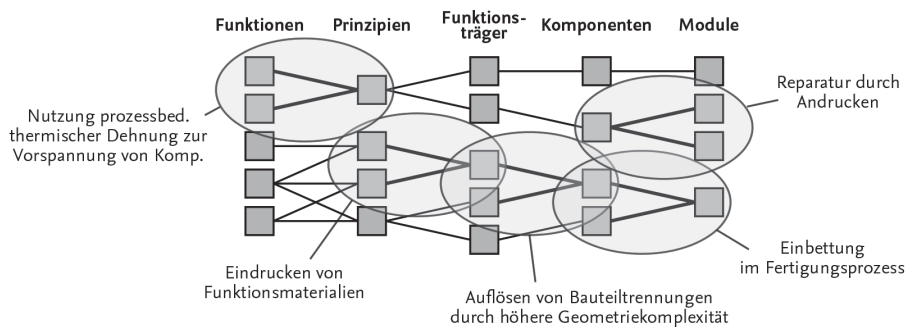


Abbildung 3: Einordnung prinzipieller Lösungen durch additive Fertigungsverfahren in fünf Ebenen der Produktarchitekturgestaltung

Als ein Prinzip ist die Ausnutzung thermischer Schrumpfungen während des Bauprozesses zur Vorspannung zusätzlich integrierter Konstruktionselemente gezeigt. Neben der ursprünglichen Funktion des tragenden Bauteils wird

somit eine zusätzliche Funktion erfüllt und es kann auf nachträgliche Einstellungen verzichtet werden.

#### 4.2 Vorgehen zur Identifizierung von Potentialen

Roth (2000) beschreibt den Produktentwicklungsprozess als das Fortschreiten zwischen Phasen, in denen produktdarstellende Modelle unterschiedlicher Konkretisierung miteinander verknüpft werden (Modellkette). Diese Produktmodelle können den fünf Ebenen der Produktarchitekturgestaltung zugeordnet werden. So entstehen während des Produktentwicklungsprozesses bspw. Funktionsstrukturen (Funktionen), prinzipielle Teillösungen in einem Morphologischen Kasten (Prinzipien), Beschreibungen prinzipieller Lösungsvarianten mithilfe von Wirkstrukturen und der Definition von Wirkkörpern und Wirkflächenpaaren (Funktionsträger), CAD-Modelle (Komponenten) oder Montagegruppeneinteilungen (Modulen).

Bei einem Großteil von Produktentwicklungsprozessen handelt es sich um Anpassungs- oder Variantenkonstruktionen, die auf bestehenden Lösungen aufbauen (Ehrlenspiel 2013). Dabei werden die beschriebenen Ebenen oftmals nicht linear, beginnend bei einer Funktionsbeschreibung durchlaufen. Vielmehr erfolgt ausgehend von den Entwicklungszielen eine Analyse bestehender Produktmodelle, um Ansatzpunkte für Variationen und/oder Erweiterungen zu identifizieren (Synthese). Wenn bspw. ein realisiertes Produkt vorliegt, ist die Baustruktur (Module und Komponenten) direkt ersichtlich. Für Optimierungen des Produkts kann es jedoch sinnvoll sein, Wirkprinzipien zu variieren, für deren Ermittlung eine Beschreibung der Funktionen notwendig ist oder bestehende Wirkstrukturen mit den zugrunde liegenden Funktionen abzugleichen.

Abbildung 4 zeigt das Vorgehen bei der Analyse und Synthese und die damit einhergehende Abstraktion bzw. Konkretisierung exemplarisch. Ausgehend von den Entwicklungszielen (z. B. Teileanzahl reduzieren) erfolgt die Auswahl der Ebene und Produktmodelle, auf der die entsprechenden Produkteigenschaften beurteilt werden können (z. B. auf der Komponentenebene). Daraufhin erfolgt eine Abstraktion auf höher liegenden Ebenen (bspw. Funktionsträger, Prinzipien und Funktionen), um dort Prinzipien zur Produktarchitekturgestaltung anwenden und so neue Zuordnungen von Elementen aus Produktmodellen der unterschiedlichen Ebenen vornehmen zu können (Synthese).



