



Design for X

Beiträge zum 27. DfX-Symposium
Oktober 2016

Dieter Krause
Kristin Paetzold
Sandro Wartzack
(Hrsg.)

Design for X

**Beiträge zum 27. DfX-Symposium
Oktober 2016**

**Dieter Krause
Kristin Paetzold
Sandro Wartzack
(Hrsg.)**



The Design Society is a charitable body,
registered in Scotland, number SC 031694

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de/kataloge> abrufbar.

Impressum

Tutech Verlag
TUTECH INNOVATION GMBH
Harburger Schloßstr. 6-12
21079 Hamburg
Tel.: +49 40 76629-0
Fax: +49 40 76629-6129
E-Mail: verlag@tutech.de
www.tutechverlag.de

Nachdruck, Vervielfältigung, Speicherung oder Übertragung in elektronische, optische, chemische oder mechanische Datenhaltungs- oder -verwertungssysteme sind -auch auszugsweise- ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung von TUTECH INNOVATION GMBH verboten.

Die Verwertung von Informationen aus *Design for X | Beiträge zum 27. DfX-Symposium* zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.

© TUTECH INNOVATION GMBH, Hamburg, 2016

ISBN 978-3-946094-09-8

Vorwort

„26-mal DfX-Symposium: ist das nicht stinklangweilig?!“ Diese Frage stellte Prof. Harald Meerkamm zur Einleitung der Dinner Speech des 26. DfX-Symposiums im vergangenen Jahr in Herrsching bei München. Und er beantwortete seine einleitende Frage mit einer packenden Rede zum 25. Jubiläum der Veranstaltung und dem Satz „Ich kann Ihnen sagen, es war mir nie langweilig, sondern ich fand es stets anregend und spannend.“

An der diesjährigen Vielfalt der eingereichten Beiträge und der gelungenen Teilnehmerzahl ist erkennbar, dass Prof. Harald Meerkamms Antwort für das diesjährige 27. DfX-Symposium in Jesteburg nahe Hamburg erneut anwendbar ist. Ich freue mich, dass wieder so viele junge wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Einladung zur Einreichung eines Beitrags gefolgt sind und wir ein Programm erstellen konnten, dass auch in diesem Jahr viele neue Anregungen für die Forschung im Bereich der Produktentwicklung erwarten lässt.

Die thematischen Schwerpunkte des diesjährigen Symposiums bilden dabei die Themen

- Modularisierung & Variantenmanagement,
- Strukturanalyse, Simulation & Test sowie
- Leichtbau.

Darüber hinaus wird die Öffnung des Symposiums für andere Themenstellungen fortgesetzt, indem auch eine Vielzahl von fachlich spannenden Beiträgen aus dem Bereich des „Design for X“ berücksichtigt wurde. Auch ist es erfreulich, dass wir verschiedene Keynote-Präsentationen aus Industrie und Wissenschaft zur Erweiterung der Themengebiete erwarten dürfen.

Ich danke meinen beiden Mitveranstaltern und Kollegen Kristin Paetzold und Sandro Wartzack für Ihr eingebrachtes Engagement und die konstruktive Zusammenarbeit, meiner Mitarbeiterin Frau Johanna Spallek für die Organisation des Symposiums und natürlich allen Teilnehmern für ihre Beiträge. Ich freue mich auf die vielen, interessanten Vorträge, sowie auf die sicherlich intensiven und lebhaften Diskussionen.



Dieter Krause

Hamburg, Oktober 2016



Inhaltsverzeichnis

1 Keynotes

Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Entwicklung von Plattformantrieben in Powertools

Josef Ponn

Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH.....1

Systematische Baukastenentwicklung in der Nutzfahrzeugindustrie

Matthias Kreimeyer

MAN Truck & Bus AG.....1

VDI 2221 - Die neue Richtlinie

Beate Bender

Ruhr-Universität Bochum.....1

Projekt ModSupport – Methodische Entwicklung eines innovativen Modulbaukastens für Aufzugsanlagen

Nicolas Gebhardt, Gregor Beckmann, Sebastian Lüsebrink, Nikolai Fischer, Hans Martin Lutz, Dieter Krause

Technische Universität Hamburg-Harburg, Hans Lutz Maschinenfabrik GmbH & Co. KG.....3

Komplexität im U-Bootbau beherrschen – ein methodischer Ansatz

Sandra Eilmus, Eren Erkul, Thomas Gumpinger, Robert Munde, Dr. Marc Pein, Sven Werner

Odego GmbH, thyssenkrupp Marine Systems.....15

2 Session: Test und Simulation

FEA-Assistenzsystem – Plausibilitätsprüfung für Finite-Elemente-Simulationen mittels sphärischen Detektorflächen

Tobias C. Spruegel, Philipp Kestel, Sandro Wartzack

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.....27

Shape optimization of topologically optimized structures using NURBS

Julian Kajo Lüdeker, Benedikt Kriegesmann

Hamburg University of Technology.....39

Ansatz zur modellunterstützten Vorauslegung von Messsystemen für die Erfassung von mechanisch-dynamischen Größen von Power-Tools

Sven Matthiesen, Andreas Wettstein, Tim Bruchmüller, Tristan Anding

Karlsruher Institut für Technologie.....51

3 Session: Modularisierung

Opportunity Cost of Modularity: Challenges and Requirements for Balancing the Dilemma of Product Platforms

Marc Windheim, Dieter Krause

Hamburg University of Technology, Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH65

Erweiterung der Design for Cost Methodik für indirekte Änderungskosten

Christian Schmied, Marcel Gebhardt, Hugo D'Albert, Markus Mörtl

Technische Universität München, International Performance Research Institut.....77



4 Postersession: Simulation

Anwendung wissensbasierter Simulationen zur Ausschöpfung von Leichtbaupotenzialen in der Automobilindustrie

Stefan Hautsch, Sebastian Katona, Tobias Sprügel, Michael Koch, Frank Rieg, Sandro Wartzack

Universität Bayreuth, TH Nürnberg, FAU Erlangen-Nürnberg.....89

Simulationsbasiertes Vorgehen zur anwendungsorientierten Variantenauslegung hyperelastischer, bionischer Gelenkantriebe

Stefan Landkammer, Daniel Schneider, Florian Winter, Rüdiger Hornfeck

Technische Hochschule Nürnberg.....101

Methode zur Parameteroptimierung komplexer Mechanismen hinsichtlich kinematischer Anforderungen

Björn Heling, Sandro Wartzack

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.....111

Einfluss von Prozessparametern auf die Funktionserfüllung von Bauteilen im Fused Deposition Modeling

Justus Siebrecht, Georg Jacobs, Alexander Beckers, Manuel Löwer, Walter Schmidt, Michael Körber

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.....123

5 Session: Leichtbau

Eine Untersuchung mechanisch gealterter kurzfaserverstärkter Thermoplaste unter hochdynamischen Lasten

Christian Witzgall, Sandro Wartzack

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.....135

Additively manufactured components for structural applications in aircraft interior - Two case studies

Jan Oltmann, Ralf Seemann, Johanna Spallek, Dieter Krause

TU Hamburg-Harburg.....147

Konzept zur hochdynamischen Kraftregelung mit nachgiebigen Mechanismen
Kristian Mauser, Sandro Wartzack, Alexander Hasse
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.....157

6 Session: Industrie 4.0

Zustandsdiagnose von Maschinen im Kontext von Industrie 4.0 unter Einsatz von Data-Mining Methoden
Christof Küstner, Jürgen Mitsch, Matthias Hegwein, Nico Meintker, Konrad Moenks, Sandro Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg, GE Jenbacher GmbH & Co OG.....169

Entwicklung von Smart Machine Elements - Ansatz der smarten Ausgleichskupplung
Stefan Schork, Sebastian Gramlich, Eckhard Kirchner
Technische Universität Darmstadt.....181

7 Postersession: Design for X

Systematische Leistungswandlerauswahl für Hybridantriebsstrangtopologien
Sebastian Ruoff
Karlsruher Institut für Technologie.....193

Modellbasierte Anforderungsermittlung durch systematische Prozessanalyse als Basis des Hygienic Designs
Jean-Paul Beetz, Hermann Kloberdanz
Technische Universität Darmstadt.....207

Priorisierung von Aktivitäten zur Konkretisierung von Produkteigenschaften am Beispiel einer Batteriemodulentwicklung
Martin Eisele, Sebastian Schoch, Rainer Puls, Albert Albers, Aline Radimersky
Karlsruher Institut für Technologie, Dipl.-Ingenieure Rainer & Oliver PULS GmbH.....219

Szenario-basierte Analyse von Anforderungen im Produktentwicklungsprozess
Iris Gräßler, Philipp Scholle
Universität Paderborn.....231

8 Session: Prozesse

Ein integriertes Gesamtsystemmodell für die modellbasierte Entwicklung
Yousef Hooshmand, Martin Höner, Stéphane Danjou, Peter Köhler
Universität Duisburg-Essen, Hochschule Rhein-Waal.....243

Agilität als Alternative zu traditionellen Standards in der Entwicklung physischer Produkte: Chancen und Herausforderungen
Tobias Sebastian Schmidt, Kristin Paetzold
Universität der Bundeswehr München.....255

9 Session: Design for X

Ansatz zur Formalisierung der Design-DNA am Beispiel der Fahrzeugaußen-
gestalt
Petia Krasteva, David Inkermann, Thomas Vietor
Technische Universität Braunschweig.....269

Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor – Konzipierung und Implementie-
rung eines Live-Lab
Benjamin Walter, Albert Albers, Fabian Haupt, Nikola Bursac
Karlsruher Institut für Technologie.....283

Methodische Variantenerzeugung zur Entwicklung eigenschaftsoptimierter
Karosseriekonzepte in Mischbauweise
Jan Hasenpusch, Andreas Hillebrand, Thomas Vietor
Volkswagen AG, TU Braunschweig.....297



Keynotes

Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Entwicklung von Plattformantrieben in Power-tools

Josef Ponn
Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH

Systematische Baukastenentwicklung in der Nutzfahrzeugindustrie

Matthias Kreimeyer
MAN Truck & Bus AG

VDI 2221 - Die neue Richtlinie

Beate Bender
*Lehrstuhl für Produktentwicklung
Ruhr-Universität Bochum*



Projekt ModSupport – Methodische Entwicklung eines innovativen Modulbaukastens für Aufzugsanlagen

Nicolas Gebhardt¹, Gregor Beckmann¹, Sebastian Lüsebrink², Nikolai Fischer², Hans Martin Lutz², Dieter Krause¹

¹ *Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg*

² *Lutz Aufzüge
Hans Lutz Maschinenfabrik GmbH & Co. KG*

Abstract

Many small and medium size enterprises (SME) successfully offer high product variety as a strategy to compete against bigger companies. The trend of globalisation with more emerging companies on the market fosters this further. This strategy often leads to an increased internal variety of components and processes with higher complexity costs, which finally outweigh the intended profits. Lutz Elevators solved this problem by new module kit elevators and a corresponding configure-to-order process. Development and implementation of the modular product structures and processes were undertaken in the joint research project ModSupport with the Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design at the Hamburg University of Technology. This paper gives a conclusion on the project case.

Keywords: Modularization, Product development processes, Methods, Tools

1 Einleitung

Viele klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) setzen auf Qualität und Individualität als Marktvorteil gegenüber Großanbietern. Die Nachfrage nach kundenspezifischen Lösungen wird weiter ansteigen [1]. Da immer mehr internationale Anbieter hinsichtlich der Qualität aufschließen, gilt es diesen Vorteil weiter auszubauen. Eine breite Angebotsvielfalt zieht allerdings eine entsprechend große Vielfalt an Komponenten und Prozessen nach sich. Diese unternehmensinterne Komplexität (steigende Artikelanzahl, Prozessausnahmen, Sonderlösungen, ...) verringert die Transparenz, erhöht die Fehlerraten und Durchlaufzeiten und kann so den Mehrwert der kundenindividuellen Leistungserfüllung zum Unternehmensrisiko werden lassen [1]). Um in dieser Problemsituation eine hohe Angebotsvielfalt bei gleichzeitig geringer internen Vielfalt anbieten zu können, haben das Unternehmen Lutz Aufzüge und das Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der TU Hamburg-Harburg das KMU-innovativ-Projekt „ModSupport“ ins Leben gerufen. Ziel ist die Überführung der auftragsbezogenen Aufzugsentwicklung in die Konfiguration mithilfe eines neu zu entwickelnden modularen Produktprogramms von Aufzügen. Das Projekt wurde Ende 2015 erfolgreich abgeschlossen und wird hier als Fallbeispiel für die methodische Entwicklung modularer Produktfamilien vorgestellt.

2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Das mittelständige Unternehmen Hans Lutz Maschinenfabrik entwickelt und fertigt als Teil der familiengeführten Lutz Aufzüge Firmengruppe kundenindividuelle Aufzugsanlagen für Gebäude und Schiffe (Bild 1). Großkonzerne wie ThyssenKrupp, KONE, OTIS Elevator oder Schindler Aufzüge bestimmen dabei den Aufzugsmarkt. Die Konzentration des Unternehmens auf hochwertige und kundenindividuelle Anlagen sowie solche auf Schiffen und Off-shore-Plattformen ermöglicht eine erfolgreiche Nischenstrategie.



Bild 1: Beispiele der hochwertigen und individuellen Anlagen von Lutz Aufzüge

Die hohe Individualität führte jedoch durch interne Vielfalt an Komponenten und Prozessen zu kritischen Durchlaufzeiten und Fehlerraten. Ziel von Lutz Aufzüge war es daher, im Projekt ModSupport die auftragsbezogene Konstruktion durch eine Konfiguration mithilfe eines neuen Modulbaukastens abzulösen und so variante Kundenwünsche mit minimaler interner Vielfalt bedienen zu können. Dazu waren Kompetenzen und Prozesse für die Entwicklung, Nutzung und kontinuierliche Weiterentwicklung („Pflege“) eines Modulbaukastens aufzubauen. Ziel war die Reduktion der Durchlaufzeiten und Fehlerraten in Konstruktion und Fertigung um 50 % bei Erhalt der Flexibilität für das obere Preissegments.

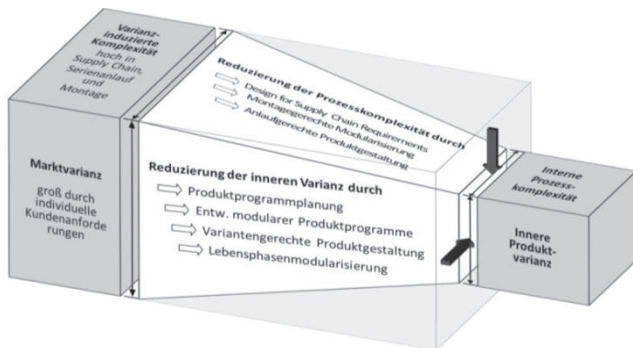


Bild 2: Integrierter PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien

Der *Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien* [2] (Bild 2) verfolgt das Ziel, eine hohe Angebotsvarianz mit einer möglichst kleinen internen Produkt- und Prozessvarianz abzubilden. Er integriert verschiedene Ansätze aus der Literatur und wurde in zahlreichen Forschungs- und Industrieprojekten erprobt und weiterentwickelt [3]. Wesentliche Alleinstellungsmerkmale sind das team- und workshoporientierte Vorgehen, produkt-nahe Visualisierungswerkzeuge und die durchgehende Unterstützung bis zur Komponentengestaltung. Bisherige Modularisierungsansätze haben sich nur in wenigen Firmen dauerhaft etabliert. Bei steigenden Komplexitätskosten wird häufig eine einmalige Bereinigungen des Portfolios auf Basis externen Knowhows durchzuführen. Um speziell die selbstständige Anwendbarkeit des Ansatzes für KMU zu gewährleisten, war es das wissenschaftliche Ziel am Projektbeispiel Verbesserungsbedarfe zu identifizieren, den Ansatz entsprechend zu erweitern und im Unternehmen die Integration der Methoden zur selbständigen, langfristigen Beherrschung der Varianz sicherzustellen.

3 Vorgehen – Entwicklung des neuen Modulbaukastens

Diese Umstrukturierung wurde methodisch durch das Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) begleitet (Bild 3). Dabei wurde der *Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien* angewendet und weiterentwickelt. Das Portfolio wurde an den Kundenbedürfnissen ausgerichtet und ein modularer Baukasten gestaltet.

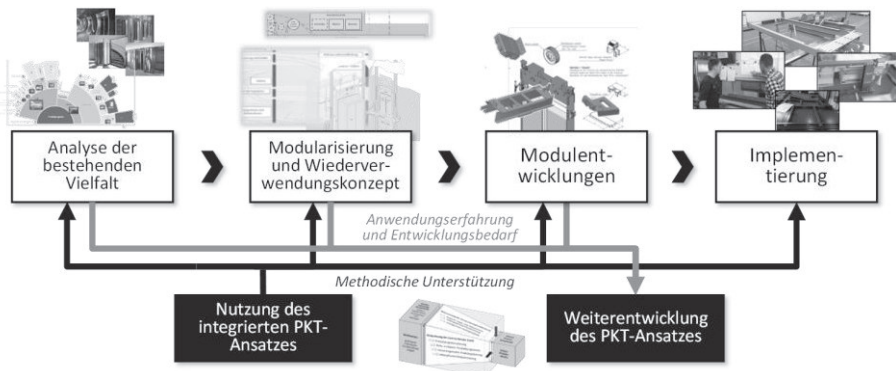


Bild 3: Übersicht des Vorgehens im Projekt ModSupport

In einer initialen Analyse der internen und externen Varianz wurde das Produktprogramm neu strukturiert und der Leistungsumfang des neuen Modulbaukastens gemeinsam durch die Geschäftsführung, dem Vertrieb und der Konstruktion erarbeitet. Diese Aufgabe wurde in Anlehnung an die *Methode zur strategischen Planung modularer Produktprogramme* mithilfe eines sog. *Program Structure Models* (PSM) ausgeführt [5] und bildete einen wichtigen Grundstein für das Projekt. Die Festlegung der neuen Modulgrenzen wurde im Projekt mithilfe der Methodenbausteine der *Variantengerechten Produktgestaltung* und der *Lebensphasenmodularisierung* [6], [7], [8] durchgeführt. Die Modulstruktur des neuen Baukastens wurde an die Anforderungen aller Lebensphasen des Unternehmens angepasst, wobei als grundlegendes Prinzip keine starre Modulstruktur im Unternehmen vorgesehen wird. Eine Gegenüberstellung und Harmonisierung der Wunsch-Modularisierungen aus den Lebensphasen bietet dagegen Vorteile für alle Lebensphasen und kann einen effizienteren Durchlauf der Produktentstehung ermöglichen. Da Lutz Aufzüge dabei ebenfalls die gesamte Auftragsabwicklung bis hin zur Anlagenmontage überarbeitet hat, wurde der sogenannte *Module Process Chart* (MPC) als Werkzeug der Methode der *Lebensphasenmodularisierung* weiterentwickelt und eingesetzt (Bild 4). Der MPC stellt nur die Komponenten pro Modul und Lebensphase da. Ohne weitere Informationen konnten die Abteilungsleiter der

Lebensphasen im Unternehmen jedoch diese nicht gemeinsam diskutieren und verbessern. Daher wurden für jede Lebensphase die wichtigen Informationen zur Handhabung der Module ergänzt, wie sie im Anlagenbau typisch sind – vor allem logistische Lösungen, wie Vormontagegestände und Auslieferreihenfolgen. Diese Ergänzung verbesserte die Kommunikation zwischen den Lebensphasen und Verwendung in den Lebensphasen deutlich.

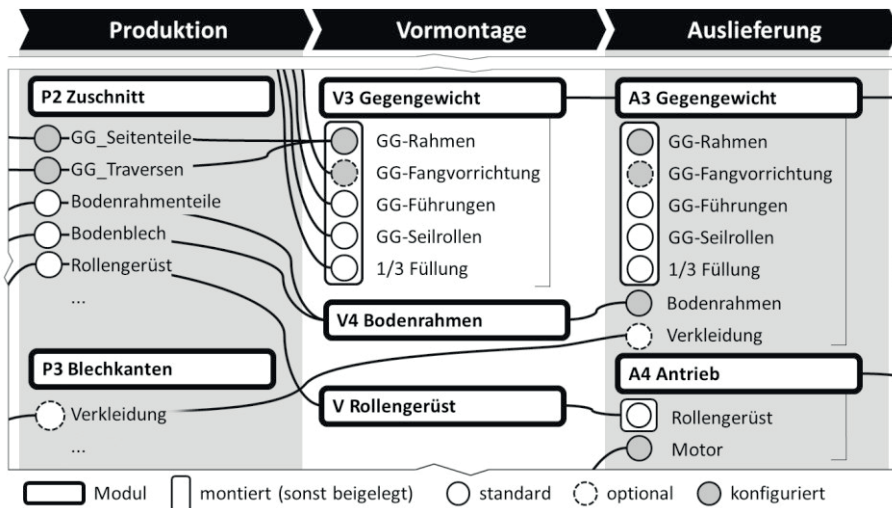


Bild 4: Beispiel der Module und des Modulprozesses im erweiterten Module Process Chart (MPC)

Die neuen Module wurden für die aufwandsarme Konfiguration der Aufzugsvarianten so entwickelt, dass differenzierende Produkteigenschaften aus Kundensicht möglichst direkt durch entkoppelte und kostengünstige Konfigurationsmodule bereitgestellt werden können, und durch Konfigurationskataloge für den Vertrieb, Moduldatenblätter, parametrisierte CAD-Modelle und Produktionsunterlagen dokumentiert (Kapitel 5).

4 Vorgehen – Entwicklung der neuen Prozesslandschaft

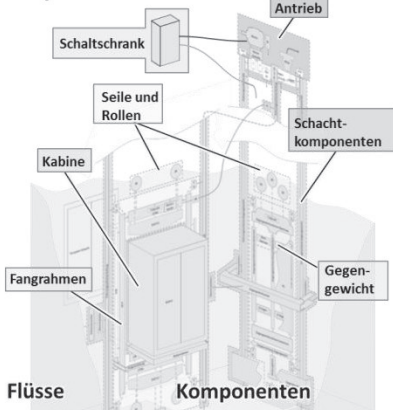
Die Umstellung von einer Engineer-to-Order (EtO) Strategie hin zu einem Configure-to-Order (CtO) benötigte wesentliche Prozessneuerungen, die neben dem neuen Modulbaukasten als technisches Ergebnis im Projekt erarbeitet und implementiert wurden. Ergebnis ist eine neue Prozesslandschaft für Auftragsbearbeitung, Fehlermeldung und -behebung sowie Entwicklung und Pflege des Modulbaukastens inklusive der wesentlichen Methoden und Werkzeuge (Kapitel 6). Zur Erarbeitung der neuen Prozesse wurde ein neuer me-

thodischer Ansatz zum Transfer von Methoden in KMU erprobt, der am Institut PKT entwickelt wurde [10], [11]. Mithilfe der „visuellen Methodendarstellung“ (VMeD) wurde die Prozess- und Organisationslandschaft analysiert und die neuen Prozesse inklusive Methoden und Werkzeuge der Teilschritte durch Auswahl, Adaption und Implementierung erarbeitet. Ein am Institut PKT entwickelter Pflegeprozesses für modulare Produktfamilien wurde als Grundlage genutzt und weiterentwickelt [9]. Neue Anforderungen werden analysiert, Lösungsmaßnahmen abgeleitet und so eine unkontrollierte Zunahme der internen Vielfalt verhindert. Die neuen Prozessverbesserungen wurden durch Anpassungen der EDV und neue sowie adaptierte Methoden unterstützt. Wesentlicher Bestandteil des *Integrierten PKT-Ansatzes* sind speziell entwickelte Visualisierungen der relevanten Produktinformationen, die in der Produktentwicklung die Aufmerksamkeit fokussieren, Verständnis vermitteln und Teamarbeit koordinieren. Visualisierungen senken die kognitive Belastung der Bearbeiter, fördern die Kreativität und können auch abstrakte Informationen vermitteln. Um Visualisierungen als Werkzeuge in der Produktentwicklung individuell auf die zu unterstützende Arbeitssituation auszurichten, wurde im Rahmen des Projektes eine *Methode zur Entwicklung von Visualisierungen als Werkzeuge in der Produktentwicklung* erarbeitet und erprobt. [12]

5 Ergebnisse – Innovativer Modulbaukasten zur Konfiguration von Aufzugsanlagen

Der neue Modulbaukasten ist der Grundstein für die neue Unternehmensstrategie und wird kontinuierlich weiterentwickelt (Bild 5). Die Aufzugsanlagen sind in Hauptmodule unterteilt, die in fast jeder Anlage verbaut werden. Diese werden durch wenige, einfache Submodule auf Basis der Vertriebsdaten konfiguriert, bei besonderen Kundenwünschen durch Anpass- oder Sonderkonstruktionen ergänzt und der Fertigung übergeben. Die Module umfassten zu Projektende bereits ca. 60% aller ausgelieferten Baugruppen und können mit einem Bruchteil der bisherigen Durchlaufzeit ausgeliefert werden. Die Konfiguration der Angebotsvielfalt ist deutlich vereinfacht. Beispielsweise können die neuen Fangrahmenmodule in ca. 40% der bisherigen Konstruktionszeit konfiguriert werden und dabei aus 23 Komponenten rechnerisch über 1,4 Mio. Fangrahmenvarianten erzeugt werden. Auch die Fehlerraten sind durch die neuen Modulstandards stark gesunken. Die Aufwände zur Entwicklung, Dokumentation und Implementierung des neuen Modulbaukastens sind damit bereits kurz nach Projektende amortisiert.

Hauptmodule



- Strukturverbindung
- Elektrische Leistung
- Informationsfluss
- standard
- variant
- optional
- parametrisi
- variante Anzahl

Antrieb	MR-13A-02	MR-13B-01	MR-13C-01	MR-15A-01	
	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell
	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation
Fangrahmen	FR-15E-01	FR-15F-01	FR-15G-01	FR-13D-02	FR-15A-01
	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell
	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation
Seile und Rollen	SA-12A-01	SA-12B-01	SA-12C-01	SA-12D-01	SA-12E-01
	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell	● CAD-Modell
	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation	● Dokumentation

- fertiggestellt
- in Arbeit
- nicht vorhanden
- ✎ aktuell in Überarbeitung, Überarbeitung notwendig

Bild 5: Übersicht und Ausschnitt des neuen Lutz Modulbaukastens

6 Ergebnisse – Referenzprozesse für die Entwicklung und Nutzung modularer Produktstrukturen

Zur Nutzung des neuen Modulbaukastens in einer CtO-Strategie und dessen zukünftigen Pflege und Weiterentwicklung ist eine neue, dreiteilige Prozesslandschaft entwickelt und implementiert worden.

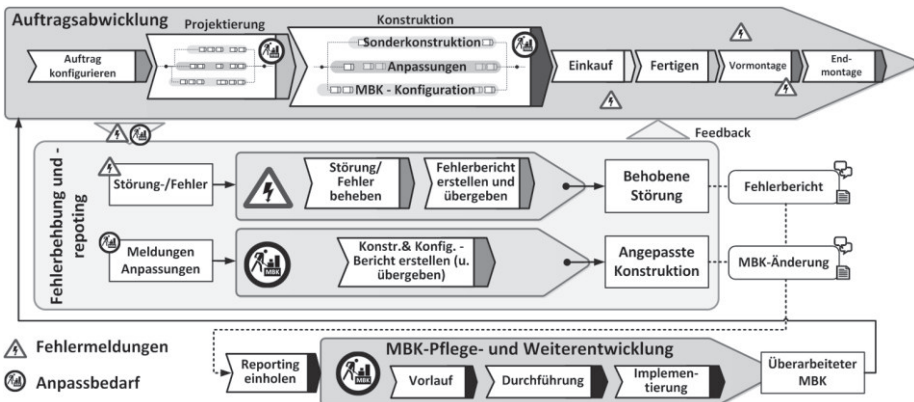


Bild 6: Neu entwickelte Prozesslandschaft

Im *Auftragsbearbeitungsprozess* (Bild 6, oben) sind zusätzlich wiederum drei Bearbeitungsmodi vorgesehen – „Konfiguration“ durch den Modulbaukas-

ten, „Anpassungskonstruktion“ eines bestehenden Modules für einen Auftrag und „Sonderkonstruktion“ eines Modules. Die Pfade ermöglichen nach Vertriebsvorgabe optimal ausgerichtete Arbeitsschritte. Der *Reporting- und Fehlerbehebungsprozess* (Bild 6, mittig) nimmt automatisiert im Intranet Fehlermeldungen und Vorschläge auf, setzt sie für das Auftragsgeschäft direkt um und filtert nach relevanten Inhalten für die Weiterentwicklung des Modulbaukastens. Der neue *Modulbaukasten-Pflege und Weiterentwicklungsprozess* (Bild 6, unten) realisiert Verbesserungen der Module bevor fehlerhafte Modulvorlagen erneut verwendet werden. Gleichzeitig werden Inputs von Vertriebs- und Geschäftsleitung zur strategischen Ausrichtung des Modulbaukastens umgesetzt.

Die neue Prozesslandschaft wurde basierend auf bestehender Forschung am Institut PKT erstellt [9], [10], sodass die Anwendbarkeit für modularen Produktstrukturstrategien allgemein unterstützt wird. Gleichzeitig wurde im Projekt ein neuer methodischer Ansatz zum Transfer von Methoden in KMU entwickelt und erprobt [11], sowie eine Methode zur Entwicklung von Visualisierungen als Werkzeuge in der Produktentwicklung [12]. Ein wesentlicher Aspekt in der Entwicklung des Modulbaukastens liegt in der fachlichen und methodischen Kompetenz der Mitarbeiter. Neben der kontinuierlichen Schulungen und Moderation während des Projekts konnten Mitarbeitern von Lutz Aufzüge Kompetenzen in zweitägigen Lehrgängen am Institut PKT zur Entwicklung modularer Produktfamilien aufbauen (Bild 7, [13]).



Bild 7: Weiterbildungsworkshops in Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien am Institut PKT mit Lutz Aufzüge und weiteren Unternehmen

7 Ergebnisse des Fallbeispiels Lutz Modulbaukasten

Durch den neuen Modulbaukasten konnte die angestrebte Halbierung von Durchlaufzeiten und Fehlerraten mit vereinfachter Konfiguration bei stark reduzierter interner Vielfalt erreicht werden. Neben dem Modulbaukasten trugen vor allem die neuen Prozessen und Methodenkompetenzen im Unternehmen sowie die angepasste EDV-Unterstützungen wesentlich zum Erfolg bei. Die Schulung der Mitarbeiter in Methoden der Entwicklung modularer

Produktstrukturen nahm eine Schlüsselrolle ein, wobei vor allem das Bewusstsein über die Potentiale und die zu vermeidenden Risiken wichtig ist. Ein Umdenken von der Bewertung der Herstellkosten alternativer Lösungskonzepte alleine hin zur Beachtung von Einsparungsmöglichkeiten in den Komplexitätskosten, die deutlich größer sein können, war ein wichtiger Faktor.

Die Weiterentwicklung des *Integrierten PKT-Ansatzes* können KMU unterstützen, eine Modulstrategie selbstständig und gewinnbringend zu entwickeln und mit passenden Prozessen zu implementieren. Die geringen Stückzahlen, dynamische Kundenanforderungen und geringe Ressourcen für die Vorentwicklung stellen besondere Anforderungen an die methodische Unterstützung der Produktentwicklung und Konstruktion. Eine Interview-Umfrage unter den Abteilungsleitern der Konstruktion, der Produktion und Vormontage sowie unter den Projektarbeitern zeigte, dass die sorgfältige Auswahl und Adaptation methodischer Lösungen im Projekt besonders wichtig war. Im Rahmen der Umfrage wurden unter anderem die selbstständige Anwendung der im Projekt genutzten Methoden, deren Weiterentwicklung nach Projektende und eine Bewertung der Maßnahmen in Schulnoten abgefragt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Auszug der Ergebnisse der Umfrage zur Methodenintegration

Im Projekt genutzte Methoden und Werkzeuge	Anwendung	Weiterentwickelt	Bewertung*
Modulbaukastenübersicht	<input checked="" type="checkbox"/> ↗	stark	2,0
Modulsteckbriefe	<input checked="" type="checkbox"/> ↗	leicht	1,8
Neue Modulbaukastenprozesse (Bild 6)	<input checked="" type="checkbox"/> ↗	stark	2,0
Parametrisierte CAD-Modelle	<input checked="" type="checkbox"/>	keine	1,7
Übersicht Modulbaukasten-Planung (Roadmap)	<input checked="" type="checkbox"/>	k.A.	2,0
Variety Allocation Model (VAM, siehe [8])	<input checked="" type="checkbox"/>	leicht	2,0
Vielfaltsliste (vereinfachter Vielfaltsbaum, siehe [2])	<input checked="" type="checkbox"/> ↗	leicht	2,8
Carry-over Chart (siehe [2])	<input type="checkbox"/>	sehr stark	2,0
Module Interface Graph (MIG, siehe [8])	<input type="checkbox"/>	k.A.	2,3
Programm Structure Model (PSM, siehe [5])	<input type="checkbox"/> ↗	k.A.	2,5
Vertriebsformular	<input type="checkbox"/> ↗	k.A.	2,0
Erweiterter Module Process Chart (MPC, Bild 4)	<input checked="" type="checkbox"/> ↗	k.A.	2,0
Komponentensteckbriefe	<input checked="" type="checkbox"/>	k.A.	3,5
Softwareprototyp für das Baukastenfeedback	<input checked="" type="checkbox"/>	k.A.	4,0
<input checked="" type="checkbox"/> Selbstständige Anwendung; <input type="checkbox"/> Anwendungsergebnisse aus Projekt werden weiterverwendet; <input checked="" type="checkbox"/> keine; ↗ Stärkere Nutzung in Zukunft gewünscht; * in Schulnoten			

Von den gelisteten 14 Maßnahmen Tabelle 1 werden sieben selbstständig durch das Unternehmen weitergeführt, vier werden nur passiv als Projektergebnis genutzt, z.B. als Informationsquelle. Die weiterhin genutzten Maßnahmen wurden durch das Unternehmen nach Projektende selber weiterentwickelt (Tabelle 1). Bei der Hälfte der Maßnahmen wird eine starke Nutzung gewünscht. Es wird deutlich, dass insbesondere Methoden, die für das Unternehmen angepasst oder speziell im Projekt entwickelt wurden, am besten bewertet wurden und am intensivsten genutzt werden. Herauszustellen sind

die neuen Modulbaukastenprozesse (Bild 6), die übergreifend im Unternehmen verwendet werden und weiter ausgeweitet werden sowie die neuen Modulsteckbriefe, die die klare Kommunikation der neuen Modulbaukastenstrategie ermöglichen. Im Rahmen dieser übergeordneten Prozesse werden auch bestehende Werkzeuge, wie das Variety Allocation Model, selbstständig durch die neu geschaffene Position des Modulbaukastenverantwortlichen verwendet. Neben dieser Nutzung der obigen Maßnahmen hat sich das Verständnis der Thematik Produktvarianz im Unternehmen deutlich verbessert, so geben alle Befragten an, dass das Unternehmen auch nach dem Projekt besser in der Lage ist selbstständig mit der hohen Produktvarianz umzugehen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Modulare Produktstrukturen bilden für viele KMU eine geeignete Produktstrukturstrategie, um Kosten und Durchlaufzeiten durch eine geringe interne Komplexität senken zu können, gleichzeitig aber eine hohe Produktvielfalt anzubieten. Mit entsprechend angepassten Prozessen können ebenfalls individuelle Kundenwünsche mit vergleichsweise geringem Mehraufwand in den Produkten umgesetzt werden. Das Unternehmen Lutz Aufzüge realisierte eine solche Produktstruktur- und Prozessstrategie in einer Umstellung der Auftragsabwicklung und Entwicklung auf eine Configure-to-Order Strategie mithilfe eines neuen Modulbaukastens.

Mittlerweile werden mehr als 60% der ausgelieferten Module aus dem neuen Baukasten bedient und die angestrebten Einsparungseffekte in Durchlaufzeiten und Fehlerraten konnten erreicht und übertroffen werden. Mit den neuen Erfahrungen und Kompetenzen wird 2016 das Prinzip auf die Kabine übertragen. Dies ist durch Bauraumverhältnisse und hohe Kundenanforderungen besonders herausfordernd, bietet aber durch die hohe Produktvielfalt großes Potential. Der neue Modulbaukasten und die überarbeitete Prozesslandschaft bietet eine Grundlage für eine digitale Unterstützung vieler Arbeitsschritte. So kann Dokumentation im Unternehmen vereinfacht werden. Ein Online-Konfigurator soll in Zukunft den Vertrieb deutlich beschleunigen.

Im Rahmen des Projektes konnte der *Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien* als Methodenbaukasten um wesentliche Methoden erweitert werden, die gerade für KMU wichtige Lösungsansätze bereitstellen. Diese sind die Pflege modularer Produktstrukturen nach Markteintritt [9], ein methodischer Ansatz zum Transfer von Methoden in KMU [11], sowie ein Vorgehen zur Entwicklung von Visualisierungen als Werkzeuge in der Produktentwicklung [12]. Viele Potentiale der modularen Produktstrukturierung sind bekannt, können aber in der Praxis aufgrund ihres zeitversetzten Auftre-

tens selten richtig eingeschätzt werden. Aufgrund dieser langfristigen Auswirkungen von Modularisierungsentscheidungen, gerade im Aufzugsbau mit einer Produktlebensdauer von bis zu 30 Jahren und intensiver Bindung des Herstellers an die Anlagen durch Serviceverträge, ist eine regelmäßige, nachträgliche Untersuchung bei Lutz Aufzüge besonders vielversprechend.

Danksagung

Das Projekt ModSupport wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02PK2314 im Rahmen der Förderinitiative KMU-innovativ Produktionsforschung beim Projektträger Karlsruhe gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Autoren danken allen Beteiligten am Projekt ModSupport für ihre Unterstützung!

Literatur

- [1] VDMA, McKinsey & Company: Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau – Erfolgreich in einem dynamischen Umfeld agieren, 2014.
- [2] Krause, D.; Beckmann, G.; Eilmus, S.; Gebhardt, N.; Jonas, H.; Rettberg, R.: Integrated Development of Modular Product Families: A Methods Toolkit. In: Simpson, T.W., Jiao, J., Siddique, Z., Hölttä-Otto, K. (Hrs.), *Advances in product family and product platform design*, Springer New York, S. 245-269, 2014.
- [3] Eilmus, S.; Gebhardt, N.; Rettberg, R.; Krause, D.: Evaluating a methodical approach for developing modular product families. 12th International Design Conference, Dubrovnik, 2012.
- [4] Franke, H.-J.: *Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung*. Hanser Verlag, München, 2002.
- [5] Jonas, H.: *Eine Methode zur strategischen Planung modularer Produktprogramme*. Dissertation TU Hamburg-Harburg, TuTech Verlag Hamburg, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Band 6, 2014.
- [6] Kipp, T.: *Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung*. Dissertation TU Hamburg-Harburg, TuTech Verlag Hamburg, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Band 4, 2012.

-
- [7] Bles, C.: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. Dissertation TU Hamburg-Harburg, TuTech Verlag Hamburg, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Band 3, 2011.
- [8] Kipp, T.; Bles, C.; Krause D.: Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien, Design for X - Beiträge zu 21. DfX-Symposium, Hamburg, 2010.
- [9] Bahns, T.; Beckmann, G.; Gebhardt, N.; Krause, D.: Sustainability of Modular Product Families. 20th International Conference on Engineering Design, Mailand, 2015.
- [10] Beckmann, G.; Krause, D.: Process Visualisation of Product Family Development Methods, 19th International Conference on Engineering Design, Seoul, 2013.
- [11] Beckmann G.; Gebhardt N.; Bahns T.; Krause D.: Approach to Transfer Methods for Developing Modular Product Families into Practice. 14th International Design Conference, Dubrovnik, 2016.
- [12] Gebhardt, N.; Krause, D.: A Method for Designing Visualisations as Product Development Tools. 14th International Design Conference, Dubrovnik, 2016.
- [13] Krause, D.; Beckmann, G.; Gebhardt N.; Ripperda S.; Kruse, M.: Industrieworkshop Weiterbildung Modularisierungsmethoden, wissenschaftliche Aus- und Weiterbildung von Ingenieuren am 5. und 06. September 2013, TUHH, Hamburg.

Komplexität im U-Bootbau beherrschen – ein methodischer Ansatz

Sandra Eilmus¹, Eren Erkul², Thomas Gumpinger¹, Robert Munde², Dr. Marc Pein², Sven Werner²

¹ *Odego GmbH*

² *thyssenkrupp Marine Systems*

Abstract

Managing complexity is a crucial success factor building highly integrated technological products as submarines are. Facing this challenge thyssenkrupp Marine System developed a methodical approach combining Model Based Systems Engineering (MBSE) with modular product family design. To ensure applicability a product architecture model is developed and realized by a software tool. The underlying meta-model is enhanced with domains and partial models supporting modularization.

Keywords: Modularization, Systems Engineering, Modelling, Complexity

1 Ausgangslage an zwei Beispielen aus der Praxis

Produktentwicklungsprozesse im U-Bootbau unterliegen Randbedingungen, die ein durchgängiges Komplexitätsmanagement auf verschiedenen Ebenen erfordern. Geringe Stückzahlen und hohe Kundenindividualität führen zu hohen wiederkehrenden Aufwänden in der Produktdefinition und Entwicklung. Extrem lange Zeiten vom Auftrag bis zur Auslieferung und hohe Absicherungsaufwände erzeugen komplexe und langwierige Prozesse. Die ausgeprägte technische Komplexität der Produkte sowie der hohe Integrationsgrad ver-

stärken die Aufwände hervorgerufen durch Produktvielfalt, Anforderungsvielfalt und diverse beteiligte Disziplinen.

Die folgenden zwei kurzen Beispiele veranschaulichen oben genannte Komplexität, sowie die Notwendigkeit, zwischen Organisationseinheiten abgestimmte Prozesse zu etablieren.

U-Boote besitzen sogenannte Tauchzellen, um den Auftrieb des Bootes beeinflussen zu können. Diese Zellen sind unten offene Tanks im Außenschiff, die Be- und Entlüftungsventile besitzen, um Seewasser in den Tank hineinströmen zu lassen oder durch Druckluft das Seewasser auszudrücken. Die Zellen besitzen folgende Schnittstellen zu konstruierenden Gewerken: Schiffbau (u.a. Auslegung Stahlstrukturen gegen Überdruck bei dem Ausblasen), Schiffstechnik (Druckluftsystem), Projektierung (Sicherstellen der maximalen Zeit bis die Zelle geleert ist) und räumliche Koordinierung bzw. CAD-Konstruktion der Zellen. Im vorliegenden Beispiel wurde während der Erprobung eines Bootes festgestellt, dass die maximale Zeit zum Leeren der Tauchzellen überschritten wird. Da dieses System über vier verschiedene Organisationseinheiten verteilt ist, gestaltet sich die Fehlersuche entsprechend komplex, da jede Organisationseinheit zunächst die in ihrem Fachbereich liegenden Konstruktionsergebnisse untersucht und mit den bekannten Schnittstellenparametern abgleicht, womit entsprechende Zeitaufwände verbunden sind. Die Lösung des Problems liegt in der interdisziplinären Betrachtung des Problems, unabhängig von der Organisationseinheit. Hierbei wurde festgestellt, dass eine Druckerhöhung des Ausblasedrucks aufgrund der Festigkeit der Zellen nur mit hohem Umbaufwand möglich ist, jedoch die Reduzierung der Druckverluste des ausströmenden Wassers durch Änderungen der Rohrleitungsdimensionierung vergleichsweise einfach möglich ist, womit die geforderte Zeit zum Leeren erfüllt wurden. Fehlerursache sind damit unklare Zuständigkeiten für die Gesamtfunktion des Systems, sowie ungenügende Schnittstellenbeschreibungen der Systemnahtstellen. Wie im Folgenden gezeigt wird, lässt sich beides durch Einsatz einer systemorientierter Organisation und strukturierter Methoden vermeiden.

Das zweite Beispiel beschreibt die Wirkung von Variantenvielfalt am Beispiel von Armaturen (z.B. Kugelhähne, Ventile...). Verschiedene Kundenanforderungen, daraus resultierende Auslegungskriterien, Anforderungen an die Zertifikate und eine Vielzahl eingebundener Personen zu verschiedenen Zeitpunkten führen dazu, dass die Wiederverwendung gleicher Armaturen in der gleichen Bootsklasse oder über verschiedene Bootsaufträge hinweg minimal sein kann. Im Extremfall können verschiedene Organisationsbereiche, z.B. die Schiffstechnik einen Kugelhahn für das Seekühlwassersystem beschreiben,

der in den Anforderungen und der Dimensionierung genau dem Kugelhahn entspricht, den die Kollegen des Waffenrohres anfordern. Beide Organisationseinheiten fragen anschließend die Armatur getrennt bei Herstellern an. Einhergehend treten Aufwände bei der administrativen Bewirtschaftung im PLM-System auf. Ohne organisationsübergreifende Instanz, die solche Doppelbeschreibung und -anfragen verhindert, ist der Armaturenvialt keine Grenze gesetzt. Um diese zu begrenzen, bedarf es eindeutiger Definitionsprozesse, im PLM verfügbare, standardisierte Beschreibungen von Armaturen und deren Modelle, sowie modular aufgebaute Armaturen, um mit geringer interner Varianz eine größtmögliche Abdeckung der Anforderungen zu erlangen.

2 Methodischer Ansatz

Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, wird im Rahmen des Projekts Subflex ein neuer Ansatz auf den Ebenen Methode, Prozess und Modellbildung entwickelt (Abbildung 1).

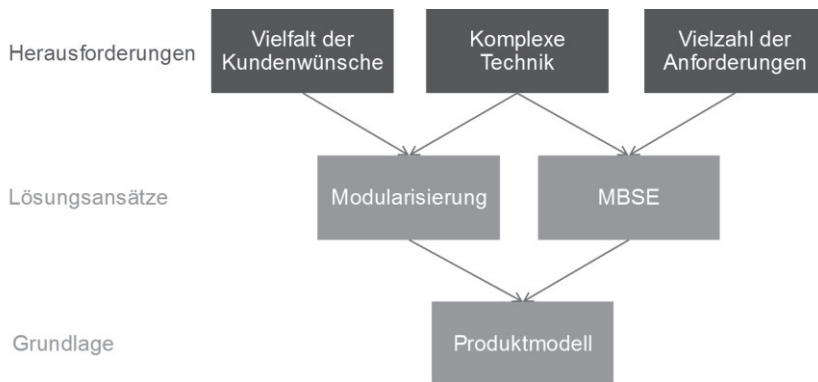


Abbildung 1: Herausforderung, Lösungen und Grundlagen für das Komplexitätsmanagement im Schiffbau

Um sowohl die technische als auch die varianzinduzierte Komplexität zu handhaben, werden modulare Strukturen entwickelt. Kundenaufträge werden zukünftig aus einem modularen Baukasten konfiguriert. Methoden der Modularisierung aus dem Integrierten PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien [1] gelten als Grundlage dafür und werden für die spezifischen Anforderungen weiterentwickelt.