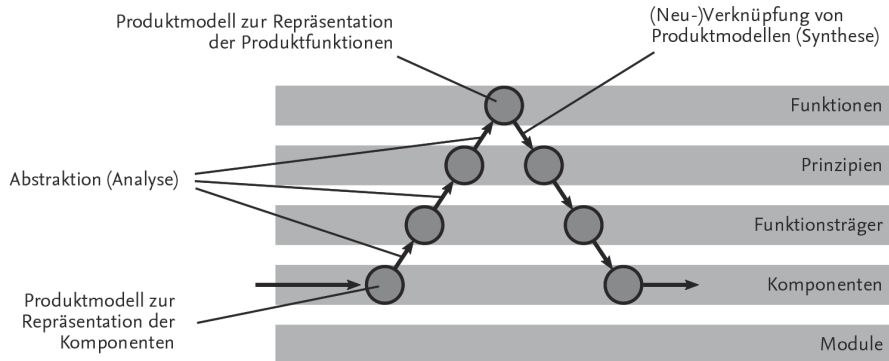


Abbildung 4: Beispielhaftes Vorgehen zur Produktarchitekturgestaltung bei einer Anpassungskonstruktion

Eine wesentliche Voraussetzung zur Anwendung des Vorgehens ist die Prinzipienidentifikation, um die Synthese neuer Lösungen zu unterstützen.

### 4.3 Bereitstellung von Prinzipien

Für die Bereitstellung von Wissen für die Produktentwicklung muss neben dem Informationsspeicher, der Lösungsbeschreibungen in einer angemessenen, strukturierten Weise enthält, eine geeignete Zugriffslogik definiert werden (Inkermann 2016). Die Zugriffslogik stellt Zugriffsmerkmale (wie Geometrie oder Verhalten) bereit, anhand derer auf den Inhalt des Informationsspeichers zugegriffen werden kann.

Wie vorhergehend beschrieben können die Prinzipien durch Anwendung additiver Fertigungsverfahren mit bestimmten Produktentwicklungszielen verknüpft werden. Zudem lassen sie sich als Präzisierungen der Basisprinzipien, Integration und Differenzierung, eindeutig den Ebenen der Produktarchitekturgestaltung zuordnen. Abbildung 5 (links) zeigt dies exemplarisch durch die Zuordnung von Prinzipien (nummeriert, bspw. "A1.1") in eine Matrix aus den Zuordnungsebenen (Kopfspalte) und Entwicklungszielen (Kopfzeile). Ein Prinzip kann dabei pro Zeile mehrmals aufgeführt werden.

Zudem zeigt Abbildung 5 (rechts) die Struktur der Beschreibung von Prinzipien im Informationsspeicher. Demnach wird jedes Prinzip (z. B. A1.1) einer Oberkategorie (z. B. A1) und einem Basisprinzip (bspw. Realisierung mehrerer Funktionen durch ein Prinzip) zugeordnet. Zusätzlich werden adressierbare Entwicklungsziele, geeignete additive Fertigungstechnologien und weiterführende Literatur angegeben.

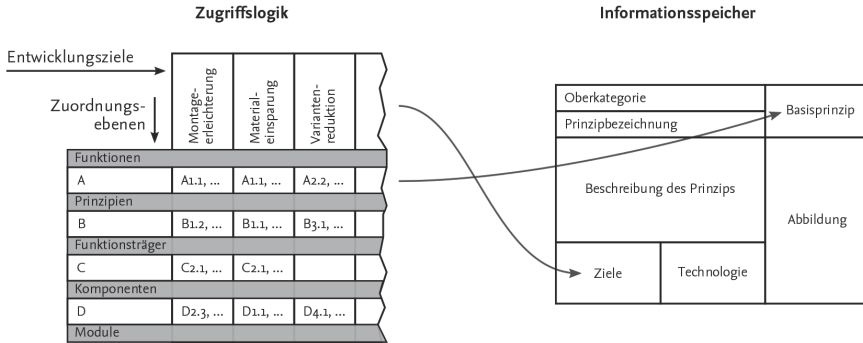


Abbildung 5: Zugriffslogik (links) und Informationsspeicher (rechts) zur Nutzung von Prinzipien zur Anwendung additiver Fertigungsverfahren

Somit wird durch das Rahmenwerk der Produktentwicklungsprozess unterstützt, indem für vorgegebene Entwicklungsziele, Potentiale additiver Fertigungsverfahren während der Produktarchitekturgestaltung bereitgestellt werden. Die Aufbereitung von Prinzipien ermöglicht einen effizienten Zugriff auf benötigtes Wissen für deren Anwendung.

## 5 Anwendung des Rahmenwerks

Das vorgeschlagene Rahmenwerk zur Berücksichtigung von Potentialen additiver Fertigungsverfahren wird im Folgenden für eine Anpassungskonstruktion eines adaptiven Drehgelenks für Parallelroboter genutzt. Zunächst wird die bestehende Lösung des Drehgelenks beschrieben, bevor in den weiteren Teilen die praktische Anwendung des Rahmenwerkes und die erzielten konstruktiven Verbesserungen aufgezeigt werden.

### 5.1 Konventionell gefertigtes adaptives Drehgelenk für Parallelroboter

Aufgrund der geschlossenen kinematischen Struktur werden in Parallelrobotern passive Gelenke eingesetzt (Merlet 2006). Da die Gelenke im Kraftfluss liegen und mitbewegt werden, beeinflussen sie maßgeblich die dynamischen und statischen Eigenschaften des Robotersystems (Heisel et al. 1998). Unabhängig von der Bauart der Gelenke werden ein großer Schwenkbereich, eine hohe statische Steifigkeit und ein geringes Spiel, eine geringe Reibung und geringer Verschleiß sowie ein geringer Bauraum und ein geringes Gewicht gefordert (Heisel et al. 1998, Franke et al. 1998, Mai 2002). Die Eigenschaften herkömmlicher Wälz- und Gleitlagerungen führen zu Kompromissen hinsichtlich der geforderten Eigenschaften, da entweder eine hohe Steifigkeit und Tragfähigkeit oder eine geringe Reibung erzielt

werden kann. Zur Überwindung der Zielkonflikte bei der Entwicklung passiver Gelenke für Parallelroboter wurden daher adaptive Lösungen entwickelt und erprobt (Pavlovic 2011, Inkermann 2016). Bei diesen werden Reibung und Steifigkeit zwischen den relativ zueinander bewegten Führungsflächen des Gelenkes mithilfe piezoelektrischer Aktoren verändert. Abbildung 6 zeigt den Aufbau eines Funktionsmodells für ein adaptives Drehgelenk.