Systems Engineering (SE) ermöglicht einen transparenten Prozess über die gesamte Wertschöpfungskette. SE ist ein bereichsübergreifender Ansatz

und ein Mittel, um die erfolgreiche Realisierung von anforderungsgerechten Systemen zu ermöglichen. Es konzentriert sich darauf, Kundenbedarf und erforderliche Funktionalität früh im Entwicklungsprozess zu definieren, Anforderungen zu dokumentieren und dann fortzufahren mit Designsynthese und Design-Bestätigung unter Berücksichtigung aller Aspekte des Lebenszyklus: Anwendung, Kosten und Zeitplan, Leistung, Schulung und Unterstützung, Nachweis, Produktion und Verwertung. SE berücksichtigt sowohl den wirtschaftlichen als auch den technischen Bedarf aller Kunden mit dem Ziel, ein Qualitätserzeugnis bereitzustellen, das den Benutzerbedarf deckt [2].

In diesem Kontext ist ein System eine Kombination aus interagierenden Elementen, um ein oder mehrere festgelegte Zwecke zu erfüllen. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Systems und zwischen dem System und seiner Umgebung abgebildet und untersucht. Die Wechselwirkungen geschehen durch Stoff-, Energie- und/oder Informationsfluss [3].

Diverse Aspekte des SE werden schon seit vielen Jahren bei thyssenkrupp Marine Systems angewendet. Zum Beispiel wird das V-Modell XT in weiten Bereichen eingesetzt. Neu ist die Sammlung und Anpassung der Prozesse an die ISO/IEC 15288 und der modellbasierte Ansatz (MBSE) [2], der auch die Entwicklung eines modular aufgebauten U-Bootes unterstützen soll.

thyssenkrupp Marine Systems hat eine lange Tradition im U-Bootbau. U-Boote wurden und werden an dem Standort Kiel konstruiert und gebaut, lange bevor sich Systems Engineering als Ingenieurdisziplin etabliert hat. Durch einen ständigen Wandel des Unternehmens und dem Einbringen immer neuer punktueller Innovationen (Brennstoffzelle, Antriebstechnologie, Kompositwerkstoffe, Batterietechnologien, Waffensysteme) hat sich das Unternehmen erfolgreich zum Weltmarktführer nicht-nuklearer U-Boote entwickelt. Im globalen Umfeld eines wachsenden Wettbewerbs und steigender Kundenanforderungen ist ein proaktiver Wandel notwendig, um damit die zu erwartenden Bedürfnisse der Kunden zu erfüllen. Die Kosten zu senken, ist ebenfalls ein wichtiger Treiber. Dies wird sowohl durch das Beseitigen von überflüssigen Elementen ermöglicht als auch durch Modularität. Diese sorgt neben der Konfigurierbarkeit für eine erhöhte Flexibilität, die ebenfalls von Kunden erwartet wird. Zuletzt wird sich zukünftig mehr und mehr die Komplexität von U-Booten erhöhen, Off-the-Shelf Forderungen und kürzer getaktete Technologiesprünge in der Mechatronik sind zu erwarten. Ein modularer systematischer Produktentwicklungsansatz ermöglicht hier eine bessere Skalierbarkeit und Austauschbarkeit als der traditionelle Ansatz.

3 Übergeordnetes Architekturmodell

Sowohl die Modularisierung als auch das MBSE greifen auf ein sauber hinterlegtes Produktmodell zurück, siehe Abbildung 2. Dieses wird in einer eigens im Konzern entwickelt und in einer konzernerneigenen Software (Design Database) abgebildet. Kern des Produktmodells ist die systemorientierte Produktstruktur. Diese wird mit Elementen verschiedener anderer Domänen verknüpft, um für jeden Arbeitsschritt bei der Modularisierung und im MBSE die notwendigen Informationen abbilden zu können.

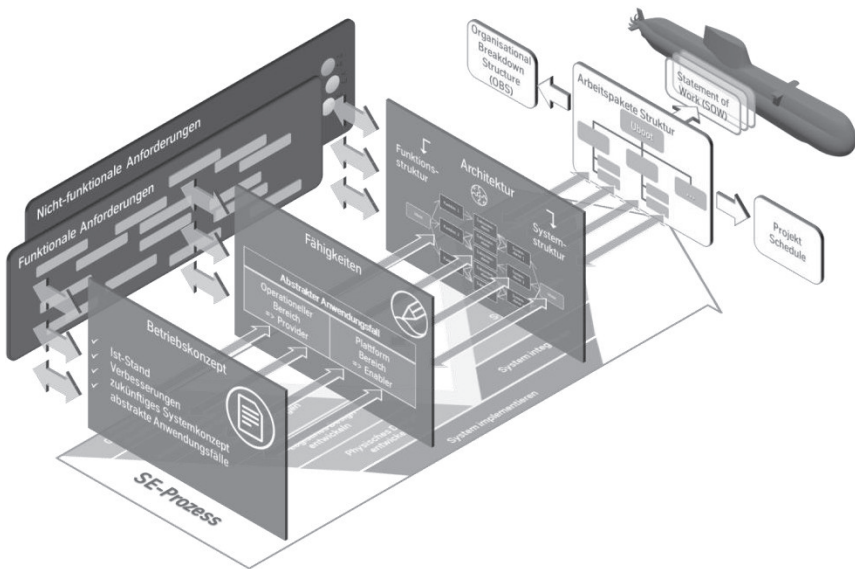


Abbildung 2: thysenkruupp Marine Systems Architekturmodell

3.1 Strukturen im Architekturmodell

Die Systemarchitektur setzt sich aus einer Funktionsstruktur und Systemstruktur zusammen.

Die Funktionen einer technischen Umsetzung des U-Boots sind bekannt. Daher wurde eine Standardstruktur für thysenkruupp Marine Systems entwickelt, die diese hierarchisch gliedert und in der Zukunft für alle U-Boots Entwicklungen herangezogen werden soll. Diese Struktur wird sich weiterentwickeln. Da Funktionen aber technologieunabhängig sind, wird diese Weiterentwicklung relativ langsam vonstattengehen. Die Funktionsstruktur ermög-

licht eine intern standardisierte Sicht auf die Anforderungen des Kunden, die, wenn möglich, den Funktionen innerhalb des Funktionsbaumes zugeordnet werden. Wenn bspw. der Kunde eine bestimmte Mindestverlegegeschwindigkeit fordert, so wird diese Anforderung an der Funktion „Unterwasserfahrt“ & „Überwasserfahrt“ angesiedelt.

Bei der Erstellung einer Funktionsstruktur sprechen der hohe Integrationsgrad von U-Booten und die starke Quervernetzung von Funktionalitäten sowie die mehrfache Nutzung von Systemfunktionalitäten nicht für eine 1:1-Zuordnung von funktionalen Elementen auf physikalische Elemente. Ulrich beschreibt [4], dass integrale Architekturen eine komplexe (nicht 1:1) Zuordnung von funktionalen Elementen zu physikalischen Komponenten und/oder ihrer Schnittstellen aufweisen.

Die Systemstruktur stellt die logische Sicht auf die Komponenten eines U-Boots dar. Dies ist ein zentraler Aspekt, um zu einer modularen U-Bootentwicklung zu kommen. Eine Systemstruktur zu erstellen, die alle Stakeholder zufrieden stellt, erwies sich als eine größere Herausforderung als zunächst angenommen. Insbesondere stellte sich die Frage, inwieweit personelle Verantwortungen, Abteilungsstrukturen, Produktionsstrukturen etc. sich an dieser Struktur orientieren müssen.

Um einen sinnvollen Ausgangspunkt zu haben, wurde das U-Boot methodisch über alle Produktfamilien hinweg in rund hundert Systeme zerlegt. Diese Methodik basiert auf der Analyse der vorhandenen Varianten, der Produktnähe und der Kommunizierbarkeit der Systeme [1]. Als nächstes wurden die Abhängigkeiten dieser Systeme zueinander in Form einer Design Structure Matrix analysiert und zu Clustern zusammengeführt. Zur ersten Gruppierung wurde ein automatischer Algorithmus verwendet, der insgesamt über 80.000 Schnittstelleninformationen auswertete. Da diese mit einem Algorithmus berechneten Gruppierungen rein mathematisch entstehen und ggf. nicht immer technisch sinnvoll sind, wurden sie in Details von Hand überarbeitet.

Konflikte konnten dadurch aufgelöst werden, dass alle Stakeholder die hundert identifizierten Systeme für die richtigen hielten. Vorteil des modellbasierten Ansatzes ist an dieser Stelle, in spezifischen Sichten arbeiten zu können. Da lediglich bei dem hierarchischen Überbau Unstimmigkeiten auftraten, war schnell ein Kompromiss zu finden, der alle Stakeholder im ausreichenden Maße abdeckte.

Durch die intern standardisierten Bäume für Funktionen und Systeme ist nun ein Mapping möglich, welches die Abhängigkeiten untereinander darstellt,

siehe Abbildung 3. Wenn über die Anforderungen die für einen Kunden benötigten Funktionen identifiziert wurden, können deshalb bereits die benötigten (logischen) Systeme aus dem Systembaum identifiziert werden.

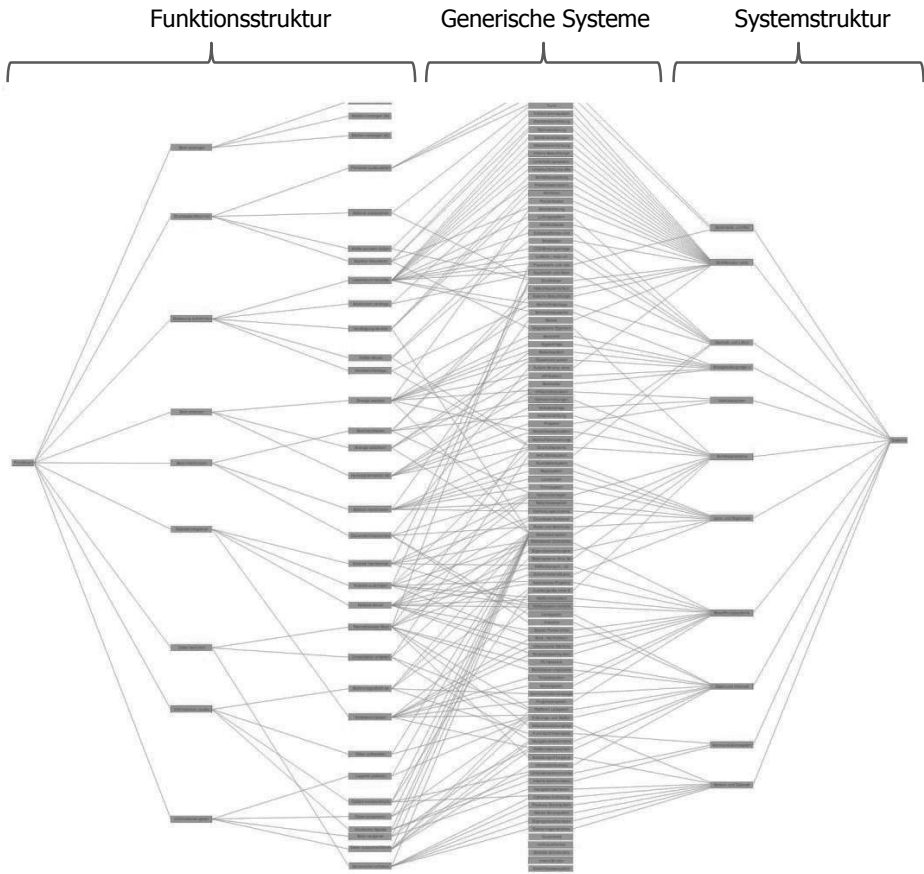


Abbildung 3: Zuordnung von Funktionen zu Systemen

3.2 Zugrundeliegendes Metamodell

Generische Metamodellkonzepte, beschreiben die notwendigen Domänen und Relationen für modulare Produktfamilien. Eine Systematik, in der die zugrundeliegenden Metamodelle von bekannten Ansätzen aus der Fachliteratur analysiert wurde, bieten Hackl et al. [5]. Darauf aufbauend wurde für dieses Projekt ein spezifisches Metamodell entwickelt, das sich in das bestehende Metamodell der bestehenden Software (vgl. Kapitel 3.3) von thysse-



Abbildung 5: Partialmodelle Design Structure Matrix (DSM, oben) und Module Interface Graph (MIG, unten) auf Basis des Metamodells

3.3 Realisierung in der Design Database

Die Design Database (DDB) ist ein Model-Based Systems Engineering-Werkzeug, welches den Design Prozess komplexer Systeme unterstützt. Sie verbindet hierbei in einem Tool verschiedene Entwicklungsphasen komplexer Systeme miteinander, indem Inhalte nachhaltig geschaffen, verknüpft und schließlich sogar in verschiedene Ansichten projiziert werden können.

Über ein eigenes in der Design Database definiertes Metamodell werden Elemente (sogenannten Engineering Elemente) in verschiedenen Domänen auf

einem definierten Detaillierungsgrad modelliert. Mit dieser Modellierung wird ein Informationsnetz geschaffen, aus dem dann komplexe Informationen zu konsistenten Dokumenten zusammengetragen werden.

Die Entwicklung der Design Database begann vor rund 15 Jahren im Konzern, nachdem vorhandene reine Anforderungsmanagementtools die Erkenntnis hervorbrachten, dass für eine durchgängige Anforderungsverfolgbarkeit ein durchgängiges modellbasiertes Tool notwendig ist. Bereits bestehende Tools waren in allererster Linie nicht durchgängig und sicherten außerdem Informationen in nicht-wiederverwendbaren Formaten und erzwangen damit weitere parallele Entwicklungen um diese bestehenden Tools herum. Weiterhin muss ein Tool, welches Anforderungen an das gesamte System beinhaltet im Unternehmen allumfänglich verfügbar sein, was allerdings durch hohe Lizenzkosten bei proprietären Tools gehemmt wird. Diese konzerneigene Entwicklung ist lizenzkostenfrei.

Über die Jahre hinweg wurde die Design Database im Konzern immer weiter entwickelt und an die Unternehmensprozesse und Technologieentwicklungen angepasst. So auch für das SubFlex Projekt. Die methodischen Ansätze die in diesem Projekt entstehen spezifizieren Use-Cases die in der DDB implementiert werden. Dazu gehört unter anderem das Produktfamilienkonzept (Abbildung 6).

Die technische Realisierung des Produktfamilienkonzeptes baut auf eine Dateninfrastruktur auf, in der eine zentrale Produktfamiliendatenbank (PFDB) anderen Projekt- und Auftragsdatenbanken (PDB) als Quelle dient. In der PFDB werden zwischen den einzelnen Engineering Elementen und deren Attributen Constraints gesetzt, welche eine teils automatisierte Übernahme von Fähigkeiten und den dazugehörigen Engineering Elementen in die PDB sicherstellt.

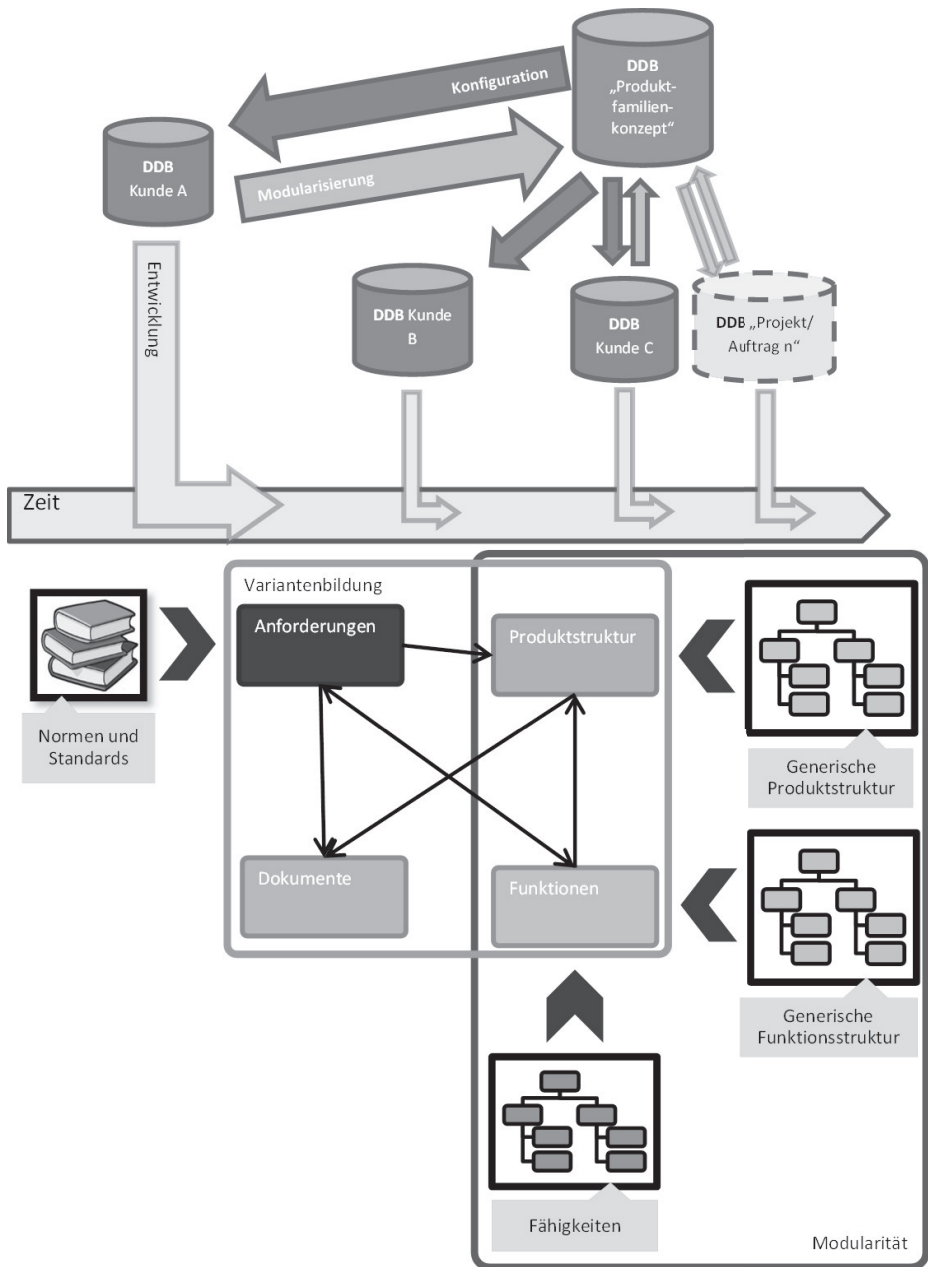


Abbildung 6: Datenkonzept DDB

4 Ausblick und konkreter praktischer Nutzen

Methodik, Prozess und Modellbildung werden derzeit erstmalig generisch erzeugt, um Situationen wie die eingangs beschriebenen Praxisbeispiele zukünftig besser beherrschen zu können. Im Fall der Tauchzellen soll künftig die Zuordnung von Systemen und Funktionen einen ganzheitlichen funktionsorientierten Lösungsansatz ermöglichen. Die Armaturen werden über Variantentreiber modular konfiguriert, was durch die DDB unterstützt werden kann. In nächsten Schritten wird das generische Modell auf ein konkretes Entwicklungsprojekt angewendet und weiterentwickelt.

Literatur

- [1] Krause, D.; Beckmann, G.; Eilmus, S.; Gebhardt, N.; Jonas, H.; Rettberg, R.: Integrated Development of Modular Product Families: A Methods Toolkit. In: Simpson, T. W. et al. (Eds.), *Advances in product family and product platform design*, Springer New York, 2014.
- [2] Tim Weilkiens: "Systems Engineering mit SysML/UML", dpunkt Verlag, 2008
- [3] INCOSE: *Systems Engineering Handbook*, International Council on Systems Engineering, 2006.
- [4] Ulrich, K.: „The role of product architecture in the manufacturing firm“. In: „Research policy: policy and management studies of science, technology and innovation“, Vol24/3, Amsterdam, 1995
- [5] Hackl, J.; Gumpinger, T.; Krause, D.: Generating a meta-model for modularization models, 13th International Design Conference (Design 2014), Dubrovnik (2014).

FEA-Assistenzsystem – Plausibilitätsprüfung für Finite-Elemente-Simulationen mittels sphärischer Detektorflächen

Tobias C. Spruegel, Philipp Kestel, Sandro Wartzack

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)*

Abstract

Finite Element Analysis (FEA) is a very efficient tool for optimizing product performance and quality. Hence, more simulation engineers with a lot of experience are needed, but they are not available. Consequently other users, such as design engineers, should be able to perform valid, reliable FEA. One of the goals of the research cooperation FORPRO² is to create a knowledge-based FEA assistance system with an integrated plausibility check for structural mechanics. Within this paper a methodology for a plausibility check using spherical detector surfaces is presented. Thereby it is possible to reduce any FE simulation to matrices of fixed size for each boundary condition and each FEA result variable. The created matrices can then be combined to form a single larger image. These images can afterwards be classified as plausible or implausible by a Deep Learning Neural Network.

Keywords: FEA assistance system, plausibility check, neural network classification, deep learning

1 Finite-Elemente-Analyse in der Produktentwicklung

Der frühzeitige Einsatz der Finite-Elemente-Analyse (FEA) in der Produktentwicklung ermöglicht die Verkürzung von Entwicklungszeiten, die Steigerung der Innovationskraft, die Reduktion von Produkt- und Entwicklungskosten und die Verbesserung der Produktqualität [1]. Finite-Elemente (FE) Simulationen sind für erfolgreiche Unternehmen unerlässlich [2]. Einerseits steigt hierdurch die Nachfrage nach erfahrenen Berechnungsingenieuren mit langjähriger Berufserfahrung stetig an, andererseits gibt es nicht ausreichend Berechnungsingenieure um der Nachfrage gerecht zu werden. Daher gilt es weniger erfahrene Berechnungsingenieure, wie z.B. Konstruktionsingenieure, bei der Durchführung aussagekräftiger FE-Simulationen zu unterstützen. Im Rahmen des Forschungsprojekts FORPRO² ("Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation") wird ein FEA-Assistenzsystem entwickelt, um sowohl beim wissensbasierten Aufbau [3] als auch bei der wissensbasierten Auswertung [4] zu unterstützen [5]. Zunächst wird daher in Kapitel 2 das gesamte FEA-Assistenzsystem vorgestellt und sowohl Synthese- als auch Analyseteil näher beleuchtet. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit zur Implementierung einer Plausibilitätsprüfung für strukturmechanische Finite-Elemente-Simulationen und die Abgrenzung des Begriffs gegenüber Verifikation und Validierung nach ASME V&V10. Im Rahmen des FORPRO²-Projekts wurde eine Bauteilerkennung mittels sphärischen Detektorflächen entwickelt. Da die Bauteilerkennung als Grundlage der hier vorgestellten Plausibilitätsprüfung dient wird diese in Kapitel 3 anhand von Beispielen erläutert und dann in Kapitel 4 zur Erzeugung von Detektormatrizen aufbauend auf FE-Zielgrößen ausgebaut. Kapitel 5 zeigt das Vorgehen anhand einer strukturmechanischen FE-Simulation einer Speedskating-Schiene und der Erzeugung der für die nachgelagerte Klassifikation notwendigen Detektor-matrizen.

2 Das FEA-Assistenzsystem

Das FEA-Assistenzsystem dient als Schnittstelle zwischen CAD- und FE-System und soll weniger erfahrene Benutzer bei der Durchführung von aussagekräftigen linearen und nichtlinearen strukturmechanischen FE-Simulationen unterstützen. Wie in Bild 1 dargestellt besteht das Assistenzsystem aus Synthese- und Analyseteil.

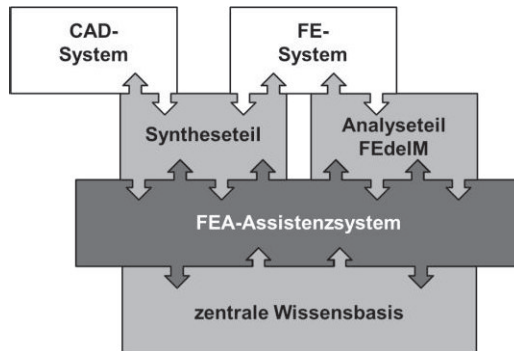


Bild 1: FEA-Assistenzsystem Synthese- und Analyseteil FEdeIM

Der Syntheseteil des FEA-Assistenzsystems dient der Erstellung aussagekräftiger, konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen [7]. Hierzu werden die erforderliche Modellierungsregeln und -methoden rechnerverarbeitbar und kontext-sensitiv in einer zentralen Wissensbasis bereitgestellt. Zudem wird der Aufbau der Simulationsmodelle automatisiert und erfolgt ausgehend von der gewohnten CAD-Arbeitsumgebung des Konstruktionsingenieurs. In Kooperation mit B&W Software wird die CAD-Umgebung von Creo Parametric entsprechend erweitert: Mit dem Schwerpunkt auf verschraubten und geschweißten Gehäusen und Profilkonstruktionen erfolgt die Implementierung des Syntheseteils in der Entwicklungsumgebung von SmartAssembly und durch die Erweiterung der Creo-Zusatzapplikationen IFX (Intelligent Fastener Extension), bisher für die effiziente CAD-Modellierung von Schrauben- und Stiftverbindungen eingesetzt, und AFX (Advanced Framework Extension), für die Gestaltung von Profilträgern und -verbindern. Darüber hinaus wird eine Schnittstelle in MathWorks MATLAB für die Kopplung von Creo Parametric mit dem CAE-System (Computer-Aided Engineering) ANSYS Workbench entwickelt und eine erweiterte STEP-Datei (standard for the exchange of product model data, ISO 10303) als neutrales Austauschformat für die Konstruktions- und Simulationsdaten genutzt. Für den automatischen Aufbau der FEA-Modelle dienen APDL-Skripte (ANSYS Parametric Design Language). [3,7,8]

Bei der Umsetzung des Syntheseteils wird ein feature-basierter Ansatz verfolgt. Bei einem Feature handelt es sich nach VDI 2218 um die Aggregation von Geometrieelementen und/oder Semantik. Bekannte Anwendungsfälle sind zum Beispiel CAD-Features zur Erstellung von Gewindebohrungen und Fasen. Aufbauend auf dieser Technologie ist für das FEA-Assistenzsystem eine CAE-Feature-Bibliothek umzusetzen. Diese verknüpft die CAD-Repräsentation eines Bauteils mit wiederkehrenden Berechnungsmodellen und -methoden.

Hierbei wird für Geometrieelemente im CAD-System anhand von semantischen Informationen definiert, um welche Bauteile es sich handelt, beziehungsweise die Lage von simulationsrelevanten Bereichen, wie Kontaktflächen, angegeben. Die gekennzeichneten Modellbereiche werden daraufhin im CAE-System automatisch erkannt und, abhängig von der Berechnungsaufgabe und den -anforderungen, gezielt für eine Finite-Elemente-Analyse vorbereitet. Neben einer erweiterten Funktionalität im CAD-System, welche die Definition der Lasten, Lagerungen und erforderlichen Berechnungsgrößen bereits in der Konstruktionsumgebung erlaubt, werden zusätzliche simulationsrelevante Geometrieelemente, wie Mittelflächen (für vereinfachte Simulationen mit Schalenelementen) und Kontaktflächen, an die Feature-Modelle angehängt. [3,7].

Der Analyseteil baut auf einem FE-Ergebnisdatensatz auf und evaluiert und bewertet die vorliegende Simulation auf Basis dieses Datensatzes. Im Rahmen dieses Beitrags soll genauer auf den Analyseteil mit der Plausibilitätsprüfung eingegangen werden. Die einzelnen Module Bauteilerkennung, Plausibilitätsprüfung, Fehlerassistent und Ergebnisbewertung sind in Bild 2 dargestellt.

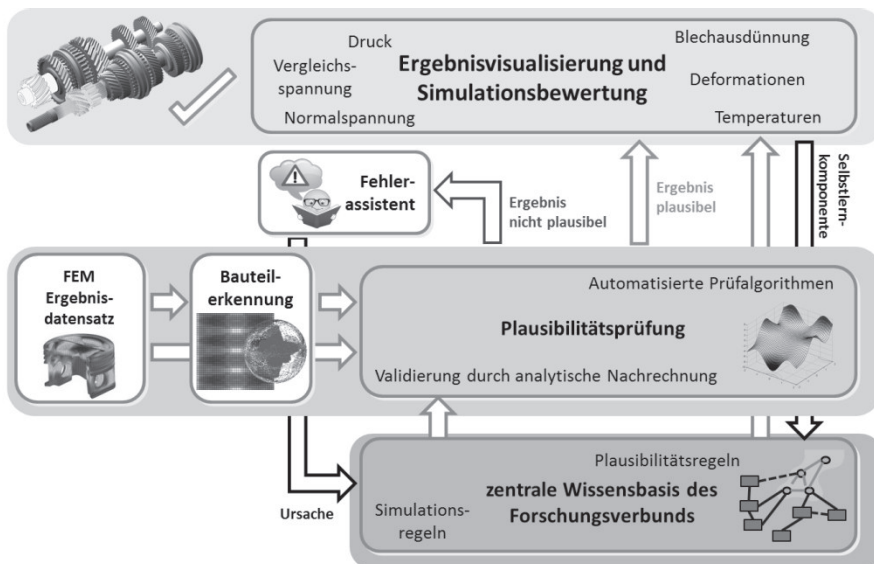


Bild 2: Analyseteil des Assistenzsystems mit Untermodulen

Sollte bei der Untersuchung eines FE-Ergebnisdatensatzes nicht bekannt sein, welche Bauteile in der vorliegenden Baugruppe enthalten sind (fehlende

semantische Informationen) wird der Fehlerassistent aktiviert. Dieser klassifiziert Bauteile anhand von projizierten FE-Netzknoten. Eine genauere Beschreibung folgt in Kapitel 3. Sollten bereits semantische Informationen zu den enthaltenen Bauteilen hinterlegt sein, wird direkt die Plausibilitätsprüfung aktiviert.

Eine Überprüfung der FE-Simulation (erstellt von weniger erfahrenem Simulationsanwender) ist unerlässlich, da offensichtlich erkennbare Fehler direkt ausgeschlossen werden sollen (Plausibilitätsprüfung). Typische Beispiele für Fehler die erkannt werden sollen sind:

- Verwendung von falschen Einheiten (bar statt MPa, inch statt mm, etc.)
- Falsche Eingabe von Belastungen (10000 N statt 1000 N)
- Unvollständige Definition von Randbedingungen (Starkkörperbewegung wird nicht unterbunden)
- Offensichtlich falsche Ergebnisse der Zielgrößen (Deformationen von 10^3 mm bei kleinen Stahlbauteilen mit geringen Belastungen)

3 Bauteilerkennung mittels sphärischen Detektorflächen

Aufbauend auf eigenen Vorarbeiten zur automatischen Bauteilerkennung innerhalb der FE-Software-Umgebung [10,11] wurde die Methode zur Erkennung mittels Detektorflächen weiterentwickelt. Die aktuelle Ausbaustufe ist in Bild 3 dargestellt. Ausgehend von einem vorliegenden Bauteil innerhalb der FE-Software erfolgt im ersten Schritte eine einheitliche Vernetzung mittels 10-knotigen Tetraeder-Elementen. Diese sind geeignet um beliebige Strukturen einheitlich zu vernetzen. Nach der Übertragung der Knotenkoordinaten erfolgen eine Koordinatentransformation in Kugelkoordinaten und eine Hauptkomponentenanalyse. Da die Hauptkomponentenanalyse keine eindeutige Orientierung liefert, erfolgt eine absichtliche Rotation der Punktwolke. Dies ist notwendig um stets eine identische Punktwolke für zuvor beliebige Orientierungen im Raum zu erhalten. Die Bauteile können um jede Raumachse in 90° -Schritten gedreht sein. Hierdurch ergeben sich $4^3=64$ mögliche Orientierungen und es entsteht eine Punktwolke mit $64x$ mehr Punkten als ein einziges Bauteil an Punkten aufweist. Nach der Aufspannung einer sphärischen Detektorfläche werden die Knoten auf die Kugeloberfläche projiziert. Damit ergeben sich unterschiedliche Häufigkeiten an projizierten Knoten für die einzelnen Pixel der Detektorfläche. Durch eine zylindrische Projektion der Kugel-

oberfläche ergibt sich die dargestellte Detektormatrix mit den Häufigkeiten der FE-Knoten pro Detektorpixel. Auch ähnliche Bauteile (wie die beiden im unteren Bereich von Bild 3 dargestellten Schrauben nach DIN 6921 / ISO 4017 der gleichen Dimension) zeigen deutlich unterschiedliche Detektormatrizen bei der Häufigkeit an FE-Netzknotten für die einzelnen Pixel. Hierdurch kann mittels Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) eine eindeutige Klassifikation und somit automatische Bauteilerkennung durchgeführt werden. [11]

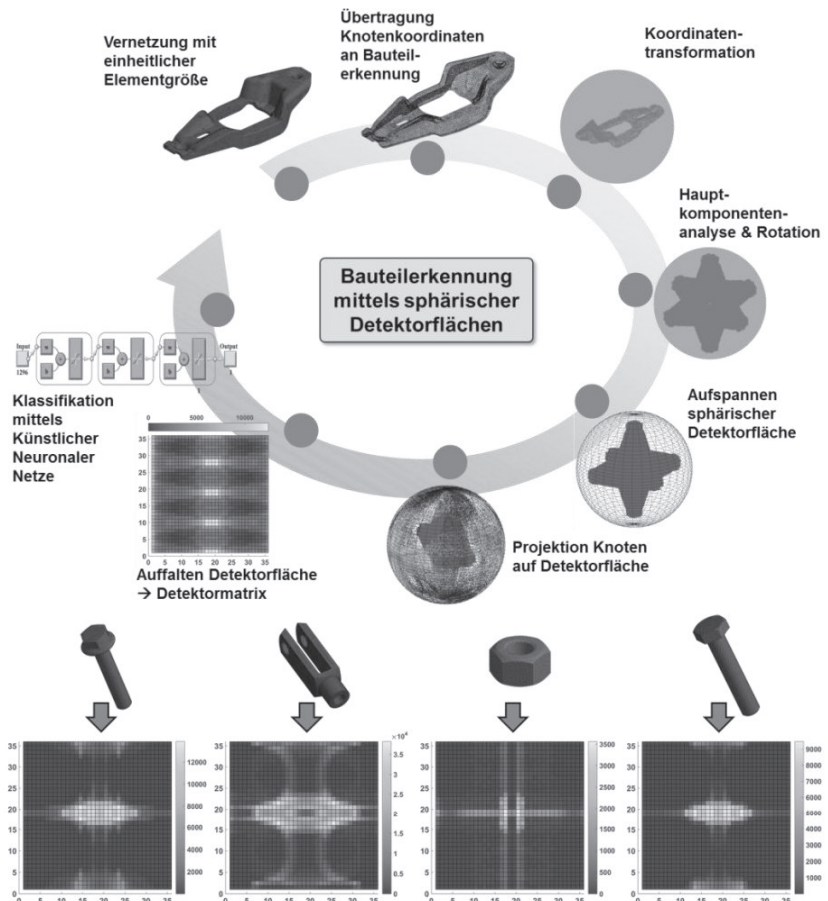


Bild 3: Bauteilerkennung mittels sphärischer Detektorflächen

Die vorgestellte Methode dient als Grundlage für das im folgenden vorgestellte Konzept der Plausibilitätsprüfung, da FE-Zielgrößen, wie beispielsweise die Deformation, ebenfalls auf eine sphärische Detektorfläche projiziert werden können. Hierdurch können beliebig große Bauteile, in beliebiger Orientie-

nung, automatisch auf eine einheitliche Matrix reduziert werden. Dies ermöglicht die Applikation von KNNs zur weiteren Verarbeitung der FE-Daten.

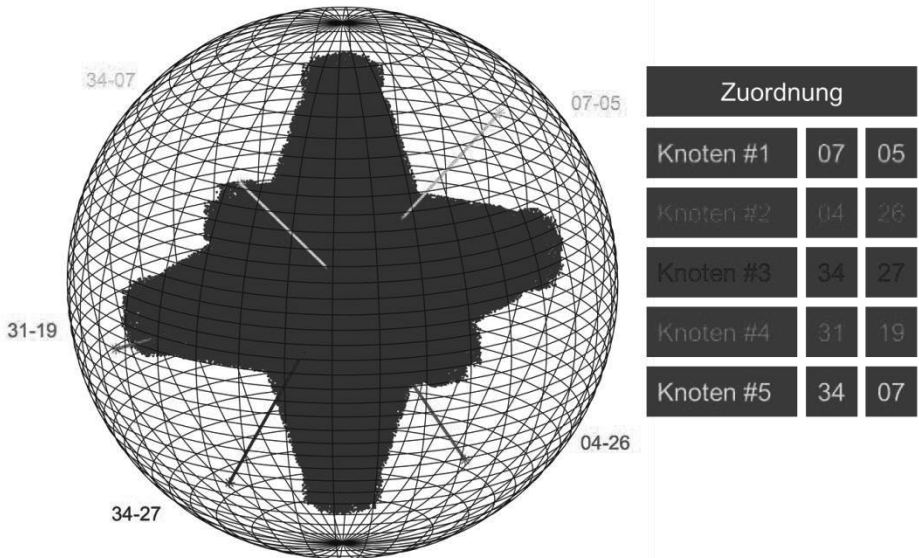


Bild 4: Zuordnung von fünf exemplarischen FE-Knoten zu den Detektorpixeln der sphärischen Detektorfläche

Die in Bild 4 dargestellte Detektorfläche besitzt 1296 Pixel und jeder Pixel kann durch zwei Zahlenwerte von 1...36 eindeutig zugeordnet werden. Durch die Projektion der FE-Knoten des Bauteils auf die Detektorpixel kann jedem Bauteilknoten ein spezifischer Pixel der Detektorfläche zugeordnet werden. Einem Pixel können beliebig viele Knoten zugeordnet werden. Auf diese Weise kann auch jede FE-Zielgröße oder Randbedingung auf eine eigene Detektorfläche projiziert werden. Es können beliebige Modelle auf eine einheitliche Zahl an gleich großen Detektormatrizen reduziert werden. Hierdurch ist es möglich FE-Simulationen und deren Ergebnisse in eine einheitliche rechnerverarbeitbare Form zu überführen und diese untereinander zu vergleichen. Dies ist bisher nicht möglich und stellt ein erhebliches Potential für die rechnerunterstützte Überprüfung auf Plausibilität dar.

4 Plausibilitätsprüfung mittels sphärischen Detektorflächen und Deep-Learning

Das Ziel des dargestellten Vorgehens besteht in der Überprüfung von beliebigen FE-Simulationen auf Plausibilität unter Verwendung sphärischer Detektorflächen und der Applikation von Deep-Learning Netzen.

Deep-Learning ist ein Bereich des maschinellen Lernens und basiert auf Algorithmen die versuchen komplizierte Abstraktionen in Daten unter Verwendung von mehreren Verarbeitungsschichten mit komplexen Strukturen oder nichtlinearen Transformationen abzubilden [12,13]. Deep-Learning findet nach Wagner unter anderem in den folgenden Bereichen Anwendung:

- Voice Search/Voice-Activated Assistants
- Recommendation Engines
- Image Recognition
- Image Tagging/Image Search
- Advertising
- Pattern Recognition
- Speech Translation
- Speech Transcription
- Text Classification
- Content Discovery
- Brand Intelligence
- Social Media Monitoring

4.1 Erzeugung Datenbasis

Bevor Deep-Learning-Algorithmen angewendet werden können muss eine umfangreiche Datenbasis erzeugt werden. Analog zum Data-Mining gilt: je mehr Daten zur Verfügung stehen, desto besser können Zusammenhänge in

den Daten erkannt werden. Im Folgenden wird anhand einer Speedskating-Schiene dargestellt wie derartige Datenmengen generiert werden. Für die spätere praktische Anwendung im Unternehmensumfeld gilt, dass alle bereits vorhandenen Simulationsdaten von plausiblen und nicht plausiblen FE-Simulationen genutzt werden sollten. Es erfolgt eine Untersuchung von zwölf unterschiedlichen Geometrien (variierende Wandstärke und Achsabstand) mit jeweils 600 Auslegungspunkten. Die Auslegungspunkte unterscheiden sich in Betrag und Richtung der angreifenden Kräfte sowie der Feinheit des FE-Netzes. Für jede der 7.200 FE-Simulationen werden, wie in Bild 5 dargestellt, 13 Detektorflächen für Vernetzung, Randbedingungen und Zielgrößen gebildet und in einem gemeinsamen Bild mit 100x1300 Pixeln abgespeichert. In diesem Bild sind alle relevanten Informationen zu der FE-Simulation enthalten. Für das Deep-Learning können Bilder unterschiedlicher Größe verwendet werden, daher können auch Simulationen mit mehr Kräften oder anderen Lagerungen betrachtet werden. Die 600 Auslegungspunkte bestehen aus 288 plausiblen und 312 implausiblen FE-Simulationen. Eine implausible Simulation liegt vor, wenn deutlich zu hohe oder zu niedrige Kräfte angegeben sind oder die Netzfeinheit offensichtlich viel zu grob gewählt wird.

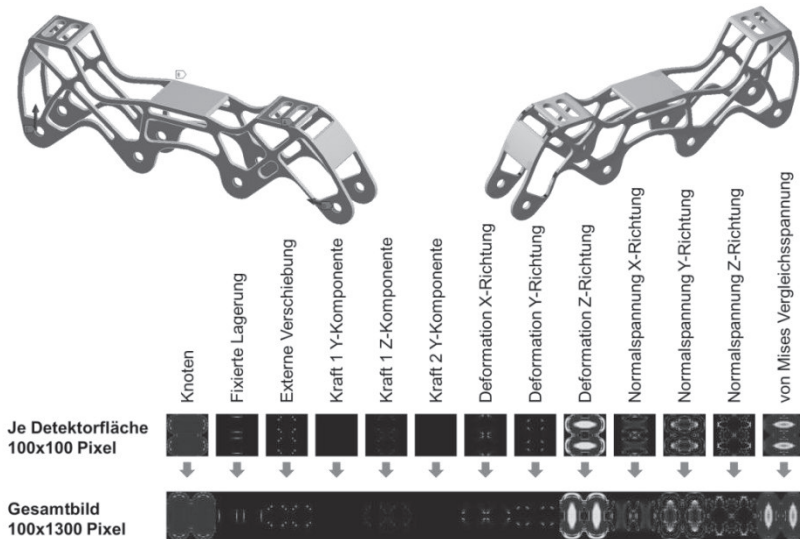


Bild 5: Erzeugung Detektormatrizen pro Geometrie und Designpoint

4.2 Deep-Learning

Das Training von Deep-Learning Neuronalen Netzen (Berechnung der benötigten Gewichtungen) erfolgt zunehmend auf Grafikkarten anstelle von

CPU-Prozessoren. Der Hersteller NVIDIA verspricht eine 10-20-fach schnelleres Training auf GPUs im Vergleich zu herkömmlicher CPU-Berechnung [15]. Für die hier vorgestellte Plausibilitätsprüfung von FE-Programmen werden das Deep-Learning Framework CAFFE [16] und das AlexNet [17] als Netzarchitektur verwendet. Die Berechnungszeiten für das Training des Netzes liegen mit den erwähnten Eingangsbildern mit 100x1300 Pixeln bei ca. 40 Stunden unter Verwendung einer Tesla C2075 GPU.

4.3 Weiteres Vorgehen

Zur Evaluierung der Performanz der trainierten Deep-Learning Netze kommen bewährte Validierungsverfahren des Data-Minings zum Einsatz. Eine gute Abschätzung wird mittels 10-fold-cross-validation [18] und der Bestimmung der Fehlklassifikationsrate als Bewertungsmaß unter Angabe der Konfidenzintervalle [19] erreicht.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Notwendigkeit FE-Simulationen wissensbasiert zu generieren und abzusichern wurde im Rahmen des Beitrags ein FEA-Assistenzsystem vorgestellt. Es besteht aus den beiden Bereichen Simulationssynthese und Simulationsanalyse – wissensbasierter Aufbau und wissensbasierte Auswertung von strukturmechanischen FE-Simulationen. Für den Analyseteil des FEA-Assistenzsystems wurde eine Methode vorgestellt um relevante Berechnungsinformationen in matrixform abzulegen. Die gezeigte Methode funktioniert für beliebige Bauteile und die Ergebnisse können für eine nachgelagerte Klassifikation mittels Künstlicher Neuronaler Netze verwendet werden. Der Aufbau einer Datenbasis wurde exemplarisch an einer Speedskating-Schiene gezeigt und es wurde eine umfangreiche Datenbasis abgeleitet. Diese steht für weitere Untersuchungen und das Training von Deep-Learning Neuronalen Netzen zur Verfügung.

Danksagung

Das hier vorgestellte Vorgehen ist Bestandteil des BFS Forschungsverbands FORPRO² „Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation“ (AZ 1071-13). Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsstiftung BFS und den Industriepartnern ANSYS Germany, B&W Software und Federal-Mogul Nürnberg für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Adams, V.: "A Designer's Guide to Simulation with Finite Element Analysis", NAFEMS, Glasgow, 2008.
- [2] Boucher, M.: "High Quality Products that Cost Less with Simulation Driven Design", Aberdeen Research Benchmark, Aberdeen Group, 2011.
- [3] Kestel, P.; Schneyer, T.; Wartzack, S.: "Feature-based approach for the automated setup of accurate, design-accompanying Finite Element Analyses", In Proceedings of the 14th International Design Conference, Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N.; Skec, S., Design Society, Glasgow, 2016, p. 697-706.
- [4] Spruegel, T. C.; Hallmann, M.; Wartzack, S.: "A concept for FE plausibility checks in structural mechanics", In: In Summary of Proceedings of NAFEMS World Congress San Diego, 2015.
- [5] Breitsprecher, Thilo, et al. "Einsatz von Data-Mining in modernen Produktentstehungsprozessen." ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110.11, 2015, p. 744-750.
- [6] ASME. Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, V&V 10, 2006.
- [7] Kestel, P.; Wartzack, S.: "Wissensbasierter Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen durch ein FEA-Assistenzsystem", Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Stelzer R., TUDpress, Dresden, 2016, p. 315-330
- [8] Wartzack, S.: "Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte", VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [9] VDI 2218: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - feature-Technologie, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [10] Spruegel, T.; Wartzack, S.: "Konzept zur automatischen Bauteilerkennung innerhalb der FE-Software-Umgebung mittels Künstlichen Neuralen Netzen", Beiträge zum 25. DfX-Symposium, Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S., TuTech Verlag, Hamburg, 2014, p. 47-56.

-
- [11] Spruegel, T. C.; Wartzack, S.: "Concept and application of automatic part-recognition with artificial neural networks for FE simulations", Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15), Weber, C.; Husung, S.; Cantamessa, M.; Cascini, G.; Marjanovic, D.; Graziosi, S., 2015, p. 183-193.
- [12] Deng, L.; Dong, Y.: "Deep Learning: Methods and Applications", Foundations and Trends in Signal Processing: Vol. 7: No. 3–4, 2014, p. 197-387.
- [13] Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A.: "Deep Learning", unpublished book in preparation for MIT Press, Cambridge, 2016.
- [14] Wagner, J.: "Deep Learning in the Real World – Practical Applications for Today's Data-Driven Business", AlchemyAPI IBM, 2014.
- [15] NVIDIA Blog "How the GPU Is Revolutionizing Machine Learning", <https://blogs.nvidia.com/blog/2015/12/10/machine-learning-gpu-facebook/>
- [16] Jia, Y. et al.: "Caffe: Convolutional Architecture for Fast Feature Embedding", In: Proceeding MM '14 Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia, 2014, p. 675-678.
- [17] Krizhevsky, A.; Sutskever, I.; Hinton, G. E., "Imagenet classification with deep convolutional neural networks", In: Advances in neural information processing systems, 2012, p. 1097-1105.
- [18] Witten, I.H.; Frank, E.; Hall, M.A.: "Data Mining – Practical Machine Learning Tools and Techniques", Morgan Kaufmann Publishers, Burlington, 2011.
- [19] Tan, P.; Steinbach, M.; Kumar, V.: "Introduction to Data Mining", Pearson, Boston, 2006.

Shape optimization of topologically optimized structures using NURBS

Julian Kajo Lüdeker, Benedikt Kriegesmann

*New design and sizing methods for hybrid airframe structures
Hamburg University of Technology*

Abstract

Topology optimization using the solid isotropic material penalization method provides a density distribution, which contains elements with intermediate densities between void and solid. A discrete design is obtained by some geometric interpretation of this result, which is often determined manually. Afterwards, the design is sized with respect to stress, sometimes in the framework of a shape optimization. The current work provides a fully automated routine to obtain a geometric interpretation and parameterization of two dimensional topology optimized structures using non-uniform rational Bézier splines (NURBS), and a shape optimization of the parameterized structure afterwards. Automating both steps reduces development time and cost, and allows embedding them into a larger optimization framework (e.g., multi-disciplinary or robustness optimization).

Keywords: Topology optimization, Shape optimization, NURBS, Structure mechanics

1 Introduction

Optimization of topology and shape of structures has recently gained attention since the resulting, geometrically complex structures can be produced by additive layer manufacturing (ALM). The solid isotropic material penaliza-

tion (SIMP) method [1] is commonly used for determining topology optimized shapes for a given load case, which considers the element densities of a finite element model as design variables. In order to be able to use gradient based optimization algorithms, within the SIMP approach the element densities are interpolated between void and solid. Therefore, the optimization result does not contain a sharp edge, but requires some geometric interpretation in order to obtain a discrete design from the density distribution. This step is often realized manually and based on engineering judgement. Furthermore, a topology optimization using the SIMP method typically targets to minimize the overall compliance for a given volume fraction. In practice however, the optimization target is typically to minimize weight while not exceeding the allowable stress. Since both criteria are not directly addressed, using the classical SIMP method, shape optimization procedures are often applied afterwards to the geometric interpretation of the design resulting from the SIMP approach [2].

The current work provides a fully automated routine to obtain a geometric interpretation and parameterization of two dimensional topology optimized structures using non-uniform rational Bézier splines (NURBS) [3]. In a second step, this parameterization is used for a shape optimization of topology optimized structure. The procedure is demonstrated by application to a bench mark example.

2 Topology optimization

For topology optimization using the SIMP method, the typical formulation of the optimization problem is to minimize the overall compliance c by variation of the vector with element densities ρ . The constraints to be fulfilled in the optimization is that the total volume (given by the product of element volumes and densities $\mathbf{v}^T \rho$) divided by volume of the design domain v_0 equals a desired volume fraction \tilde{v} , that equilibrium is fulfilled ($\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}$), and that the normalized densities ρ_i have values between 0 and 1.

$$\begin{aligned}
 \min_{\rho} : c(\rho) &= \mathbf{U}^T(\rho)\mathbf{F} \\
 \frac{\mathbf{v}^T \rho}{v_0} &= \tilde{v} \\
 s.t. \quad \mathbf{K}\mathbf{U} &= \mathbf{F} \\
 0 &\leq \rho_i \leq 1
 \end{aligned} \tag{1}$$

Here, \mathbf{U} is the global displacement vector, \mathbf{K} is the global stiffness matrix and \mathbf{F} is the load vector. By inserting the equilibrium condition, the compliance can be written as

$$c = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (2)$$

The concept of SIMP approach is to prescribe the relationship between densities and stiffness by

$$\mathbf{K}_i(\rho_i) = \rho_i^p \mathbf{K}_{0i} \quad (3)$$

where \mathbf{K}_i is the element stiffness matrix, ρ_i is the element density and \mathbf{K}_{0i} is the initial element stiffness matrix of the i -th finite element. The penalty factor p enforces the optimization to provide values either close to 0 or 1, and is typically chose to $p = 3$.

This motivation for formulating the optimization problem as given above is that the derivatives of the compliance with respect to the element densities are given analytically.

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial \rho_i} &= -\mathbf{u}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_i} \mathbf{u}_i = -p \rho_i^{p-1} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_{0i} \mathbf{u}_i \\ \frac{\partial^2 c}{\partial \rho_i \partial \rho_j} &= \begin{cases} -\frac{p+1}{\rho_i} \frac{\partial c}{\partial \rho} & , i = j \\ 0 & , i \neq j \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Furthermore, the equilibrium constrained is fulfilled implicitly and the remaining constraints are linear. This allows solving the optimization problem efficiently using standard gradient based optimization algorithms, even for examples with extremely large numbers of variables.

3 Geometric parametrization

The basic idea for parameterizing the geometry in this work is to determine the contour of the structure along the maximum density gradients and to describe this contour with NURBS.

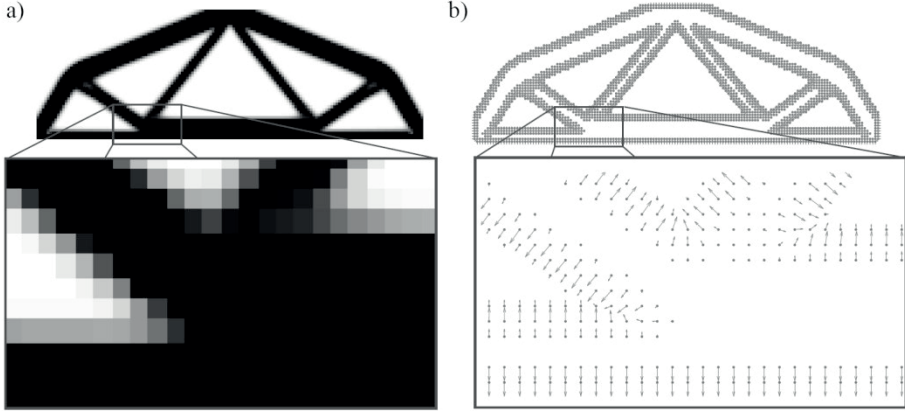


Figure 1: Density distribution of a finite element mesh (150x50) as a result of the SIMP approach (a) and the corresponding gradient field (b)

Based on the density distribution in the design domain obtained by topology optimization, the density gradient $\nabla_{\mathbf{x}}\rho_{ij}$ can be approximated using a finite differences scheme (Figure 1). In order to ensure a high gradient at the edge of the design domain, the finite element mesh is surrounded by zero density elements.

$$\nabla_{\mathbf{x}}\rho_{ij} = \frac{\partial\rho_{ij}}{\partial\mathbf{x}} \approx \begin{bmatrix} \frac{\rho_{i-1j} - \rho_{i+1j}}{\Delta x_1} \\ \frac{\rho_{ij-1} - \rho_{ij+1}}{\Delta x_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

The first step of the geometric interpretation is to find and sort the elements that describe the contour of the structure. The idea of the algorithm is to identify the contours by "drawing" lines along the maximum gradients, resulting in an array of lines described by the position \mathbf{x}_{ij} of the elements \mathbf{e}_{ij} . At the beginning, the candidate list is given by all elements for which the norm of the density gradient is larger than some value ε , which is chosen to equal 0.1.

$$C = \{ \mathbf{e}_{ij} \mid \|\nabla_{\mathbf{x}}\rho_{ij}\| > \varepsilon \} \quad (6)$$

While the candidate list C is not empty, the element with the maximum gradient is chosen as a starting point $e_{start} = \{e_{ij} \mid \max |\nabla_{\mathbf{x}} \rho_{ij}|\}$. Then, an iterative procedure follows the contour of the structure by checking the neighbourhood N

$$N(e_{ij}) = \{n_{ij}\} = \{e_{kl} \mid (|i - k| \leq 1) \cup (|j - l| \leq 1)\} \setminus e_{ij}, \quad (7)$$

of the previous chosen element and picking the one with the highest weight $w(n_i)$.

$$w(n_i) = w_{\alpha}(\alpha(e_{ij}, n_i)) w_{\beta}(\beta(e_{ij}, n_i)) |\nabla_{\mathbf{x}} \rho_{ij}|^q$$

$$w_{\alpha}(\alpha) = \sin |\alpha| + \frac{a}{\pi} |\alpha| \quad (8)$$

$$w_{\beta}(\beta) = \sin |\beta| - \frac{a}{\pi} |\beta| + a$$

This weight is based on the norm and the directions of the current elements and its neighbourhood's gradients. The directions are weighted by w_{α} and w_{β} , which uprate elements that are more tangential to the gradients direction. Both functions and the definition of the corresponding angles α and β are shown in Figure 2 and Figure 3.

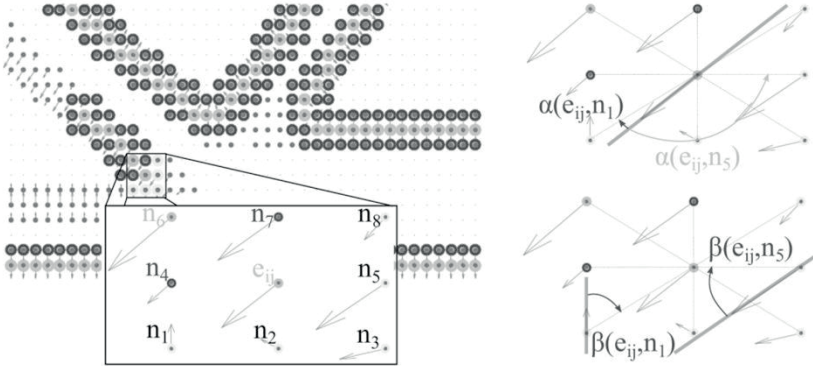


Figure 2: Definition of the angles α and β of the density gradients

The criterion defined by equation (8) appears to be stable by a usage of constant values $a = 1/4$ and $q = 4$, for different density distributions achieved

by the two-dimensional SIMP method. For more accurate representations of complex fillets it is beneficial to reduce the weight of the gradient norm by decreasing q .

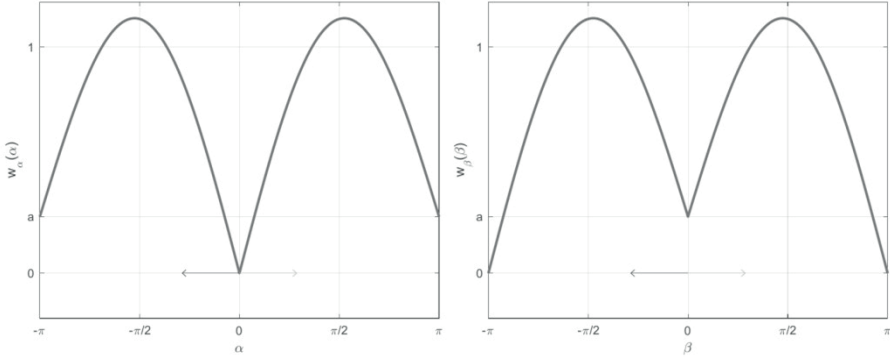


Figure 3: Weight functions w_α and w_β of the density angles α and β for $a = 1/4$

In the next step, a reduced number of points from the candidate list is used as control points for the NURBS. NURBS are basically a weighted sum of Bernstein polynomials depending on control points. In contrast to normal Bézier curvatures, the control points only locally influence the described geometry, which provides large flexibility and allows describing arbitrary shapes. For more details, see e.g. Ref. [3]. The density of control points is chosen dependent of the orientations of the density gradients shown in Figure 1. In areas where the density gradients point in the same direction, few control points are used, whereas in areas with differing gradient orientations, many control points are used. The resulting in NURBS representation is exemplarily shown in Figure 4.

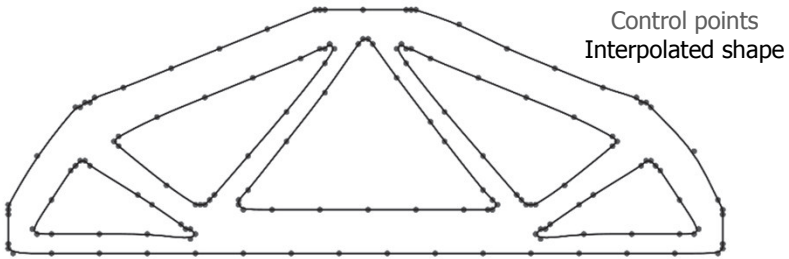


Figure 4: NURBS representation of the topologically optimized example structure

Given the NURBS representation, the geometry is meshed with triangle elements using the algorithm published in [5]. The meshing algorithm requires defining the sign distance function (negative inside the structure, positive outside the structure) and is called such that the mesh density increases towards the edges (Figure 5). For the finite element simulation, linear elements with reduced integration are used.

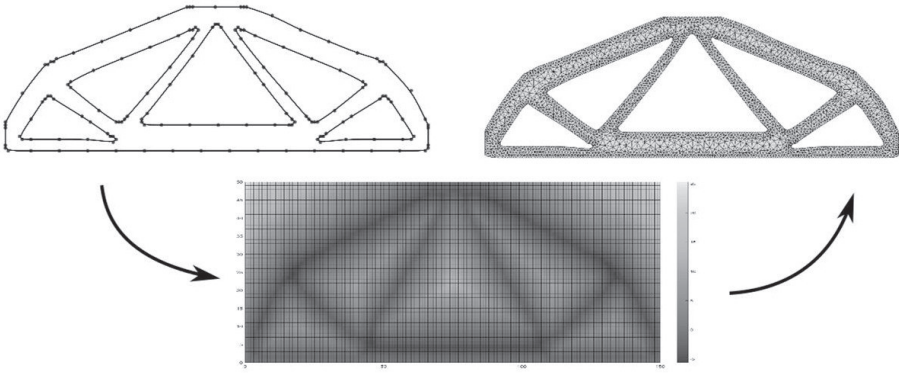


Figure 5: Meshing of the parameterized structure based on the corresponding distance function

4 Shape optimization

Shape optimization aims at improving the structural performance without modifying the general topology, i.e., it does not allow for creating or removing holes. A main challenge in shape optimization is to find a parametric description of the geometry, for which a multitude of approaches exist [2].

One possibility is to directly use the nodes of the finite element mesh. This approach allows a semi-analytic calculation of the gradient using the adjoint method. However, this formulation is leading to a large number of design variables and may result in a highly distorted mesh due to the shape variation.

Another approach is to describe the geometry as a superposition of modes (e.g., buckling or vibration modes) and to consider the weight (or scale factor) of each mode as design variable. This approach works with very few parameters, but the geometry changes are typically very limited. The possible variation of geometry and hence the potential for optimization signif-

icantly depends on the chosen modes and the selection of adequate modes is very difficult to automate.

The approach followed in this paper is to find a geometric model, that describes the basic topology of the structure with less variables. This could be a CAD model, which restricts the design changes to the initial characteristics of the design (e.g., a straight line cannot become curved). Using NURBS provides much more design freedom while still having a small number of geometric parameters. For each design variation, the geometry is remeshed, which ensures a good mesh quality throughout the optimization, but requires an efficient meshing tool. Furthermore, using this approach the derivatives of the objective function cannot be determined analytically, but need to be estimated numerically using finite differences.

The objective of the shape optimization presented is to minimize the volume v of the structure by varying the locations of the NURBS control points, with the constraint that the stresses σ_i in each element do not exceed the allowable stress σ_{\max} . for the 2D example, the volume of the structure is calculated easily as the difference between the area surrounded by the NURBS that describes the outer line V_{No} and the sum of the areas surrounded by the inner lines V_{Ni} .

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{y}} v(\mathbf{y}) &= V_{No} - \sum V_{Ni}(\mathbf{y}) \\ s.t. \quad \max_i(\sigma_i) &\leq \sigma_{\max} \end{aligned} \tag{9}$$

The design variables summarized in the vector \mathbf{y} describe the positions of the control points along the density gradient direction, which is known from the SIMP method (see Figure 1).

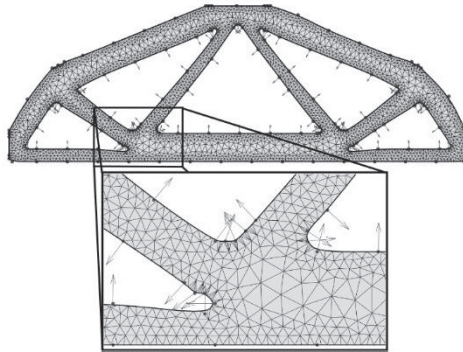


Figure 6: Gradient directions at the control points of the NURBS curvatures

Beside the derivatives of the volume, also the derivatives of the stresses are required. The stresses themselves are obtained from finite element analyses. Since the derivatives are evaluated numerically with finite differences, the stresses have to be evaluated $n + 1$ times per optimization step, where n is equal to the number of design variables, i.e. the number of control points.

The optimization process is performed using the interior point method [4] for nonlinear constrained problems provided by the MATLAB Optimization Toolbox.

5 Results

For demonstration of the workflow, the proposed procedure is applied to a frequently used 2D benchmark example, namely the MBB beam (see Figure 7). The topology optimization is performed using the 99 Matlab code published in Ref. [6] for a design space of 150×50 elements of unit length, a target volume fraction of 0.4, a filter radius of 1.5 and a penalty factor of $p = 3$.

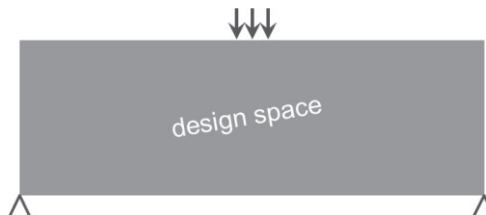


Figure 7: Design space and boundary conditions of the MBB beam example

The result of the topology optimization is given in Figure 1. The NURBS representation provided by the procedure described in section 3 is shown in

Figure 4. The stress distribution of this design is given in Figure 8. This design is the initial design of the shape optimization. While the target of the topology optimization was to minimize the compliance for a given volume, the shape optimization has the objective to reduce weight while not exceeding the allowed stress, as explained in section 4.

An intermediate result provided by the shape optimization is shown in Figure 9, where also the contour of the initial design is given. This design has 16.5% less volume than the initial design and fulfils the stress constraint. In further iterations, infeasible designs are obtained. This convergence problem is traced back to the mesh generator and needs to be further analysed. The intermediated result however shows the potential of the shape optimization.

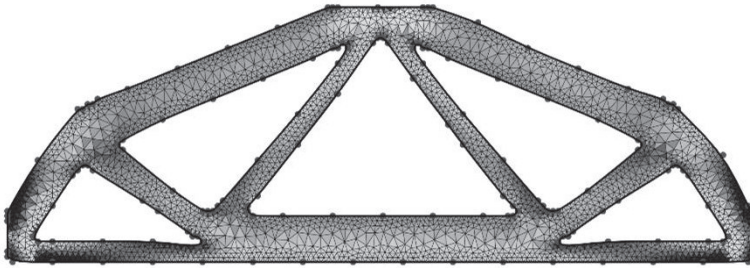


Figure 8: Qualitative distribution of von Mises stresses for the initial topology optimized design



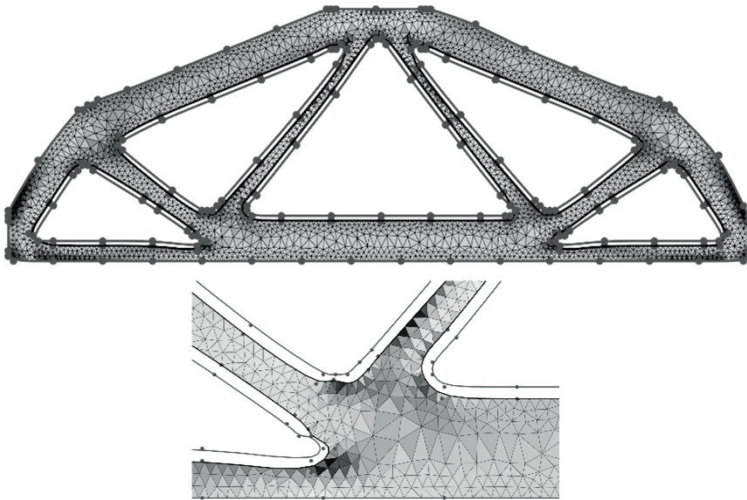


Figure 9: Qualitative distribution of von Mises stresses for the result of the shape optimization and comparison to initial design (red lines)

6 Conclusion & Outlook

A procedure is presented for automatically determining a parameterized geometric description of a topologically optimized structure by NURBS. This parameterized description is used for a shape optimization of the obtained design. The procedure is successfully applied to an example for demonstration purposes. So far, the parameterization is implemented in the two dimensional space. In general, the presented procedure can be extended to the third dimension, but especially the determination of the NURBS representation requires significantly development effort to extended to surfaces of a 3D structure.

References

- [1] Bendsøe, M.B.; Sigmund, O.: „Topology Optimization – Theory, Methods and Applications“, Springer Verlag Berlin Heidelberg , 2004.
- [2] Harzheim, L.: „Strukturoptimierung – Grundlagen und Anwendungen“, Verlag Europa Lehrmittel, 2014
- [3] Berkahn, V.: „Geometrische Modellierung im Bauingenieurwesen“, Shaker Verlag, 2005

-
- [4] Nocedal, J.; Wright, S.J.: „Numerical Optimization“, Springer Science+Business Media, 2006
- [5] Persson, P.-O.: “Mesh generation for implicit geometries”, Massachusetts Institute of Technology, 2005
- [6] Sigmund, O.: “A 99 line topology optimization code written in Matlab,” Structural and Multidisciplinary Optimization, 21(2), 120–127, 2001.

Ansatz zur modellunterstützten Vorauslegung von Messsystemen für die Erfassung von mechanisch-dynamischen Größen von Power-Tools

Sven Matthiesen, Andreas Wettstein, Tim Bruchmüller,
Tristan Anding

*IPEK – Institut für Produktentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

Abstract

Within the product development process the product and the measurement system to validate the product functionalities has to be developed simultaneously. An effective measurement system initiates positive in-stage iterations to rapidly increase product maturity and avoid costly cross-gate iterations where development decisions have to be revised. The transformation of product functionalities in measurable values and the identification of suitable sensing elements are most important for measurement performance and therefore validation quality. The variety of possible solutions is extraordinary large due to massive amounts of measurement equipment available and various possibilities on measurement values representing product functions. This paper introduces a method to support the selection of measurement values and the quantitative evaluation of commercial sensor systems for product validation purposes.

Keywords: preliminary design, measuring system, dynamic measuring, power-tools

1 Einleitung

Die Validierung ist eine zentrale Aktivität der Produktentwicklung und hat das Ziel herauszufinden, ob Produktfunktionen erfüllt sind. In der Validierung von Power-Tools ist der Einsatz von geeigneter Messtechnik für hochdynamische Systemgrößen essentiell für die Quantifizierung von geforderten Produktfunktionen und für den Nachweis der Richtlinienkonformität.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, welches eine Auswahl von Messtechnik für konkrete Messaufgaben der Validierung durch den Einsatz zweier neuer Methoden unterstützt. Dabei ermöglicht der Messprinzipbaum basierend auf ermittelten physikalischen Zusammenhängen geeignete Messgrößen für die Recherche handelsüblicher Messaufnehmer zu identifizieren. Als Ergebnis der Recherche liegen dem Entwickler konkrete Messketten, bestehend aus z.B. Messaufnehmer, Verstärker, Analog-Digital-Wandler und Datenerfassung, zur Bewältigung der Messaufgabe vor. Die Messketten werden durch die vorgestellte Simulationsmethode getestet. Ziel dieser Methode ist es, die Leistungsfähigkeit der Messketten frühzeitig abzusichern, eine Bewertung zu ermöglichen und so eine belastbare Entscheidung zu treffen.

Damit wird es möglich In-Stage-Iterationen innerhalb der jeweiligen Produktentwicklungsphase (sog. In-Stage-Iterationen) zu provozieren. Entwicklungsphasenübergreifende Iterationen (sog. Cross-Gate-Iterationen), welche getroffene Entwicklungsfreigaben zwischen den Stages obsolet machen, können so vermieden werden. Durch Cross-Gate-Iterationen kommt es zu Verzögerungen im Entwicklungsprozess und zur Gefährdung des Markteinführungstermins, was zu großen finanziellen Verlusten führen kann[1]. Um In-Stage-Iterationen gezielt zu provozieren und die Gefahr von Cross-Gate-Iterationen zu verringern, müssen Validierungstechnik und zu entwickelndes Produkt simultan entwickelt werden[2]. Die Validierungstechnik macht Produktfunktionen bewertbar, indem abstrakte Kundenanforderungen in messbare Größen übersetzt werden [3]. Eine optimale Auswahl der Messtechnik erhöht die Chance auf gewünschte In-Stage-Iterationen und minimiert das Risiko von möglichen Cross-Gate-Iterationen, da dann die erfassten Messgrößen, trotz der Messunsicherheiten, die eigentliche Produktfunktion ausreichend repräsentieren. Für die Validierung von Power-Tools, welche aufgrund von hochdrehenden Motoren oder auftretenden Vibrationen dynamischen Effekten unterliegen, müssen diese Unsicherheiten aufgrund der Wechselwirkung von Messsystem und Prüfling besonders genau betrachtet werden. Matthiesen, et. al beschreiben in [4] einen Ansatz, mit dessen Hilfe diese Wechselwirkungen zwischen Prüfling und Messsystem reduziert werden können.

2 Stand der Forschung

Die VDI-Richtlinie 2221 beschreibt für die Entwicklung und Konstruktion ein generelles Vorgehen in sieben Schritten und verweist auf entsprechende Methoden [5]. Dieses Vorgehen kann auch bei der Entwicklung von Messsystemen zur Validierung von Geräten angewandt werden. Jedoch kommen Turki[6] und Wynn[7] in ihren Arbeiten zu der Erkenntnis, dass die Methoden der Produktentwicklung häufig sehr abstrakt gestaltet sind und wenig Hinweise auf die Anwendung im Alltag von Konstrukteuren bieten. Dabei bieten Methoden ein großes Potential Konstrukteure im industriellen Produktentwicklungsprozess zu unterstützen, wenn diese unter der Berücksichtigung der Anforderungen der Industrie und Konstrukteure gestaltet sind [8].

Gerade bei der Entwicklung von Messsystemen für hochdynamische mechanische Größen ist die Ermittlung von Funktionsstrukturen und die Suche und Bewertung möglicher Lösungen, wie sie als Teilschritte in der VDI 2221 beschrieben werden, besonders herausfordernd. Die Eigenschaften des Messsystems bewirken beim Messen dynamische Effekte, welche die Messungen beeinflussen [9]. Simultan zur Messsystementwicklung oder nachfolgend kann eine Entwicklung entsprechender mathematischer Modelle erfolgen, um diese dynamischen Effekte zu berücksichtigen. Für Entwicklung solcher Modelle bestehen bereits verschiedene Ansätze. Einen dieser Ansätze stellen Zirn und Weikert in ihrer Arbeit vor [10]. Sie beschreiben vier Phasen der Modellbildung und beginnen mit einer Sammlung von Anforderungen. Ergebnis dieser ersten Phase sind Skizzen, Daten und Spezifikationen. In der zweiten Phase werden die Wirkzusammenhänge ergründet. Das Ergebnis dieser Phase ist ein physikalisches Modell, das sogenannte qualitative Modell. In der dritten Phase wird das quantitative Modell, auch mathematisches Modell genannt, erstellt. Dabei werden die Einzelprozesse in Formeln gefasst. Im Anschluss wird das Modell als Blockschaltbild umgesetzt.

Ziel des in diesem Beitrag vorgestellten Vorgehens ist es Teilschritte des generellen Vorgehens der Produktentwicklung mit den Ansätzen zur Modellbildung zu erweitern. Dabei soll ein Ansatz zur Vorauslegung und Bewertung von Messsystemen zur Erfassung von mechanisch-dynamischen Größen für die Validierung am Beispiel von Power-Tools geschaffen werden. Die Teilschritte, Ermittlung von Funktionsstrukturen und Suche und Bewertung möglicher Lösungen, aus der VDI 2221 werden mit den vier Phasen der Modellbildung nach Zirn und Weikert kombiniert. Außerdem soll der Anwender dabei unterstützt werden, unabhängig von dessen Vorkenntnissen, Messsysteme, die dem Stand der Technik entsprechend, zu entwickeln. Gleichzeitig soll eine Bewertung und damit eine belastbare Auswahl der Messtechnik ermöglicht

werden. Hierzu werden zwei neue Methoden eingeführt, welche bei der Identifikation möglicher Lösungen, sowie deren Bewertung und Auswahl unterstützen.

3 Vorstellung und Anwendung der Methode an einem Beispiel

Aus der Kombination des Vorgehens der VDI 2221 und der vier Phasen der Modellbildung konnte ein Ansatz generiert werden, welcher eine Vorauslegung von Messsystemen in drei Schritten ermöglicht. In Abbildung 1 sind die einzelnen Aktivitäten des Ansatzes dargestellt. Im Folgenden wird der Ablauf kurz vorgestellt.

Zunächst werden im ersten Schritt die Anforderungen aus der initial übergebenen Messaufgabe an das Messsystem ermittelt. Zur Identifikation der Anforderungen sollten die Hauptarbeitsschritte zur Erstellung von Anforderungslisten, wie sie Feldhusen et al. beschreiben herangezogen werden [11]. Das Ergebnis ist eine Anforderungsliste, welche durch später gewonnene Erkenntnisse erweitert werden kann [11].

Im zweiten Schritt werden die relevanten Wirkzusammenhänge von dem noch zu entwickelnden Messsystem und dem Prüfling, z.B. eine Schlagbohrmaschine, ergründet. Anhand dieser und mit den zuvor ermittelten Anforderungen werden die mechanischen Zusammenhänge, in Form von mathematischen Modellen, z.B. Bewegungsgleichungen oder das Materialverhalten, aufgestellt.

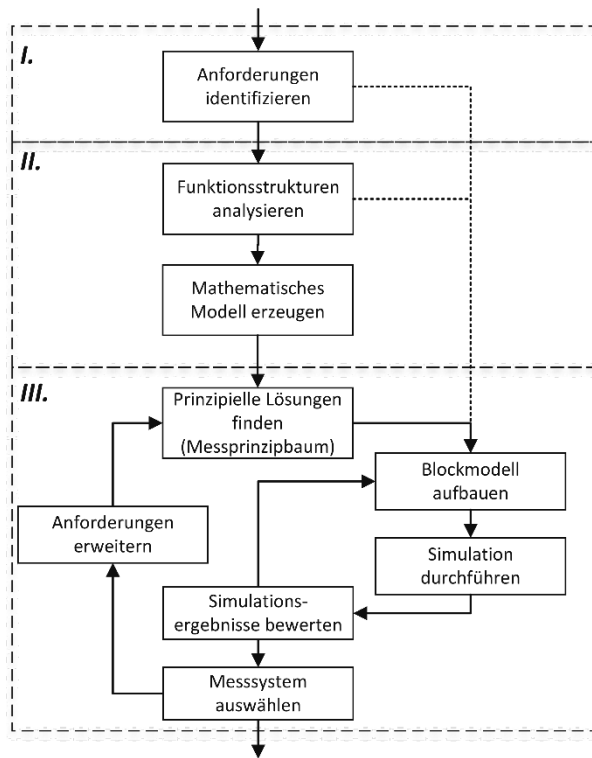


Abbildung 1: Ablaufdiagramm zur Auswahl des Messsystems mit Teilaktivitäten

Im letzten Schritt wird mit Hilfe des Messprinzipbaums, welcher auf den ermittelten mechanischen Zusammenhängen basiert, eine Vielzahl möglicher Lösungen generiert [12]. Die Grundlage dieses Tools ist die Aufschlüsselung der mathematischen Gleichungen in einem Baumdiagramm. Ebenso ermöglicht der Messprinzipbaum eine Priorisierung der gefundenen Lösungen, welchen auch technische Komponenten zugeordnet werden. Im Detail wird die Methode *Messprinzipbaum* in Abschnitt 4 anhand eines konkreten Beispiels erklärt. Die hoch priorisierten Lösungen werden anschließend, anhand der wirkenden mechanischen Zusammenhänge und der Eigenschaften der betreffenden Messkettenkomponenten in einem Blockschaltbild abgebildet. Der Detailierungsgrad der einzelnen Blöcke ist dabei an die Datenblätter der einzelnen Komponenten angepasst, sodass mehrere mögliche Komponenten verschiedener Hersteller berücksichtigt werden können. Damit kann die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Lösungen durch Simulation des Verhaltens

verglichen und damit die Lösung bewertet werden. Den Aufbau der Simulation zeigt Abbildung 2.

Dabei wird unter anderem die Abweichung der Ausgangssignale vom Eingangssignal durch einen Vergleich betrachtet. Anhand der Simulationsergebnisse erfolgt eine Bewertung (vgl. Abbildung 1) und abschließend eine belastbare Auswahl. Sind die Simulationsergebnisse nicht eindeutig, muss zunächst die Simulation weiter detailliert werden. Kann keine der Lösungen die Anforderungen an die Qualität der Messergebnisse erfüllen, müssen die Anforderungen an die prinzipiellen Lösungen erweitert werden.

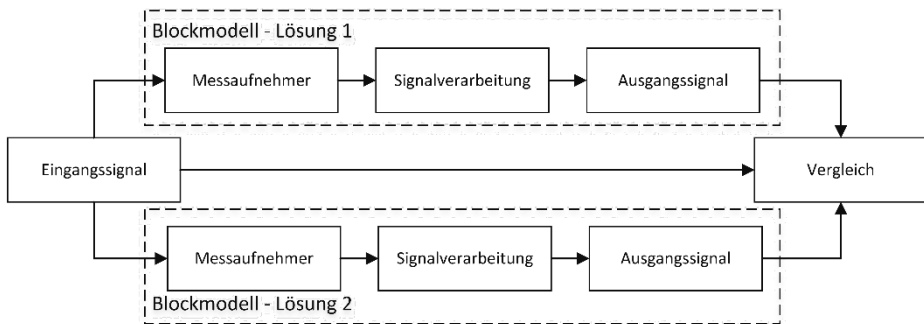


Abbildung 2: Aufbau der Simulation

4 Anwendung am Beispiel

Im Folgenden wird die Methode an einem Prüfstand zur Messung des Verlaufs der Schlagkraft eines Bohrhammers angewandt. Dieser ist vereinfacht in Abbildung 3 dargestellt. Die Messaufgabe in diesem Beispiel ist es den Schlagimpuls, welcher die Arbeitsleistung des Bohrhammers charakterisiert zu erfassen. Zwischen Untergrund und Meißel befindet sich folglich der Messaufnehmer, welcher den an den Untergrund übertragenen Schlagimpuls messen soll. Die Anforderungen an das Messsystem werden abgeleitet, Beispiele sind die notwendige Abtastfrequenz oder die maximal messbare Kraft.



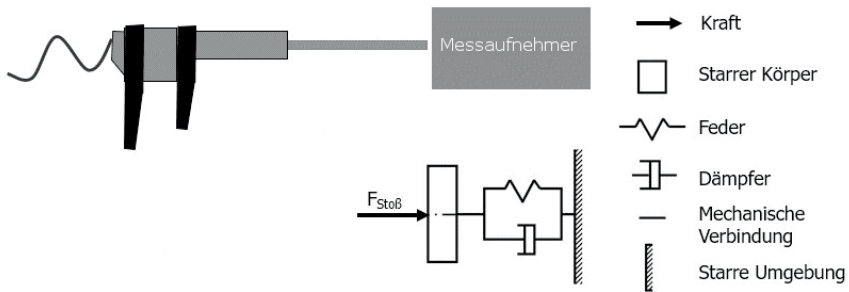


Abbildung 3: Prinzipdarstellung des Prüfaufbaus

Ausgehend von der eigentlichen Messaufgabe werden in der ersten Stufe die Rahmenbedingungen und expliziten Anforderungen identifiziert. In der zweiten Stufe kann zum Beispiel eine Hauptmerkmalliste zur Identifikation weiterer Anforderungen eingesetzt werden. [11]

Im zweiten Schritt werden die relevanten Funktionsstrukturen des Systems ermittelt. In diesem Beispiel bedeutet dies, dass der Untergrund bzw. der Messaufnehmer näher betrachtet wird. In diesem Beispiel ist es ausreichend den Messaufnehmer als Masse-Feder-Dämpfer Modell abzubilden. Aus diesem Modell kann dann das mathematische Modell entwickelt werden, indem aus den wirkenden Kräften die Bewegungsgleichung abgeleitet wird.

$$F_{Gesamt}(t) = F_f(x) + F_d(\dot{x}) + F_m(\ddot{x}) \quad (1)$$

Aufbauend auf diesen Ergebnissen kann nun der abschließende Schritt erfolgen. Ziel ist es, zunächst prinzipielle Lösungen zu identifizieren und eine Priorisierung dieser durchzuführen. In Abbildung 4 wird der Messprinzipbaum dargestellt, welcher die Zusammenhänge zwischen den Messgrößen visualisiert.

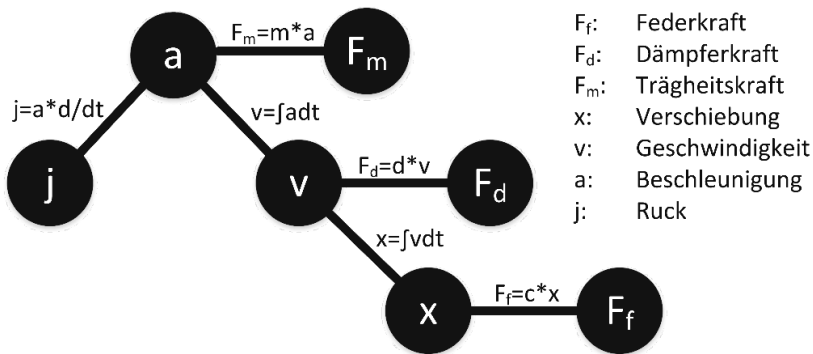


Abbildung 4: Aufbau des Messprinzipbaums

Wie für Baumdiagramme üblich, besteht der Messprinzipbaum aus Knoten und Verbindungselementen. Messgrößen werden im Messprinzipbaum durch Knoten dargestellt, die Verbindungslinien entsprechen den physikalischen bzw. mathematischen Zusammenhängen zwischen diesen. Um den Messprinzipbaum entsprechend der Messaufgabe aufzubauen wird die relevante Messgröße, also in diesem Beispiel die Kraft, im Zentrum angeordnet und um diesen Knoten herum die entsprechend anderen Knoten. Im Gegensatz zu üblichen Baumdiagrammen folgt die räumliche Orientierung der Verbindungslinien folgenden zwei Regeln:

1. Verbindungen, welche einen linearen Zusammenhang darstellen werden horizontal, also in der gleichen Ebene angeordnet
2. Verbindungen, welche einen integralen Zusammenhang darstellen werden durch die Anordnung des Integranden auf der linken Seite der unteren Ebene dargestellt

Dies bedeutet in diesem Beispiel, dass Messgrößen, aus denen die Kraft über lineare Zusammenhänge ermittelt werden kann, sich in der gleichen Ebene wie der Knoten der Kraft befinden sowie, dass Messgrößen, aus denen die Kraft durch Integration oder Differentiation aus einer Größe bestimmt werden können, links unter oder links über dem Knoten der Kraft orientiert werden. [12]

Für jede mit der Kraft verbundene Messgröße können nun wiederum andere Größen für eine indirekte Messung gefunden werden. Entsprechend den eben beschriebenen Regeln sind diese in der gleichen Ebene, darunter oder darüber anzuordnen. Es kann dabei auch zu mehrfach aufgeführten Messgrö-

ßen kommen. Eine Zusammenführung von Größen ist möglich, wenn es dabei zu keinem Konflikt bezüglich der mathematisch-physikalischen Zusammenhänge kommt. Die zu ermittelnde Messgröße *Kraft* soll allerdings nur einmal auftauchen.

Häufig setzen sich dynamische Messgrößen aus mehreren Anteilen zusammen. Die ermittelte Bewegungsgleichung in diesem Beispiel gibt drei Anteile vor. Es bietet sich an, den Messprinzipbaum zunächst für einen der Anteil aufzustellen und die übrigen Anteile durch mathematisch-physikalische Zusammenhänge in diesen zu integrieren. Ein entsprechendes Baumdiagramm auf Basis der Trägheitskraft mit den beiden anderen Anteilen wird in Abbildung 4 dargestellt. Im Folgenden wird der Anteil der Messgröße Kraft aus der elastischen Deformation als wesentlicher Anteil betrachtet, da wie in Abbildung 4 zu erkennen die beiden anderen aus diesem berechnet werden können. Für diesen Anteil sollen nun geeignete Messprinzipien priorisiert werden. Grundlage der Priorisierung ist der Pfad zwischen dem Knoten, welcher den Anteil der Kraft repräsentiert und dem Knoten, welcher die Messgröße eines entsprechenden Messprinzips repräsentiert. Für die Bewertung dieser Pfade gelten wenige Grundregeln. Kurze Pfade sollten immer bevorzugt und gut bewertet werden. Horizontale Verbindungen, also lineare Zusammenhänge sollten besser als die Integration oder Differentiation bewertet werden. Im Detail muss die Anwendung dieser Regeln spezifisch an die Messaufgabe angepasst werden. Bei der Betrachtung des Messprinzipbaums in Abbildung 4 wird deutlich, dass eine Bestimmung der Federkraft durch Erfassung der Verschiebung den kürzesten und rein linearen Pfad aufweist. Dadurch ist die Erfassung der Verschiebung als bester Pfad zu bewerten. Im Gegensatz dazu wird die Erfassung der Beschleunigung schlechter bewertet, da der Pfad sehr lang und die notwendigen mathematischen Operationen nicht rein linear sind. Die ermittelte Bewertung der Pfade kann direkt im Messprinzipbaum visualisiert werden, z.B. durch ein Ampelsystem oder Zahlenwerte. Anhand der Bewertung werden Messgrößen, welche für die Messaufgabe am günstigsten sind ausgewählt.

Bis zu diesem Punkt wurden nur die Zusammenhänge zwischen den Größen berücksichtigt. Beginnend mit den gut bewerteten Pfaden folgt nun eine Recherche zu passenden, handelsüblichen Messaufnehmern. Gefundene Messaufnehmer werden mit den zu Beginn ermittelten Anforderungen abgeglichen und bei Erfüllung dieser den jeweiligen Pfaden zugeordnet. In diesem Beispiel können zum Beispiel Anforderungen wie der maximaler Messbereich oder die Grenzfrequenz der Aufnehmer zu einem Ausschluss führen. Kann für eine Messgröße kein Messaufnehmer zur direkten Erfassung gefunden werden, wird die ursprünglich im Baum festgelegte Größe als Messgröße ausgeschlossen. Die gefundenen Lösungen, bestehend aus einem Pfad und zugehörigen Messaufnehmern werden in einer priorisierenden Liste zusammengeführt. In diesem Beispiel müssen nach Gleichung (1) drei Anteile (Federkraft,

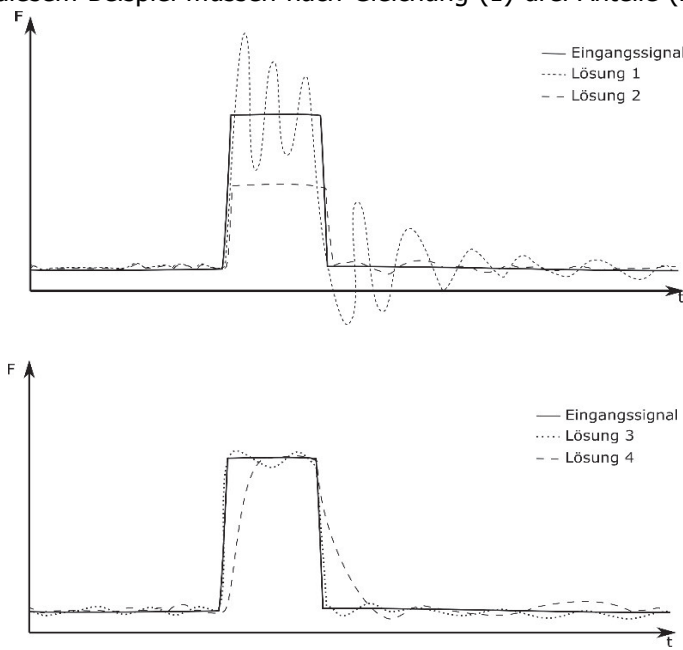


Abbildung 5: Qualitatives, simuliertes Ausgangssignal der Lösungen

Dämpferkraft und Trägheitskraft) erfasst werden, um die Messaufgabe zu erfüllen. Für jeden dieser Anteile liegt nun eine Liste vor. Die gut bewerteten Lösungen der Listen werden miteinander abgeglichen, sodass Gesamtlösungen gefunden werden können, welche mit wenigen Messaufnehmern funktionieren. Für die so kombinierten Gesamtlösungen werden nun Blockmodelle aufgebaut, um durch eine Simulation des Verhaltens die geeignetste Lösung zu ermitteln. Dabei werden die verschiedenen Lösungen mit äquivalenten

Eingangssignalen angeregt und mit den jeweiligen Ausgangssignalen verglichen, wie Abbildung 2 für den Vergleich von zwei Lösungen darstellt.

Die Umsetzung dieses Konzepts kann z.B. in MATLAB Simulink[®] erfolgen. Für die gewählten Messprinzipien werden zunächst technische Komponenten mit Hilfe einer Recherche ermittelt und Blockmodelle abgebildet. Anhand der Datenblätter werden diese Modelle angepasst, sodass diese das Verhalten der realen Komponenten abbilden. Die erstellten Modelle werden zu den entsprechenden Messketten verschaltet und mit einem Testsignal oder einem der Messaufgabe entsprechendem Eingangssignal beaufschlagt, welches an die spätere reale Anregung angelehnt ist. In diesem Beispiel entsprechen daher die erwartete Krafthöhe und Kraftdauer dem Bohrhämmer. Die Ausgangssignale verschiedener Lösungen und das Eingangssignal sind in Abbildung 5 qualitativ dargestellt. Die Unterschiede zwischen den Signalen werden betrachtet um zu entscheiden, ob diese den Anforderungen entsprechen oder ob eine Iteration in der Auswahl der Lösung notwendig ist. In der Abbildung ist bei Lösung 2 erkennbar, dass diese aufgrund von einem zu geringen Messbereich nicht geeignet ist. Ebenso ist Lösung 1 aufgrund des großen Überschwingens und Lösung 4 aufgrund der Trägheit der Lösung ungeeignet. Lösung 3 zeigt ein Verhalten, welches die Anforderungen erfüllt und wird deshalb in diesem Beispiel als Lösung ausgewählt.

5 Diskussion

Ziel der Methode ist es, den Entwickler bei der Vorauslegung und Auswahl von Messsystemen zur Validierung von Power-Tools, z.B. Bohrhämmer, zu unterstützen. Ein Vorgehen in drei Schritten hierfür wurde vorgestellt. Kernelemente des Vorgehens sind der Messprinzipbaum und die Simulation der Messketten.