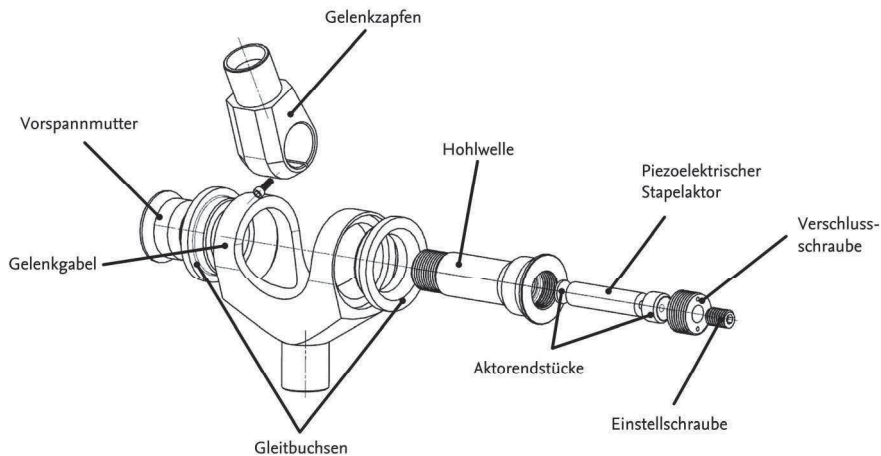


Abbildung 6: Explosionsdarstellung des adaptiven Drehgelenks für Parallelroboter



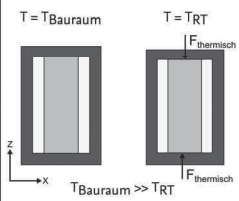
Die Relativbewegung zwischen Gelenkgabel und Hohlwelle wird mithilfe von Gleitbuchsen geführt. Die Gleitbuchsen nehmen die Radialbelastungen auf und bieten Führungsflächen zur axialen Festlegung der Hohlwelle. Die Gegenläufigen befinden sich auf der Hohlwelle und der Vorspannmutter. Mithilfe der Vorspannmutter wird die Vorspannung zwischen den schrägen Führungsflächen (O-Anordnung) eingestellt. Die axialwirkende Aktorkraft verringert die Lagervorspannung während des Betriebs, woraus ein größeres Lagerspiel und damit eine geringere Reibung bzw. Steifigkeit resultiert (Inkermann 2016). Um den in der Hohlwelle platzierten Stapelaktor montieren und vorspannen zu können sowie vor Querkräften und Biegebelastungen zu schützen, sind weitere Komponenten (Verschluss-schraube, Einstellschraube und Aktorendstücke) erforderlich. Diese Komponenten realisieren Sekundärfunktionen, die aufgrund der gewählten Materialien und Fertigungsverfahren sowie der Eigenschaften des Stapelaktors erforderlich sind. Sie wirken sich allerdings negativ auf den Montageaufwand, das Gesamtgewicht und den Bauraum des Gelenks aus. Durch systematische Betrachtung der Potentiale additiver Fertigungsverfahren sollen im Folgenden

konstruktive Maßnahmen zur verbesserten Integration des piezoelektrischen Stapelaktors untersucht werden.

## 5.2 Nutzung von Potentialen additiver Fertigungsverfahren

Für die Anwendung des Rahmenwerks müssen im ersten Schritt Entwicklungsziele identifiziert werden. Bspw. soll die Montage erleichtert werden, die derzeit durch viele Komponenten zur Integration des Stapelaktors sehr aufwändig ist (Einbringen von Aktorendstücken, Schließen der Hohlwelle mit der Verschlusschraube und Vorspannen des Aktors durch eine Einstellschraube). Der Montageaufwand kann auf der Ebene (vgl. Abbildung 4) der Komponenten beurteilt werden. Lösungsvorschläge durch Integration oder Differenzierung können durch die Verknüpfung von Elementen auf dieser und höher liegenden Ebenen (Funktionsträger, Prinzipien und Funktionen) ermittelt werden. Das größte Innovationspotential, aber auch den höchsten Änderungsaufwand, bieten dabei Lösungen auf höchster Ebene durch eine Ermittlung alternativer Prinzipien für die definierten Funktionen. Mithilfe der Zugriffslogik (vgl. Abschnitt 4.3) kann so bspw. das in Tabelle 2 dargestellte Prinzip aus der Kategorie "Vorhandene Prozess- und Werkstoffeigenschaften nutzen" identifiziert werden.

Tabelle 2: Beschreibung des Prinzips zur Nutzung prozessbedingter thermischer Dehnung zur Vorspannung

<b>A1</b>	<b>Vorhandene Prozess- und Werkstoffeigenschaften nutzen</b>		<b>Basisprinzip:</b> Funktion 1  Prinzip 1 Funktion 2  Prinzip 1
<b>A1.1</b>	Nutzen prozessbedingter thermischer Dehnungen zur Vorspannung eingebetteter Komponenten während des Fertigungsprozesses		
<b>Prinzipbeschreibung:</b> Der schichtweise Aufbau der additiven Fertigung erlaubt durch die Unterbrechung des Bauprozesses eine Integration von Komponenten in die vorhandene Bauteilstruktur. Infolge des Materialaufschmelzens (z.B. Metall oder Kunststoff) sowie der Bauraumtemperierung wird das Bauteil während der Fertigung erwärmt. Der Effekt der materialspezifischen thermischen Wärmeausdehnung kann zur Ein- bzw. Vorspannung der integrierten Komponenten genutzt werden.			
<b>Zuordnung zu konstruktiven Zielen:</b> - Montageerleichterung - Bauraumeinsparung - Gewichtsreduktion - Sichererhöhung - ...	<b>Zuordnung zu den Fertigungstechn.:</b> - Selektives Lasersintern (SLS) - Selektives Laserschmelzen (SLM) - Fused Layer Modeling (FLM)	<b>Quelle:</b> [Mayer et al. 2015]	