Der Messprinzipbaum dient unter anderem zur Visualisierung der ermittelten mathematischen Modelle und der physikalischen Abhängigkeiten. Er ermöglicht dem Entwickler direkte und indirekte Messverfahren zu identifizieren und dadurch den größtmöglichen Lösungsraum zu erfassen. Dies unterstützt den Entwickler vor allem in Situationen, in welchen bestehende Lösungen auf Grenzen stoßen und neue Wege gefunden werden müssen. Die Bewertung der Pfade im Baumdiagramm erfolgt aktuell nach wenigen Regeln und ist damit stark vereinfacht, viele Einflüsse werden hier vernachlässigt. Eine detaillierte Betrachtung der Fehlerfortpflanzung in Abhängigkeit der Art der Messaufgabe sowie eine Aufnahme weiterer Bewertungsfaktoren erscheint sinnvoll. Die Recherche von handelsüblichen Komponenten erfolgt mithilfe der Anforderungsliste. Diese entwickelt sich im dritten Schritt des Vorgehens bei

der Simulation der Messketten stark weiter und führt dadurch zu zahlreichen Iterationen in diesem Schritt. Um den gesamten Aufwand zu minimieren müssen bereits im ersten Schritt die Anforderungen detailliert ermittelt werden.

Die Simulation der Messketten ermöglicht es die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Lösungen miteinander zu vergleichen und die aus diesem Gesichtspunkt beste Lösung zu identifizieren. Aktuell wird jedoch nur das elektrische Verhalten der Messkettenkomponenten und das mechanische Verhalten der Messaufnehmer berücksichtigt. Der Einfluss des restlichen Messaufbaus und des Prüflings wird vernachlässigt. Die vorgestellte Methode muss hinsichtlich einer Berücksichtigung der realen Gestalt erweitert werden, um auch eine Aussage über die spätere Messqualität des realen Messsystems treffen zu können. Das entstehende ganzheitliche Simulationsmodell bietet dem Entwickler dann zusätzlich die Möglichkeit die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Messsystems zu optimieren.

6 Conclusion

Der vorgestellte Beitrag adressiert Entwickler, welche Messsysteme für hochdynamische Systeme aufbauen. In diesem Beitrag wird ein Vorgehen auf Basis bestehender Vorgehensweisen in der Produktentwicklung und Ansätzen der Modellbildung entwickelt und anhand des Beispiels Bohrhammer erklärt. Kernelemente des Vorgehens sind zwei Methoden. Die erste Methode ist der Messprinzipbaum, auf dessen Basis eine Vorauswahl von Messprinzipien getroffen werden kann. Die zweite Methode ist eine Simulation, welche nur auf Basis von Datenblätter der Hersteller die Qualität der Lösung bewertet werden kann. Dadurch wird es möglich vor der Beschaffung der Messtechnik bereits fundierte Erkenntnisse zu schaffen. Dies erzwingt gewünschte In-Stage-Iterationen und Investitionsentscheidung können fundiert getroffen werden.

Literatur

- [1] Hall, et al.: Study by Hewlett Packard, Hewlett Packard, 1992
- [2] Albers, A. et al.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess, Handbuch Produktentwicklung, Springer, 2016
- [3] Albers, A. et al.: Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess, VDI Konstruktion, 2015

-
- [4] Matthiesen, S. et al.: Modellunterstützte Reduktion von Störgrößen in einem Messsystem zur Erfassung der Geräte-Werkstück-Wechselwirkungen, In Design Society (Ed.), 26. DfX-Symposium (Vol. 26, pp. 157–168). TuTech Verlag, Hamburg, 2015
- [5] VDI Richtlinie 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI, 1993
- [6] A. Albers, A. Radimersky, T. Turki: Verbesserte Ausschöpfung vorhandener Innovationspotentiale durch Kopplung von Prozess-, Wissens- und Methodenmanagement, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, 2012.
- [7] D. C. Wynn: Model-Based Approaches to Support Process Improvement in Complex Product Development, University of Cambridge, 2007.
- [8] C. Geis, R. Bierhals, I. Schuster, P. Badke-Schaub, H. Birkhofer: Methods in Practice - a Study on Requirements for Development and Transfer of Design Methods. In: Proceedings of International Design Conference – Design 2008, Dubrovnik, 2008.
- [9] J. P. Hessling: A novel method of estimating dynamic measurement errors, Measurement Science and Technology 20, 2009
- [10] O. Zirn; S. Weikert: Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme: Eine praxisnahe Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [11] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H.: Konstruktionslehre. Berlin: Springer 2013.
- [12] Anding, T.: Eine Methode zur Vorauslegung und Bewertung von Messsystemen für mechanische Größen exemplarisch am Tangentialschlagimpuls, Karlsruhe, 2016



Opportunity Cost of Modularity: Challenges and Requirements for Balancing the Dilemma of Product Platforms

Marc Windheim^{1,2}, Dieter Krause¹

¹ *Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design
Hamburg University of Technology*

² *Department Drives, Embedded Software and Technology
Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH*

Abstract

Modular product structure, respectively, platform definition is challenging for decision makers such as project managers or managers which are responsible for a product portfolio. Decisions with influence on modularity of the product family or the product portfolio have effects on internal and external variety and thus induce desired and non-desired effects in firms. This paper describes the problem of balancing effects induced by modularity and introduces modularity-induced opportunity cost as a perspective to the problem.

Keywords: Platform, Platform design, Modularity, Variant Management

1 Introduction

Modular product structures have been in scope of research in the past decades since their principles enable huge potentials for companies to satisfy customer needs while keeping internal variance low [1] (see Figure 1). Managers, project managers and engineers define modular properties of products, and therefore the modularity of the portfolio. Thus, decision making in the context of modular boundary and platform definition is one of the key

success factors of modularization because of its wide-spread impacts on product families and on the product portfolio.

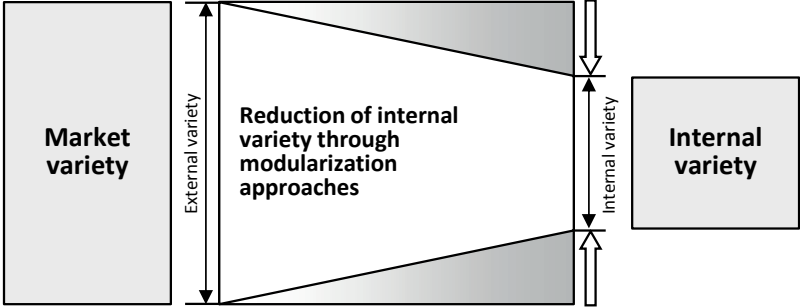


Figure 1: Goal of modularization [1]

The power of modular properties and platforms and the overall positive effects on product life phases and on companies utilizing these principles have been widely investigated in literature [2]. By defining the design of a product, modularity for product families and therefore the modular properties of a product portfolio is determined. Thus, effects of modular systems are desired by different stakeholders. During product development projects, project teams develop different product structure alternatives. These alternatives, however, have an influence on the modularity of the product portfolio, resulting in different external and internal variety. This difference in external and internal variety causes positive and negative effects, which have to be considered for deciding for one or another product structure alternative.

If it comes to decision making, there are major challenges to balance desired (e.g. reduction of resource allocation per product variant) and non-desired effects (e.g. reduced differentiation of product variants). This paper examines a case study where product structure alternatives impact external and internal variety and therefore cause desired and non-desired effects. Challenges in balancing the trade-offs and requirements for a support are further identified. Building on the key findings, opportunity cost of modularity are introduced as a perspective to describe the decision situation and the effects induced by modularity within product development projects of modules and module families.

2 Review of the literature

Decision making in the context of modularity, platforms and product structures is in scope of research for the past decades. Accordingly, supporting methodologies to develop modular product structures have been postulated, such as e.g. such as Modular Function Deployment [6], Structural Complexity Management [7], Theory of Modular Design [8] or the Integrated PKT approach [1].

In addition to development-oriented research, research on effects of product structures and methods for their assessment has been carried out. [2] point out that research on effects of modular product structures is not consolidated and further not supporting product structuring in a sufficient manner. The benefits of variant-reduction are commonly known in literature and in practice; however, companies and researchers still left the question open on how to optimize variety in product portfolios. Methods to support the assessment of product structures and therefore to support decision making for product structuring follow different principles [11]:

Consideration of metrics measuring the degree of modularity:

Product and portfolio structure is measured by performance indicators such as e.g. variance flexibility [6] or platform commonality index [10].

Consideration of metrics measuring the results of product architecture design: The approaches not only focus on the product structure itself but on their effects induced, such as effects caused by commonality and variety as well as strategic and financial effects.

However, fewer methods meet the requirements to assess positive and negative impacts of modular structures, or provide sufficient support for decision makers. This problem on conflicting requirements of different stakeholders regarding the effects of modularity is e.g. touched by [9]. [3] show effects of a modular product structure alternative and describe the challenges handled during the decision process, stating the impact of modularity on customer requirements (effect of external variety) stood in major comparison to the increase of the projects' operational expenditures and to the increase of lead time (effect of internal variety). Divergences in the system of objectives for the architecture alternative are visualized in an impact model in order to provide support in the regarded decision situation. This technique is also applied by [2], where the effects of modularity are visualized in impact models.

3 The dilemma of product platforms

By developing modular product families the development teams induce internal and external variety in companies. The induced variety differs for different product architectures, e.g. by increasing standardization, postponement strategies in the development process, use of platforms or carry-over parts, and causes effects in companies in certain departments, affecting relevant performance indicators such as lead time, turnover, resource allocation, complexity cost or, in general, complexity in the company.

Figure 2 illustrates the problem described in a case study [3], where two different product architecture alternatives (alternative "A" and "B") were developed resulting in different external and internal variety. Deciding for the alternative which leads to higher external variety (desired) also determines higher internal variety (non-desired) in the regarded case.

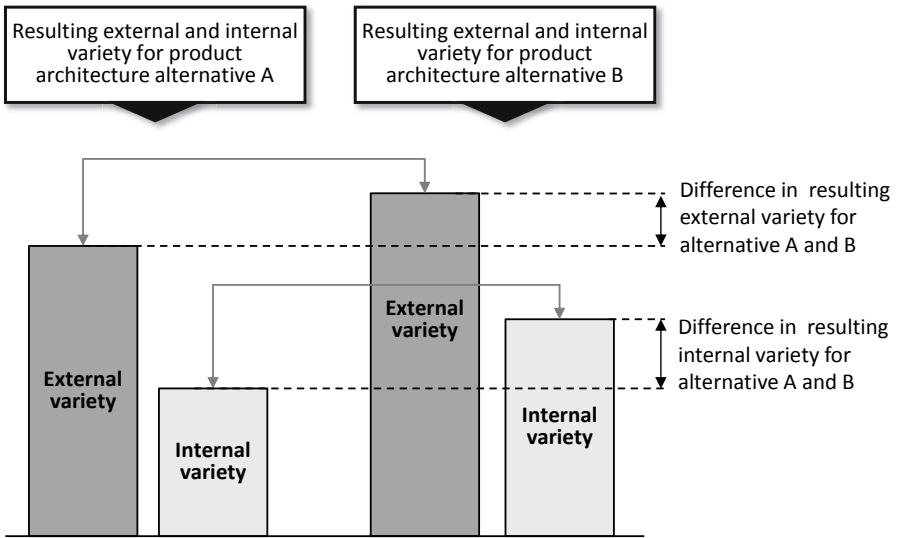


Figure 2: The dilemma of product platforms

The effects induced by the differences are decisive for decision situations, since crucial performance indicators are affected here [3]. The dilemma will further be explained by a case study conducted at an international company from the power tool sector.

4 Empirical research

4.1 Research design and case studies' characteristics

The results presented in this paper are based on two explorative case studies conducted at the international power tool company Hilti. The companies' basic information relevant for the later finding is shown in the following:

- A total number of 22.000 employers work at the company
- The company's value chain includes i.a. product development, production and sales of solutions for professional construction applications
- The organization is divided into business units; product development of modules is realized through a matrix organization [5]
- The production volumes can be considered as high

Data was extracted from a development project for an electronics module family and from a strategy project. Utilized collection methods are direct observations, analysis of relevant documents and interviews of respective experts. Table 1 summarizes the characteristics of both case studies.

Table 1: Overview of conducted case studies

	Case Study 1 Development project for an electronics module family	Case Study 2 Strategy project
Team size of core team	< 5	5 - 10
Duration of project	12 - 36 months	< 12 months
Project output	Modular product family (electronics)	Strategy
Case Study purpose	- Identify effects induced by different product architecture alternatives - Identify challenges for balancing internal and external variety - Identification of requirements (partly)	- Identify challenges for balancing internal and external variety - Identification of requirements

4.2 Case study 1

Case Study 1 focusses on the phase where technical concepts of each of the electronics are defined and therefore the modularity of the modular product family is defined. Important portfolio characteristics, such as volumes, carry-over-parts or platform parts are determined here.

The task in the development project is to develop a modular product family for a motor control unit (MCU) and human-machine-interface (HMI). The modules are planned to be implemented in six product families consisting of approximately 15 products. The development team consists of project management, technical project management, supply manager, supply engineering, electronics hardware development, electronics software development, hardware development and testing. To achieve the next milestone, the technical design has to be frozen. In order to meet different requirements, the team has developed different design alternatives which are described in Table 2 regarding their degree of standardization (internal variety), combinability of modules and customer requirements (external variety):

Table 2: Comparison of modular product family alternatives

		Degree of standardization Regarding software modules, schematic modules and layout	Combinability Combinability of modules within product family	Requirements Fulfillment of customer requirements
Alternative 1	MCU HMI	rather low	not given	trade-off in customer requirements
Alternative 2	MCU HMI	high rather low	not given	fulfilled
Alternative 3	MCU HMI	high	given	fulfilled

Figure 3 illustrates standardized and variant software and schematics (circuit diagrams) for alternative 3 in a visualization based on a Modular Interface Graph (MIG) [4]. The different design alternatives were assessed in multiple dimensions. The effects induced by modularity as discussed in the context of this project were described in the subsequent chapter.

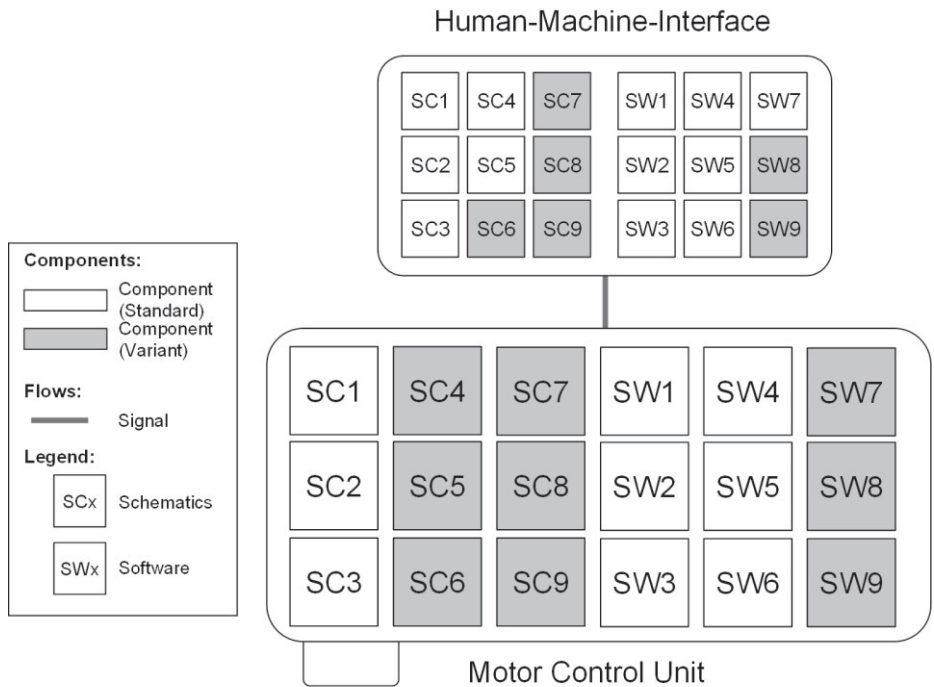


Figure 3: Modular Interface Graph (MIG) for electronics family illustrating schematics and software variety

4.3 Observed effects induced by differences in modularity

The most important effects caused by the different product structure alternatives are predicted by the development and management team. These effects are allocable to the dimensions meeting of customer requirements, module cost (for each product, product families and for the product portfolio), operational expenditures and lead time. Figure 3 shows the differences in costs for each of the modules, for the product families (A-F) and for the portfolio. Based on the cost calculation, alternative 1 and 2 are cost optimized with respect to the reference scenario (as it is today). In contrast, alternative 3 would lead to increase costs in product family F, C and E.

Regarding lead-time and operational expenditures of the electronics family, alternative 3 presents to be the most desired choice, followed by alternative 2, as shown in Figure 5. Taking the combinability enabled by alternative 3 into consideration, we see that there are trade-offs in each of the relevant

dimensions to be made, independently from which alternative to choose. Choosing for alternative 1 would significantly impact combinability, which would not be given, however, result in the lowest product cost for the portfolio.

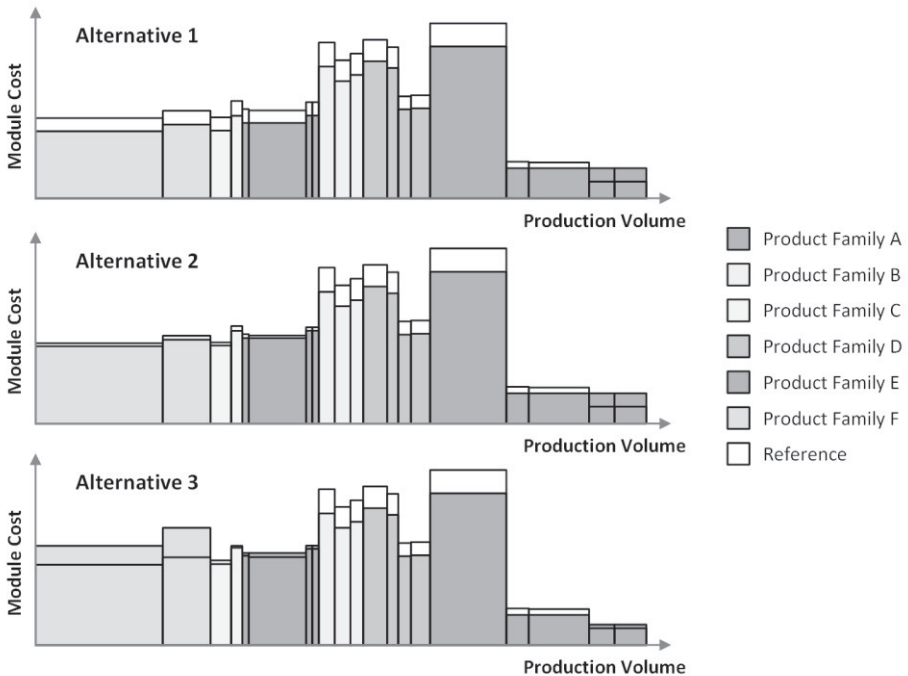


Figure 4: Effects on portfolio cost structure induced by differences in modularity

Alternative 2 represents the alternative with approximately same cost structure as the today's portfolio, but has longer lead time and higher project costs. Alternative 3 in turn enables full combinability, the lowest project expenditures, fastest lead time but also result in highest product cost, especially for product family F. Compared to the case study in [3], same effects (operational expenditures, lead-time, product cost) and similar trade-off discussions (additional efforts, impact on meeting customer requirements) are challenging development teams and decision makers.

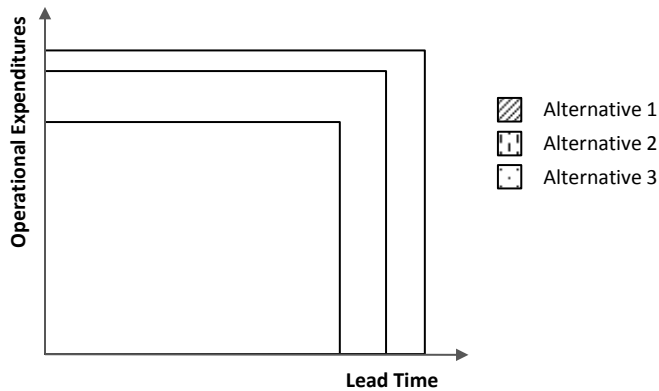


Figure 5: Effects on operational expenditures and on lead time induced by differences in modularity

5 Key findings and implications of the case studies

The findings and implications, which focus on the challenges and requirements for decision making in the context of modular product definition, are based on the two case studies.

From a managerial perspective, decision making processes take too long to find the solution with the most valuable modular structure for any of the stakeholders. During the decision process, possible compromises (e.g. in terms of product cost, packaging) for modular and for platform structures are discussed repetitively. The separation and illustration of the differences is one of the most valuable elements in the decision making process. By including dimensions in the decision process, which is based on estimations, derivations of alternatives are more tangible for decision makers. If it comes to decision making between different product structure alternatives, differences in their resulting effects are in focus of consideration ("What could we achieve as product cost if we go for alternative X?"). Building on that argumentation, the effects induced by modular structures (positive and negative, depending on the stakeholder's requirements and perspective) have to be assessed, especially the differences between the product architectures causing differences in desired and non-desired effects. The prediction of internal effects (e.g. on lead time, resource allocation and complexity cost) and their comparative assessment as well as the prediction of external effects and their comparative assessment are what we consider the basis for future research in the context of balancing the dilemma of modularity. In addition, the formal representation

of modular product structure decisions and the visualization of differences in their effects are in focus of the subsequent argumentation.

6 Modularity-induced opportunity cost

Based on the deliberations in this paper about costs of rejected product architecture alternatives and consequently costs of rejected effects of modularity in the portfolio, we introduce a new perspective on product architecture decisions by the fundamental theory of opportunity cost. From what we've observed, the definition of modularity in product development decisions and in portfolio decisions induce cost of rejected alternatives for a set of performance indicators in decision situations with mutually exclusive alternatives. Hereby we introduce *modularity-induced opportunity cost* based on the common definitions in business administration as following.

Modularity-Induced Opportunity Cost is the foregone value of rejected modular product structure alternatives.

By this definition, we broaden relevant decision parameters from absolute values (product cost, lead time, customer requirements) to the differences and foregone added value of chosen/rejected alternatives. Modularity-induced opportunity costs occur for product structure alternatives which differ in their modular properties, respectively, platform design. Exemplified at the case study presented in this paper, modularity induces opportunity cost in resource allocation by rejecting alternative 3. For example, the foregone value of the rejected modular product alternative 3 is e.g. 20000h resource availability and therefore value creation for other product development projects (e.g. two months faster time to market for other project, which is running parallel).

7 Outlook

Cases in the context of modular product structure definition show the difficulties in assessing positive as well as negative effects of modularity and platforms. For highly integrated modular systems, such as the one described in the case study, we see that lowering internal variety also effects external variety and vice versa. Deciding for or against an alternative allows decision makers to create the value of increasing external variety and to get opportunity cost of rejected decrease of internal variety, or to get opportunity cost for rejected external variety and to create value by lowering internal variety.

One of the subsequent elements of future research is the investigation of suitable preparation, respective, visualization of data which is necessary for

decision makers. According to the latest implications, we hypothesize that the following steps support decision making in the context of the development of modular product structures:

- Create transparency by suitable **visualization of existing internal and external variety**, e.g. Tree of variety [1]
- Create transparency by suitable **visualization of resulting internal and external variety**, e.g. Tree of variety [1]
- Foster **identification of relevant effects** of modularity alternatives and create transparency by its visualization
- Create transparency by **consideration of modularity-induced opportunity cost** for modular structure and platform alternatives
- Development of **a suitable method to support decision making** in the context of modular product structures and platforms

The support shall not only be able to include absolute values, but also highlight modularity-induced opportunity cost for product structure alternatives. Besides, existing approaches and their solution to this problem shall be investigated in future research. A general support shall be derived to meet the requirements for decision making in the context modularity on project-management-level (decisions with influence on the modular properties of the product portfolio made within module development projects) and on management-level, which represents the portfolio-level (decisions with influence on the modular properties of the product portfolio made out of module development projects). In a long term, recurrence of the findings from the case studies presented in this paper and the findings from [3] are in scope to prove evidence of findings and their implications.

References

- [1] Krause et al.: Integrated Development of Modular Product Families: A Methods Toolkit. In: Simpson, T.W.; Jiao, J.; Siddique, Z.; Hölttä-Otto, K. (Eds.): Advances in product family and product platform design, Springer, New York, pp. 245–269.

-
- [2] Hackl, J.; Krause, D.: Effects of modular Product Structures on Life Phases and economic Factors, 14th International Design Conference – Design 2016, Dubrovnik, 2016.
- [3] Windheim, M.; Hackl, J.; Gebhardt, N.; Krause, D.: Assessing Impacts of Modular Product Structures on the Firm: A Case Study, 14th International Design Conference – Design 2016, Dubrovnik, 2016.
- [4] Gebhardt, N.; Bahns, T., Krause, D.: An example of visually supported design of modular product families. 24rd CIRP Design Conference, Milano, 2014.
- [5] Gasnakis, S.: Modularization of Product Development in Global Manufacturing Companies, Optimus, 2011.
- [6] Erixon, G.: Modular function deployment, The Royal Inst. of Technology, Dept. of Manufacturing Systems, Assembly Systems Division, Stockholm, 1998.
- [7] Lindemann, U., Maurer, M., Braun, T.: Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. Stone 1997]
- [8] Pimmler, T. U., Eppinger, S. D.: Integration analysis of product decomposition, ASME Conference on Design Theory and Methodology, 1994, pp. 343–351.
- [9] Eilmus, S., Ripperda, S., Krause, D.: Towards the development of commonal product programs. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, 2013.
- [10] Siddique, Z., Rosen, D. W.: On the applicability of product variety design concepts to automotive platform commonality, Proceedings of Design Engineering Technical Conferences – ASME/DECT’98, Atlanta, 1998.
- [11] Heilemann, M., Culley, S. J., Schlüter, M., Haase, H.-J.: Examination of modularization metrics in industry. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, 2013, pp. 427-436.

Erweiterung der Design for Cost Methodik für indirekte Änderungskosten

Christian Schmied¹, Marcel Gebhardt², Hugo D'Albert¹, Markus Mörtl¹

¹ *Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München*

² *International Performance Research Institute (IPRI)*

Abstract

Indirect cost of engineering changes in drive industry represent increasing challenges for companies. Their high frequency and complex cost impacts regarding when and where change costs occur in the change process, makes it difficult to forecast and influence the cost outcomes. Currently direct cost (eg. changed material) are well mastered in industry, but indirect cost (e.g. engineering design, administration, testing, procurement) are not yet supported sufficiently. Early knowledge of amounts and effective measures to influence indirect costs can be crucial for the economic result on the market. Hence, fast and easy prediction- and influence methods are needed in change decisions. We present an approach for company-specific derivation and application of indirect cost reduction measures.

Keywords: Design for Cost, Indirect Cost of Engineering Changes, Cost Reduction Measures, Indirect Cost Influence

1 Motivation

Wesentlicher Wettbewerbsvorteil der deutschen Antriebstechnikbranche ist die Entwicklung kundenspezifischer Lösungen. Die Folge ist jedoch, dass die Unternehmen kontinuierlich mit Änderungswünschen der Kunden konfrontiert werden. Neben der schnellen Einschätzung technischer Möglichkeiten ist auch eine frühzeitige Quantifizierung aller durch eine Produktänderung verursachten Kosten entscheidend. Die Bestimmung direkter Änderungskosten (bspw. geänderter Materialeinsatz) wird in der Praxis gut beherrscht. Hingegen sind die indirekten Änderungskosten (bspw. in Entwicklung, Vertrieb, Verwaltung etc.) aufgrund ihres komplexen Charakters bislang nur schwer zu bestimmen, und daher die zielgerichtete Ergreifung von Kostensenkungsmaßnahmen bislang nicht möglich gewesen. Der Beitrag präsentiert einen Ansatz, der dem Konstrukteur, Änderungsmanager bzw. den Beteiligten am Änderungsprozess ein einfaches Vorgehen mit anpassbaren Maßnahmen an die Hand gibt, um indirekte Änderungskosten unternehmensindividuell und änderungsfallspezifisch beeinflussen zu können.

2 Forschungsansatz

Aufbauend auf der Beschreibung des Systemverhaltens indirekter Änderungskosten [1] das die Kostenausprägungen für konkrete Änderungsfälle firmenindividuell und fallspezifisch aufzeigen kann, basiert der Forschungsansatz auf zwei Grundlagen. Zum einen wurde aus der Literatur eine Liste allgemeiner Maßnahmen herausgearbeitet, die in der Lage sind indirekte Änderungskosten zu senken. Zum anderen stützt sich der Ansatz auf eine Workshop-basierte Vorgehensweise in den Unternehmen, indem diese Liste auf die Unternehmenssituation reduziert, erweitert bzw. angepasst wird. Anhand der so gewonnenen Maßnahmen können ebenfalls in Workshops die Wirkungen der Maßnahmen für das Unternehmen über Expertenschätzungen eingestuft werden und als Maßnahmenkataloge für zukünftige Änderungen nutzbar gemacht werden. Der Forschungsgegenstand ist im Schnittstellenbereich Variantenmanagement [2], Änderungsmanagement und Gemeinkostenmanagement eingeordnet.

3 Unternehmensindividuelle und änderungsfallspezifische Wirkungen

Allgemeine Kostenwirkungen der Konstruktion auf Gemeinkosten wurden in der Forschung bereits betrachtet [3]. Indirekte Änderungskosten, d.h. durch Änderungen verursachte Gemeinkosten, befinden sich aktuell im Forschungsstadium [4]. Erste Studien [5] haben gezeigt, dass indirekte Änderungskosten starken unternehmensindividuellen und zudem änderungsfallspe-

zifischen Charakter aufweisen, deren Beschreibung über die Auswirkungen von Kostentreibern auf beteiligte Prozessschritte (Aktivitäten) und beteiligte Unternehmensbereiche (Rollen) einer Änderung gelingen kann. Hierzu wurde ein Änderungsprozessmodell entwickelt, das in der Lage ist das Systemverhalten indirekter Änderungskosten darzustellen [1]. Bild 1 zeigt das Änderungsprozessmodell als Kern eines Vorgehens zur Ableitung von gezielten Kostensenkungsmaßnahmen.

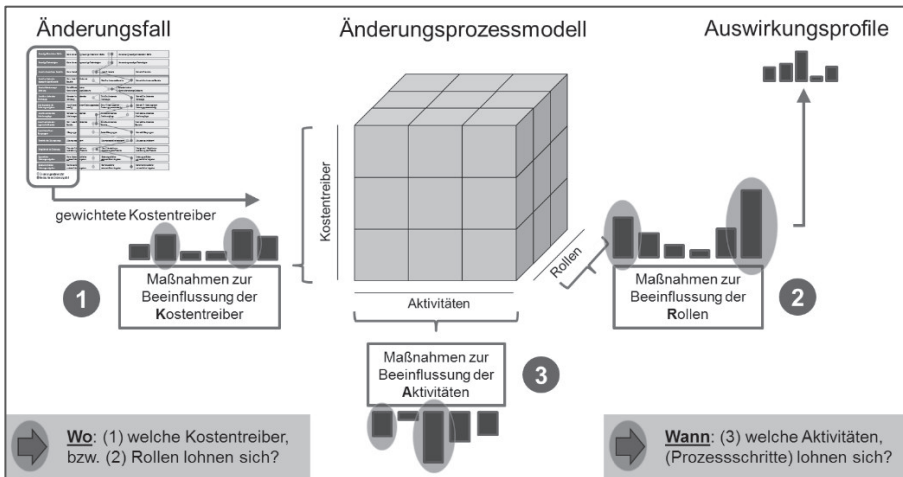


Bild 1: Änderungsprozessmodell zur Ableitung von Maßnahmen

Der Änderungsfall wird über unternehmensindividuelle Kostentreiber und deren fallspezifische Ausprägungen (gewichtete Kostentreiber) klassifiziert, z.B. Komplexitätsgrad der Änderung in Ausprägung „gering=1“, „mittel=2“ oder „hoch=3“. Die Auswirkungen der Kostentreiber auf die Aktivitäten und Rollen werden über Einflussmatrizen (Kostentreiber/Aktivitäten, Kostentreiber/Rollen) dargestellt, die für jedes Unternehmen in Workshops mit geringem Zeitaufwand erhoben werden können. Eine einfache Spalten/Zeilensumme der Multiplikation von Ausprägungswerten der Kostentreiber mit den Zellen der Einflussmatrizen ergibt Auswirkungsprofile der Änderungsaufwände/-kosten, an denen sich der Konstrukteur orientieren kann. Auf dieser Basis kann z.B. entschieden werden, wo und wann es sich lohnt Maßnahmen zur Kostensenkung einzusetzen.

Die Beherrschung der indirekten Änderungskosten erfolgt durch den Einsatz von geeigneten Kostensenkungsmaßnahmen, die sich an den Elementen

des Änderungsprozessmodells, d.h. Kostentreiber, Rollen und Aktivitäten orientieren, und durch ein einfaches Vorgehen strukturiert anwenden lassen.

4 Maßnahmen zur Senkung indirekter Änderungskosten

Um indirekte Änderungskosten gezielt beeinflussen zu können, müssen einerseits Maßnahmen identifiziert werden die im Unternehmen praktikabel anwendbar sind. Andererseits müssen die Wirkungen dieser Maßnahmen firmenindividuell quantifiziert werden. Daraus lassen sich firmenspezifische Maßnahmenkataloge erarbeiten die für zukünftige Änderungsfälle einsetzbar sind.

Anhand von Unternehmensbefragungen wurde ermittelt dass analog zum Systemverhalten indirekter Änderungskosten auch entsprechende Maßnahmen zu Kostensenkung firmenindividuelle und änderungsfallsspezifische Wirkungen haben. In erster Übersicht können Maßnahmen anhand des Änderungsprozessmodells in änderungsfallübergreifende (z.B. komplett alternative Änderungslösung) und ursachen- bzw. auswirkungsbezogene Maßnahmen eingeteilt werden. Ursachenbezogene setzen direkt an den Haupteinflussfaktoren (Kostentreibern an, während auswirkungsbezogene an den einzelnen Prozessschritten (Aktivitäten) und beteiligten Unternehmensbereichen (Rollen) einsetzbar sind. Bild 2 zeigt hier eine exemplarische Übersicht.

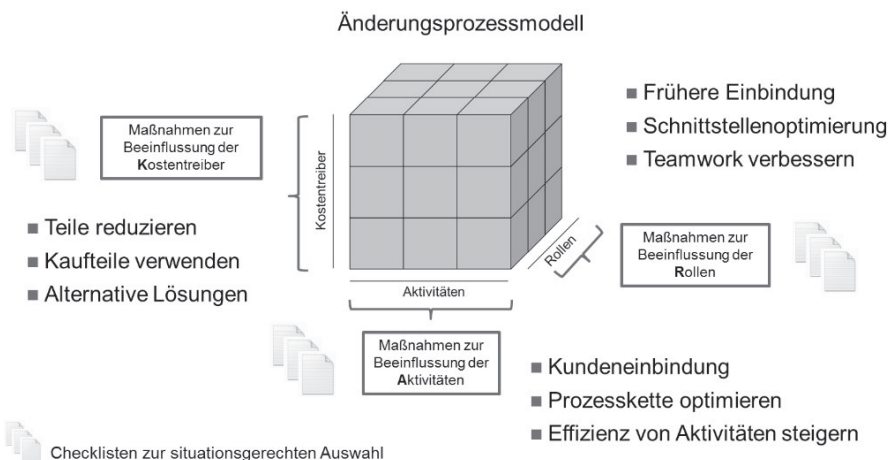


Bild 2: Handlungsfelder für Maßnahmen aus dem Änderungsprozessmodell

Auf Basis des Änderungsprozessmodells können folglich, nachdem es bereits die Ausprägungen (Bild 1) der Kostentreiber und zu erwartenden Auf-

wände in den beteiligten Aktivitäten und beteiligten Rollen aufzeigt, passende Wirkungsprofile von Maßnahmen zur gezielten Senkung der indirekten Änderungsaufwände bzw. Kosten zum Einsatz kommen.

Beispiele für Maßnahmen können

- *im Bereich der Kostentreiber die gezielte Eliminierung oder Reduzierung von Einflüssen (wie konstruktive oder organisatorische Komplexitätsreduzierung),*
- *im Bereich Aktivitäten eine Effizienzsteigerung stark ausgeprägter Prozessschritte und*
- *im Bereich der Rollen ein verbessertes Schnittstellenmanagement, bessere und frühere Einbindung als auch personelle Optimierungen sein.*

Um zu konkreten Einzelmaßnahmen zu gelangen wurde ausgehend von einer thematischen Literaturrecherche eine Liste allgemeiner Maßnahmen zur Beeinflussung indirekter Änderungskosten (Kapitel 4.1) erarbeitet. Diese kann und muss unternehmensspezifisch angepasst bzw. reduziert oder erweitert werden. Um dazu die Wirkungen dieser Maßnahmen aufzuzeigen, müssen diese durch Expertenschätzungen über Einflussmatrizen (Maßnahme/Kostentreiber, Maßnahme/Aktivitäten, Maßnahme/Rollen) in einem Einmalaufwand erhoben werden (Kapitel 4.3). Auf dieser Basis ist es möglich Maßnahmenkataloge zu erstellen (Kapitel 4.4) die dem Konstrukteur, Änderungsmanager bzw. Beteiligten am Änderungsprozess übersichtlich den Einsatz in konkreten Änderungsfällen zu ermöglichen. Abschließend wird eine Vorgehensbeschreibung (Kapitel 5) zusammengefasst die durch den Prozess des Maßnahmeneinsatzes führt.

4.1 Literaturrecherche zur Ableitung allgemeiner Maßnahmen

In einer Recherche zu geeigneten und übertragbaren Maßnahmen aus der Literatur konnten bereits Maßnahmen identifiziert werden. Hierzu wurde in einem ersten Schritt thematisch passende Literatur recherchiert die Aspekte der indirekten Änderungskosten behandelt. Identifiziert wurden die Literaturbereiche Gemeinkostenmanagement [6], [7], [8], [9], Lean Development [10], Prozessoptimierung [11], [12], kostengünstig Konstruieren [13], [14], [15], [16], [17] und Änderungsmanagement [18], [19], [20]. Aus diesen Quellen wurden über 200 Einzelmaßnahmen identifiziert, die nach Konsolidierung und Verallgemeinerung auf ca. 70 stark wirkende allgemeine Maßnahmen in einer Liste mit Beschreibungen zusammengeführt wurden (Die Liste kann auf Anfrage bei den Autoren bezogen werden).

4.2 Einteilung der Maßnahmen

In erster Linie kann der Konstrukteur die indirekten Änderungskosten auf **Gesamtänderungsebene** über alternative Änderungslösungen, d.h. teilweise bis komplett alternative Ausprägungen der Kostentreiber einer Änderung, übergreifend beeinflussen. Aber auch innerhalb einer gegebenen Änderungslösung kann weiter optimiert werden, indem anhand der Auswirkungsprofile z.B. stark ausgeprägte Einflüsse (Kostentreiber) **ursachenbezogen** gezielt konstruktiv reduziert werden. Zusätzlich können Maßnahmen ergriffen werden, die **auswirkungsbezogen** stark betroffene Aktivitäten oder Rollen der Änderung zum Ziel haben.

4.2.1 Ursachenbezogene Maßnahmen

Unter den ursachenbezogenen Maßnahmen sind besonders die konstruktiv beeinflussbaren interessant. Eine Übersicht der generischen **Kostentreiber** indirekter Änderungskosten (Änderungskomplexität, Neuigkeit der Änderung, Änderungszeitpunkt, Dringlichkeit, Interdependenz und Dynamik der Änderungsaufgaben [5]) zeigt dass im Wesentlichen die **Änderungskomplexität** und die **Neuigkeit der Änderung** (Bild 3 und 4) konstruktiv beeinflussbar sind.

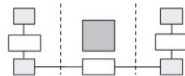
KT-Kategorie: Änderungskomplexität	
Beschreibung und Konkretisierung Die Änderungskomplexität beschreibt den technischen und inhaltlichen Umfang der Änderung, der sich auf den Umfang der im Rahmen der Umsetzung des Änderungsprojekts anfallenden Tätigkeiten auswirkt. So bewirkt bspw. eine Hohe Anzahl zu ändernder eigengefertigter Bauteile umfangreiche Änderungen von Zeichnungen oder Bauplänen, Qualitätsprüfungen und hat ggf. Folgeänderungen aufgrund technischer Interdependenzen (z.B. geometrisch oder funktional) zur Folge.	 <p style="text-align: center;">Änderungskomplexität</p>
Folgen Komplexe Änderungen führen zu einer höheren Anzahl von Aufgabenmerkmalen und zu einem erhöhten Abstimmungsbedarf im Unternehmen, indem mehr Bereiche am Änderungsprozess beteiligt, gegenseitige Auswirkungen der Änderungen berücksichtigt sowie zeitlich aufeinander abgestimmt werden müssen. Durch die Komplexität ist eine erhöhte Unsicherheit im Prozess vorhanden.	Indikatoren zur Operationalisierung / Messung <ul style="list-style-type: none"> · Anzahl zu ändernder eigengefertigter Bauteile · Anzahl erforderlicher eigengefertigter Neuteile · Anzahl zu ändernder zugekaufter Bauteile · Anzahl betroffener Baugruppen · Anzahl zu ändernder Stücklistenpositionen · Anzahl zu ändernder Arbeitsvorgänge in den Arbeitsplänen · Anzahl zu ändernder Werkzeuge
Auswirkungsorte in Organisation/Bereiche Eine hohe Änderungskomplexität kann in sämtlichen direkten und indirekten Bereiche zu umfangreicheren Aufgaben und erhöhtem Abstimmungsbedarf führen.	

Bild 3: Kostentreiber Änderungskomplexität [5]

Bei beiden Kostentreibern (KT) können die Ausprägungen der Indikatoren zur Operationalisierung/Messung direkt vom Konstrukteur reduziert werden.

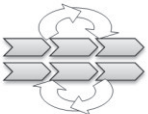
KT-Kategorie: Neuigkeit der Änderung	
Beschreibung und Konkretisierung Die Neuigkeit der Änderung beschreibt inwiefern das zur Umsetzung der Änderung erforderliche Wissen, die Fähigkeiten und der Lösungsweg bekannt sind. Viele Änderungen sind Standardänderungen, deren Abläufe, Tätigkeiten und einzubindende Abteilungen klar definiert sind. Umfassen Änderungen neue Technologien oder Materialien so sind häufig weitere Tätigkeiten, wie bspw. Versuche oder Prüf- und Testläufe, notwendig um die Änderung umzusetzen.	 <p style="text-align: center;">Neuigkeit der Änderung</p>
Folgen Änderungen mit hohem Neuigkeitsgrad führen zu mehr Unsicherheit im Unternehmen und bedeuten zusätzlichen Aufwand in der Abwicklung der Änderung. Häufig geht mit unsicheren Änderungen ein erhöhter Abstimmungs- und Informationsaufwand einher, es ist mehr Iterationen bzw. Rücksprünge zu rechnen und es sind zusätzliche Tätigkeiten (z.B. Versuche) zur Umsetzung der Änderung erforderlich.	
Auswirkungsorte in Organisation/Bereiche Eine hoher Neuigkeitsgrad von Änderungen kann in sämtlichen direkten und indirekten Bereiche zu erhöhtem Abstimmungsbedarf, zu umfangreicheren Aufgaben und zu mehr Iterationen führen.	Indikatoren zur Operationalisierung / Messung <ul style="list-style-type: none"> • Erfordernis einer Konstruktionskonzeptänderung (ja/nein) • Verwendung von neuartigen Materialien / Stoffen (ja/nein) • Verwendung von neuartigen Technologien (ja/nein) • Lösungsweg bekannt / teilweise bekannt / nicht bekannt

Bild 4: Kostentreiber Neuigkeit der Änderung [5]

4.2.2 Auswirkungsbezogene Maßnahmen

Werden von einer Änderung besonders hohe Aufwände in den beteiligten **Aktivitäten** oder **Rollen** verursacht, können diese, soweit konstruktive oder organisatorische Maßnahmen zur Reduzierung der Kostentreiber bereits vorgenommen wurden, als weitere Möglichkeit zur Kostensenkung herangezogen werden. Hier stehen bei den Aktivitäten besonders Effizienzsteigerungen der Prozesse auf Basis von Prozessoptimierungen im Vordergrund. Bei den Rollen können neben einem verbesserten Schnittstellenmanagement, einer früheren Einbindung von Abteilungen auch personelle Optimierungen (Fortbildungen etc.) erwogen werden.

4.3 Bewertung der Wirkungen von Maßnahmen im Unternehmen

Um konkrete Maßnahmen für ein Unternehmen verfügbar zu machen müssen diese (1.) erhoben werden, siehe linke Spalte in Bild 5, und (2.) deren Wirkungen auf Kostentreiber (K), Aktivitäten (A) und Rollen (R) bewertet werden, siehe horizontale Zellen in Bild 5. Dazu ist für jede Maßnahme die Frage zu stellen: ob bzw. wie stark die einzelnen Kostentreiber, Aktivitäten und Rollen von deren Einsatz kostensenkend beeinflusst werden? Dies kann über (gewichtete) Einflussmatrizen durchgeführt werden indem für jede Zelle das Vorhandensein der Wirkung mit „x“ oder detaillierter noch die Stärke der Wirkung (0=keine, 1=schwache, 2=mittlere und 3=starke Wirkung) über Experteneinschätzungen aufgenommen wird.

Wirkung	K1	K2	...	Kn		A1	A2	...	An		R1	R2	...	Rn	
M1	x						2								
M2	x		x	x			x					x	x		
...						x									
Mn		x				x	x								

Bild 5: Aufnahme von Maßnahmen und deren Wirkungen

4.4 Firmenindividuelle Erstellung eines Maßnahmenkatalogs

Auf den zuvor beschriebenen Grundlagen können nun zur Unterstützung eines „Design for Cost“ firmenindividuelle Maßnahmenkataloge für indirekte Änderungskosten aufgebaut werden. Hierzu zeigt Bild 6 einen Strukturvorschlag am Beispiel der Maßnahme „Gleichteile“. Wichtige Inhalte sind die Nennung der Maßnahme und die Beschreibung, welche jeweils auf das Unternehmen angepasst werden müssen. Abgeleitet aus den Einflussmatrizen können die Wirkungen auf die Bereiche Kostentreiber, Aktivitäten und Rollen qualitativ (vorhanden: Ja/nein) und quantitativ (gering, mittel, stark) für jede Einzelmaßnahme dargestellt werden. Ein Feld über Aufwand/Nutzen der Maßnahme kann Aufschluss über die Eignung im Einzelfall geben. Der Maßnahmenkatalog kann in Gegenüberstellung zum Änderungsprozessmodell auch implementiert werden.

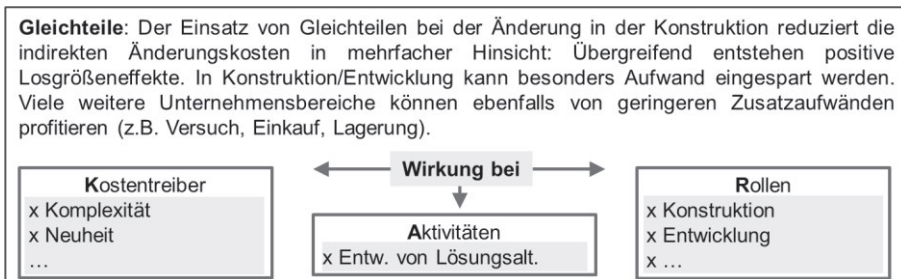


Bild 6: Strukturvorschlag Maßnahmenkatalog am Beispiel „Gleichteile“

5 Vorgehen zur Senkung indirekter Änderungskosten

Bild 7 zeigt die wesentlichen Schritte die durchgeführt werden müssen um an einer gegebenen Änderung deren indirekte Kosten zu senken.

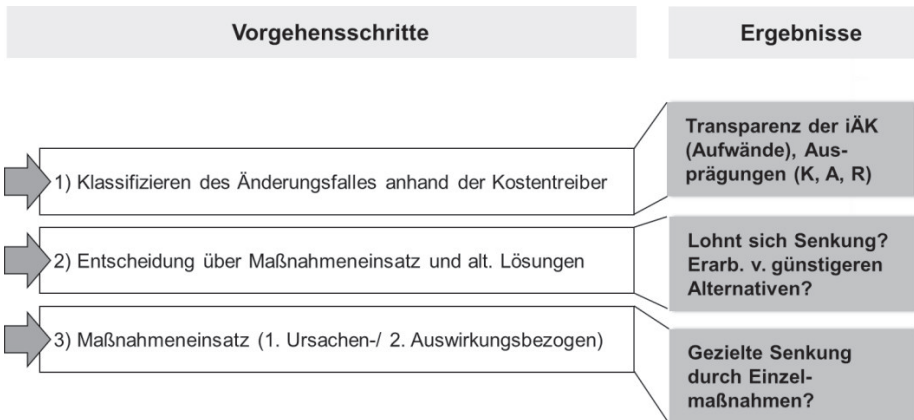


Bild 7: Vorgehensschritte zur Senkung indirekter Änderungskosten

5.1 Klassifizieren des Änderungsfalles anhand der Kostentreiber

Zuerst muss der Änderungsfall anhand der Ausprägungen seiner Kostentreiber klassifiziert werden. Dies liefert im Prozessmodell Transparenz über die zu erwartenden Aufwände in den einzelnen Prozessschritten und Unternehmensbereichen. Ergebnis des ersten Schrittes sind die Ausprägungen der Kostentreiber, der Prozessschritte und der beteiligten Rollen. Der zu erwartende Gesamtaufwand den die Änderung hervorruft, ist erstes Entscheidungskriterium für den nächsten Schritt.

5.2 Entscheidung über Maßnahmeneinsatz und alternative Lösungen

Anhand des Gesamtaufwands muss nun im zweiten Schritt entschieden werden ob sich der Einsatz von Kostensenkungsmaßnahmen lohnt. Ist der zu erwartende Aufwand (Kosten) der Änderung so gering, dass der Aufwand für Kostensenkungsmaßnahmen nicht gerechtfertigt ist, wird der Prozess hier abgebrochen.

Ist der Aufwand für Kostensenkungsmaßnahmen hingegen gerechtfertigt, muss weiter entschieden werden ob sich die Erarbeitung von alternativen Lösungen für die Änderung lohnt. Ist dies der Fall muss aus den erarbeiteten Alternativen die günstigste anhand der Klassifizierung der jeweiligen Kostentreiber identifiziert werden. Soweit eine ausreichend günstige Alternative dabei ist, kann der Prozess ebenfalls hier abgebrochen werden wenn das Kostensenkungsziel erreicht ist. Anderenfalls wird die Änderung oder günstigste Alternative einem weiteren detaillierten Maßnahmeneinsatz zugeführt.

5.3 Maßnahmeninsatz (1. Ursachen-/ 2. Auswirkungsbezogen)

Im detailliertesten Fall müssen Einzelmaßnahmen eingesetzt werden um weitere Kostensenkungen zu realisieren. Diese sollten erst ursachenbezogen erfolgen, dann auswirkungsbezogen eingesetzt werden. Ursachenbezogene greifen direkt an den Kostentreibern der jeweiligen Änderung/Alternative an und reduzieren deren Ausprägung. Ist dies bereits zielführend genug kann der Prozess hier abgebrochen werden. Ist die Reduzierung der Kostentreiber bereits ausgereizt, können in weiteren Schritten Maßnahmen an den Auswirkungen in den Unternehmensbereichen/Rollen oder in den einzelnen Prozessschritten angesetzt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorgestellten Methodik wurde der Forschungsbereich „Design for Cost“ um den bisher nicht vertretenen Bereich der indirekten Änderungskosten als spezieller Vertreter der Gemeinkosten erweitert. Neben der Erkenntnis dass indirekte Änderungskosten stark unternehmens- und änderungsfallspezifischen Charakter zeigen [4] kann als wichtigstes Ergebnis festgehalten werden, dass auch der Maßnahmeninsatz für ein „Design for Indirect Change Cost“ also ein änderungskostengünstiges Konstruieren im Hinblick auf verursachte indirekte Änderungskosten stark unternehmensspezifisch und änderungsfallspezifisch erfolgen muss. Das erzielte Resultat ist sicherlich im Rahmen der Genauigkeit und Qualität der Expertenschätzungen für das Systemverhalten (siehe [4]) und Wirkungsverhalten der Maßnahmen zur Reduzierung der indirekten Änderungskosten zu sehen. Wichtigstes Entscheidungskriterium stellt die erwartete Höhe der indirekten Änderungskosten dar. Dazu die Frage, ob es sich lohnt Kostensenkungsmaßnahmen einzusetzen. Um die Genauigkeit der erwarteten Höhe als Entscheidungsgrundlage weiter zu verbessern, wird in [21] ein Vorgehen vorgestellt, das auf Basis von Daten bereits im Unternehmen durchgeführter Änderungsfälle Schätzergebnisse in höherer Präzision liefert. Dies sollte insbesondere bei wichtigen und umfangreichen Änderungen herangezogen werden. Im Bereich der Maßnahmen kann die umfangreichste Wirkung in erster Linie über alternative Änderungslösungen als Top-Maßnahme erzielt werden, erst danach sollten detailliertere Maßnahmen eingesetzt werden.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 18492 N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. - FKM, Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt am Main wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriell-

len Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] Schmied, C. et al.: "Analyse des Systemverhaltens und Beeinflussung indirekter Änderungskosten in der Antriebstechnik", in: Tag des Systems Engineering 2016, Hanser, München, 2016.
- [2] Gebhart, N.; Kruse, M.; Krause, D.: "Gleichteile-, Modul- und Plattformstrategie" In: Lindemann, U. (Hrsg.): "Handbuch Produktentwicklung", Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2016, S. 111-149.
- [3] Ehrlenspiel, K. et al.: "Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren - Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung", Springer, Berlin, 2014. 7. Auflage.
- [4] Mörtl, M.; Schmied, C.: "Design for Cost - A Review of Methods, Tools and Research Directions", Journal of the Indian Institute of Science Volume 95, Issue 4, 2015, pp. 379-404.
- [5] Gebhardt, M. et al.: "AIDA - Aufwandsarme Quantifizierung von indirekten Änderungskosten in der Antriebstechnik", Forschungsreport 2015 Zwischenbericht, AiF Projekt 18492 N, FVA-Projekt Nr. 738 I, Frankfurt, 2015.
- [6] Gleich, R.; Marfleet, F. (Hrsg.): "Effektives Gemeinkostenmanagement - Best Practice-Beispiele erfolgreicher Unternehmen", Haufe-Lexware, München, 2012.
- [7] Kaplan, R. S.; Anderson, S. R.: "Time-driven Activity-based Costing - A simpler and more powerful path to higher profits", Harvard Business School Press, Boston, 2007.
- [8] Brimson, J. A.: "Activity Accounting - An Activity Based Costing Approach", Wiley, New York, 1991.
- [9] Müller, A., "Gemeinkostenmanagement - Vorteile der Prozesskostenrechnung", Gabler, Wiesbaden, 1992.

-
- [10] Mascitelli, R.: "The Lean Product Development Guidebook - Everything Your Design Team Needs to Improve Efficiency and Slash Time-to-Market", Technology Perspectives, Northridge, 2007.
- [11] Seidenschwarz, W. (Hrsg.): "Marktorientiertes Prozessmanagement - Wie Process Mass Customization Kundenorientierung und Prozess Standardisierung integriert", Vahlen, München, 2008.
- [12] Fischermanns, G., "Praxishandbuch Prozessmanagement", Verlag Dr. Götz Schmidt, Gießen, 2013.
- [13] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: "Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit", Hanser, München, 2013.
- [14] Schmidt, F.: "Gemeinkostensenkung durch kostengünstiges Konstruieren", Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, Gabler, 1996.
- [15] Mörtl, M., "Kostenrechnung in der Konstruktion". In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.) "Handbuch Konstruktion". Hanser, München, 2012.
- [16] Mörtl, M., "Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte", Dr. Hut, München, 2002.
- [17] Bertram, U.: "Prozeß- und kostenorientierte Konstruktionssystematik im rechnerunterstützten Apparate- und Maschinenbau", Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 20 Nr. 306, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [18] Fricke, E., "Der Änderungsprozeß als Grundlage einer nutzerzentrierten Systementwicklung". Utz, München, 2006.
- [19] Lindemann, U.; Reichwald, R. (Hrsg.): "Integriertes Änderungsmanagement", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [20] Conrat Niernerg, J.-I.: "Änderungskosten in der Produktentwicklung", Dissertation, Technische Universität München, 1997.
- [21] Gebhardt, M.; Schmied, C.; Mörtl, M., "Vorgehen zur Entwicklung heuristischer Verfahren zur ex-ante Quantifizierung indirekter Änderungskosten", ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Heft 7/8, 2016.

Anwendung wissensbasierter Simulationen zur Ausschöpfung von Leichtbaupotenzialen in der Automobilindustrie

Stefan Hautsch¹, Sebastian Katona², Tobias Sprügel³, Michael Koch², Frank Rieg¹, Sandro Wartzack³

¹ *Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD; Universität Bayreuth*

² *3D-Visualisierungszentrum; TH Nürnberg Georg Simon Ohm*

³ *Lehrstuhl für Konstruktionstechnik; FAU Erlangen-Nürnberg*

Abstract

The application of knowledge-based simulations to scoop lightweight design potentials in automotive industry provides an efficient way of virtual product development for inexperienced operators. Generating lightweight constructions or reengineering and improving existing automobile parts can be achieved by combining structural optimization, knowledge allocation and 3D scan techniques. As the phases of this process are mostly performed virtually and supported by a knowledge database, even inexperienced developers can efficiently invent lightweight constructions by utilizing modern optimization tools. Furthermore, they can secure the designs with enhanced finite element analyses and identify possible mechanical problems because of manufacturing deviations with help of 3D scanning methods.

Keywords: finite-element-analysis, optimization, knowledge-based, 3D scan

1 Motivation

Die Produktentwicklung wird in der heutigen Zeit zunehmend virtuell durchgeführt. Dabei geht der Trend zu innovativen Simulationswerkzeugen wie der Finite-Elemente-Analyse (FEA) und der Strukturoptimierung, welche jedoch bei der Anwendung einen großen Wissensbedarf mit sich bringen. Um die Nutzung dieser Werkzeuge in der Produktentwicklung effizienter zu gestalten, sollen auch Konstrukteure mit wenig Berechnungserfahrung durch kontextsensitive Unterstützung mit Hilfe einer Wissensdatenbank in die Lage versetzt werden, einen virtuellen Entwicklungszyklus durchzuführen. Hierbei werden durch den Einsatz der Strukturoptimierung und der FEA produkt- und prozessoptimale Bauteilentwürfe generiert. Diese wissensbasierte Simulation ermöglicht nicht nur kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) eine effiziente und moderne Produktentwicklung, sondern schafft auch für Großunternehmen einen Wettbewerbsvorteil durch schnellere und flexiblere Entwicklungsprozesse. Die Betrachtung bzw. Einhaltung von Prozessrestriktionen und die Analyse und Vermeidung von Fertigungsabweichungen bereits in einer der frühen Phasen der Produktentwicklung [1] reduziert Fehler und damit spätere Kosten durch ressourcenintensive Änderungsschleifen. Abseits von Neukonstruktionen können durch die Anwendung dieser wissensbasierten, simulationsgestützten Prozesse auch bestehende Bauteile – z. B. unter Änderung des Fertigungsverfahrens – hin zu leichteren Strukturen bei gleicher Funktion anforderungsgerecht entwickelt werden.

2 Reengineering

Die Anwendung der wissensbasierten Simulationen zur Ausschöpfung von Leichtbaupotenzialen soll anhand eines Fallbeispiels mit der Geometrie eines KFZ-Querlenkers dargestellt werden. Hierbei soll ein bereits vorhandenes Stahlgussbauteil analysiert und durch Variation des Materials bzw. des Herstellungsverfahrens unter Zuhilfenahme von virtuellen Entwicklungswerkzeugen zu einem optimal leichten Bauteil entwickelt werden. Dieser Prozess (vgl. Bild 1) ist nicht aus Automobilherstellersicht (OEM, Original Equipment Manufacturer) entwickelt, sondern aus der Sicht eines freien Teilemarktteilnehmers (IAM, Independent Aftermarket), der sich einen Wettbewerbsvorteil durch optimierte Fahrzeug-Komponenten für verschiedene Einsatzzwecke erarbeiten will.

Unter Variation des Prozesses durch Weglassen der Ermittlung von Randbedingung und Geometrierückführung lässt sich der Prozess ebenso auf OEM oder Zulieferer anwenden, welchen diese Daten aus der Vorentwicklung bereits zur Verfügung stehen. Der eigentliche Entwicklungsansatz ab der Neu-

konzeption eines leichten Bauteils durch die Anwendung von wissensbasierter Simulation führt dann auch in diesen Unternehmen zu einer Effizienzsteigerung der Entwicklung mit gleichzeitiger Optimierung der Bauteileigenschaften (u. a. Masse, Steifigkeit bzw. Festigkeit) und Steigerung der Ressourceneffizienz. Die Auswahl des Fertigungsverfahrens, mit welchem das optimierte Bauteil gefertigt werden soll, ist abhängig von den Gegebenheiten des anwendenden Unternehmens. Hier werden zwei alternative Wege aufgezeigt, um die Flexibilität der entwickelten Methode zu demonstrieren.

2.1 Analyse der Ausgangssituation

Die Analyse der Ausgangssituation besteht aus zwei Teilen: die Aufnahme der Geometrie und die Ermittlung der vorhandenen Randbedingungen und Kräfte. Für die angreifenden Lastfälle wird dabei auf einschlägige Literatur zurückgegriffen [2]. Bei der Erzeugung der Geometrie kommen hochgenaue optische Messgeräte zum Einsatz. Dabei wird die real vorliegende physische Komponente mit dem Laser- oder Lichtschnittverfahren berührungslos aufgenommen und so in Form von Punktwolken digitalisiert. Diese dienen im weiteren Verlauf als Ausgang für die Ableitung und Definition der Ausgangspunkte und Anschlussmaße. Zudem wird die gesamte Geometrie auf dieser Basis in einem CAD-System parametrisch neu aufgebaut. Dieses Modell wird in Kombination mit den ermittelten Randbedingungen zu einer ersten FEA herangezogen, um die Belastungssituation des Ausgangsbauteils zu analysieren und Leichtbaupotentiale aufzudecken.

Sofern die notwendigen Daten (Bauraum, Lasten und Randbedingungen) bereits aus der Vorentwicklung beim OEM vorhanden sind, ist eine Aufnahme der Geometrie und Ermittlung der Kenndaten nicht notwendig.

2.2 Neukonzeption mit Ziel Leichtbau

Unabhängig von der Ausgangssituation soll nun mit den bekannten Randbedingungen und dem zur Verfügung stehenden Bauraum eine Neukonzeption mit dem Ziel des Leichtbaus erfolgen. Dies geschieht nicht nur durch Formleichtbau, sondern es wird auch die Möglichkeit des Stoffleichtbaus in Betracht gezogen [3]. Folglich werden zwei Alternativen konzipiert – eine Aluminium-Druckgusskonstruktion und ein Stahlblechbauteil, die jeweils mit Hilfe von Optimierungsverfahren simulationsgestützt zum optimalen Design hin entwickelt werden sollen. Um die Strukturoptimierung effizient und fehlerfrei einsetzen zu können, sind detaillierte Kenntnisse über die verwendeten Algorithmen und Verfahren notwendig. Dies können unerfahrene Anwender durch die selektiv aus der Wissensbasis bereitgestellten Informationen aus-

gleichen, um z. B. die passenden Parameter auszuwählen oder eine optimale Vernetzung für die Topologieoptimierung zu erzeugen.

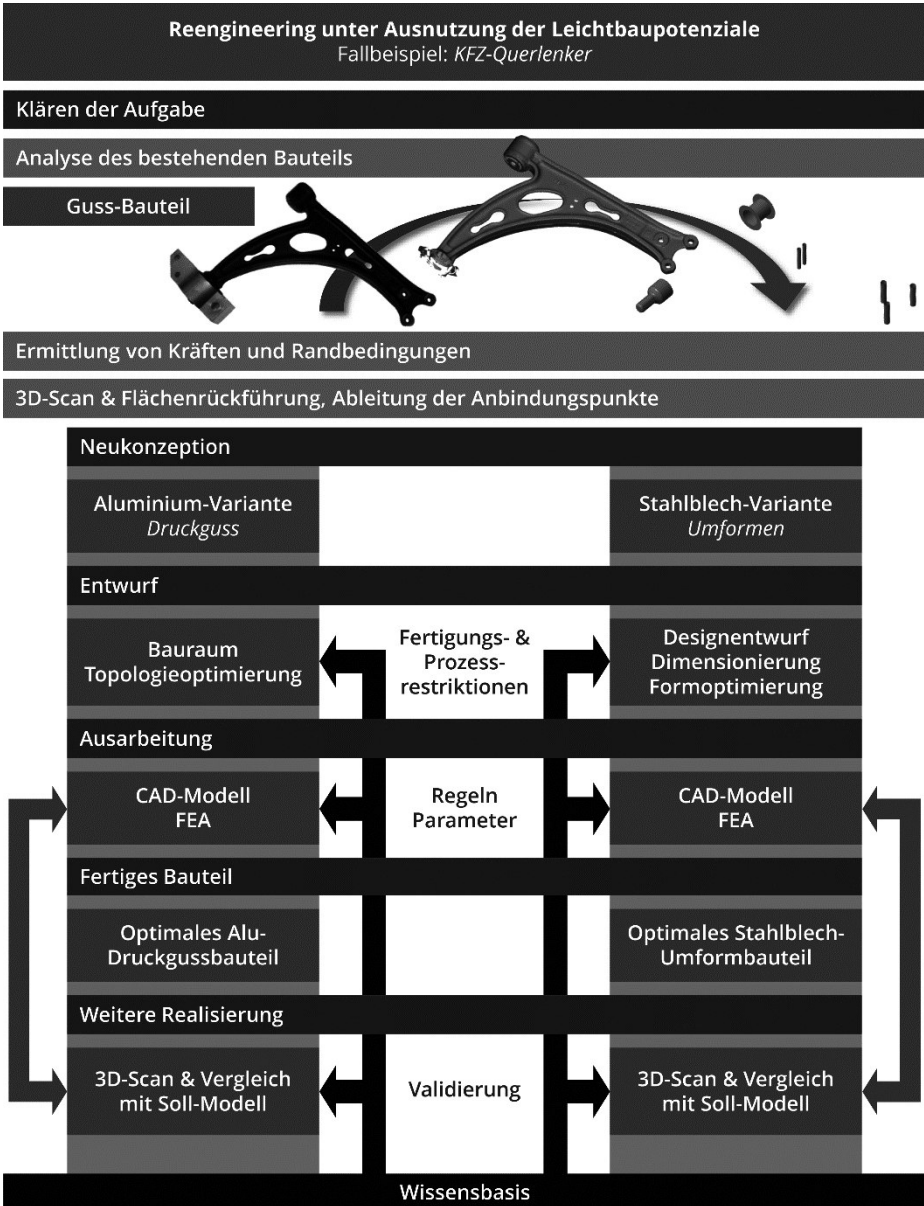


Bild 1: Reengineering unter Ausnutzung der Leichtbaupotenziale

Nach erfolgreicher Generierung der Designvorschläge und Neukonstruktion der parametrischen Modelle folgt ein weiterer Simulationsschritt zur Absicherung.

2.3 Computergestützter Entwurf der neuen Geometrien

Am Beispiel des KFZ-Querlenkers werden zwei verschiedene Fertigungsverfahren zur Vorstellung der Methode herangezogen, wobei die Wahl des ersten Bauteilvorschlags auf Aluminium-Druckguss fiel. Bei diesem Herstellungsverfahren sind leichte Strukturbauteile aus Aluminium mit hoher Qualität in Serienproduktion herstellbar.

Zur Erzeugung eines optimalen Druckgussbauteils ausgehend von einem Bauraum sind mehrere Schritte durchzuführen, vgl. Bild 2. Der Bauraum muss konstruiert und in das Optimierungssystem importiert werden. Dort sind passende Parameter sowohl für das FE-Netz als auch die Optimierungsalgorithmen zu wählen. Im Speziellen ist die FE-Netzfeinheit adäquat einzustellen, so dass sowohl eine ausreichende Ergebnisgüte als auch die Anwendbarkeit von Fertigungsrestriktionen gegeben sind, andererseits aber auch ein erhöhter Berechnungsaufwand durch zu feine Vernetzung vermieden wird. Zusätzlich sind Zielfunktion, Restriktionen und weitere Parameter der Optimierungsalgorithmen sinnvoll einzustellen, um effizient eine Topologieoptimierung durchzuführen. Um nun ein dünnwandiges Bauteil mit Hilfe der Topologieoptimierung zu generieren, ist z. B. eine Kombination von Restriktionen wie „Maximum Member Size“ (maximale Strukturgröße) und „Demold“ (Entformung) zielführend, welche jedoch nur mit optimalen Parametern sinnvolle Ergebnisse liefern. Damit versucht der Algorithmus, bereits eine dünnwandige Struktur als Designvorschlag zu erzeugen, welchen der Produktentwickler dann in einer Neukonstruktion bzw. Anpassung des Bauraums zu einem fertigen Druckgussbauteil formen muss. Neben den Einstellungen der Optimierungssoftware sind hierbei sowohl die Gestaltungsrichtlinien bzw. Fertigungsrestriktionen für das Guss- bzw. Druckgussverfahren zu beachten, als auch die Prozessrestriktionen des Druckgießens.

Mit großer Wahrscheinlichkeit ist der verantwortliche Produktentwickler kein Simulations- und Fertigungsspezialist, sondern ist in diesen Bereichen auf Hilfestellungen angewiesen. Um ein unnötiges und ineffizientes Nachfragen in den Fachbereichen – falls im Unternehmen überhaupt vorhanden – oder Anfordern von externen Spezialisten zu vermeiden, kommt eine Wissensbasis zur selektiven Unterstützung des Produktentwicklers zum Einsatz. Aus dieser Datenbank können dem Anwender Wissensartefakte bzw. Dokumente zum jeweiligen Entwicklungsschritt selektiv zur Verfügung gestellt werden, z. B.

zur Wahl der perfekten FE-Netzfeinheit während des Modellaufbaus. Diese Datenbank kann von Simulations- und Prozessprofis mit Wissen gefüllt und durch geschulte Mitarbeiter gepflegt und erweitert werden. Dies führt einerseits zum Wissenserhalt innerhalb des Unternehmens auch bei Mitarbeiterabgang (z. B. durch Arbeitgeberwechsel oder Rente) als auch zur Ermöglichung eines effizienten, wissensbasierten virtuellen Entwicklungsprozesses für Mitarbeiter der verschiedensten Erfahrungsstufen.

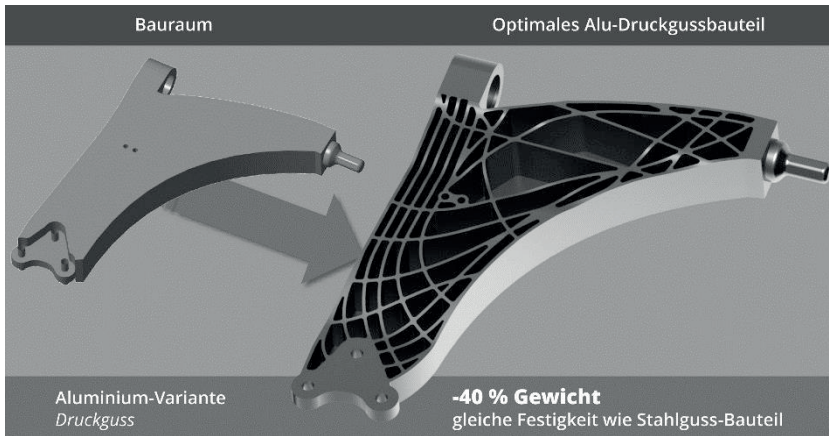


Bild 2: Topologieoptimierter und druckgussgerechter Querlenker aus Alu

Der Ablauf für den zweiten Bauteilvorschlag mittels Stahlblech-Umformen ist nahezu identisch. Statt einer Topologieoptimierung ausgehend von einem Bauraum kommt hierbei eine Dimensionierung der Blechdicke und – falls notwendig – eine Formoptimierung der Blechkontur ausgehend von einem ersten Designentwurf zum Einsatz [4]. Dabei erstellt der Produktentwickler mit Fertigungswissen aus der Wissensbasis ein erstes Bauteildesign, idealerweise als Flächenmodell, welches dann der Optimierung zugeführt wird. Die Blechdicke wurde über das gesamte Bauteil einheitlich gewählt, theoretisch könnte diese aber auch abschnittsweise optimiert werden, was damit jedoch den Einsatz von vergleichsweise teuren Tailored Blanks nötig machen würde. Trotz Verzicht auf diese komplexere Fertigungstechnologie konnte mit Hilfe der gezeigten Methode, also der Anwendung wissensbasierter Simulationen bzw. Strukturoptimierungen, ein optimal leichtes und trotzdem steifes Stahlblechbauteil entwickelt werden.

Im Vergleich zum Ausgangsbauteil aus Stahlguss, welches ein Gewicht von 4,64 kg aufweist, konnte durch das Stahlblechbauteil mit einer Masse von 3,53 kg eine Gewichtseinsparung von knapp 24 % erreicht werden. Das Alu-



minium-Druckgussbauteil fällt mit 2,75 kg nochmals deutlich leichter aus und schafft zum Ausgangsbauteil eine Massereduktion von über 40 %. Nach erfolgreicher Erzeugung der Geometrien sollten diese einer abschließenden Produktsimulation zur Absicherung der mechanischen Eigenschaften sowie einer Untersuchung des Einflusses von Fertigungsabweichungen unterzogen werden.

2.4 Ausarbeitung durch wissensbasierte Simulation

Im Anschluss an die Optimierung und Modellierung der optimierten CAD-Geometrien für Aluminium-Druckguss bzw. Stahlblech-Umformen ist daher eine simulative strukturmechanische Finite-Elemente-Absicherung unerlässlich. Die Randbedingungen werden analog zu den Randbedingungen der vorgelagerten Optimierungen gewählt. Insbesondere die Belastung durch Schaglöcher ist für die strukturmechanische Simulation von erheblicher Bedeutung, da hierbei die höchsten Spannungen im Bauteil im Vergleich zu den anderen vier Lastfällen auftreten. Für die FE-Simulation von Aluminium- und Stahlgussbauteil kommen Tetraeder-Elemente mit 10 Knoten zum Einsatz. Für das Blechbauteil wird die Mittelfläche mit Hexaeder-Elementen mit 20 Knoten vernetzt. Die einheitliche Elementgröße liegt bei allen FE-Simulationen bei 2 mm. Als Geometrie wird die ideale CAD-Geometrie ohne Abweichungen aus Fertigung, Montage oder Betrieb verwendet.

Tabelle 1 zeigt den Abgleich der drei FE-Simulationen mit unterschiedlicher Geometrie bzw. unterschiedlichen Fertigungsverfahren anhand der Bauteilmassen und erzielten Sicherheiten. Es zeigt sich, dass die beiden optimierten Varianten zu einer Verbesserung der Sicherheit gegenüber Gewaltbruch führen bei gleichzeitiger Reduktion der Masse.

Ausgehend von den FE-Simulationen der drei Bauteile können sphärische Detektorflächen abgeleitet werden. Das mathematische Vorgehen wird in [5] detailliert beschrieben, der prinzipielle Vorgang ist in Bild 3 dargestellt. Die dargestellten Matrizen entsprechen der zylindrischen Auffaltung der sphärischen Detektorfläche und zeigen die summierte Vergleichsspannung aller projizierten FE-Knoten geteilt durch die Anzahl an projizierten Knoten im jeweiligen Pixel. Es ergibt sich eine normierte vonMises-Vergleichsspannung in MPa für jedes der 1296 (36x36) Pixel der Detektorfläche. Dies ermöglicht den paarweisen direkten Abgleich von FE-Simulationen mit unterschiedlicher Geometrie und unterschiedlichen FE-Netzen. Im unteren Bereich von Bild 3 werden einerseits Aluminium- und Stahlguss-Bauteil verglichen, andererseits Stahlguss- und Stahlblech-Bauteil. Die Abweichungen zwischen den Matrizen werden mit roten und grünen Farben visualisiert. Das Referenzbauteil ist stets

das Stahlguss-Bauteil und eine Reduktion der vonMises-Vergleichsspannung wird bei jedem Pixel im 3D-Balkendiagramm in grün dargestellt – eine Erhöhung dagegen in rot.

Tabelle 1: Bauteilvergleich über Masse und Sicherheit gegen Gewaltbruch

	Alu- Druckguss- Bauteil	Stahlguss- Bauteil	Stahlblech- Bauteil
Masse	2,75 kg	4,64 kg	3,53 kg
Relative Masse	59,3 %	100,0 %	76,1 %
Relative Sicherheit (Auslegung gegen Gewaltbruch)	104,8 %	100,0 %	121,3 %
Verbesserung der Sicherheit	+ 4,8 %		
		+ 21,3 %	

Bei der Substitution des Stahlguss- durch das Aluminium-Bauteil ergeben sich deutlich reduzierte Spannungen und eine homogenere Verteilung der Spannungswerte im Bauteil. Die homogenere Verteilung ist an den leicht erhöhten (rot dargestellten) Spannungswerten und den normierten Vergleichsspannungen an jedem Pixel zur erkennen. Die Substitution von Stahlguss- durch ein Blech-Bauteil zeigt ebenfalls reduzierte Spannungen, allerdings in einem deutlich kleineren Rahmen als bei dem Aluminium-Bauteil. Auch für das Blech-Bauteil kann eine homogenere Spannungsverteilung beobachtet werden.

In der ersten wissensbasierten Absicherung konnte eine erhebliche Verbesserung der Sicherheit für das Aluminium-Bauteil beobachtet werden. Bedingt durch die Aluminium-Druckguss Fertigung ist nur mit geringfügigen Abweichungen durch die Fertigung gegenüber dem idealen CAD-Modell zu rechnen. Insbesondere aufgrund der deutlich geringeren Verbesserung der Sicherheit gegen Gewaltbruch des Blech- gegenüber dem Stahlguss-Bauteil sollte hier unbedingt eine Überprüfung hinsichtlich realer Fertigungseinflüsse erfolgen.



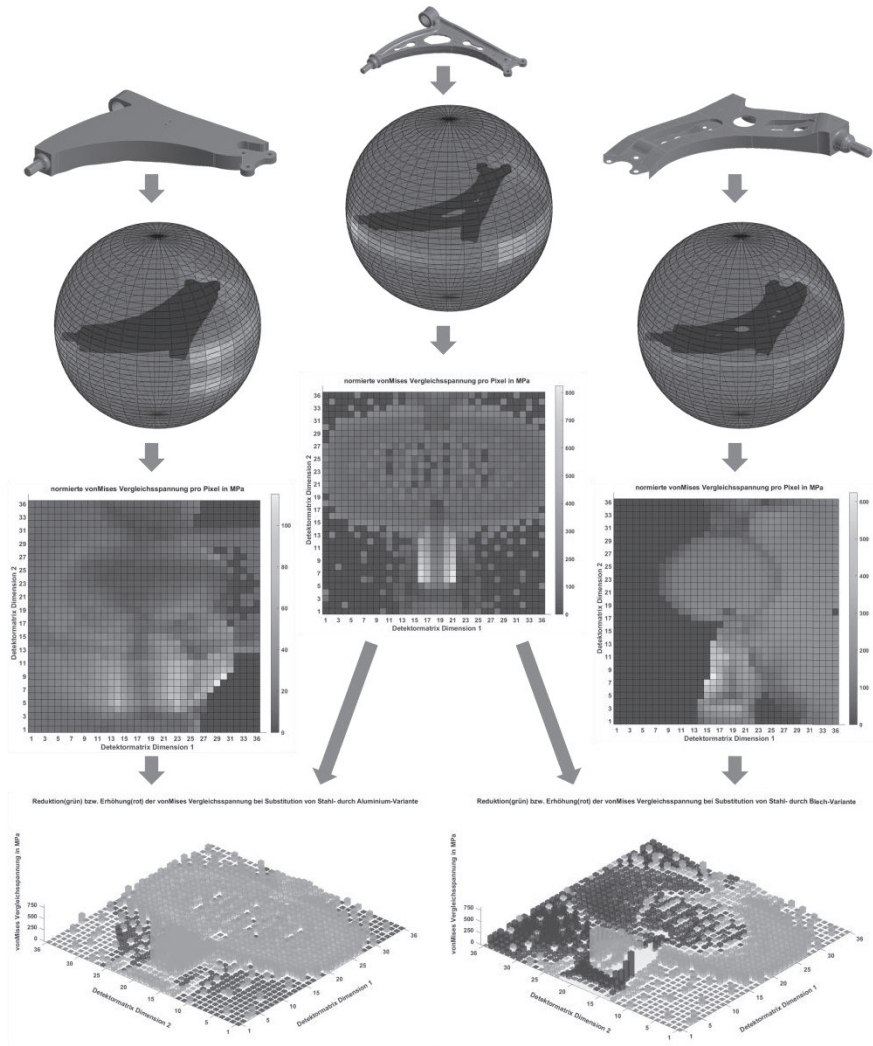


Bild 3: Visualisierung der Spannungsverläufe von unterschiedlichen Bauteilen mittels sphärischen Detektorflächen und paarweisem Vergleich

Um ausgehend von der idealen Bauteilgeometrie eine reale Geometrie zu erhalten, können mehrere Strategien verfolgt werden [6]. Im Rahmen dieses Beitrags sollen real gefertigte Bauteile gescannt werden und eine Rückführung dieser Geometrie in das FE-System erfolgen.

2.5 Weitere Realisierung und Validierung

In der weiteren Realisierung findet zunächst eine Validierung des erzeugten Simulationsmodelles mittels eines Geometrievergleichs statt. Hierbei wird mit hochgenauen optischen Messsystemen die Oberfläche der realen Objekte vermessen. Die dabei erzeugten Punktwolken lassen sich mittels Überlagerung zum CAD-Modell in Vergleichsdarstellungen bringen, um so die Abweichungen, welche aus der Fertigung resultieren, zu detektieren. Zeigen sich hier Differenzen, wird mit Informationen aus der Wissensbasis der Einfluss auf die durchgeführten Simulationen bewertet. Ergibt sich hieraus die Wahrscheinlichkeit, dass die Simulationsergebnisse nicht mehr aussagekräftig genug sind, findet eine Aufbereitung des Modells statt, so dass eine erneute Analyse des Bauteils mit der tatsächlich gefertigten Kontur erfolgen kann [7].

Für die Erzeugung des Ist-Zustandes werden optische Messsysteme verwendet, welche die Oberflächen mittels eines Lasers berührungslos erfassen. Diese beruhen auf dem Grundprinzip der Triangulation. Das Messsystem ist dabei so aufgebaut, dass eine Matrix-Kamera in definiertem Abstand und Winkel zu einem Linienlaser steht. Durch die Kontur des Objektes wird die Linie deformiert und von der Kamera detektiert. Über eine Relativbewegung des Messsystems zum Objekt lässt sich so die gesamte Oberfläche des Bauteils digitalisieren. Diese Technik ist in der Industrie bereits etabliert und liefert Genauigkeiten von bis zu $\pm 20\mu\text{m}$. Für die Vermeidung von zufälligen Abweichungen, bzw. um diese auszuschließen, empfiehlt es sich, eine Reihe von Bauteilen zu scannen und eine flächenhafte Auswertung der Varianzen durchzuführen. So werden auch nur die tatsächlichen, systematischen, fertigungstechnisch bedingten Fehler berücksichtigt. Für den Geometrievergleich ist zunächst eine Registrierung der CAD-Daten zu den Punktwolken elementar, um gezielte Aussagen treffen zu können. Hierbei stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung: 3-Punkt-Methode (anhand von mindestens drei Punkten, welche nicht auf einer Geraden liegen dürfen), mittels Standard-Geometrieelemente (z. B. Kugel, Ebene, Zylinder), Best-fit-Ausrichtung oder der 3-2-1-Methode (Sequenzielle Transformation mit Ausrichtung an einer Linie und eines einzelnen Punktes) [8].

Mittels der Inhalte der Wissensbasis – bestehend aus Expertenwissen, bereits vorhandenen Vergleichen und empirischen Versuchen – werden diese Abweichungen auf ihre Relevanz für die Aussagekraft der durchgeführten Produktsimulation evaluiert. Zeigt sich dabei, dass die vorhandenen Differenzen zwischen CAD-Modell und realer Form Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse haben könnten, wird eine Aufbereitung vorgenommen, um diese in die Analyse mit einzubeziehen.

In der konkreten Variante des umgeformten Stahlblechs zeigen sich signifikante Abweichungen zwischen dem CAD-Modell und den Scandaten, weshalb hier eine erneute Simulation direkt mit den Daten der Digitalisierung vorgenommen wird, um das tatsächliche Betriebsverhalten besser analysieren und absichern zu können.

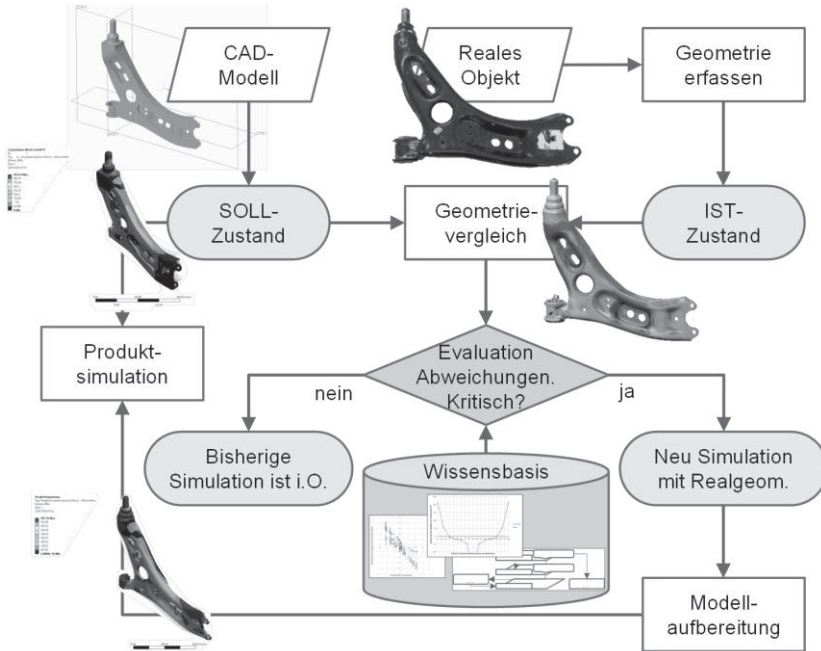


Bild 4: Prozess der weiteren Realisierung bei umgeformtem Stahlblech

3 Fazit und Ausblick

Das gezeigte Vorgehen schafft eine effiziente Möglichkeit, wissensbasierte Simulationen zur Geometrieerzeugung und Absicherung anzuwenden sowie anschließend zu validieren. Hierbei profitieren vor allem simulationsunerfahrene Anwender von einer Wissensbasis, die Expertenwissen rund um numerische Simulations- und Optimierungsverfahren sowie Fertigungs- und Prozess-Know-How situativ bereitstellt. Dies ermöglicht schnelles und fehlerarmes Neuentwickeln oder Reengineering in allen Unternehmensgrößen und -strukturen. Als essentieller Punkt gilt hierbei die Befüllung und Pflege der Wissensbasis, deren Qualität direkten Einfluss auf die Anwendbarkeit der Methode hat.

Danksagung

Wir danken der Bayerischen Forschungsstiftung für die Förderung unserer Forschung im Rahmen des Forschungsverbunds „ForPro² – Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation“.

Literatur

- [1] Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): „Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung“, Springer-Verlag, Berlin, 2013.
- [2] Trzesniowski, M.: "Rennwagentechnik – Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme", 4. Auf., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [3] Haldenwanger, H.-G.: „Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von PKW-Rohkarosserien“ (Dissertation), TU Dresden, 1997.
- [4] Hautsch, S.; et al.: „Prozessgerechte Strukturoptimierung von Tiefziehbauteilen“. In: Fraunhofer IAO Stuttgart (Hg.): Tagungsband zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015. Stuttgart, 19.06.2015. Fraunhofer IAO Stuttgart.
- [5] Spruegel, T.C.; Kestel, P.; Wartzack, S.: "FEA-Assistenzsystem – Plausibilitätsprüfung für Finite-Elemente-Simulationen mittels sphärischer Detektorflächen ", Beiträge zum 27. DfX-Symposium, Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S., TuTech Verlag, Hamburg, 2016.
- [6] Katona, S.; Spruegel, T. C.; Koch, M.; Wartzack, S.: "Structural mechanics analysis using an FE-mesh adaption to real, 3d surface detected geometry data", In: Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA), Vol. 5, No. 7, 2015, p. 387-394.
- [7] Katona, S.; Koch, M.; Wartzack, S.: „An approach of a knowledge-based process to integrate real geometry models in product simulations.“ In: Procedia CIRP, 26th CIRP Design Conference, Stockholm, Sweden, 15.-17.06.2016, in print.
- [8] VDI 5620 - Blatt 1, Entwurf. Reverse Engineering von Geometriedaten. Beuth, Berlin, August 2015

Simulationsbasiertes Vorgehen zur anwendungsorientierten Variantenauslegung hyperelastischer, bionischer Gelenkantriebe

Stefan Landkammer, Daniel Schneider, Florian Winter, Rüdiger Hornfeck

*3D- Visualisierungszentrum / OHM CMP
Technische Hochschule Nürnberg*

Abstract

Flexibility of inherent compliant robotic joints helps to avoid injuries in case of intended or unintended contact between robots and human. Therefore, soft-actuated robotic joints are becoming increasingly important for robots with expected Human-Robot-Interaction. But the highly nonlinear behavior (hysteresis, load velocity dependence) of soft materials complicates an exact and reliable prediction of the joint angle characteristic, especially if one actuator should be usable in different areas, from elder care to industrial tasks. Therefore, a methodology is provided to approximate the case depending change of material properties due to the characteristic requirements for different cases of application.

Keywords: Compliant Joints Design, Spider Leg Actuator, Biomimetic Actuator, Flexible Fluidic Actuator Design

1 Einleitung

Seit Jahren steigt das Interesse an bionischen Gelenkantrieben, die sich durch ihre inhärente Nachgiebigkeit gut für eine Mensch-Maschinen-Interaktion eignen [1]. So wird gezielt die Elastizität weicher Werkstoffe genutzt, um damit Verletzungen zu vermeiden und Sicherheitsanforderungen [2] auf natürliche Weise zu erfüllen. Weiterhin ist es heutzutage mit den neuen generativen Fertigungsmethoden (Rapid-Prototyping) möglich Tragstruktur, Sensoren und Aktoren in Integralbauweise zu vereinen und Stellglieder in anwendungsorientierter Leichtbauweise zu entwickeln.

Jedoch erschweren gerade die flexiblen Werkstoffe- hyperelastische Elastomere- eine genaue Vorhersage des Verhaltens mittels Strukturanalyse. Die Gründe hierfür sind materialeitige Hysterese und starke Geschwindigkeitsabhängigkeit. Im vorliegenden Beitrag wird eine Methodik vorgestellt, wie Varianten nachgiebiger Robotikstellglieder abhängig vom späteren Anwendungsfall ausgelegt werden können.

2 Natürlich nachgiebige, pneumatische Robotergelenke

Die meisten natürlich nachgiebigen Robotikantriebe basieren heutzutage auf fluidischen Aktuationsprinzipien [1]. Stellglieder aus flexiblen Materialien (oft Elastomere, Polyurethane) werden hierzu mit Innendruck beaufschlagt, um mit daraus resultierender Formänderung Bewegungen auszuführen. Die Literatur [3] unterscheidet dabei zwischen zwei Grundtypen, *Soft Robotics* und *Robots with Soft Capabilities*. Die „wahren“ *Soft Robotics* beschreiben Robotikeinheiten, die durchgängig aus weichem Material bestehen und sich in ihrer Gesamtheit verformen [1, 4–6]. Im zweiten Grundtyp- *Roboter mit Soft Capabilities*- wird die natürliche Nachgiebigkeit dadurch erreicht, dass harte Roboterglieder mit weichen, pneumatischen Gelenkelementen angetrieben werden [7, 8]. Beispielhaft kann für diesen Typ ein bionischer Robotikaktuator genannt werden, der nach dem biologischen Vorbild des Spinnenbeines entwickelt wurde [9]. Bild 1 dient zur Verdeutlichung dieses Funktionsprinzips.

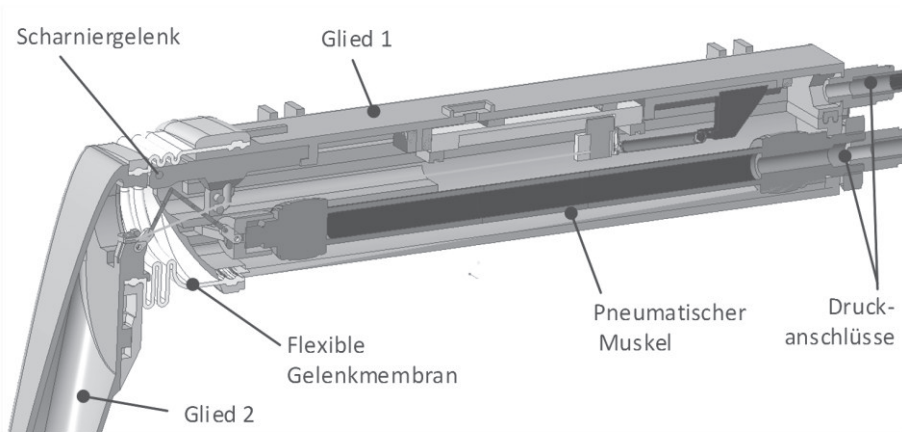


Bild 1: Prototyp eines nachgiebigen Pneumatikgelenks nach dem Spinnenbeinprinzip.

Exoskelettsegmente werden hierzu mit einem scharnierartigen Gelenk verbunden, wobei die Gelenkkehle in faltenbalgartiger Struktur aus weichem Material (hell dargestellt) ausgeführt wird. Ein pneumatischer Druckanstieg innerhalb dieses Hüllkörpers führt zur Entfaltung der Membran und zur Streckung des Gelenkes. Die Gelenkbeugung erfolgt mittels integrierter pneumatischer Muskeln. Da die Differenz des Drehmomentes resultierend aus Beugung und Streckung für die Bewegungsgenerierung entscheidend ist, kann der Aktuator sehr anwendungsspezifisch betrieben werden. Einerseits ist es möglich ein sehr steifes Bewegungsprofil zu fahren, in dem mit hohem Streckdruck und gleichzeitig hohem Beugedruck gearbeitet wird. In diesem Fall wird der Aktuator in gewisser Weise nachgiebig verspannt. Andererseits kann die nötige Druckdifferenz auf einem sehr geringen Niveau beider Einzeldrücke erreicht werden. Dies entspricht einem sehr weichen, nachgiebigen Bewegungsprofil des pneumatischen Antriebs.