Aus diesem Prinzip kann eine neue konstruktive Lösung für das Gehäuse abgeleitet werden, bei welcher der Aktor während des Fertigungsprozesses integriert wird. Die Schrumpfung des Gehäuses durch Abkühlung der additiv gefertigten Hohlwelle führt dazu, dass der Aktor vorgespannt wird. Somit erfüllt das Gehäuse zusätzlich die Funktion der zuvor genutzten Einstellschraube. Die Aktorendstücke sowie die Verschluss- und Einstellschraube können somit entfallen.

Auf diese Weise können weitere Prinzipien zur Optimierung der Hohlwellenbaugruppe identifiziert werden, was zu den in Abbildung 7 gezeigten Änderungsvorschlägen führt.

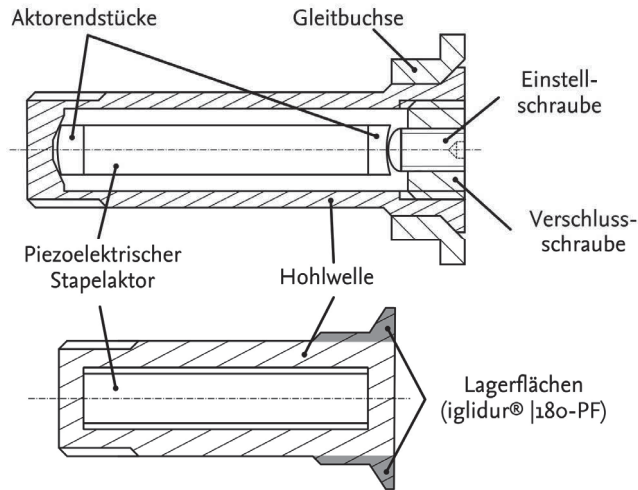


Abbildung 7: Schematische Darstellung der konventionell gefertigten (oben) und der additiv gefertigten Hohlwelle (unten)

Mit Hilfe des Prinzipienkatalogs kann wie beschrieben die thermische Wärmedehnung zur Vorspannung des während des Bauprozesses eingesetzten Stapelaktors genutzt werden. Durch die Verwendung eines kunststoffbasierten Verfahrens, bspw. dem Fused-Layer-Modeling, kann der ursprünglich zur Isolation von Aktor und Hohlwelle erforderliche Luftspalt reduziert werden. Dies kann eine weitere Senkung des Bauraumbedarfs mit sich bringen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass aufgrund des geringeren E-Moduls des Kunststoffs die Hohlwelle größer dimensioniert werden muss. Aufgrund des schichtweisen Materialauftrags müssen bei der Dimensionierung der Welle zusätzlich die anisotropen mechanischen Eigenschaften in Baurichtung beachtet werden. Weiterhin kann die Biegesteifigkeit der Welle bspw. durch die Integration von innenliegenden Gitterstrukturen gesteigert werden und so das Gewicht weiter reduziert werden.

Durch die Verwendung eines Funktionsmaterials mit tribologisch günstigen Eigenschaften (z. B. iglidur® |180-PF) können die Lagerflächen ohne nachträglichen Fügeprozess direkt während der Hohlwellenfertigung in die Struktur integriert werden. Hierdurch werden die Gleitbuchsen eingespart und die Lagerung der Welle kann direkt in der metallischen Gabel erfolgen, was

neben einer Bauteileinsparung zusätzlich eine Reduzierung des Bauraums und des Bauteilgewichts bewirkt. Wegen der vergleichsweise geringen Oberflächengüten und hohen Maßtoleranzen der additiven Fertigung ist es jedoch erforderlich, dass die Lagerflächen nachgearbeitet werden. Die noch mangelnde Reproduzierbarkeit additiv gefertigter Bauteile verlangt zudem eine kontinuierliche Kontrolle der Maßhaltigkeit, um die Funktion des Robotergelenks zu gewährleisten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass additive Fertigungsverfahren eine Vielzahl von Potentialen besitzen, die bei der Produktarchitekturgestaltung explizit berücksichtigt werden sollten. Dafür wurde ein Rahmenwerk vorgestellt, welches die Produktarchitektur durch eine Zuordnung von Elementen auf den Ebenen von Funktionen, Prinzipien, Funktionsträgern, Komponenten und Modulen beschreibt. Ausgehend von den Basisprinzipien der Integration und Differenzierung können hiermit Potentiale additiver Fertigungsverfahren in einem Prinzipienkatalog kategorisiert und beschrieben werden.

Die Anwendbarkeit des Rahmenwerks wurde am Beispiel eines adaptiven Drehgelenks für Parallelroboter illustriert. Mithilfe verschiedener Prinzipien wurde dabei eine angepasste additiv gefertigte Hohlwelle entworfen, in welcher der piezoelektrische Stapelaktor integriert und Funktionsmaterialien zur Optimierung der Gleiteigenschaften eingedruckt werden. Insgesamt konnten somit Potentiale aufgezeigt werden, um Bauteilanzahl, Bauraumbedarf, Montageaufwand und Bauteilgewicht der Baugruppe zu reduzieren.

Offen bleibt zum einen aus technologischer Sicht, ob die vorgeschlagene Lösung des adaptiven Robotergelenks mit den bestehenden Fertigungsverfahren reproduzierbar in ausreichender Qualität realisiert werden kann und ob die postulierten technischen Vorteile der Lösung mögliche wirtschaftliche Nachteile übertagen. Um diese Fragen zu klären, sind weitere Arbeiten zur praktischen Absicherung der vorgeschlagenen Lösung geplant. Diese umfassen neben der Fertigung der neu entwickelten Hohlwellenbaugruppe die Absicherung und Detaillierung der Welle zur Erzielung der maximalen Akteurarbeit.

Zum anderen wurde in diesem Beitrag ein methodisches Rahmenwerk vorgestellt, welches einen wesentlichen Teil einer umfassenden Methodik zur Produktarchitekturgestaltung darstellt, die derzeit im Zuge eines Promotionsprojekts erarbeitet wird, siehe (Richter et al. 2015, 2016). Zum derzeitigen Stand ist weder ein vollständiger Prinzipienkatalog ausgearbeitet, noch existieren allgemein anwendbare (softwaregestützte) Hilfsmittel zur Modellierung der Produktarchitektur und Identifizierung von Prinzipien. Aktuelle

Arbeiten zielen darauf ab, die vielfältigen Beziehungen, die in der Methodik abgebildet werden müssen, mithilfe von Graphendatenbanken zu modellieren.

Um die Nutzung von Potentialen additiver Fertigungsverfahren in der Produktentwicklung zu fördern, ist darüber hinaus als Teil weiterer Forschungsarbeiten ein Rahmenwerk für die systematische Entwicklung additiv gefertigter Produkte erarbeitet worden (Kumke et al. 2016). Die modulare Struktur des Vorgehens erlaubt eine Integration bestehender Ansätze und Hilfsmittel aus dem Bereich des Design for Additive Manufacturing (DfAM), sodass der hier vorgestellte Prinzipienkatalog in das Rahmenwerk eingegliedert und bspw. unterstützend bei der Produktkonzeption eingesetzt werden kann.