3 Charakteristik typischer Werkstoffe flexibler Pneumatikgelenke

Für flexible Robotergelenke in Kleinserien werden Werkstoffe benötigt, die zwar über möglichst hohe Reißfestigkeiten verfügen, aber vor allem auch bestimmte Dehnungen gewähren müssen und mit geringen Fertigungs- oder Formkosten herstellbar sind. Bild 2 zeigt ein solches Bauteil, zum Antrieb des Gelenkaktuators.

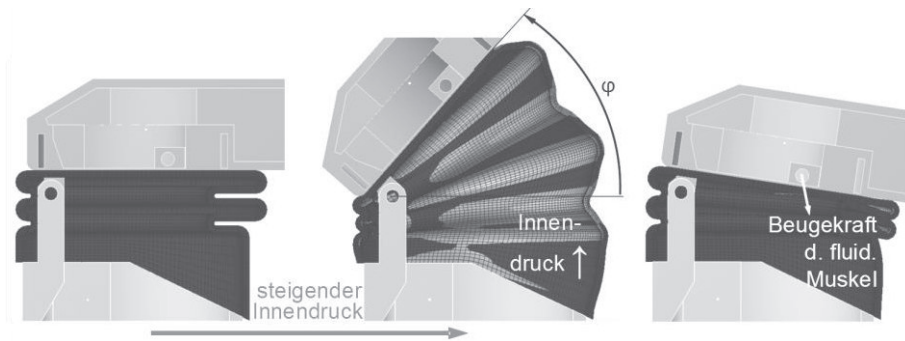


Bild 2: Pneumatischen Streckung mittels einer faltenbalgartigen Gelenkmembran aus Polyurethan (PU) oder Thermoplastischem Polyurethan (TPU) [10].

Polyurethan (PU) und generativ gefertigtes thermoplastisches Polyurethan (TPU) stellen aufgrund der verfügbaren Spannungs-Dehnungs-Bereiche geeignete Werkstoffe dar. Durch die Herstellung mittels Rapid Prototyping sind diese Materialien hinsichtlich der Fertigungskosten vor allem auch für Kleinserien und individuell ausgelegte Stellglieder attraktiv. Nachteilig sind jedoch die stark nichtlinearen Eigenschaften. Neben starker Hystereseeffekte ist auch die Abhängigkeit von der größten Vorbelastung und die entsprechende Geschwindigkeitsabhängigkeit ein entscheidender Faktor zur Variantengenerierung. Bild 3 zeigt beispielsweise Zugprobenauswertungen eines in der flexiblen Robotik verwendeten Polyurethans (UPX8400). Links dargestellt: Die Abhängigkeit der Vorbelastung in Dehnungsprozent. Hohe (Vor-)Belastungen verringern die Materialsteifigkeit. Rechts dargestellt: Die Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit. So sind bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten höhere Spannungen nötig um die gleiche Deformation des Werkstoffs zu erzeugen. Sie lassen das Material steifer erscheinen.

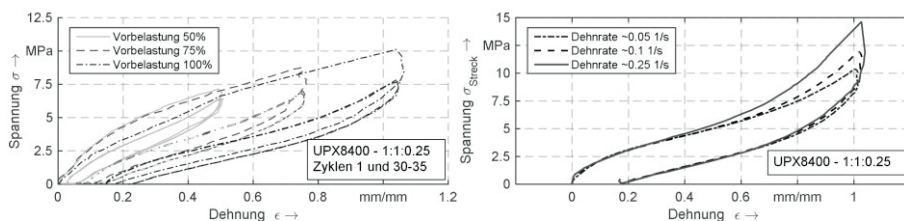


Bild 3: Charakteristisches Materialverhalten von getestetem Polyurethan.

Aufgrund der dargestellten Materialeigenschaften von PU/TPU ist eine exakte Verhaltensbestimmung diverser Anwendungsvarianten von flexiblen, pneumatischen Gelenken nicht direkt möglich.

Übliche Vorgehensweisen [11, 12] im Simulationsprozess gehen davon aus, dass bei einer Strukturanalyse definierte Materialeigenschaften vorliegen. Somit ist eine Vielzahl viskoelastischer Materialmodelle nutzbar, die alle innerhalb eines Anwendungsbereiches zuverlässige Ergebnisse liefern [13] und die Nachbildung des getesteten Materialverhaltens ermöglichen. Unterscheidet sich die Belastung des Werkstoffs im Betriebszustand jedoch vom Materialzustand zum Zeitpunkt der experimentellen Kennwertermittlung, so kann das simulativ ermittelte Verhalten stark abweichen. Elastomereartige Werkstoffe müssen bei einer zu erwartenden Belastungshöhe und -geschwindigkeit vor-konditioniert werden, um in diesem Zustand die materialeitige Kennwertermittlung und die anschließenden Simulationen durchzuführen [14, 15].

Soll ein Aktuator möglichst breit einsetzbar sein, so erschwert dies eine zuverlässige Abschätzung des vorliegenden Materialverhaltens. Denn abhängig vom Anwendungsbereich eines flexiblen Gelenkes einer bestimmten Baugröße herrschen verschiedene, typische Belastungsprofile. Beispielsweise wird ein Pflegeroboter für die Unterstützung von Kranken, Alten oder körperlich benachteiligten Menschen sehr vorsichtig agieren. Die Gelenkgeschwindigkeiten, um beispielsweise ein Glas Wasser zum Mund des Menschen zu führen sind klein und das Druckniveau eines pneumatischen Gelenkantriebs - wie in Kapitel 2 erläutert- wird verhältnismäßig niedrig sein. Wird der Aktuator im Gegensatz dazu zur Montageunterstützung im industriellen Umfeld eingesetzt, so wird der Gelenkantrieb mit deutlich höheren Winkelgeschwindigkeiten betrieben, um möglichst produktiv zu sein. Die Nachgiebigkeit des Stellgliedes wird zwar so gewählt, dass Verletzungen im Falle einer Kollision mit Menschen noch vermieden werden, trotzdem werden das Druckniveau, die Druckänderungsgeschwindigkeiten und die daraus resultierende Spannung im Material bei dieser Anwendung höher liegen.

4 Methodik zur zuverlässigen Variantenauslegung

Zur Reduzierung der Variantenvielfalt sollte ein Gelenkantrieb idealerweise in allen Bereichen optimal nutzbar sein. Dabei muss die Zielgröße der Winkelposition möglichst genau in Abhängigkeit des Druckes und der extern anliegenden Belastung vorhergesagt werden können.

Wie beschrieben liegen jedoch abhängig vom Anwendungsgebiet typische Bereiche der Stellgeschwindigkeiten und Belastungen vor. Dies führt aufgrund

des stark nichtlinearen, dynamischen Materialverhaltens zu Abweichungen in den Winkelpositionen bei temporär gleichem Eingangsdruck.

Um diesen Zielkonflikt zu verbessern muss dem Nutzer eine bessere Vorhersage der zu erwartenden Gelenkpositionen bereitgestellt werden. Dies geschieht anhand eines Näherungsverfahrens, das neben der parametrischen Skalierung abhängig von den Zielgrößen eines Drehgelenkes (Drehwinkel- und Momentenbereich) auch die anwendungsspezifisch zu erwartenden Beanspruchungsprofile mit berücksichtigt. Der Ansatz zu dieser Vorgehensweise wird in Bild 4 aufzeigt.

Kernelement ist eine empirische Studie (dargestellt in Bild 4.2), welche die typisch auftretenden Belastungsprofile für diverse Anwendungsbereiche ermittelt und ordnet. Dieser Anforderungskatalog kann unabhängig vom späteren Gelenkaktuator geschehen und ist allgemein nutzbar. Nachdem ein Gelenkelement in einer bestimmten Baugröße entworfen wurde (Bild 4.1), können aus dem Anforderungskatalog die entsprechend relevanten Nutzungsprofile der erwarteten Zielgruppen ausgewählt werden. Die Randfälle mit minimaler und maximaler Gelenkgeschwindigkeit sowie oberem und unterem Belastungsbereich der Baugröße werden im Einsatzfall zu den größten Variationen im Gelenkverhalten führen und werden deswegen genauer betrachtet. Finite Elemente Simulationen bieten hierzu die Möglichkeit mit angenommenen Kennwerten die Randbereiche der Materialdehnungen- und dehnungsgeschwindigkeiten abschätzen zu können, vergleiche Bild 4.3. Mittels experimenteller Werkstoffprüfungen können anschließend für diese Beanspruchungen nötige Parameter für die Materialmodelle zur simulativen Berechnung ermittelt werden. Das charakteristische Gelenkverhalten für die Randanwendungsfelder (Bild 4.4) kann somit anhand der numerischen Berechnungen und Verifikationen am Versuchsstand ermittelt werden. Ebenso lässt sich durch Werkstoffprüfungen eine Aussage über die zu erwartende Lebensdauer in diesen Einsatzfällen treffen.

Da sich sämtliche weitere Beanspruchungsfelder innerhalb dieser Randbereiche befinden, wird sich auch das Gelenkverhalten im Einsatzfall zwischen diesen Grenzfällen bewegen.

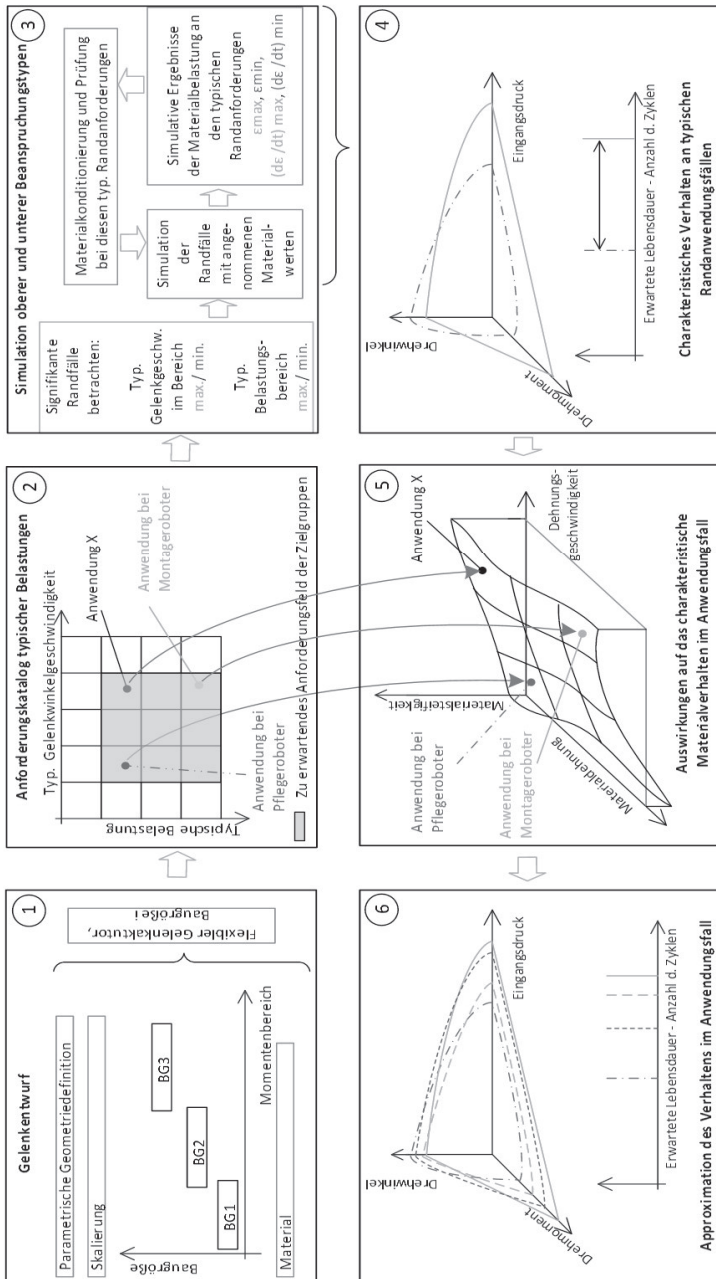


Bild 4: Veranschaulichung der Methodik zur systematischen Abschätzung des Verhaltens hyperelastischer Gelenkantriebe abhängig vom Anwendungsfall.

Im Anforderungskatalog (Bild 4.2) sind für alle Anwendungsfelder typische Gelenkgeschwindigkeiten und –belastungen hinterlegt und darüber hinaus sind für die Randtypen dieser Anwendungsfelder nun auch die dazugehörigen Materialbelastungen bekannt. Somit ist es möglich die charakteristischen Dehnungen und Dehnungsgeschwindigkeiten für die weiteren Nutzungsprofile abzuschätzen (Bild 4.5). Mit dem experimentellen Wissen des Zusammenhangs zwischen temporärer Materialsteifigkeit und Dehnungshöhe bzw. -geschwindigkeit (Bild 3) lassen sich anschließend Parameter der Näherungsgleichungen zur Approximation der dazwischenliegenden Nutzungsprofile finden. Dies ermöglicht eine bessere Abschätzung des Verhaltens im Anwendungsfall und eine bessere Abschätzung der Lebensdauer bei diesen Belastungsbedingungen.

5 Fazit und Ausblick

Die systematische Einbeziehung des Beanspruchungsprofils ermöglicht somit die Generierung passender Antwortcharakteristiken mittels einem Schätzverfahren. Durch bereitgestellte Näherungsgleichungen und dem verifizierten Verhalten in den Randbereichen kann auch jedem Nutzer selbst die Möglichkeit gegeben werden für seinen vorliegenden Anwendungsfall das entsprechende Antwortverhalten besser abzuschätzen. Dies ermöglicht eine Erhöhung der Positioniergenauigkeit sowie eine Minimierung des Regelungsaufwandes im Betrieb. Weiterhin ist diese Vorgehensweise der Approximation des Verhaltens für verschiedene Typen hyperelastischer, pneumatischer Gelenkantrieben anwendbar und somit allgemein gültig.

Um eine systematische Zuordnung der typischen Belastungsprofile verschiedener Anwendungsklassen ermöglichen zu können sind jedoch empirische Studien nötig, die charakteristische Bewegungs- und Lastprofile in verschiedenen Anwendungsbereichen ermitteln und eine entsprechende Clusterung zulassen. Darüber hinaus müssen Daten, beispielsweise Dämpfungskonstanten zur Approximation des viskoelastischen Verhaltens, für diverse Materialien hinterlegt werden, entsprechende Näherungsgleichungen aufgestellt und die Güte dieses Schätzverfahrens mittels experimenteller Versuchsreihen evaluiert werden.

Danksagung

Wir danken dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) für die Förderung des Forschungsprojektes *Entwicklung eines hydraulischen Spinnenroboters mit bionischen Aktuatorbeinen und intuitiver Roboterbedienung* im Rahmen der Bionikinitiative *bionicum*.

Literatur

- [1] Rus, D.; Tolley, M.T.: "Design, fabrication and control of soft robots", *Nature*, 521, 7553, 2015, pp. 467–475.
- [2] International Organization for Standardization (ISO): "Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Collaborative operation, ISO/TS 15066", ISO, Genf, 2011.
- [3] Trivedi, D. et al.: "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research", *Applied Bionics and Biomechanics*, 5, 3, 2008, pp. 99–117.
- [4] Cianchetti, M. et al.: "Design concept and validation of a robotic arm inspired by the octopus", *Materials Science and Engineering: C*, 31, 6, 2011, pp. 1230–1239.
- [5] Mao, S. et al.: "Design and Development of Starfish-Like Robot: Soft Bionic Platform with Multi-Motion Using SMA Actuators. In Proceedings of the ROBIO 2013", International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE, Ed.; IEEE, Shenzhen, China, 12.-14. 12. 2013: Piscataway, NJ, 2013.
- [6] Marchese, A.D. et al.: "A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots", *Soft Robotics*, 2, 1, 2015, pp. 7–25.
- [7] Rosendo, A. et al.: "Stretch reflex improves rolling stability during hopping of a decerebrate biped system", *Bioinspiration & Biomimetics*, 10, 1, 2015, pp. 16008.
- [8] Haegele, M. et al.: "Musculoskeletal Robots and Wearable Devices on the Basis of Cable-driven Actuators. In Soft robotics, Verl, A.; Albuschäffer, A.; Brock, O.; Ratz, A., Eds., . Transferring theory to application; Springer Verlag: Heidelberg, 2015, pp. 42–53.
- [9] Landkammer, S.; Hornfeck, R.: "Drehantrieb, Deutsches Patent, Technische Hochschule Nürnberg - Georg Simon Ohm, DE 10 2013 114 660 B4, 2013.
- [10] Landkammer, S. et al.: "Static Modeling of an Antagonistic Pneumatic Actuator for Robotic Applications. In Proceedings of the ECMSM2015", IEEE - Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application

to Mechatronics (ECMSM2015), IEEE, Ed., ; IEEE, Liberec, Czech, 22.-24.06.2015, 2015.

- [11] Gebhardt, C.: "Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench- Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik", Hanser, München, 2011.
- [12] Stommel, M. et al.: "FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen", Hanser, Carl, München, 2011.
- [13] Bergstrom, J.: "Mechanics of solid polymers- Theory and computational modeling", William Andrew/ Elsevier, Amsterdam, 2015.
- [14] Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis, Miller, K. Available online:
URL: <http://www.axelproducts.com/downloads/TestingForHyperelastic.pdf> (accessed on 18.09.2014).
- [15] Brown, R.: "Physical Testing of Rubber", Springer Science-i-Business Media, Inc., New York,, 2006.

Methode zur Parameteroptimierung komplexer Mechanismen hinsichtlich kinematischer Anforderungen

Björn Heling, Sandro Wartzack

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

Shorter product life cycles along with continuously changing requirements lead to a demand for more efficient product development processes. Resulting from these upcoming challenges the guiding principle „Right-First-Time“ focuses on a reduction of iteration loops during product development. As a consequence product developers need suitable tools and methods to allow a more efficient product development process. In this contribution a new method, which is based on methods for the conceptions of systems in motion and Robust-Design principles, is presented. This novel combination takes kinematic requirements as well as possible geometric uncertainties into account. As a consequence the designed system not only fulfills the kinematic requirements but is also insensitive to deviations from the ideal state.

Keywords: Robust Design, Parameter Optimization, Taguchi Method, kinematic design

1 Einleitung und Motivation

Bedeutende Herausforderungen bei der Entwicklung neuer Produkte ergeben sich heute aus der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Technologien. Um den daraus resultierenden verkürzten Produkt- und Entwicklungszyklen gerecht zu werden, sollten Entwickler nach dem Leitmotiv „Right-First-Time“ handeln. Fokussiert wird dabei im Rahmen des Total-Quality-Management die Entwicklung von Produkten, deren Funktionserfüllung trotz unterschiedlichster Einflüsse stets sichergestellt wird. [1]

Angestrebt werden in diesem Kontext Produkte, die trotz unterschiedlichster externer Einflussgrößen und unvermeidlicher Geometrieabweichungen den angestrebten Anforderungen stets genügen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind vor allem Entscheidungen, die in frühen Entwicklungsphasen getroffen werden ausschlaggebend, da in diesen die wesentlichen Produkteigenschaften festgelegt werden [2]. Dies kann nicht zuletzt mit der „Rule of Ten“, die den zeitlichen und finanziellen Aufwand bei der Produktentwicklung beschreibt, begründet werden [3]. Diese Daumenregel besagt, dass sich die Kosten für eine Fehlerbeseitigung in den unterschiedlichen Produktlebensphasen um den Faktor zehn erhöhen. Bei der Produktentwicklung sollten folglich die (idealen) Nennmaße einzelner Bauteile und Baugruppen frühestmöglich festgelegt werden, wobei sich das gesamte System auch in Hinblick auf die spätere Fertigung insensitiv gegenüber Abweichungen vom Idealzustand verhalten sollte.

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die es erlaubt geometrische (Nenn-)Größen eines bewegten Systems so zu wählen, dass unterschiedliche kinematische Anforderungen unter Berücksichtigung potentieller Abweichungen an das technische System erfüllt werden. Dazu werden Methoden für die Konzeption von bewegten Mechanismen, wie beispielsweise Beschleunigungsanalysen, mit Methoden des Robust Design gezielt kombiniert [4], [5]. Durch diese neuartige Kombination der bewährten Methoden versprechen sich die Autoren eine Effizienzsteigerung bei der Entwicklung komplexer Mechanismen, da die Anzahl der Iterationsschleifen reduziert werden kann.

2 Herausforderungen bei der Entwicklung robuster Mechanismen

In [6] wurde gezeigt, dass die Eigenschaften von bewegten Mechanismen zum Teil erheblich von ihren Idealeigenschaften abweichen, wenn einzelne Bauteilmaße schwanken. Das Robust Design, welches auf TAGUCHI zurückgeht, berücksichtigt solche potentiellen Schwankungen möglichst früh im Produktentwicklungsprozess, sodass die (negativen) Auswirkungen frühestmöglich

reduziert werden [5]. Eine Grundannahme ist dabei, dass sämtliche Einflussfaktoren auf ein System Streuungen unterworfen sind. Da alle diese Streuungen Auswirkungen auf das System und dessen Verhalten haben, wird versucht das System so zu gestalten, dass es sich insensitiv gegenüber den streuenden Einflussgrößen verhält. Die Festlegung der Nennmaße stellt eine besondere Herausforderung bei der Optimierung dar, da sich Veränderungen an Maßen auf unterschiedlichste Eigenschaften, wie beispielsweise dem Beschleunigungsverhalten eines Mechanismus auswirken,

2.1 Gestaltung von Mechanismen

Im Folgenden wird auf ausgewählte Grundlagen der Getriebelehre, die notwendig sind um die kinematischen Anforderungen an einen Mechanismus zu beschreiben, eingegangen. Nach [4] wird unter dem **Laufgrad** F die Anzahl relativer Bewegungen verstanden, die verhindert werden müssten, sodass ein Getriebe bewegungsunfähig wird. Dieser stellt somit eine Funktion der Getriebeglieder, den Gelenken und deren Freiheitsgraden dar. Obwohl somit die Bauteilabmessungen im Allgemeinen keinen Einfluss auf den Laufgrad eines Getriebes haben, kann es bei einer ungünstigen Konstellation abweichungsbehafteter Bauteile zu einem Verklemmen (Laufgrad $F=0$) kommen. Um ein Verklemmen des Mechanismus ausschließen zu können, genügt es somit nicht ausschließlich die Nennmaße des Mechanismus zu betrachten, da gefertigte Mechanismen stets von diesen idealen Nennmaßen abweichen.

Bei der Analyse des **kinematischen Verhaltens** eines Getriebes wird in der Regel ausgehend von einem inertialen Koordinatensystem beschrieben, wie eine oder mehrere Antriebsfunktionen Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Punktes auf einem Getriebeglied beeinflussen. Dabei muss die Beschreibung der kinematischen Größen nicht nur in Abhängigkeit vom inertialen Koordinatensystem erfolgen, vielmehr können auch Beziehungen zwischen unterschiedlichen Punkten beschrieben werden. Weiterhin kann die Geschwindigkeit, beziehungsweise die Beschleunigung eines Punktes als Ableitung des Orts- beziehungsweise des Geschwindigkeitsvektors nach der Zeit beschrieben werden. Für die Konzeption von Mechanismen sind diese kinematischen Größen von großer Bedeutung, da sie maßgeblich das Systemverhalten beeinflussen [4]. So führen beispielsweise Veränderungen der Maße eines Kurbeltriebes nicht nur dazu, dass sich das Verdichtungsverhältnis verändert, sondern auch das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten des gesamten Mechanismus wird dadurch beeinflusst.

2.2 Robust Design nach TAGUCHI

Nach TAGUCHI wird unter einem robusten System ein System verstanden, welches sich insensitive gegenüber schwanken Eingangsgrößen verhält. Bild 1 stellt den Zusammenhang zwischen streuenden Eingangs- und Ausgangsgrößen dar, wobei System A als robuster bezeichnet werden kann, da die Streuung der Eingangsgröße einen geringeren Effekt auf die Streuung der Ausgangsgröße hat.

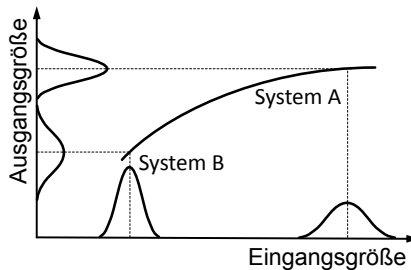


Bild 1: Bewertung der Robustheit nach [7]

Das ursprünglich für Prozesse konzipierte Vorgehen von TAGUCHI gliedert sich in das System-, Parameter- und Toleranzdesign. Beim Systemdesign wird die Art des Systems und dessen Komponenten festgelegt. Anschließend erfolgt beim Parameterdesign die Wahl der Sollwerte der Parameter (zum Beispiel der Nennmaße). Beim abschließenden Toleranzdesign werden zulässige Abweichungen von idealen Parametern beschrieben. Während Methoden des Toleranzmanagements, wie der Toleranzanalyse beziehungsweise –synthese folglich dem Toleranzdesign zugeordnet werden, wird die im Folgenden dargestellte Methode früher im Entwicklungsprozess angewendet und kann dem Parameterdesign zugeordnet werden.

2.3 Ableitung des Handlungsbedarfes

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, kann das kinematische Verhalten eines Mechanismus mathematisch beschrieben und analysiert werden, wobei bei diesen Betrachtungen meist Abweichungen der Parameter vernachlässigt werden. Abweichungen werden erst im Rahmen von Toleranzanalysen, welche später im Produktentwicklungsprozess stattfinden, durchgeführt. So konnte bei einer Toleranzsynthese von WALTER gezeigt werden, dass sowohl kleine Anpassungen der Nennmaße (in Form von Mittelwertsverschiebungen),

als auch Anpassungen der Toleranzen bei der Optimierung zeitlich veränderlicher Systeme berücksichtigt werden können ([8]).

Zusammenfassend bleibt jedoch die Frage unbeantwortet, wie Produktentwickler(-teams) die Nennmaße von Mechanismen so auslegen können, dass die Mechanismen sowohl kinematischen Anforderungen (bspw. dem Beschleunigungsverhalten) genügen, als auch insensitive auf Abweichungen von den Idealmaßen reagieren. Um das Entwicklerteam adäquat unterstützen zu können wird im Folgenden ein Vorgehen zur Parameteroptimierung komplexer Mechanismen hinsichtlich kinematischer Anforderungen vorgestellt.

3 Vorgehensweise bei der Parameteroptimierung

Für die Parameteroptimierung eines Mechanismus wird das in Bild 2 dargestellte Vorgehen vorgeschlagen.

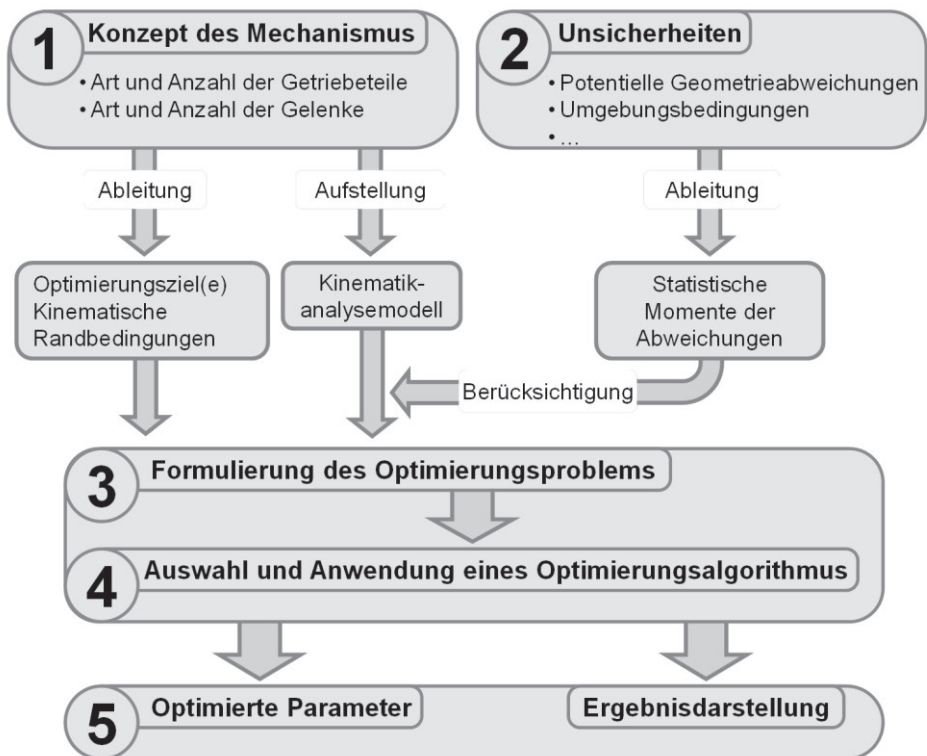


Bild 2: Vorgehen bei der Parameteroptimierung von Mechanismen

Ausgangspunkt ist dabei ein Konzept des zu verbessernden Mechanismus, bei dem sowohl die Art und Anzahl der kinematischen Glieder, als auch die Anzahl und Art der Gelenke bereits definiert sind. Weiterhin müssen Annahmen bezüglich Prozess und Bauteilstreuungen getroffen werden, da ausgehend von diesen Streuungen ein robuster Mechanismus gestaltet werden kann. Dabei werden neben kinematischen Randbedingungen, die jeweils mit einem Analysemodell beschrieben werden Optimierungsziele definiert, welche die Formulierung eines Optimierungsproblems erlauben. Anschließend erfolgt nach der Auswahl eines Optimierungsalgorithmus die Optimierung und die anschließende Ergebnisdarstellung der optimierten Parameter.

Entscheidend ist, dass bei der Formulierung des Optimierungsproblems Unsicherheiten berücksichtigt werden. Zu solchen Unsicherheiten können beispielsweise neben potentiellen Geometrieabweichungen auch schwankende Umgebungsbedingungen gehören. Um diese Unsicherheiten bei der Optimierung berücksichtigen zu können, werden die zu berücksichtigenden Unsicherheiten mit statistischen Kennwerten beschrieben. Durch die Berücksichtigung der Unsicherheiten kann gewährleistet werden, dass auch bei der Fertigung des Produktes, bei der unweigerlich Abweichungen vom Idealzustand auftreten, die Mechanismen dennoch den geforderten Eigenschaften genügen.

4 Parameteroptimierung einer Röntgenblende

Für die Anwendung des oben vorgestellten Vorgehens soll eine Röntgenblende eines Computertomographen herangezogen werden. Diese Blende hat die Aufgabe die Röntgenstrahlung möglichst genau zu dosieren, sodass Patienten keinen unnötig hohen Strahlendosen ausgesetzt werden. Für die Produktentwicklung ergeben sich somit unter anderem hohe Anforderungen an die Positionsgenauigkeit und die Verstelldynamik des Mechanismus. Hinzu kommen unumgängliche Geometrieabweichungen des Mechanismus, die auf Bauteil- und Prozessstreuungen zurückzuführen sind. Es ist folglich vonnöten den Mechanismus ausgehend von den an ihn gestellten Anforderungen, möglichst robust zu gestalten um Abweichungen vom (geometrischen) Idealzustand präventiv zu begegnen.

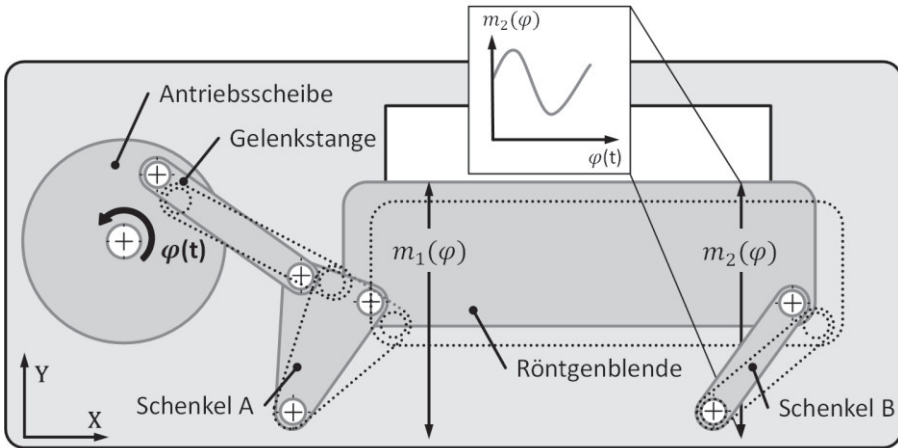


Bild 3: Kinematik der Röntgenblende mit zeitabhängigen Funktionsmaßen

Im Einzelnen besteht die Kinematik der Röntgenblende (Bild 3) aus einem dreieckigen Schenkel A, der über eine Gelenkstange mit der Antriebsscheibe verbunden ist. Auf der rechten Seite wird die Röntgenblende über einen weiteren Schenkel (B) geführt, sodass die Blende sich ausgehend von der rotatorischen Eingangsbewegung auf einer parallelen Kurve bewegt.

4.1 Kinematikanalysemodell

Für die in Bild 4 dargestellte Kinematik können mit Hilfe von Vektorketten die beiden Schließmaße für die Analyse berechnet werden. Unter der Annahme dass die Gelenke spielfrei sind ergeben sich folgende vereinfachte Bewegungsgleichungen für die beiden Messstellen:

$$m_1(t) = \sin(\gamma(t)) * a_1 + \cos\left(90^\circ - \operatorname{atan}\left(\frac{10}{60}\right) - \iota(t)\right) * \sqrt{60^2 + 10^2} \quad (1)$$

$$m_2(t) = \sin(\delta(t)) * b + \cos\left(90^\circ + \operatorname{atan}\left(\frac{10}{60}\right) + \iota(t)\right) * \sqrt{60^2 + 10^2} \quad (2)$$

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Formeln aus Gründen der besseren Lesbarkeit stark vereinfacht sind und in Bild 4 neben den Messstellen lediglich Parameter, die bei der Optimierung berücksichtigt werden dargestellt sind.

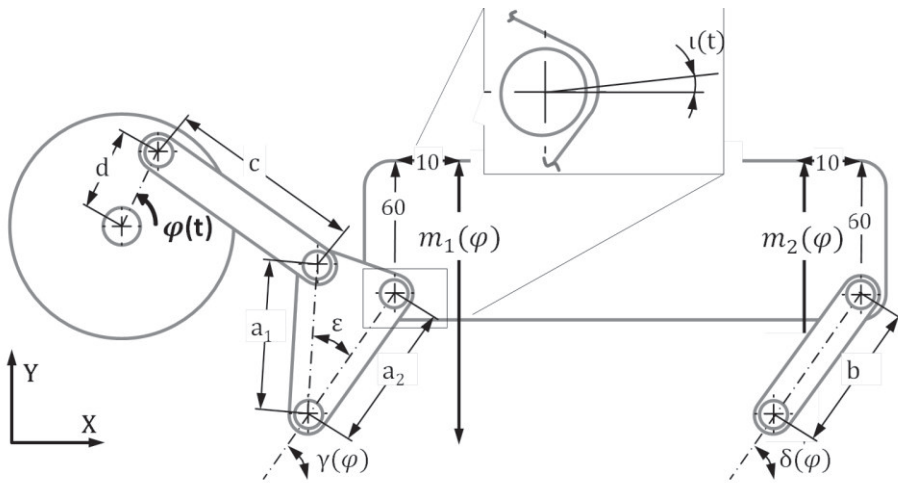


Bild 4: Kinematik der Röntgenblende mit zu optimierenden Parametern

In Tabelle 2 sind neben den Nennmaßen die jeweiligen Optimierungsbereiche und die angenommenen Unsicherheiten, die bei der Optimierung mit berücksichtigt werden dargestellt. Bei den Unsicherheiten werden symmetrisch normalverteilten Streuungen bei einer mittleren Allgemeintoleranz ([9]) angenommen. Beim später stattfindenden Toleranzdesign können diese Toleranzen unter Berücksichtigung des Kostenaspektes weiter eingeschränkt werden. Lediglich die beiden Hebellängen a_2 und b sind von Anfang an enger toleriert, da andernfalls die parallele Bewegung der Blende nicht sichergestellt werden kann.

4.2 Optimierungsziel und kinematische Randbedingungen

An die Kinematik der Röntgenblende werden unterschiedlichste kinematische Anforderungen gestellt, die als Randbedingungen der Optimierung formuliert werden. Um sowohl eine geführte Bewegung sicherstellen als auch ein Verklemmen ausschließen zu können, muss der Laufgrad des Demonstrators stets $F=1$ sein. Dies wird gewährleistet, sofern alle Bewegungsgleichungen für reale Zahlen gelöst werden können.

Zusätzlich werden wie Bild 3 dargestellt zwei Schließmaße zwischen der Ausschnittoberkante und der Röntgenblende definiert. Hier wird angenommen, dass die Ausschnittoberkante waagrecht ist und die beiden Schließmaße somit ausschließlich in Y-Richtung gemessen werden. Die kinematischen Randbedingungen sind im Einzelnen:

- **Mindestweg der Blende:** Um eine ausreichende Bestrahlung sicherstellen zu können, muss die Blende in der Lage sein einen Mindestweg zurücklegen zu können. Für den Demonstrator soll dieser 15 mm betragen:

$$m_{i,max} - m_{i,min} \geq 15 \text{ mm} \quad (3)$$

- **Parallelitätsanforderung:** Von der idealen parallelen Bewegung der Blende darf nur gering abgewichen werden:

$$|m_1(\varphi) - m_2(\varphi)| \leq 1 \text{ mm} \quad (4)$$

- **Ausschluss lokaler Minima und Maxima:** Weiterhin muss sichergestellt werden, dass bei einem Bewegungszyklus der Blende $\varphi \in [0^\circ, 360^\circ[$ lediglich ein (globales) Maximum beziehungsweise Minimum auftritt. Andernfalls würde sich beim gewollten Schließen der Blende der Spalt zwischenzeitlich vergrößern. Da der Bewegungsablauf der Blende zyklisch erfolgt, muss im Intervall $[0^\circ, 90^\circ[$, welche ab dem unteren Umkehrpunkt der Blende beginnt gelten:

$$\frac{d}{d\varphi} m_1(\varphi) \neq 0 \quad \text{für} \quad \varphi \in [0^\circ, 90^\circ[\quad (5)$$

Da eine bestimmte Position der Blende möglichst genau eingestellt werden muss, ist das **Optimierungsziel** eine Minimierung der maximalen Änderung des Blendenabstandes in Bezug auf den Drehwinkel φ :

$$\min\left(\max\left(\frac{d}{d\varphi} m_1(\varphi)\right)\right) \quad (6)$$

4.3 Angewandeter Optimierungsalgorithmus und Optimierungsergebnisse

Bei der Optimierung wurde ein Partikelschwarmoptimierer verwendet, der das biologische Schwarmverhalten imitiert. Dieser metaheuristische Ansatz wurde gewählt, da aus den kinematischen Anforderungen nicht-lineare Randbedingungen resultieren (siehe dazu [10]). Für die Optimierung wurden die in Tabelle 1 dargestellten Einstellungen gewählt.

Tabelle 1: Gewählte Parameter bei der Partikelschwarmoptimierung

Parameter	Wert
Größe der Stichprobe bei Optimierungsvorgang	500
Anzahl der Partikel der Population	20
Tolerierte Verletzung der Zielfunktion	$1 \cdot 10^{-3}$
Tolerierte Verletzung der Nebenbedingungen	$1 \cdot 10^{-6}$
Anzahl quasi-identischer Lösungen	10

Die ursprünglichen Nennmaße, mit den jeweiligen Optimierungsbereichen und zugehörigen Unsicherheiten sind in Tabelle 2 den optimierten Nennmaßen gegenübergestellt.

Tabelle 2: Ursprüngliche und optimierte Nennmaße

Bezeichnung	Ursprüngliches Nennmaß	Optimierungsbereich	Unsicherheiten	Optimiertes Nennmaß
a_1	35 mm	[30, 40] mm	$\pm 0,3$ mm	36,5 mm
a_2	35 mm	[30, 40] mm	$\pm 0,1$ mm	35,0 mm
b	35 mm	[30, 40] mm	$\pm 0,1$ mm	35,0 mm
d	16 mm	[10, 30] mm	$\pm 0,2$ mm	11,2 mm
g	80 mm	[78, 90] mm	$\pm 0,3$ mm	89,0 mm
ε	45°	[30, 50]°	$\pm 0,5$ '	45,6 °

Bei der Betrachtung der Nennmaße wird deutlich, dass sich der Radius auf dem sich die Gelenkstange befindet merklich reduziert hat, während die Länge der Gelenkstange vergrößert wurde. Zusätzlich fällt auf, dass die Längen der Schenkel kaum verändert wurden, wobei Schenkel A nach der Optimierung unterschiedliche Hebellängen aufweist.

Zur Verdeutlichung der erreichten Verbesserung der Eigenschaften des Mechanismus ist in Bild 5 der Weg der Blende in Y-Richtung $m_1(\varphi)$ und der Geschwindigkeitsverlauf $\frac{d}{d\varphi} m_1(\varphi)$ vor und nach der Optimierung dargestellt.

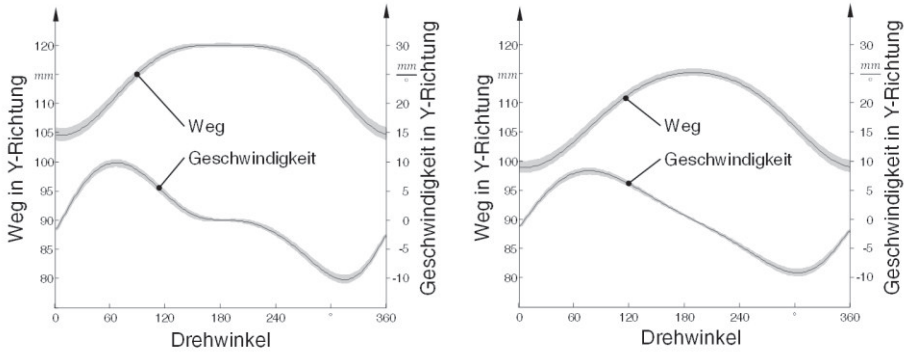


Bild 5: Schließmaß- und Geschwindigkeitsverlauf vor (links) und nach (rechts) der Optimierung

Bei der Darstellung ist jeweils ein Spektrum, ausgehend von einer Stichprobengröße von $n=500$ und den in Tabelle 1 dargestellten Unsicherheiten aufgetragen. Bei beiden Bildern ist der Verlauf der Geschwindigkeit unterhalb des Schließmaßverlaufes angetragen. Bei der Optimierung konnte unter Einhaltung der geforderten Eigenschaften die maximale Geschwindigkeit von $9,84 \frac{mm}{1^\circ}$ auf $8,44 \frac{mm}{1^\circ}$ reduziert werden. Die Reduzierung der maximalen Geschwindigkeit sorgt dafür, dass der robuster gestaltete Mechanismus weniger sensitiv auf Winkelveränderungen reagiert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die übergeordnete Zielsetzung des vorliegenden Beitrags ist die Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Parameteroptimierung komplexer Mechanismen, hinsichtlich kinematischer Anforderungen. Mit der in diesem Beitrag vorgestellten allgemeingültigen Methode lassen sich komplexe bewegte Systeme hinsichtlich kinematischer Anforderungen, unter Berücksichtigung von geometrischen Unsicherheiten, robuster gestalten. Exemplarisch wird dies durch die Optimierung der Kinematik einer Röntgenblende gezeigt.

Die Autoren danken der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden“ (WA 2913/19-1).

Literatur

- [1] Crosby, P.B.: „Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain“, New American Library, New York, 1980.

-
- [2] Krause, F-L.; Franke, H-J.; Gausemeier, J.: „Innovationspotentiale in der Produktentwicklung“, Carl Hanser Verlag, München, 2006.
- [3] Clark, K.; Fujimoto, T.: „Automobilentwicklung mit System: Strategie, Organisation und Management in Europa“, Campus, Frankfurt a.M., 1992.
- [4] Myszka, D.: „Machines and mechanisms“, Pearson Education, Inc, New Jersey, 2012.
- [5] Taguchi, G.; Chowdhury, S.; Wu, Y.: „Taguchi's Quality Engineering Handbook“, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2004.
- [6] Imani, B.M.; Pour, M.: „Tolerance analysis of flexible kinematic mechanism using DLM method“, Mechanism and Machine Theory Bd. 44, Nr. 2, 2009.
- [7] Matthiassen, B.: „Design for Robustness and Reliability“, Department of Control and Engineering Design DTU, Lyngby, 1997.
- [8] Walter, M.; Spruegel, TC.; Wartzack, S.: „Tolerance-Cost-Optimization of Systems with time-variant Deviations“, Procedia CIRP – 13th Conference on Computer Aided Tolerancing, 2014.
- [9] DIN ISO 2768-1:1991: Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung, 1991.
- [10] Heling, B.; Aschenbrenner, A.; Walter, M.S.J.; Wartzack, S.: „On Connected Tolerances in Statistical Tolerance-Cost-Optimization of Assemblies with Interrelated Dimension Chains“ Procedia CIRP – 14th Conference on Computer Aided Tolerancing, 2016.

Einfluss von Prozessparametern auf die Funktionserfüllung von Bauteilen beim Fused Deposition Modeling

Justus Siebrecht, Georg Jacobs, Alexander Beckers, Manuel Löwer, Walter Schmidt, Michael Körber

Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Abstract

Optimising the stress behaviour of Fused Deposition Modeling (FDM) manufactured parts can be achieved by specific variation of process parameters. Varying nozzle temperatures, part orientations and filling structures are efficient ways to influence mechanical properties. This paper investigates the impact of different parameter combinations for parts printed in polylactic acid on an Ultimaker² printer from Ultimaking B. V. Characteristic mechanical values, or more precisely tensile strength, young modulus and breaking strain are analysed through tension tests. Additionally, visually detectable changes on finished part surfaces are examined. The results contribute to broaden the common understanding of build parameter combinations and their usage in designing optimised part properties.

Keywords: additive manufacturing, customized properties, fused deposition modeling

1 Einleitung

Generative Fertigungsverfahren - im Englischen „additive manufacturing“ (AM) genannt - bieten große Potenziale bei der Herstellung von individuellen Prototypen oder Bauteilen. Nach Fastermann [1] wird AM als Teil einer neuen industriellen Revolution beschrieben. Vielseitige innovative Möglichkeiten führen zu einer stetig wachsenden Nutzung in unterschiedlichsten Branchen. Das Spektrum reicht dabei von Bauteilen im Maschinenbau und Modellen in der Architektur bis hin zu individuellen medizinischen Implantaten, der Werkzeugfertigung im Weltall sowie der Vision von gedruckten Organen. Trotz der vorangeschrittenen Entwicklung beschreibt Gebhardt, dass für die AM neue Konstruktionsrichtlinien notwendig sind und das Potential noch nicht ausgeschöpft ist [2]. Eine Verfahrensvariante für die Erstellung von Kunststoffteilen ist das Fused Deposition Modeling (FDM) [3]. Hierbei werden Kunststofffilamente aufgeschmolzen und in geometrisch definierten Bahnen schichtweise aufeinander abgelegt. Durch die günstigen Anschaffungs- und Materialkosten sind diese Drucker auch für Privatanwender erschwinglich, wobei die Materialgruppe der Polyactide (PLA) einen großen Stellenwert einnimmt. Trotz der weiten Verbreitung auch im professionellen Einsatz [4] wird der FDM-Druck in vielen Fällen nur zum Prototypen- oder Musterbau eingesetzt. Unterschiedliche Prozessparameter sowie die zum Teil inhomogenen Materialeigenschaften liefern Druckergebnisse mit stark variierender Qualität [5]. Jedoch erlaubt die richtige Prozessparameterwahl durchaus den Druck funktionsfähiger Serienteile in Abhängigkeit der jeweiligen Anforderungen.

2 Problemstellung

Durch die lange Prozessdauer eignet sich AM meist nur für Kleinserien und individuelle Produkte [6]. Dieser häufige Wechsel an Bauteilanforderungen erfordert eine Vielzahl an angepassten Prozessparametern, da schon geringe Abweichungen einzelner Parameter die späteren Bauteileigenschaften beeinflussen. Den Einfluss verschiedener Parameter auf die Herstellung und Qualitätsmerkmale zu eruieren, ist somit ein wichtiger Bestandteil des AM [2, 4].

Die stetige Verschiebung des Anwendungsschwerpunktes von Prototypen zu fertigen Endprodukten [1] lässt die Qualität und somit die Korrelation der Prozessparameter bedeutender werden. Auch im FDM-Druck findet dieser Wandel statt. Die geringere Beanspruchbarkeit der Bauteile im Vergleich zu herkömmlichen Spritzgussverfahren [1, 6] ist jedoch ein Nachteil bei der Produktion von Endprodukten und kann ein Ausschlusskriterium bei der Wahl des Fertigungsverfahrens sein. In welcher Weise dieser Nachteil durch die Vorteile

des FDM-Drucks ausgeglichen werden kann, lässt sich nur im Einzelfall ermitteln.

Caulfields [5] und Wendels [6] Untersuchungen von gedruckten Kunststoffteilen liefern erste wichtige Erkenntnisse zur Auswirkungen der Bauteilorientierung im Drucker und der prozessbedingten Anisotropie. Ein Merkmal FDM-gedruckter Teile ist, dass nicht nur zwischen den Schichten sondern auch innerhalb einer Schicht, durch das Legen einzelner Filamentbahnen, Anisotropie auftritt. Während Tymrak [7] die Formabweichungen und Zugfestigkeit beim Selective Laser Sintering (SLS) betrachtet, liegt der Fokus von Wendel [6] auf dem Einfluss von Füllstoffen, wobei PLA nicht näher untersucht wird. Tymrak [7] zeigt die Vergleichbarkeit von kommerziellen und open-source FDM-Druckern auf. Unterschiede der Zugfestigkeit aufgrund der Ausrichtung sind ebenfalls zu erkennen. Hohle Strukturen werden nicht betrachtet, wohingegen das unbefriedigende Abschneiden der Zugfestigkeit bezogen auf den Spritzguss weiträumig thematisiert ist [5, 6, 7].

Grundsätzlich werden neben der Bauteilorientierung im Drucker bisher nur wenige Prozessparameter analysiert. Für den flächendeckenden Einsatz von FDM in heutigen Konstruktionsabteilungen fehlen weiterhin Zusammenhänge zwischen Parametern und Qualitätsmerkmalen [4, 7]. Eine strukturierte Analyse der unterschiedliche Prozessparameter ist somit Voraussetzung für einen optimierten Entwicklungsprozess.

3 Versuchsplanung

Im Rahmen dieser Untersuchung werden Prozessparameter eines FDM-Druckers der Firma Ultimaking B.V., dem Ultimaker², über den Slicer Cura variiert. Die Materialauswahl ist auf PLA begrenzt. Mithilfe mehrerer Versuchsreihen wird der Einfluss der Prozessparameter auf die Druckergebnisse ermittelt [4]. Damit signifikante Einflüsse mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 80% erkannt werden, wird die benötigte Versuchsanzahl je Parameterkombination durch die statistische Versuchsplanung auf sechs Zugproben festgesetzt [9]. Die Messgenauigkeit der Prüfmaschine, die 0,1% der Messspanne beträgt, wird hier ebenfalls beachtet. Für die Zugversuche werden teilgefüllte sowie hohle Proben verwendet. Teilgefüllte Proben erlauben eine bessere Vergleichbarkeit zu realen Bauteilen, da bei FDM-Druck in den seltensten Fällen mit Vollmaterial gearbeitet wird. Hierzu ist es notwendig, angepasste Prüfvorschriften und Prüfteile zu definieren. Unterschiedliche Probenkörper, die neben der Ermittlung mechanischer Kennwerte auch eine qualitative optische Bewertung zulassen, sind unabdingbar.

Die Analyse der Proben erfolgt einerseits in zerstörenden Zugversuchen mithilfe einer einachsigen wirkenden Prüfmaschine, andererseits durch eine subjektive, optische Beurteilung der Oberflächenqualität. Eine qualitative Vergleichbarkeit zu anderen FDM-Druckern ist durch Tymrak [7] gegeben. Dem gegenüber steht jedoch Ebel [10], der zwar die Reproduzierbarkeit auf einem Drucker bestätigt, jedoch eine quantitative Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Druckern nicht bestätigen kann. Die Verwendung quantitativer Ergebnisse anderer FDM-Drucker ist somit nicht möglich. Eine eigenständige quantitative Analyse des verwendeten Druckers ist erforderlich.

Das Druckergebnis kann durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Prozessparametern beeinflusst werden. Ausgewählte Parameter werden in dieser Analyse untersucht. Mit Hilfe von Zugversuchen wird die Auswirkung von Drucktemperatur, Druckrichtung und Bauteilfüllung ermittelt. Für die Drucktemperatur und die Druckgeschwindigkeit werden optisch auswertbare Proben hinzugenommen. Im Folgenden wird die Drucktemperatur als Synonym für die Düsentemperatur verwendet. Andere Temperaturen, wie beispielsweise die Druckbetttemperatur, werden nicht variiert.

Durch die begrenzte Anzahl an Untersuchungen im Bereich des Parametereinflusses im FDM-Druck werden ausgewählten Prozessparameter grob variiert, um Ansätze für spätere, detailliertere Analysen zu liefern. Die Prüfgruppen sind in Bild 1 links dargestellt. Für den Einfluss der Düsentemperatur werden die Temperaturen auf 200 °C, 210 °C und 220 °C festgesetzt. Bezogen auf die Orientierung der Zugproben im Bauraum werden zwei Ausrichtungen definiert, die in Bild 1 rechts schematisch dargestellt sind. Einerseits werden Zugproben in Druckrichtung (stehend) und somit senkrecht zu den einzelnen Schichten belastet. Andererseits werden liegende Proben parallel zu den Schichten, also senkrecht zur Druckrichtung belastet.

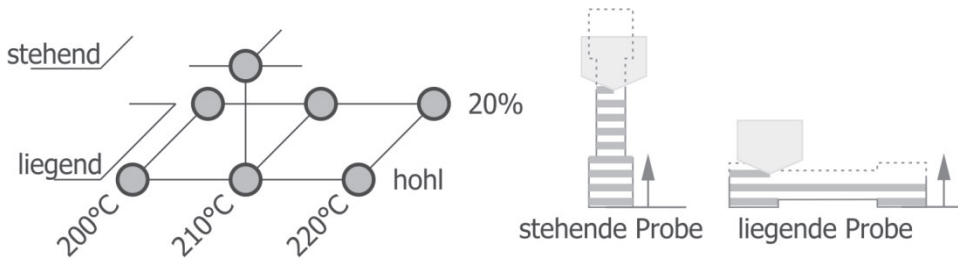


Bild 1: Probenorientierung im Druckraum und Prüfgruppen

Hinzu kommt die Variation der Füllung und die somit erzeugten Spannungsspitzen [6, 8]. Da nicht bekannt ist, ob sich die Füllung generell positiv



oder negativ auf die Belastbarkeit auswirkt, werden hohle und teilgefüllte Proben gedruckt. Der Füllgrad der teilgefüllten Proben liegt bei 20%.

Für die optische Beurteilung der Oberflächen wird neben der Drucktemperatur auch die Druckgeschwindigkeit verändert. Ziel ist es, Fehlstellen in den von außen sichtbaren Oberflächen zu vermeiden. Ob eine Verringerung von Fehlstellen auf der Oberfläche mit einer Verringerung von Kerben im Inneren einhergeht und zu einer Festigkeitssteigerung führt, wird näher untersucht.

4 Probengeometrie

Die verwendeten Zugproben orientieren sich am genormten, spritzgegossenen Vielzweckprobenkörper der DIN EN ISO 3167. Durch die notwendige Anzahl an Prüfkörpern, die Druckdauer und die Bauraumgröße, ist der Prüfbereich um die Hälfte reduziert. Weitere Anpassungen betreffen die innere Geometrie. Die zur Einspannung notwendigen Kräfte können nicht von hohlen oder teilgefüllten Proben aufgenommen werden. Die Angabe *hohl* und *teilgefüllt* bezieht sich somit nur auf den Prüfbereich, im Einspannbereich wird Vollmaterial verwendet. Füllungsunabhängig liegen die Wandstärke der Proben bei 0,8 mm und die Schichtdicke bei 0,1 mm. Die zerstörende Prüfung der Zugproben erfolgt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,25 mm/s.

5 Ergebnisse

Die durchgeführten Analysen liefern unterschiedliche Kennwerte und Ergebnisse in Abhängigkeit zu den Prozessparametern. Über die ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugproben lassen sich Aussagen über das Dehnungsverhalten sowie weitere mechanische Kennwerte machen. Bild 2 stellt beispielhaft die sechs Spannungs-Dehnungs-Verläufe einer liegenden (links) und einer stehenden (rechts) Probengruppe dar. Diese wird mit einer Drucktemperatur von 210°C hohl gedruckt.

Die Standardabweichung der Zugfestigkeit liegt bei allen Prüfgruppen zwischen 2,7% und 5,3%. Der E-Modul zeigt vergleichbare Werte. Die größte Abweichung weist die Dehnung auf. Diese liegt im Extremfall, hervorgerufen durch einzelne Ausreißer, bei 20% (Bild 2, links). Allen Prüfgruppen gemein ist, dass die Verläufe bis zu 90% der maximalen Spannung sehr gleichmäßig sind. Die Reproduzierbarkeit, wie bei Ebel [10] angesprochen, ist auch für den Ultimaker² zutreffend.

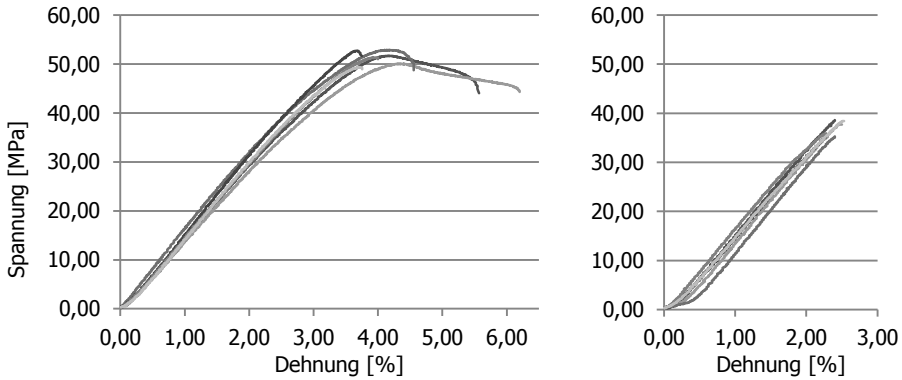


Bild 2: Prüfdiagramme von Zugproben unterschiedlicher Ausrichtung; links liegend, rechts stehend

5.1 Einfluss der Bauteilorientierung

Alle betrachteten Parameter haben einen eindeutig nachweisbaren Einfluss auf die mechanischen Kennwerte. Im Folgenden wird der Einfluss der Bauteilorientierung im Druckerbaurraum detailliert betrachtet, der zu signifikanten Unterschieden im Bauteilversagen führt. Diese Inkonsistenz ist anhand der Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Bild 2 ableitbar. Das rechte Diagramm in Bild 2 zeigt spontanes Bauteilversagen stehender Proben. Verglichen mit den Proben aus dem linken Diagramm in Bild 2 liegen bis auf die Bauteilorientierung die gleichen Randbedingungen zugrunde. Bauteilversagen mit ausgeprägtem plastischem Anteil ist somit nur bei liegenden Proben zu erkennen.

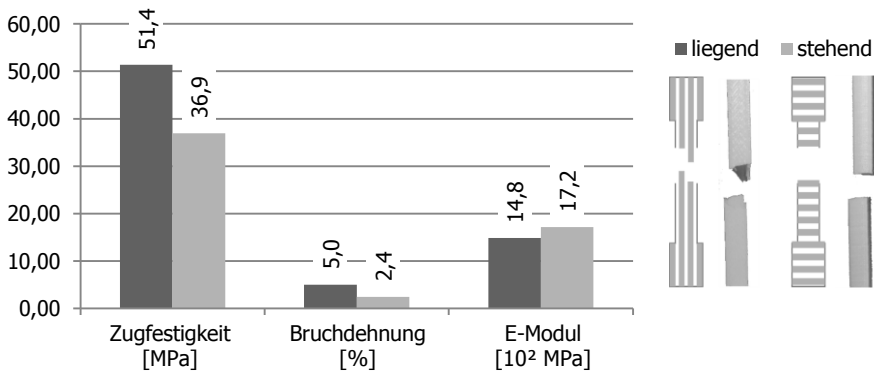


Bild 3: Mechanische Kennwerte in Abhängigkeit der Bauteilorientierung

Bei den mechanischen Kennwerten sind ebenfalls Unterschiede messbar, die im Diagramm in Bild 3 aufgeführt sind. Hierzu werden die jeweiligen Mittelwerte der betrachteten Kennwerte einer Probengruppe verglichen. Dargestellt sind neben der Zugfestigkeit auch der E-Modul und die Bruchdehnung. Senkrecht zur Schicht belastete Proben weisen bei der Zugfestigkeit ein um 28%, bei der Bruchdehnung 53% geringeren Wert auf. Bezogen auf den E-Modul liegen die Werte jedoch knapp über den liegenden Proben und weisen somit eine höhere Steifigkeit auf. Diese Erkenntnisse entsprechen somit dem SLS-Druck [5]. Auch beim Bruchbild, Bild 3 rechts, sind die Ergebnisse vom SLS-Druck und FDM-Druck vergleichbar. Ein gerader Bruch ist jeweils bei senkrecht zur Schicht belasteten Proben (stehend) erkennbar, wobei der Bruch den gedruckten Schichten folgt. Liegende Proben reißen geometrisch undefiniert.

5.2 Einfluss auf mechanische Eigenschaften

Das Erhöhen der Drucktemperatur führt zu einer Zunahme der Zugfestigkeit. Bild 4 zeigt die Zugfestigkeit über den Temperaturbereich auf. Ebenfalls ist der Einfluss der Füllung zu sehen. Hohle Proben weisen eine höhere Zugfestigkeit auf als teilgefüllte Proben. Im Falle der Zugproben hat die Füllung in Summe, durch die eingebrachten Spannungsspitzen [6, 8], einen negativen Effekt auf die Zugfestigkeit.

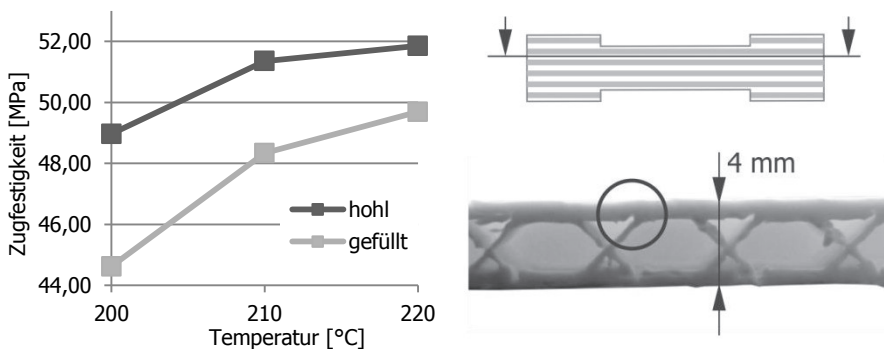


Bild 4: Temperatureinfluss auf die Zugfestigkeit (links) und Probenlängsschnitt (rechts)

Der Längsschnitt einer Probe, Bild 4 rechts, zeigt, dass die Füllung an der Kontaktstelle zur Wand Kerben erzeugt. Eine erhöhte Drucktemperatur und somit Fließfähigkeit verbessert jedoch die Anbindung der Füllung an die

Wand. Indirekt lässt sich dies aus den Zugfestigkeitsverläufen ableiten. Eine Erhöhung der Temperatur steigert die Zugfestigkeit hohler Proben über den Prüfbereich von 20 °C um 5,8 %. Bei teilgefüllten Proben ist eine höhere Zugfestigkeitssteigerung von 11,3 % erkennbar. Da als einziger Unterschied zwischen den Proben die Füllung zu nennen ist, lässt sich schlussfolgern, dass eine verbesserte Anbindung der Füllung an die Außenwand bei höheren Temperaturen vorliegt. Dies reduziert die durch die Füllung hervorgerufenen Kerben und steigert die Zugfestigkeit.

Der Temperatureinfluss auf die Bruchdehnung wird im linken Diagramm in Bild 5 dargestellt. Eine Abweichung von der Standarddrucktemperatur von 210°C führt in allen Fällen zu einer Verringerung der Bruchdehnung. Der durch die Füllung hervorgerufene Unterschied ist auf die Kerbstellen zurückführbar. Teilgefüllte Proben reißen demnach bei geringerer Dehnung als hohle Proben. Bei einer Drucktemperatur von 220 °C sinkt die Bruchdehnung unabhängig von der Füllung. Eine mögliche Erklärung hierfür kann die Zersetzung des Materials sein, die bei hohen Drucktemperaturen auftritt [6].

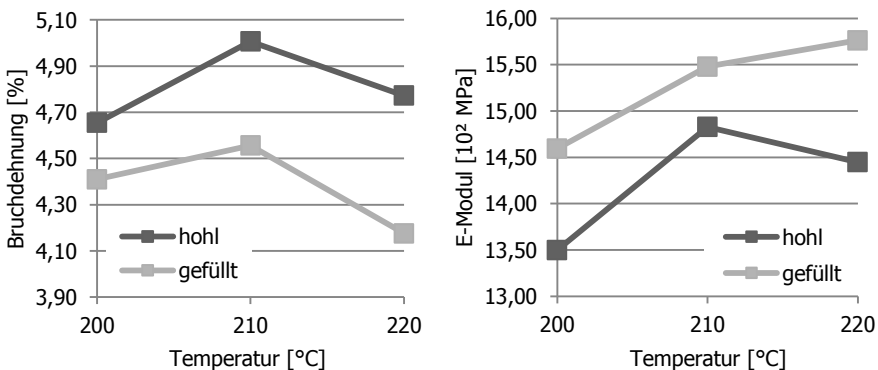


Bild 5: Einfluss der Temperatur und Füllung auf die Bruchdehnung (links) und den E-Modul (rechts)

Bezogen auf den E-Modul, dargestellt in Bild 5 rechts, sind vergleichbare Effekte erkennbar. Teilgefüllte Proben weisen eine höhere Steifigkeit als hohle Proben auf. Mit steigender Temperatur werden wie bei der Zugfestigkeit die Kerbstellen reduziert. E-Modulsteigerungen durch die bessere Anbindung der Füllung an die Wand überwiegen bei teilgefüllten Proben gegenüber der möglichen Materialzersetzung bei hohen Temperaturen. Bei hohlen Proben hingegen kann keine Versteifung durch die Füllung erfolgen und bei einer Drucktemperatur von 220 °C sinkt der E-Modul.

5.3 Einfluss auf die Formfüllung

Neben der Messung quantitativer mechanischer Kennwerte können FDM-gedruckte Proben auch optisch beurteilt werden. Je nach Wahl der Parameter sind Formabweichungen, Oberflächenwelligkeit und Fehlstellen zu verzeichnen. Durch den subjektiven Qualitätseindruck lassen sich auch Rückschlüsse auf mechanische Kennwerte ableiten. Diese qualitative und zerstörungsfreie Beurteilung ist bei fertigen Bauteilen wünschenswert. Hervorzuheben ist die Formfüllung, also die Vermeidung von sichtbaren Fehlstellen. Bild 6 zeigt Probekörper zur Formfüllung, die mit 200 °C und 220 °C bei unterschiedlichen Druckgeschwindigkeiten gedruckt wurden. Die Verringerung von sichtbaren Fehlstellen durch eine Temperaturerhöhung entspricht dem Einfluss der Drucktemperatur auf die innere Füllung und die Zugfestigkeit. Optisch können somit Bauteile untereinander auf potentielle, qualitative Zugfestigkeitsunterschiede untersucht werden.

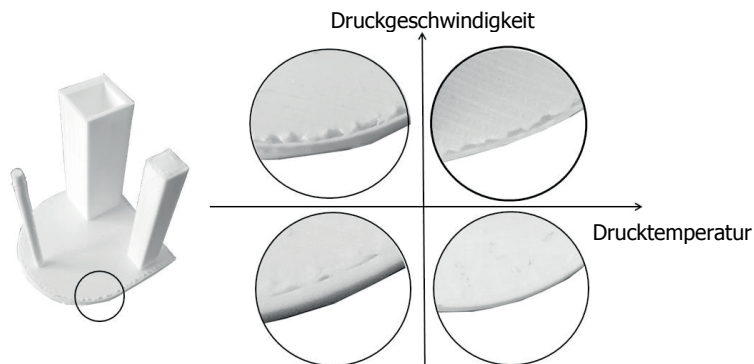


Bild 6: Formfüllung und sichtbare Fehlstellen

Eine Verringerung der Druckgeschwindigkeit führt zu einer weiteren Reduktion von Fehlstellen, wie Bild 6 zeigt. Abweichend von den Standarddruckgeschwindigkeiten (Füllung 80 mm/s, Außenhülle 30 mm/s) liegen die reduzierten Druckgeschwindigkeiten bei 60 mm/s und 20 mm/s, die erhöhte Druckgeschwindigkeit bei 90 mm/s und 80 mm/s. Eine erhöhte Temperatur sowie langsamere Druckgeschwindigkeit ermöglicht der Schmelze Räume zu füllen und großflächigen Kontakt zwischen verschiedenen Filamentbahnen herzustellen. Eine qualitative Zugfestigkeitssteigerung durch die Reduktion der Druckgeschwindigkeit wird durch die optimierten Zugproben validiert.

5.4 Optimierung der Zugproben hinsichtlich der Zugfestigkeit

Optimierungen einzelner Bauteileigenschaften können unter Kenntnis der dargelegten Ergebnisse durchgeführt werden. Bei einer Auslegung von funktionalen Bauteilen sowie der Materialwahl spielt die Zugfestigkeit eine entscheidende Rolle. Im Folgenden wird eine verbesserte Zugfestigkeit unter Beachtung aller Ergebnisse der vorherigen Kapitel angestrebt. Dabei wird der realitätsnahe Fall teilgefüllter Proben betrachtet. Die Drucktemperatur liegt wie in Abschnitt 5.2 und 5.3 ermittelt bei 220 °C. Durch die beeinflussbare Orientierung im Druckraum können kritische Bauteile entlang der Schichten belastet werden. Die Einschränkung ausschließlich liegende Proben zu betrachten, ist somit bei der Optimierung auf die Zugfestigkeit gerechtfertigt. Weiterhin wird eine langsame Druckgeschwindigkeit gewählt, um weitere Fehlstellen zu vermeiden.

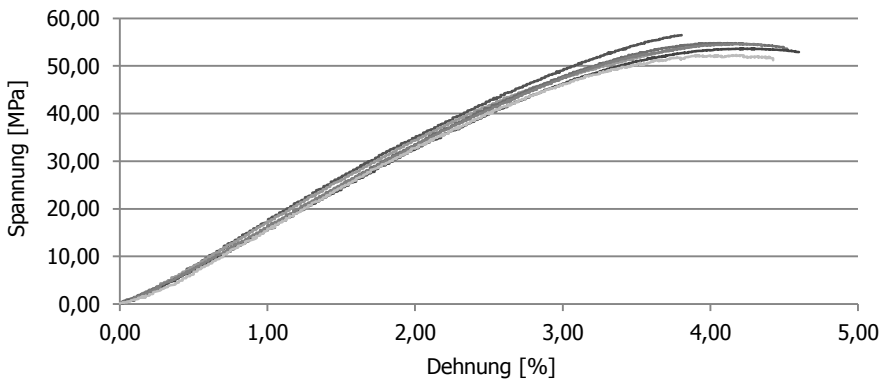


Bild 7: Prüfdiagramm der auf Zugfestigkeit optimierten Proben

Bild 7 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der verbesserten Proben. Neben der Zugfestigkeitssteigerung auf 54,5 MPa sind weitere Effekte sichtbar. Die Probengruppe weist im Vergleich zu allen analysierten Proben die geringste Streuung auf. Diese liegt für den E-Modul bei 2,3% und für die Zugfestigkeit bei 2,6%. Weiterhin sinkt die Streuung der Bruchdehnung auf vergleichsweise niedrige 7,4%. Durch die höhere Drucktemperatur und verringerte Druckgeschwindigkeit werden somit ein homogenerer Druck und eine gesteigerte Reproduzierbarkeit bewirkt. Die mechanischen Kennwerte hängen somit stärker von den Materialwerten und nicht von prozessspezifischen Einstellungen ab. Im Vergleich zu den angegebenen Standardwerten (normale Druckgeschwindigkeit, 210 °C Drucktemperatur) lässt sich die Zugfestigkeit durch Optimierung weniger Prozessparameter um 12,7 % steigern.

6 Fazit

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern des FDM-Verfahrens und den Eigenschaften von gedruckten Bauteilen auf dem Ultimaker² auf. Mit den Erkenntnissen aller ausgewerteten Versuche können künftig die Drucktemperatur, Bauteilfüllung sowie -ausrichtung besser auf die benötigten Anforderungen abgestimmt werden. Eine quantitative Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auch auf andere FDM-Drucker bleibt nach Ebel [10] jedoch weiterhin schwierig. Die Ergebnisse zeigen allerdings Ansätze auf, mit denen die mechanischen Kennwerte, insbesondere die Zugfestigkeit FDM-gedruckter Bauteile erhöht werden kann. Dadurch ist eine Annäherung an den Spritzguss möglich. Die Obergrenze liegt hier nach Tymrak [7] bei 63 MPa. Die verbesserten Zugproben erreichen somit 87 % der Zugfestigkeit spritzgegossener PLA Proben. Eine Optimierung hinsichtlich anderer mechanischer Kennwerte wird hier nicht weiter fokussiert. Je nach Anforderungsprofil ist diese Optimierung jedoch möglich.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Reproduzierbarkeit durch die Optimierung von Druckparametern weiter gesteigert werden kann. Trotz der bestehenden Differenzen in der Bruchdehnung und Zugspannung ist der Verlauf der Proben über große Teile des Zugversuches konsistent. Der objektive Vergleich mit anderen Fertigungsverfahren [2] und die Einbindung des FDM-Drucks bei der Produktion von Kleinserien [1, 4] sind somit verbessert möglich. Für eine vollständige Einbindung sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

7 Ausblick

Erfahrungen mit dem FDM-Druck haben gezeigt, dass das Potenzial optimierter Prozessparameter eines Druckers quantitativ weitgehend unbehandelt ist. Neben der Filamentqualität und der Wahl des Druckers haben auch Umgebungsbedingungen wie Raumtemperatur oder Alter des Filamentes einen Einfluss auf die Druckqualität. Weiterhin liefern die vielfältigen und wachsenden Einstellmöglichkeiten heutiger FDM-Drucker enorme Potenziale im Hinblick auf mechanische Kennwerte, konstruktive Freiheiten und die Beeinflussung der Prozessdauer. Oberflächenbeeinflussung und Formabweichung sind ebenfalls sinnvolle Analyseschritte. Bezogen auf Baugruppen wächst das notwendige Wissen an der Beeinflussung von Passungen und Funktionsflächen. Zukünftige Erweiterungen und Durchführungen sowie eine Standardisierung der beschriebenen Versuche mit unterschiedlichen Materialien, Druckern und Druckparametern liefern eine stetig wachsende Datenbank. Diese Erkenntnisse bieten einen Ansatz, das Potenzial individueller additiver Fertigung stärker

auszuschöpfen. Entwicklungszeiten und Iterationen 3D-gedruckter Bauteile lassen sich dadurch senken und die individuelle Funktionalität verbessern.

Literatur

- [1] Fastermann, P.: „3D-Drucken“, Springer-Verlag, Berlin, 2014
- [2] Gebhardt, A. et al.: „3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)“, Hanser, München, 2013.
- [3] Beyer, C., Kochan, D: „Innovationspotenzial der Generativen Fertigung“, In Feldhusen, J., Grote, K.-H.: „Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung“, S. 48-99, Berlin Heidelberg, Springer Vieweg, 2013
- [4] VDI: „Handlungsfelder – Additive Fertigungsverfahren“, ISBN 978-3-931384-82-1, VDI, 2016
- [5] Caulfield, B., McHugh, P.E., Lohfeld, S.: “Dependences of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process”, Journal of Materials Processing Technologies 182, 2007, S. 477-488
- [6] Wendel, B.: “Prozessuntersuchung des Fused Deposition Modeling“, Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Erlangen, 2009
- [7] Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J.M.: „Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions“, Materials and Design 58, 2014, S. 242-246
- [8] Breuninger, J. et el.: “Generative Fertigung mit Kunststoffen“, Berlin Heidelberg, Springer Vieweg, 2013
- [9] Siebertz, K., van Bebber, D., Hochkirchen, T.: „Statistische Versuchsplanung“, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2010
- [10] Ebel, E., Sinnemann, T.: „Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties“, RTEjournal, 2014

Eine Untersuchung mechanisch gealterter kurzfaserverstärkter Thermoplaste unter hochdynamischen Lasten

Christian Witzgall, Sandro Wartzack

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

Short-fibre reinforced thermoplastics (SFRT) are increasingly being used in 21st century's automotive construction. Besides statically loaded parts, SFRT are also used for safety-relevant components such as door modules and crash absorbers. Temperature, chemically aggressive media as well as mechanical loading lead to aging effects within the plastic, which generally, weakens the material's mechanical properties. Thus, within the present paper, a series of tests is introduced in order to investigate the effect of mechanical aging on the material's crashworthiness behaviour.

Keywords: composite, testing, fatigue, crashworthiness

1 Einführung

Bereits seit Beginn des 21. Jahrhunderts werden kurzfaserverstärkte, thermoplastische Kunststoffe (KVTP) zunehmend im Fahrzeugbau eingesetzt. Neben statisch beanspruchten Teilen wie Frontschürzen werden auch sicherheitsrelevante Bauteile wie Motorträger, Türmodule und Crashabsorber daraus gefertigt. [1, 2] In [3] wird eine Untersuchung der Crashesicherheit von Gebrauchtfahrzeugen vorgestellt. Dazu wurden Gebrauchtfahrzeuge im Fron-

talaufprall unter gleichen Versuchsbedingungen wie vor ihrer Markteinführung (55 km/h Aufprallgeschwindigkeit, 50% Überdeckung) getestet. Beim Modell Toyota Corolla 1.6 Si zeigten sich dabei gegenüber dem Neufahrzeug deutlich gesteigerte Werte für die auf den Fahrer einwirkenden Belastungen. Bild 1 zeigt den Verlauf der resultierenden Kopfbeschleunigung. Sie ist im Altfahrzeug um rund 20% erhöht und überschreitet damit das zulässige Head Injury Criterion. Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, die erhöhten Belastungen seien „auf die Alterung des gesamten Fahrzeugs zurückzuführen“. [3]

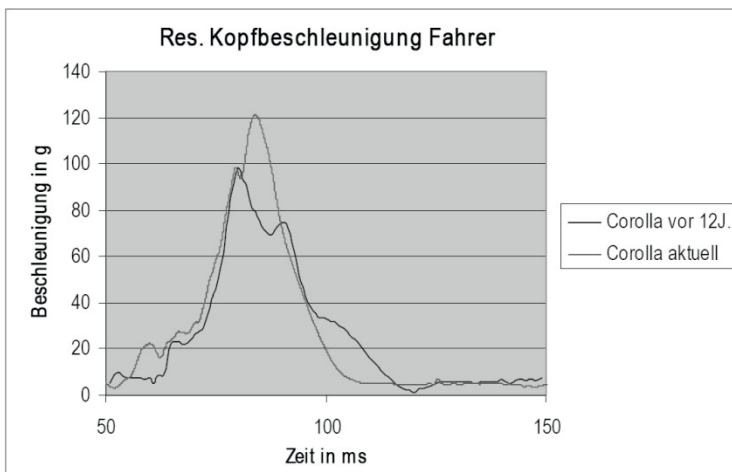


Bild 1: resultierende Kopfbeschleunigung in Alt- und Neufahrzeug [3]

Im Fall von Kunststoffen führen Faktoren wie Temperatur, Medien- oder Strahlungsbelastung, aber auch mechanische Beanspruchungen zu einer Alterung, die im Allgemeinen eine Verschlechterung der mechanischen Materialeigenschaften mit sich bringt [4]. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird die Alterung kurzfaserverstärkter Thermoplaste in Folge mechanischer Beanspruchungen und ihr Einfluss auf das Materialverhalten unter schlagdynamischer Beanspruchung näher untersucht. Es soll gezeigt werden, dass die mechanische Vorschädigung einen deutlichen Einfluss auf die Beanspruchbarkeit des Materials unter hochdynamischen Bedingungen hat.

2 Versuchsbedingungen und –durchführung

Für die nachfolgend beschriebenen Versuche wird ein zu 30 % kurzglasfasergefüllter Polybutylenterephthalat-Blend (PBT) verwendet. Alle Versuche

werden bei Raumtemperatur durchgeführt, alle verwendeten Proben sind gleich alt und wurden unter gleichen Bedingungen gelagert und verarbeitet. Auf diese Weise sollen die Alterungseffekte infolge Temperatur, Strahlung oder Medienbelastung möglichst gering gehalten werden.

Bild 2 zeigt schematisch die Vorgehensschritte dieser Versuchsreihe. Zunächst wurde in quasistatischen Zugversuchen die Festigkeit, Steifigkeit und Bruchdehnung an neuen Proben bestimmt. Anhand der daraus gewonnenen Informationen werden die Lastbedingungen für die Ermittlung der Maximal ertragbaren Schwingspielzahlen festgelegt. Mehrere Proben werden dazu bei $1/3$ bzw. $2/3$ der quasistatisch ermittelten maximalen Spannung zugschwellend bis zum Bruch beansprucht. Dieselben Lastniveaus werden ebenfalls im Rahmen der Vorschädigung verwendet, jedoch liegen die gewählten Schwingspielzahlen deutlich unterhalb der in den Vorversuchen mindestens ertragenen. Aus den zwei Lastniveaus mit unterschiedlich fortgeschrittener Vorschädigung und den ungeschädigten Proben ergeben sich drei Serien, 0, 1 und 2, die in Hochgeschwindigkeitszugversuchen bei $2,0$ m/s miteinander verglichen werden.

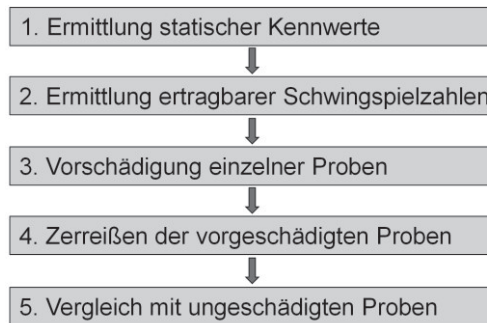


Bild 2: Vorgehensschritte der Versuchsreihe

Für alle Versuche werden wie in Bild 3 dargestellte Probekörper der Stärke $3,5$ mm nach Becker, [5], verwendet, die eine besonders günstige Geometrie für die durchzuführenden Hochgeschwindigkeitszugversuche bieten. Die Probenform zeichnet sich dadurch aus, dass durch die sehr kurz gehaltene Ausgangslänge hohe Dehnraten bereits bei moderaten Geschwindigkeiten erreicht werden und ein möglichst uniaxialer Spannungszustand im parallelen Bereich der Probe entsteht. Zudem bietet sie mit der relativ breiten Oberfläche gute Voraussetzungen für eine zuverlässige und reproduzierbare optische Dehnungsauswertung. [5]

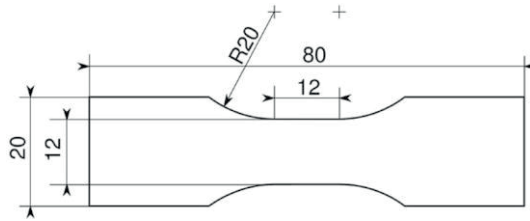


Bild 3: verwendete Probenform nach Becker [5]

Um eine Beeinflussung der ermittelten Ergebnisse durch die Probenform zu vermeiden, wird diese auch für die quasistatisch und zyklisch durchgeführten Versuche herangezogen.

Im Folgenden soll die Durchführung der einzelnen Versuchsschritte beschrieben werden; der Vorstellung der Ergebnisse der hochdynamischen Zugversuche und dem Vergleich geschädigter und ungeschädigter Proben sei ein eigenes Kapitel gewidmet.

2.1 Ermittlung statischer Kennwerte

Zur Charakterisierung des Materials im statischen Fall werden uniaxiale Zugversuche mit einer Zuggeschwindigkeit von 0,001 m/s durchgeführt. Bezogen auf die Länge des parallelen Bereichs im Zugstab ergibt sich daraus eine nominelle Dehnrates von 0,08 s⁻¹, was dem quasistatischen Bereich zuzuordnen ist [6]. Zur besseren statistischen Absicherung werden die durchgeführten Versuche zehnfach wiederholt; die Ergebnisse sind gemittelt und mit Standardabweichung in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: statisch ermittelte Kennwerte des Prüfmaterals

Zugsteifigkeit $E_{0,2\%}$	Maximalspannung σ_{\max}	Bruchdehnung ε_{\max}
10.300 ± 480 MPa	113 ± 3,4 MPa	1,8 ± 0,08 %

Anhand der im Mittel maximal ertragenen Zugspannungen werden zwei Spannungsniveaus festgelegt:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_o}{\sigma_{\max}}; \quad k_1 = 0,33; \quad k_2 = 0,66$$

Diese bestimmen die angelegte Last im Schwingversuch.

2.2 Ermittlung ertragbarer Schwingspielzahlen

In zyklischen Pulserversuchen soll zunächst die maximal ertragbare Schwingspielzahl der Proben auf den jeweiligen Lastniveaus k_1 und k_2 ermittelt werden. Dies geschieht auf einem servohydraulischen Pulser, der mit einer Prüffrequenz von 5 Hz betrieben wird. Eine höhere Prüffrequenz ist aufgrund der ausgeprägten Be- und Entlastungshysterese („innere Reibung“) des Probenmaterials nicht einsetzbar, da der dadurch verursachte Wärmestrom eine zu hohe Temperatursteigerung und damit Aufweichung des Materials bedingt. Alle durchgeführten Versuche werden kraft geregelt und im zugschwellenden Bereich durchgeführt, d.h. es gilt für das Spannungsverhältnis aus Unter- und Oberspannung:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \approx 0$$

Bild 4 zeigt die bis zum Bruch ertragenen Schwingspielzahlen. Sie liegen für das Lastniveau $k_1 = 0,33$ im Bereich $5,5 \dots 7,2 \cdot 10^5$ bzw. für $k_2 = 0,66$ im Bereich $2,1 \dots 3,4 \cdot 10^5$.

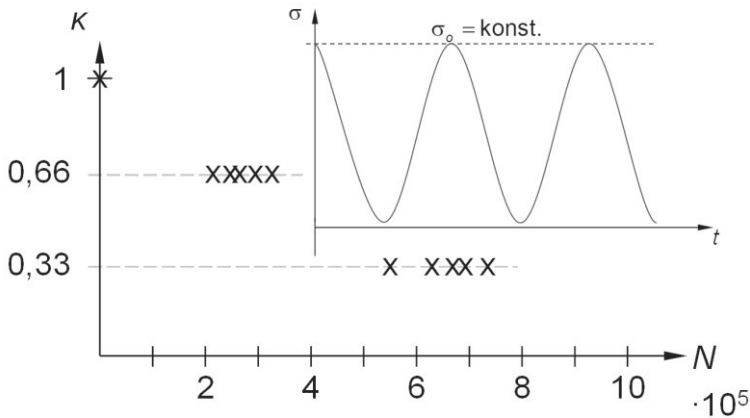


Bild 4: ertragene Schwingenspiele bis zum Bruch

Auf eine Berechnung von Überlebenswahrscheinlichkeiten oder anderen statistischen Auswertungen wird an dieser Stelle aufgrund der geringen zugrundeliegenden Versuchszahl von nur 5 Proben verzichtet. Stattdessen wird die mindestens ertragene Schwingenspielzahl als Bezugsgröße für die folgenden Versuche herangezogen, d.h.:

$$N_1(k_1 = 0,66) = 2,1 \cdot 10^5$$

$$N_2(k_2 = 0,33) = 5,5 \cdot 10^5$$

2.3 Vorschädigung einzelner Proben

Wie bereits bei den zyklischen Charakterisierungsversuchen wird auch zur mechanischen Vorschädigung der Proben ein servohydraulischer Pulser verwendet. Wesentliche Maßgabe ist hierbei jedoch, dass die Proben nicht bereits im zyklischen Versuch bis zum Bruch beansprucht werden. Zudem soll vermieden werden, dass trotz verschieden hoher Lastniveaus eine gleich stark ausgeprägte Vorschädigung der beiden Probenserien erreicht wird.

Zur quantitativen Abschätzung der Vorschädigung wird daher das Prinzip der Schadensakkumulation herangezogen, in diesem Fall das erste und einfachste Verfahren der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner [7], [8]. Es beschreibt ein Schadensmaß D durch Summation der Quoti-

enten aus Teilschwingzahl n_i und ertragbarer Schwingzahl N_i auf jeweils gleichem Lastniveau:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$

Sogenannte Reihenfolgeneffekte der Beanspruchung oder nichtlineares Verhalten – wie es für Faserverbundwerkstoffe nach [9] zu erwarten ist – können durch die lineare Schadensakkumulation nicht beschrieben werden. Im vorliegenden Fall liegt die Zielsetzung jedoch einerseits auf einer einstufigen Beanspruchung und andererseits auf einem Vergleich der beiden Probenreihen, was die Methode nach Palmgren und Miner gestattet.

Die Definition der Probenreihen und ihrer Schadensmaße ist aufgeführt in Tabelle 2. Daraus ergibt sich für die Serie 1 trotz eines höheren Lastniveaus aufgrund der geringeren Teilschwingzahl ein niedrigeres Schadensmaß als bei der geringeren, aber häufiger beanspruchten Serie 2. Die Serie 0 stellt die ungeschädigte Kontrollgruppe dar.

Tabelle 2: Versuchparameter der Probenreihen

Serie	Lastniveau	Teilschwingzahl	ert. Schwingzahl	Schadensmaß
0	keine Vorschädigung			
1	$k_1 = 0,66$	$n_1 = 81.000$	$N_1 = 213.000$	$D_1 \approx 0,40$
2	$k_2 = 0,33$	$n_2 = 324.000$	$N_2 = 550.000$	$D_2 \approx 0,60$

2.4 Zerreißen der vorgeschädigten Proben

Zum endgültigen Zerreißen der drei Probenreihen wird eine servohydraulische Hochgeschwindigkeitsprüfanlage eingesetzt, auf der uniaxiale Zugversuche mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 2,0 m/s durchgeführt werden. Es werden jeweils fünf Proben der Serien 1 und 2 und zehn Proben der Serie 0 geprüft. Alle Versuche werden bei Raumtemperatur und in zufälliger Reihenfolge durchgeführt.

3 Vergleich geschädigter und ungeschädigter Proben im hochdynamischen Zugversuch

In Tabelle 3 sind die ertragenen Spannungen und Dehnungen der jeweiligen Probenserien im Zerreiversuch gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die maximal ertragene Spannung der Proben mit zunehmender Schädigung abnimmt: während die ungeschädigte Serie 0 eine gemittelte Maximalspannung von 119 MPa zeigt, liegt diese in der Serie 1 mit 91 MPa und der Serie 2 mit 84 MPa bereits um 23 bzw. 30 % darunter. Eine vergleichbare Entwicklung kann auch bei der Bruchdehnung beobachtet werden: auch sie nimmt mit fortschreitender mechanischer Alterung ab. Folglich verringert sich die bis zum Bruch absorbierte Energie der Proben ebenfalls; sie wurde durch numerische Integration der aufgezeichneten Kraft-Verschiebungs-Kurven ermittelt.

Tabelle 3: Ertragene Spannungen und Dehnungen der Probenserien

	Serie 0	Serie 1 (D = 0,40)	Serie 2 (D = 0,60)
σ_{max}	119 ± 3,2 MPa	91 ± 5,4 MPa (-23 %)	84 ± 4,1 MPa (-30 %)
ϵ_{max}	1,61 %	1,25 % (-22 %)	0,76 % (-43%)
E_{abs}	855 Nmm	469 Nmm (-55%)	174 Nmm (-79%)

Bild 5 zeigt die ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramme der drei beschriebenen Probenserien. Anhand der Abbildung kann auch das Energieabsorptionsvermögen des Materials eingeschätzt werden; die zum Zerreißen aufgebrauchte Energie entspricht der Fläche unter einer Kraft-Weg-Kurve. Die Verhältnismäßigkeit der Verringerung der Energieabsorption kann jedoch auch im Spannungs-Dehnungs-Diagramm abgelesen werden.

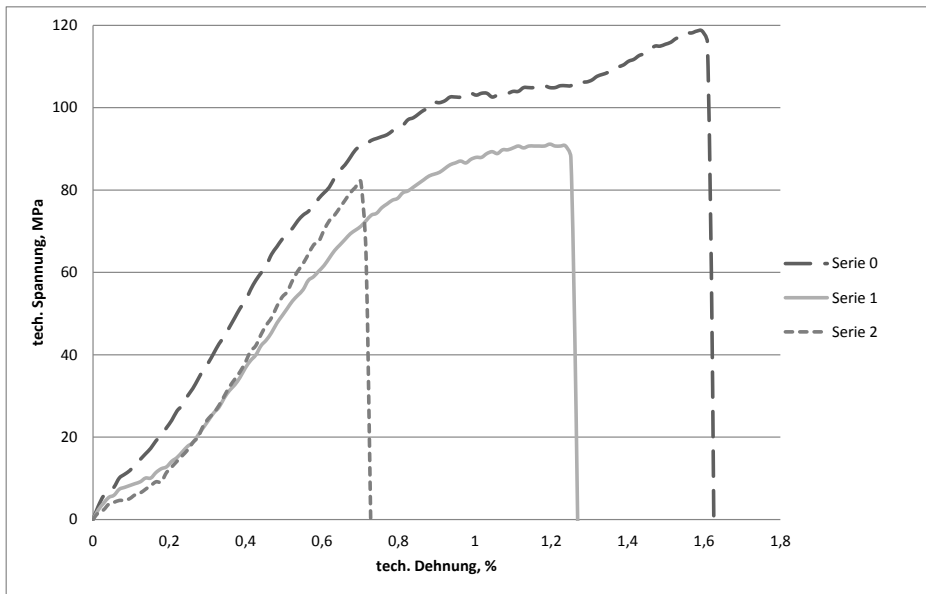


Bild 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramme (gemittelt) der Serien 0, 1, 2

Bild 6 zeigt Mikroskopaufnahmen der Bruchflächen der Proben in 10- bzw. 25-facher Vergrößerung. In der linken Bildhälfte ist die bereits mit bloßem Auge sichtbar zerklüftete Oberfläche des Bruchs einer ungeschädigt zerrissenen Probe dargestellt. Die rechte Bildhälfte zeigt die Bruchfläche einer vorgeschädigten Probe der Serie 2. Auch auf ihr ist die makroskopische Zerklüftung bereits mit bloßem Auge zu erkennen; darüber hinaus zeigen sich unter dem Lichtmikroskop herausstehende, aus der Matrix gezogene Kurzfasern. Die Bruchbilder treten über verschiedene Proben jeweils reproduzierbar auf.