## Literaturverzeichnis

- Becker, R., Grzesiak, A. & Henning, A. 2006: Rethink assembly design. In: *Assembly Automation*, 25 (4), 262-266
- Blees, C. 2011: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien, Hamburg: TU Hamburg-Harburg.
- Crilly, N., Moultrie, J. & Clarkson, P. J. 2004: Seeing things: consumer response to the visual domain in product design. In: *Design Studies*, 25 (6), 547-577
- Deppe, G. & Koch, R. 2014: Exploring the influence of an Additive Manufacturing integration on future MRO processes in aeronautics. In: *RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*, 2014
- Ehrlenspiel, K. 2013: Integrierte Produktentwicklung, München: Hanser Verlag.
- Ericsson A. & Erixon, G. *Controlling Design Variants* (1999): Modular Product-Platforms, Dearborn Michigan: Society of Manufact. Engineers.
- Franke, H.J., Köberlein, S. & Hagedorn, U. 1998: Systematik und Auswahl von Gelenken mit Hilfe von Konstruktionskatalogen. In: *Neue Maschinenkonzepte mit parallelen Strukturen für Handhabung und Produktion – VDI-Berichte 1427*, 101–115. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Gebhardt, A. 2013: *Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, München: Hanser Verlag.
- Gero, J. S. & Kannengiesser, U. 2004: The situated function-behaviour-structure framework, In: *Design Studies*, 25 (4), 373-391
- Glasschröder, J., Prager, E. & Zäh, M. F. 2015: Powder-bed-based 3D-printing of function integrated parts. In: *Rapid Prototyping Journal*, 21 (2), 207-215
- Heisel, U. & Maier, V. 1998: Gestaltung und Bewertung von Gelenkeinheiten für Maschinen mit Hexapod-Kinematik - Teil I. In: *PKS 1998: Chemnitzer Parallelkinematik-Seminar*, 27–39

- Hubka, V. & Eder, W. E. 1988: Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design, Berlin Heidelberg: Springer.
- Inker mann, D. 2016: Anwendung adaptiver Lösungsprinzipien für die Entwicklung adaptiver Systeme, Braunschweig: TU Braunschweig, im Druck
- Kumke, M., Watschke, H. & Vietor, T. 2016: A new methodological framework for design for additive manufacturing. In: Virtual and Physical Prototyping, 11 (1), 3-19
- Lindemann, U., Reichwald, R. & Zäh, M.F. (Hrsg) 2006: Individualisierte Produkte: Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Maier, V. 2002: Ein Beitrag zur Untersuchung und Beurteilung von Parallel-Kinematik-Werkzeugmaschinen, Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Mayer, D., Stoffregen, H. A., Heuss, O., Thiel, J., Abele, E. & Melz, T. 2015: Additive manufacturing of active struts for piezoelectric shunt damping. In: Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Special Issue Article, 1-12
- Merlet, J.-P. 2006: Parallel Robots. Dordrecht: Springer Verlag.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg) 2007: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung, Berlin: Springer Verlag.
- Pavlovic, N. (2011): Entwicklung von adaptiven Drehgelenken für Parallelstrukturen, Braunschweig: TU Braunschweig
- Renner, I. (2007): Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil, München: TU München
- Richter, T., Inker mann, D. & Vietor, T. 2015: Die Rolle der Festlegung der Produktarchitektur in der Produktentwicklung, In: Proceedings of the 26th Symposium Design for X, 267-279
- Richter, T., Inker mann, D. & Vietor, T. 2016: Product architecture design as a key task within conceptual design, In: Proceedings of DESIGN the 14th Int. Design Conf.
- Rosen, D.W. 2014: Research supporting principles for design for additive manufacturing. In: Virtual and Physical Prototyping, 9 (4), 225-232
- Roth, K. 2000: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Konstruktionslehre, Berlin: Springer.
- Weber, C. 2007: Looking at DFX and Product Maturity from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes, In: Proceedings of the 17th CIRP Design Conf., 85-104
- Wegner, A. & Witt, G. 2012: Design rules for laser sintering. In: Journal of Plastics Technology, 8 (3), 253-277
- Yang, S. & Zhao, Y.F. 2015a: Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80 (1), 327-342
- Yang, S., Tang, Y. & Zhao, Y. F. 2015b: A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing. In: Journal of Manufacturing Processes, 20, 444-449
- Ziebart, J. R. 2012: Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration, Braunschweig: TU Braunschweig.



## **Kontakt**

Dipl.-Ing. Timo Richter  
Hagen Watschke, M. Sc.  
Dipl.-Ing. David Inkermann  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Konstruktionstechnik  
Langer Kamp 8  
38106 Braunschweig  
*[www.tu-braunschweig.de/ik](http://www.tu-braunschweig.de/ik)*