Die anhand der Bruchbilder gemachten Beobachtungen lassen mögliche Rückschlüsse auf die Versagensvorgänge im Material zu. Den Ausführungen von [10] und [11] folgend ist auch hier ein sogenannter Faser-Pullout zu beobachten, der typischerweise für kurzfaserverstärkte Thermoplaste auftritt, nachdem die Verbindung zwischen Faser- und Matrixmaterial abgelöst ist.

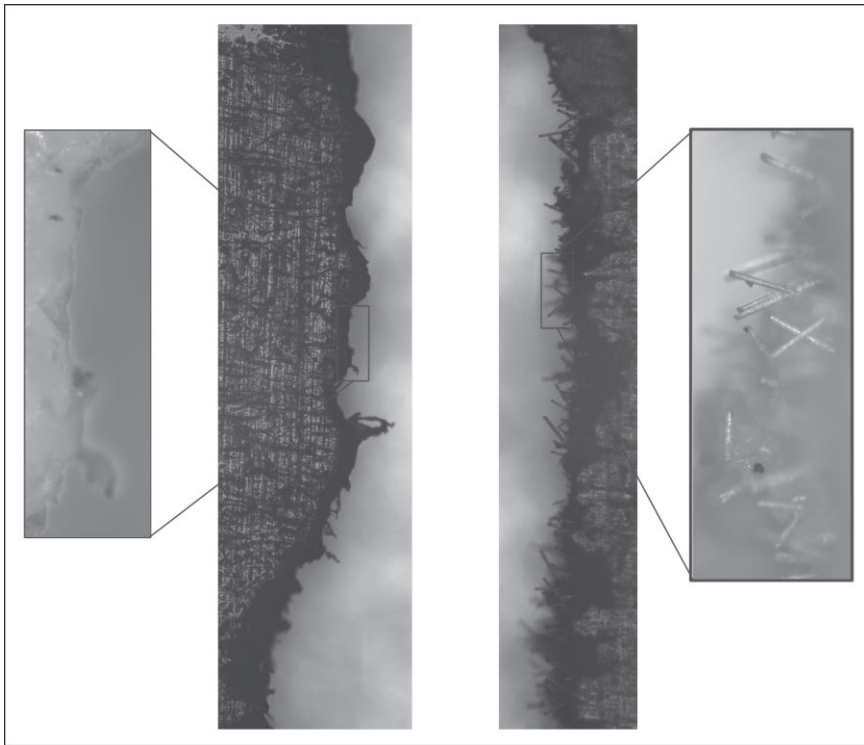


Bild 6: Mikroskopaufnahmen der ungeschädigten (links) und vorgeschädigten (rechts) Proben

4 Zusammenfassung und Ausblick auf weitere Forschungstätigkeiten

Im vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, welchen Einfluss die mechanische Schädigung auf die Festigkeit und das Energieabsorptionsvermögen kurzfaserverstärkter Thermoplaste hat. Dazu wurden Proben zunächst durch zyklische Versuche mechanisch vorgeschädigt und anschließend in hochdynamischen Zugversuchen geprüft. In dieser ersten Untersuchung wurden alle Proben parallel zu ihrer Haupt-Faserorientierung geprüft. Die eingangs beschriebene Hypothese, dass die mechanische Festigkeit mit fortschreitender Schädigung zunehmend abnimmt kann bestätigt werden.

Da die Annahme nahe liegt, dass die Anisotropie des Materials sowohl auf die Dauerfestigkeit wie auch auf die Restfestigkeit nach mechanischer Vorbeanspruchung erheblichen Einfluss nimmt, stellt die Untersuchung verschiedener Faserorientierungen ein wichtiges Ziel für die weiteren, folgenden For-



schungsarbeiten dar. Um dieses Ziel umzusetzen sind zahlreiche weitere zyklische Versuche erforderlich.

Weiterhin wurde im Rahmen der vorgestellten Untersuchung auf die Methode der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner zurückgegriffen. Dies ist in den Grenzen der behandelten einstufigen Beanspruchungshistorie zulässig; für den realitätsnäheren Fall mehrstufiger Lastkollektive wird es jedoch von wesentlicher Bedeutung sein, sowohl ein Verfahren zur Berechnung nichtlinearer Schädigung als auch zur Berücksichtigung von Reihenfolgeneffekten heran zu ziehen. Hierzu wurde in [9] bereits Vorarbeit geleistet, die für das vorliegende Material jedoch ebenfalls durch weitere Experimente überprüft werden muss.

Danksagung

Die Autoren danken der Firma Zwick/Roell in Ulm, namentlich besonders Herrn Johannes Künstler, für die experimentelle Unterstützung im Rahmen dieser Untersuchung.

Literatur

- [1] LANXESS Deutschland GmbH: Ford Focus van features hybrid metal/composite front-end. Reinforced Plastics 45 (2004) 8, S. 4.
- [2] Short, P.; Tullo, A.: Bracing for 'K'. Chemical & engineering news 85 (2007) 28, S. 26.
- [3] Ehrenstein, G.W.; Pongratz, S.: Beständigkeit von Kunststoffen. Hanser Verlag, 2007.
- [4] Kamber, B.: Crashtest gebrauchter Fahrzeuge mit Airbag. Dynamic Test Center Biel, Vauffelin / Biel, 2005.
- [5] Becker, F.: Entwicklung einer Beschreibungsmethodik für das mechanische Verhalten unverstärkter Thermoplaste bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten. Dissertation, Universität Halle-Wittenberg, 2009.
- [6] Schoßig, M.: Bewertung der Schädigungsmechanismen von kurzglasfaserverstärkten Polyolefinen durch simultane Aufzeichnung der Schallemissionen unter quasistatischer und dynamischer Beanspruchung. Dissertation, Universität Halle-Wittenberg, 2010.
- [7] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 68.14, S. 339-341, VDI-Verlag, 1924.
- [8] Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue. Journal of applied mechanics 12.3, S. 159-164, 1945.
- [9] Jollivet, T.; Peyrac, C.; Lefebvre, F.: Damage of composite materials. 5th Fatigue Design Conference, Procedia Engineering, Vol. 66, S. 746-758, Elsevier, 2013.
- [10] Domininghaus, H.: Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2005.
- [11] Eckell, A.: Die Chemie und Physik von Verbundwerkstoffen mit Polymermatrix. Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde in der Kunststofftechnik. S. 27-53, VDI-Verlag, 1982.

Additively Manufactured Components for Structural Applications in Aircraft Interior – Two Case Studies

Jan Oltmann, Ralf Seemann, Johanna Spallek, Dieter Krause

*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
TU Hamburg- Harburg*

Abstract

Conventional manufacturing technologies limit the design of lightweight sandwich cores to homogenous topologies. The paper presents two case studies on the optimization of the structural performance of existing lightweight sandwich structures utilizing the design freedom given by additive manufacturing technologies. Both studies focus on the improvement of the sandwich core. In the first study, a novel adaptive core geometry is developed in order to improve the load introduction into the panel. The second study focuses on the improvement of the damping properties of the sandwich panel, as it is necessary to reduce resonant vibration. The voids in the honeycomb core are used to insert small particles in order to damp the structure.

Keywords: Additive manufacturing, Structural applications, Product development, Honeycomb sandwich structures

1 Introduction

For the construction of cabin interior – such as galleys, partitions or hatracks – sandwich panels are widely used as structural material. For these lightweight structures, the panels serve as planar structural elements assem-

bled to spatial monuments. Sandwich panels provide the opportunity to efficiently design each part of the sandwich construction, i.e. face sheets, core, according to individual requirements [1]. For the use in the passenger cabin, panels have to resist high static and dynamic loads [2]. For these lightweight applications, sandwich panels offer excellent material properties due to their high stiffness-to-weight ratio.

Generally sandwich structures consist of two face sheets bonded adhesively to a core. Commonly the face sheets carry the loading whereas the core can fulfil different functions in addition to the connection of the facesheets, e.g. thermal isolation, acoustic emission etc. For lightweight structures the main requirement for sandwich cores is a low density, which is typically achieved by foam cores or periodic thin walled cellular, porous or lattice structures. Currently these cores are commonly manufactured with conventional processes, thus limiting the topology that can be achieved and restricting cores to a homogenous topology [4]. Restrictions of sandwich construction of many applications are the local introduction of loads and resonant vibrations caused by the very stiff and light structural properties. Here, the sandwich core offers great potential for structural improvements with its possibility to manufacture optimized free form geometries.

Additive manufacturing (AM), as the collective term for layer-by-layer manufacturing technologies, has undergone a high evolution over the last three decades [3]. The various technologies, such as stereolithography, fused deposition modelling, or selective laser melting, can produce parts in a large range of materials, e.g. metals, ceramic materials and polymers [4]. Beside the common use for Rapid Prototyping, the tool-less fabrication is used more often for the production of end-use parts [4]. AM offers new design opportunities at the part level, at the material level and the micro scale, and at the product level [3]. The design freedom at the material level allows designers to receive improved functionality through the creation of adapted porosity, surfaces, and textures, as used for the structural improvement of sandwich structures. The application of additive manufacturing for tailoring sandwich cores is not new. The available literature on this topic can be subdivided in different categories (see Figure 1).

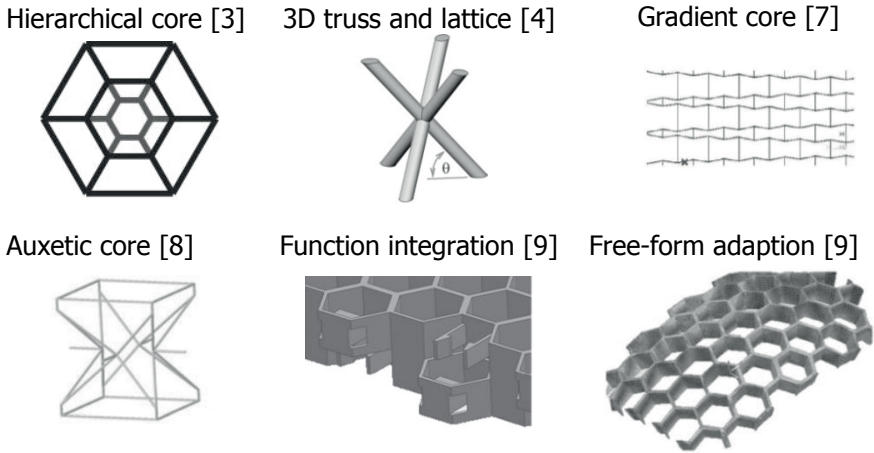


Figure 1: Application of additive manufacturing for tailoring sandwich cores

There are several studies on *hierarchical cellular cores* based on engineered self-similarity, where a regular lattice is densified with smaller cells of the same topology leading to a fractal-like structure. It has been established that these structures achieve greatly improved weight specific stiffness and strength. One example are spiderweb honeycombs which have been studied by Mousanezhada et al. [3]. Another category comprises *3D truss and lattice* structures, which have been proposed to replace state of the art honeycomb cores [4]. Another field is the development of *load dependent and gradient sandwich cores*, where the core is adapted for a specific load distribution [7]. Furthermore, there are multiple studies on the development of *auxetic sandwich cores*. Imbalzano et al. for instance develop an auxetic sandwich core to improve its local impact resistance [8]. Moreover auxetic cores are used to improve damping properties. Other applications include the *adaption to free-form surfaces* and the *integration of functions* in sandwich components [9].

2 Case Studies

In two case studies, it is presented how the structural properties of honeycomb sandwich structures can be improved for aircraft interior through the application of additive manufacturing technologies. In the first case study adaptive sandwich core geometries for improved load introduction are developed and tested. The second study investigates the potential of particle damping in honeycomb sandwich panels. The case studies exemplarily show advantages that enhance the use of additive manufacturing in product development to improve not only product design but also its development process.

2.1 Adaptive sandwich core geometry for improved load introduction

One of the main challenges in sandwich construction is the reinforcement of the core at places of local load introduction for instance at joints [155]. This is generally achieved by locally adding solid material such as adhesive or other plastics post core fabrication (Figure 2).

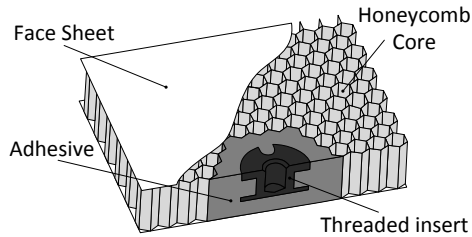


Figure 2: Reinforcement at local load introduction in sandwich panels

This state of the art process is not ideal for different reasons. Firstly, the locally added solid material contributes to considerable mass increase. Secondly, this type of reinforcement leads to a sudden change of stiffness at the boundary of unreinforced core and reinforcement, making this boundary the weak point of the composite. Lastly, it requires additional manufacturing steps. Additive manufacturing provides the design freedom to generate adaptive core geometries with gradually increasing density towards the location of load introduction in only one manufacturing step, while only moderately adding mass. It can therefore tackle all of the mentioned shortcomings. The objective of the first case study is to experimentally demonstrate and quantify the weight specific performance advantage of adaptive core geometries in case of local load introduction.

2.1.1 Definition of scope

Since honeycombs are widely regarded as one of the best performing sandwich core lattices, the present study is dedicated to enhance the performance of honeycomb cores. As load case, the vertical pull-out of threaded inserts in sandwich panels is selected, since it is one of the most studied sandwich joint configurations and it is typically dominated by premature core failure. The implemented adaptive core geometry is inspired by available literature. It is essentially a combination of gradient and hierarchical cellular cores. Nevertheless, the adaptive core geometry of the present study is designed heuristically based on iterative geometry variations. In order to have a reference for performance comparison, a honeycomb core based on the state of the art solid reinforcement is generated. Both derived honeycomb cores

have the same global honeycomb lattice and contain a bore hole in the center which is intended for introducing the load via a screw (Figure 3).

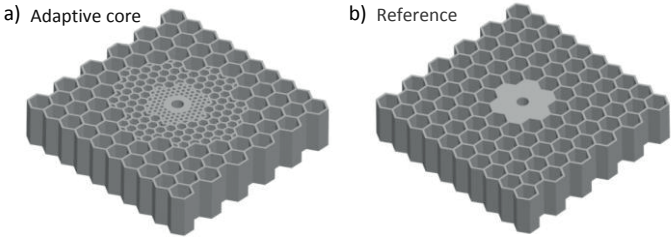


Figure 3: Designed core geometries, a) adaptive core, b) reference core

2.1.2 Experimental study

The two developed honeycomb core designs are fabricated from ABS using a commercial fused deposition modelling 3D-printer (Designjet Color 3D printer; Hewlett-Packard Development Company, Palo Alto, California). The used machine limits the minimum cell wall thickness to 0.9 mm. The core geometries are fabricated in two different heights, 12 mm and 20 mm, in order to draw conclusions on the effect of the core height. The additively manufactured cores are bonded with aluminium face sheets (0.5 mm thickness) using two component adhesive (UHU Endfest 300). Of each configuration, four specimens are prepared leading to 16 specimens in total. All specimens are weighed for subsequent weight specific evaluation. The pull-out strength of the specimens is tested using a fixture, which is based on the suggestions of the Insert Design Handbook [10] (Figure 4a). The tests are performed quasi-statically (5 mm/min) on a universal testing machine (Galdabini Quasar 100) using a 10 kN load cell. The displacement is directly taken from the crosshead displacement of the machine.

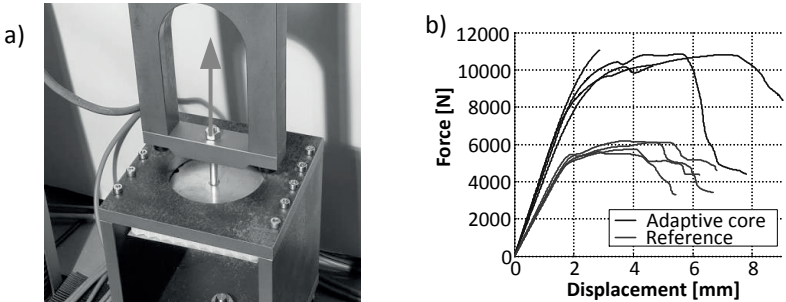


Figure 4: a) Pull-Out test setup, b) Test results for four specimens of 20 mm cores, c) Comparison of weight specific peak force

2.1.3 Results

The test results in terms of force displacement curves are given exemplarily for the 20 mm core in Figure 3b. The curve progression of reference and adaptive core are similar. After initial linear displacement plastic deformation of the core cell walls adjacent to the reinforced center leads to global plasticity of the specimens up until rupture of the face sheets and/or core initiates catastrophic failure. The averaged results in terms of weight specific peak force for all tested configurations is given in Figure 4. In case of the 20 mm core the weight specific peak force can be increased by 66 % while for the 12 mm core an increase of 50 % is evident.

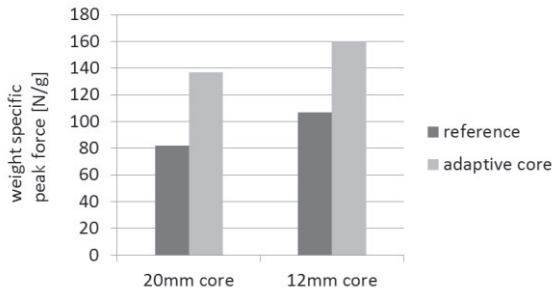


Figure 5: a) Comparison of weight specific peak force

2.2 Augmented damping properties of sandwich structures

As second promising field of AM-enabled structural applications in aircraft interior, the improvement of the damping capacity of sandwich structures is presented. In addition to the static design requirements for aircraft interior structures, dynamic loads act on the aircraft, like the so-called sustained engine imbalance or vibration comfort [2]. Higher damping properties can reduce the dynamic loads acting on the interior structures. In [12] it is shown that damping reduces the interface loads on an aircraft galley by several factors for different loading conditions. The very stiff sandwich panels, however, lack natural damping capacity [11].

2.2.1 Definition of scope

One possibility to increase the damping capacity of these sandwich panels is to incorporate loose particles into the free space of the honeycomb cells. Energy dissipates by collision or friction between the particles itself and with



the cell walls of the core. With AM a freeform design of particle cavities so that particle boxes is possible. The boxes can be inserted into the sandwich panel or glued onto the face sheets. In order to design such particle boxes with free geometry simulation models would help to predict the corresponding dynamic behaviour. But the dynamic behaviour cannot be predicted without experiments, because FE simulations including damping properties require an experimental identification of the structure prior to that. Therefore numerical optimization is only possible to a low degree and trial-and-error experimentation has been very common [11]. At this stage additive manufacturing enables to test many different geometries of particle boxes on honeycomb sandwich panels without much effort. In this study, it is shown how particle damping can improve the damping properties of sandwich panels using new capabilities for the design of particle cavities given by AM. Furthermore, a testing based approach to improve the design of particle damping is investigated.

2.2.2 Experimental study

Particle boxes with varying diameter, shape, and size are additively manufactured and used as representative volume element for particle damping, as shown in Figure 6. The parameters of the particle boxes are chosen with respect to common honeycomb panel design used for aircraft interior.

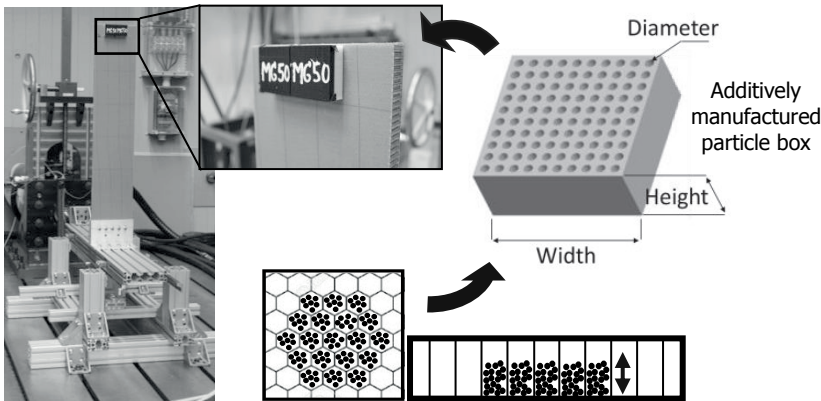


Figure 6: Testing procedure for particle damping of sandwich panels

For the tests, a sandwich panel as used for aircraft interior is excited by a hydraulic shaker with a sine sweep at its base point and the acceleration response is measured (see Figure 6). The excitation is from 5 Hz to 30 Hz with different constant acceleration levels between 0.1 g and 0.5 g. Instant adhesive was used to glue the particle boxes onto the panels. The particle boxes

are manufactured from the same printers as in the previous section. For the testing a Design of Experiments (DOE) is done to reduce the overall amount of tests that have to be performed from 92 to 46. Because of the non-linear behaviour of sandwich damping (see [12]) a quadratic Box-Behnken-Design is chosen [13]. With the particle boxes as depicted in Figure 6 the diameter, width, height and filling ratio are investigated as well as the excitation level.

2.2.3 Results

Firstly, the actual test results are compared to tests with fixed reference masses, the added masses of the particles plus the particle box, in order to analyse the additional damping only due to the loose particles. Taking all tests into account the particle mass varied by 4 - 10% of the raw panels (360 ± 7 g). The damping is calculated with the half-power-bandwidth method. The results are shown in Figure 7.

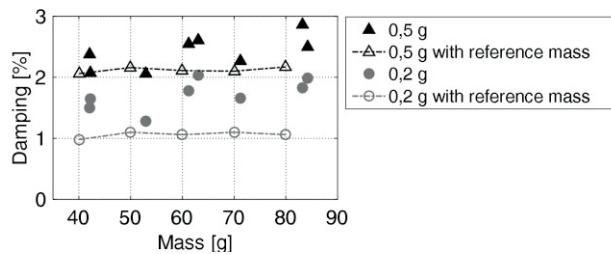


Figure 7: Comparison of test results of an aircraft interior panel with particle damping with reference masses

In all tests, the damping could be increased, since the damping is higher than in the reference tests. Still, it can be seen that for 0.2 g acceleration level the particle damping is very efficient, whereas for 0.5 g the damping is closer to the reference. Other damping effects as interface damping or material damping increase with the acceleration level and minimize the effect of particle damping contributing to the entire system's damping. Calculating the main effects of the test result, according to the DOE and the chosen Box-Behnken test plan, an analysis of single parameter variations is presented. The damping increases with the diameter, width, and the height of the particle box. There is an optimum design for a filling ratio of around 50 %. The excitation level only influences the damping, if it is higher than about 0.35 g. With regard to Figure 7, this means that in this case loss of efficiency of particle damping can be neglected until 0,35 g. Except from the filling ratio in all cases an increase in particle mass is required to improve the damping. To analyse the lightweight design in order to compensate the weight increase by

the particle mass, e.g. reduce the number of face sheets, further studies will be done in the next step.

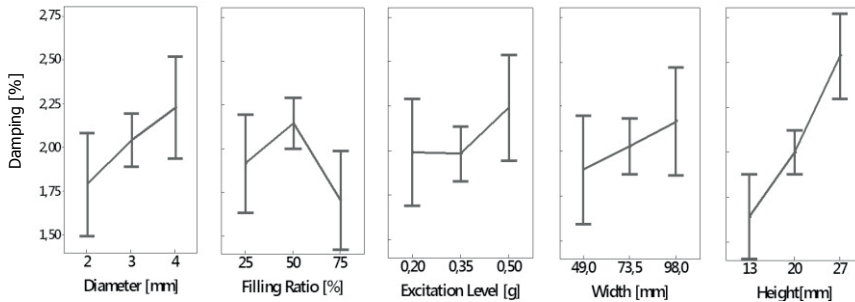


Figure 8: Main effects on the damping and 95% confidence bounds based on a Box-Behnken-DOE

Generally, AM can improve two aspects of particle damping. Firstly, it improves the damping technology by allowing entirely free design of particle cavities. Secondly, the testing process accelerates the process to optimize damping efficiency, because simulation models are only capable to predict the undamped dynamic response in terms of mode shapes and eigenfrequencies. With AM-enabled individual damping measurements, a wide range of tests can be realized.

3 Conclusion

With production techniques like additive manufacturing a high design freedom can be used for the structural applications. The paper presents two case studies optimizing the structural performance of existing lightweight sandwich construction. Improved load introduction into honeycomb sandwich structures are realized by adaptive core geometries. A combination of gradient and hierarchical cellular cores is essential. In a second study particle damping is integrated into the honeycomb core in order to reduce resonant vibrations. Particle boxes, which can be inserted into the sandwich, with varying geometry are studied. Above all, both studies show that the core of sandwich construction allows a structural optimization and benefits from new design possibilities of AM. Benefits for design processes are shown and should be investigated in future research.

Literature

[1] Zenkert D., The handbook of sandwich construction, EMAS Publishing, (1997)

-
- [2] European Aviation Safety Agency, CS25, (2012)
- [3] M.K. Thompson, et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. CIRP Annals - Manufacturing Technology (2016)
- [4] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker: Additive Manufacturing Technologies – 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. New York: Springer New York; (2015)
- [5] D. Mousanezhad, H. Ebrahimi, B. Haghpanah, R. Ghosh, A. Ajdari, A.M.S. Hamouda, A. Vaziri: Spiderweb honeycombs. In: International Journal of Solids and Structures 66 (2015), S. 218–227
- [6] I. Ullah, J. Elambasseril, M. Brandt, S. Feih, Performance of bio-inspired Kagome truss core structures under compression and shear loading. In: Composite Structures 118 (2014), S. 294–302
- [7] Y. Hou, Y.H. Tai, C. Lira, d, F. Scarpa, J.R. Yates, B. Gu, The bending and failure of sandwich structures with auxetic gradient cellular cores. In: Composites Part A 49 (2013), S. 119–131
- [8] G. Imbalzano, P. Tran, T. D Ngo, P. VS Lee, Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance, In: Journal of Sandwich Structures and Materials (2015)
- [9] F. Riss; J. Schilp; G. Reinhart: Load-dependent Optimization of Honeycombs for Sandwich Components – New Possibilities by Using Additive Layer Manufacturing, In: Physics Procedia 56 (2014), S. 327–335
- [10] Insert Design Handbook, ECSS-E-30-06 Draft 3, European Cooperation for Space Standardization , (2005)
- [11] Michon, G.; Almajid, A.; Aridon, G.: Soft hollow particle damping identification in honeycomb structures, In: Journal of Sound and Vibration, (2013), 332, S. 536–544
- [12] Seemann, R.; Plaumann, B.; Oltmann, J.; Krause, D.: FE-Modelling Guidelines for the Dimensioning of Aircraft Cabin Interior Under Stationary Dynamic Loads, ICAS, St. Petersburg, (2014)
- [13] Kleppmann, W.: „Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren“. Hanser, München, (2016)

Konzept zur hochdynamischen Kraftregelung mit nachgiebigen Mechanismen

Kristian Mauser, Sandro Wartzack, Alexander Hasse

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

The traditional approach to robotics includes a stiff serial-kinematic structure. Although this solution is efficient for position control tasks, such a concept is problematic for force control. The performance of control strategies is limited amongst others by the proper inertia which sets strong boundaries to control. Here, we propose an attractive concept for the realization of force control by means of an elastic interface based on variable-stiffness compliant-mechanism. Interposition of our elastic interface between the robot free-end and end effector 'decouples' the entire robot inertia from the end effector. Furthermore, the proposed system provides a frictionless operation and offers adaptive compliance, which allows for a high range of bandwidth.

Keywords: Series elastic actuation, compliant mechanism, highly dynamic force control, variable stiffness actuator

1 Einleitung und Stand der Technik

Industriell eingesetzte Roboter und Verfahreinheiten sind heute so ausgelegt, dass sie bestimmte Positionen in ihrem Arbeitsraum hochdynamisch und präzise anfahren können. Durch konsequenten "Steifbau" wird auch unter angreifenden Lasten eine bestimmte Positionsgenauigkeit gewährleistet. In

technischen Systemen gibt es aber nicht nur Positionieraufgaben, sondern auch Aufgaben, bei denen eine bestimmte Kraft kontrolliert und hochdynamisch in einem Arbeitspunkt aufgebracht werden muss. Als Beispiele können automatisierte Kontaktaufgaben wie Fräs-, Schleif-, Polier- und Montageprozesse genannt werden. Um diese Aufgaben zu bewältigen besteht der verbreitetste Ansatz darin, die klassischen Roboter und Verfahreinheiten mit steifen Kraftsensoren zu kombinieren. Allerdings weist bei diesem Ansatz das Gesamtsystem eine hohe mechanische Impedanz, d.h. eine hohe mechanische Steifigkeit [1], auf. Folglich können bereits kleine Abweichungen von Ist- und Sollposition zu großen Kräften zwischen Roboter und dem zu manipulierenden Werkstück führen [2]. Solche Positionsabweichungen treten infolge von dynamischen Effekten des Robotersystems, z.B. Massenträgheit, beim dynamischen Kontaktieren von Oberflächen unweigerlich auf. Die infolge der hohen mechanischen Impedanz entstehenden Kräfte können dann nicht rechtzeitig ausgeglichen werden, da der Reglerverstärker innerhalb der Kraftregelung unendlich groß sein müsste (vgl. Kapitel 1.1). Die resultierenden Kraftspitzen können dem Roboter, dem Werkstück oder der Umgebung erheblichen Schaden zufügen. Als Folge werden klassische kraftgeregelter Roboter nur bei Anwendungen mit geringer Dynamik eingesetzt [3]. Der derzeitige Trend geht dahin, die mechanische Impedanz des Roboters zu reduzieren. Hierfür wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, zwischen der Lastseite und dem Antriebsstrang ein elastisches Element montiert. Ein solcher Aufbau wird als *seriell elastischer Aktor* (SEA) bezeichnet und im folgenden Kapitel näher erläutert.

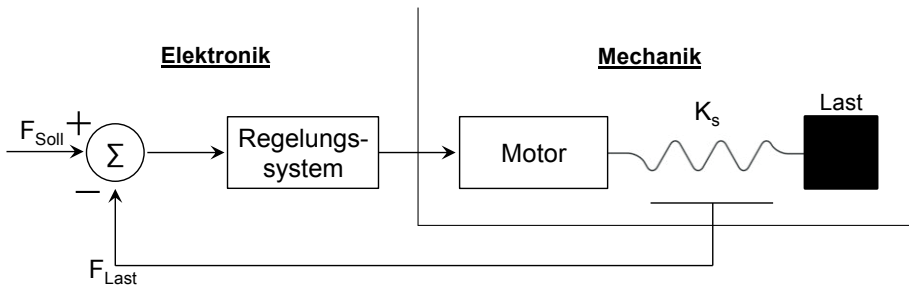


Abbildung 1 Schematischer Aufbau eines seriell elastischen Aktors [4]

1.1 Seriell elastische Aktoren

Vor der Einführung der seriell elastischen Aktoren von Pratt [5] stellte die Nachgiebigkeit immer einen störenden Faktor innerhalb eines Systems dar [6], da eine positionstreuere Lageregelung erschwert wird. Für kraftgeregelter Aufgaben bietet die Nachgiebigkeit jedoch entscheidende Vorteile. Im Folgen-

den wird anhand eines von Grün [7] aufgestellten Beispiels die Bedeutung des nachgiebigen Elements für die Kraftregelung aufgezeigt.

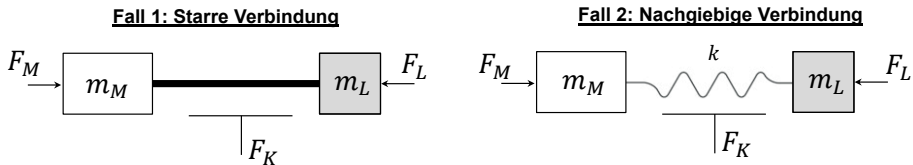


Abbildung 2 Beispiel: Schematische Darstellung einer starren (links) und einer nachgiebigen (rechts) Verbindung [7]

Betrachtet wird ein elektrischer Linearmotor mit der Masse m_M . Dieser Motor wird entweder direkt (Fall 1) oder über eine Feder, die einen translatorischen Freiheitsgrad besitzt, (Fall 2) mit einer Masse m_L gekoppelt (vgl. Abbildung 2). Zusätzlich wirkt an der Motorseite die Antriebskraft F_M auf die Motormasse und an der Lastseite die Kraft F_L . Übertragen bedeutet dies für Fall 1, dass die Koppelkraft F_K mit einem unendlich steifen Sensor gemessen wird. Die Koppelkraft stellt die Regelgröße dar und kann wie folgt geschrieben werden

$$F_K(s) = \underbrace{\frac{m_L}{m_L+m_M}}_{Z_{F\u00fch\r{r}}(s)} F_M(s) + \underbrace{\frac{m_M}{m_L+m_M}}_{Z_{St\u00f6r}(s)} F_L(s). \quad (1)$$

Der erste Term auf der rechten Seite stellt das Führungsverhalten, also dem Verhalten bei dem nur die Antriebskraft wirkt, dar. Der Bruch wird entsprechend als Führungsübertragungsfunktion $Z_{F\u00fch\r{r}}(s)$ bezeichnet. Der zweite Term auf der rechten Seite charakterisiert das St\u00f6rverhalten, welches bei einer Antriebskraft von $F_M=0$ unter dem alleinigen Einwirken von externen Kr\u00e4ften vorliegt. Der Bruch wird entsprechend als St\u00f6r\u00fcbertragungsfunktion $Z_{St\u00f6r}(s)$ bezeichnet [8]. Mit einem beliebigen Regler $R(s)$ kann der Regelkreis geschlossen werden

$$F_M(s) = -R(s)F_K(s). \quad (2)$$

Mithilfe von Gleichung (2) kann die St\u00f6r\u00fcbertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises wie folgt geschrieben werden

$$Z_{Stör}(s) = \frac{F_K(s)}{F_L(s)} = \frac{m_M}{m_L + m_M + R(s)m_L}. \quad (3)$$

Damit beim Kontaktieren einer Oberfläche keine Kraftspitzen auftreten, muss ein Durchgriff der Störübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises verhindert werden. Das bedeutet, dass eine direkte und unverzögerte Wirkung der Last auf die Koppelkraft verhindert werden muss

$$\lim_{s \rightarrow \infty} Z_{Stör}(s) \stackrel{!}{=} 0. \quad (4)$$

Ein Regler $R(s)$, der eine endliche Reglerverstärkung besitzt, kann diese Bedingung nicht erfüllen. Da die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises einen Durchgriff, unabhängig vom gewählten Regler, aufweist baut sich infolge von externen Lasten F_L sofort eine Widerstandskraft F_K auf die beim Kontaktieren der Oberfläche zu hohen Kraftspitzen führt.

Bei seriell elastischen Aktoren wird ein elastisches Federelement mit einer Federsteifigkeit k zwischen der Lastseite und dem Aktor montiert. Die Koppelkraft ergibt sich zu

$$F_K(s) = \underbrace{\frac{m_L}{\frac{m_L m_M}{k} + m_L + m_M}}_{Z_{Führ}(s)} F_M(s) + \underbrace{\frac{m_M}{\frac{m_L m_M}{k} + m_L + m_M}}_{Z_{Stör}(s)} F_L(s) \quad (5)$$

Die entsprechende Störübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises ist definiert durch:

$$Z_{Stör}(s) = \frac{F_K(s)}{F_L(s)} = \frac{m_M}{\frac{m_L m_M}{k} s^2 + m_L + m_M + R(s)m_L} \quad (6)$$

Infolge der endlichen Steifigkeit k kann die Bedingung (4) mit einem Regler erfüllt werden. Ein Durchgriff der Störübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises kann bei seriell elastischen Aktoren vermieden werden. [7]

Zusätzlich weisen SEAs durch ihre inhärente Nachgiebigkeit eine hohe Schocktoleranz und ein passives Deformationsverhalten gegenüber externen Kräften auf. Gerade für Mensch-Maschine-Interaktionen bietet diese Passivität entscheidende Sicherheitsvorteile, weshalb SEAs Bestens für den Einsatz in der Prothetik oder in der direkten Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter geeignet sind.

Neben den genannten Vorteil weisen SEAs auch einige Nachteile auf. Bestehende Systeme nutzen konventionelle Mechanismen, wie beispielsweise Bolzengelenke oder Linearlager, als Führung des meist eindimensionalen Federelements. Durch das Gleiten und Rollen von Elementen ist die Bewegung mit Reibung, Spiel und Stick-Slip-Effekten behaftet. Durch experimentell bestimmte Werte versuchen bestehende kraftgeregelte Systeme die genannten Effekte zu kompensieren. Jedoch sind die Effekte nichtlinear und ändern sich über die Betriebszeit, beispielsweise durch Verschleiß, und wirken sich somit negativ auf das Regelverhalten aus. Ein weiterer Nachteil von SEAs ist, dass sie unterhalb ihrer natürlichen Eigenfrequenz betrieben werden müssen, wodurch sich die Einsatzbandbreite stark reduziert. Zusätzlich begrenzen, endliche Federwege die möglichen ausgeübten Betriebskräfte.

Um die benannten Nachteile zu reduzieren oder zu beheben verfolgt der in dieser Veröffentlichung vorgestellte Ansatz den Ersatz der konventionellen Mechanismen durch nachgiebige Mechanismen. Aufgrund ihres Funktionsprinzips - Bewegung wird aus der elastischen Deformation des Materials produziert und nicht über das Rollen oder Gleiten von Starrkörpern - ermöglichen nachgiebige Mechanismen einen reibungs- und spielfreien Betrieb eines seriell elastischen Aktors ohne das Auftreten von Stick-Slip-Effekten. Die limitierte Bandbreite bestehender seriell elastischer Aktoren soll mit Hilfe von adaptiver Steifigkeit erweitert werden. Dabei wird die Steifigkeit des nachgiebigen Mechanismus durch Formadaption verändert und an die jeweiligen Betriebsbedingungen angepasst. Im Folgenden wird kurz auf den Stand der Technik von nachgiebigen Mechanismen mit selektiver Nachgiebigkeit und Aktoren mit adaptiver Steifigkeit eingegangen.

1.2 Nachgiebige Mechanismen mit selektiver Nachgiebigkeit

Nachgiebige Mechanismen können entsprechend ihres Designs in verschiedene Arten unterteilt werden. Die klassischste Variante sind die nachgiebigen Mechanismen mit konzentrierter Nachgiebigkeit. Deren Design wird von konventionellen Mechanismen abgeleitet, indem die klassischen Gelenke durch sogenannte Kerbgelenk, d.h. Regionen mit reduzierter Biegesteifigkeit, ersetzt werden. Diese Art der nachgiebigen Mechanismen weist den Vorteil

auf, dass sie sich kinematisch ähnlich zu klassischen Mechanismen verhalten - d.h. die möglichen Bewegungen des Mechanismus sind kinematisch auf bestimmte Freiheitsgrade beschränkt. Wesentlicher Nachteil sind die lokal auftretenden hohen Beanspruchungen des Materials bei größeren Bewegungen. Um diesen Nachteil zu kompensieren, nutzt man teilweise nachgiebige Mechanismen mit verteilter Nachgiebigkeit. Bei denen ist die zur Bewegung notwendige Materialdeformation über weite Bereiche der Struktur verteilt. Allerdings ist deren Bewegung kinematisch weniger eingeschränkt, d.h. auftretende Störkräfte können zu ungewünschten Bewegungen des Mechanismus führen. Insbesondere wenn man eine geführte Bewegung wie bei den SEAs erreichen möchte, ist dies nachteilig. Eine dritte Art des nachgiebigen Mechanismus sind jene mit selektiver Nachgiebigkeit. Diese verbinden durch ein geschicktes Design von interagierenden Biegeelementen große mögliche Bewegungen mit einer kinematisch definierten Bewegung. Sie sind deshalb für den Einsatz in SEA prädestiniert. Ein etabliertes nachgiebiges Rotationsgelenk mit selektiver Nachgiebigkeit ist das in Abbildung 3 dargestellte Wagenradgelenk.

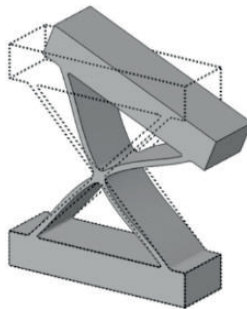


Abbildung 3 Wagenradgelenk [11]

1.3 Aktoren mit variabler Steifigkeit

Bei klassischen Konzepten für die variable Steifigkeit wird die Anpassung der Steifigkeit unter anderem durch das Vorspannen von nichtlinearen Schraubenfedern, durch Veränderung der aktiven Federlänge oder durch Adaption des Federangriffspunkts realisiert. Für diese Systeme werden häufig zusätzliche Aktoren und konventionelle Mechanismen für die Führung der Federelemente benötigt. Systemgewicht, -reibung und -spiel werden dadurch negativ beeinflusst. In den letzten Jahren sind zudem einige Materialsysteme vorgestellt worden, die eine variable Steifigkeit ermöglichen. Beispiele für dafür sind unter anderem elektrorheologische Flüssigkeit oder Formgedächtnislegierung. Der sinnvolle Einsatz dieser Materialien für SEA mit adaptiver



Steifigkeit ist derzeit jedoch nicht möglich, da die Operationsgeschwindigkeiten sehr niedrig sind und Antwortzeiten im Bereich von zehn Sekunden oder mehr liegen [9]. Für hochdynamische Systeme sind diese Materialien daher ungeeignet. Eine detaillierte Übersicht über nachgiebige Aktoren mit variabler Steifigkeit wird in [9] und [10] gegeben.

2 Konzept zur hochdynamischen Kraftregelung mit nachgiebigen Mechanismen

Unser genereller Ansatz besteht darin, durch Integration von nachgiebigen Mechanismen mit selektiver Nachgiebigkeit einen reibungs- und spielfreien seriell elastischen Aktor für hochdynamische kraftgeregelter Prozesse zu realisieren. Zusätzlich soll die Steifigkeit des nachgiebigen Mechanismus durch eine Formadaption von Strukturelementen aktiv beeinflusst werden, so dass eine möglichst große Bandbreite des SEAs erreicht werden kann. Im Folgenden wird anhand eines Beispiels die Umsetzung des Konzepts vorgestellt. Neben einem exemplarischen Mechanismusdesign wird die Realisierung der adaptiven Steifigkeit dargestellt. Abschließend wird ein Prüfstandskonzept vorgestellt, welches eine Beurteilung des dynamischen Verhaltens des kraftgeregelter SEAs ermöglicht.

2.1 Mechanismus Design

Das elastische Element des hier vorgestellten reibungsfreien seriell elastischen Aktors wird beispielhaft durch ein Parallelgelenk – einen nachgiebigen Mechanismus mit selektiver Steifigkeit – realisiert (siehe Abbildung 4). Die Verformung des Parallelgelenks ist auf einen translatorischen Freiheitsgrad beschränkt und wird durch die Deformation von vier parallelen Biegebalken realisiert. Bei diesem Mechanismus steht der Kraft- und Verformungsvektor parallel und in einem analytisch beschreibbaren Verhältnis zueinander. Infolgedessen kann aus der gemessenen Deformation die entsprechende Federkraft in Echtzeit berechnet werden und ist somit für hochdynamische Regelprozesse geeignet. Innerhalb des folgenden Kapitels wird ein strukturintegriertes und reibungsfreies Konzept vorgestellt, welches eine Adaption der Steifigkeit des vorgestellten Parallelgelenks ermöglicht.

2.2 Variable Steifigkeit durch Formänderung

Unser neuartiges Konzept besteht darin, durch Formadaption die Steifigkeit des nachgiebigen Mechanismus mit selektiver Nachgiebigkeit zu variieren. Das Konzept wird in Abbildung 4 verdeutlicht. Die vier Biegebalken des Parallelgelenks sind in hellgrauer Farbe dargestellt. In dunkelgrauer Farbe sind die

flächig applizierten Piezoaktoren abgebildet, die infolge einer durch elektrische Spannung induzierten Dehnung in y -Richtung eine Querschnittsveränderung in der xy -Ebene der hellgrauen Biegebalken hervorrufen. In Abbildung 5 ist der Querschnitt der Biegebalken dargestellt. Auf der linken Seite ist ein Biegebalken in Ruhelage abgebildet, wohingegen auf der rechten Seite die Verformung des Balkens durch die Piezoaktoren dargestellt wird. Diese Verformung führt zu einer signifikanten Steigerung des Flächenträgheitsmoments der Biegebalken, wodurch sich wiederum die Steifigkeit des Parallelgelenks in Bewegungsrichtung aktiv einstellen lässt.

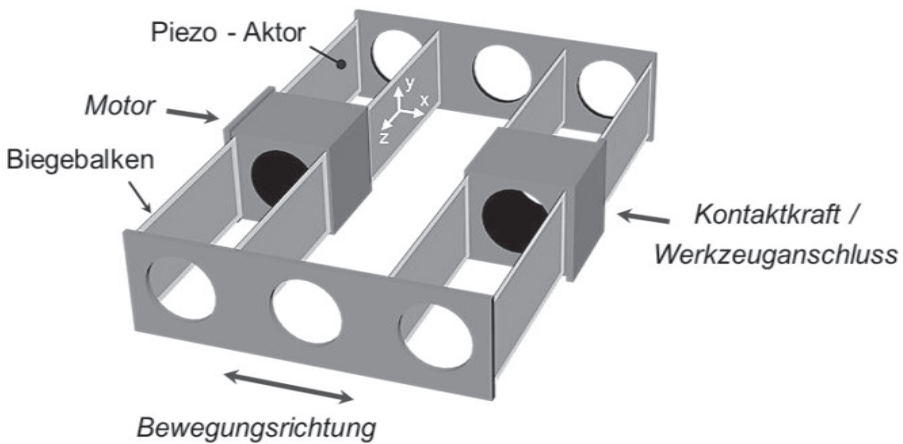


Abbildung 4 Parallelgelenk mit flächigen Piezoaktoren

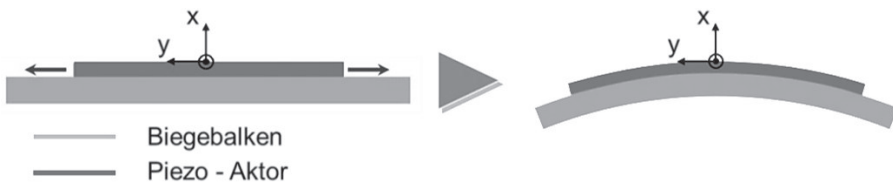


Abbildung 5 Erhöhung des Flächenträgheitsmoments durch Formänderung

2.3 Prüfeinrichtung

Der Prüfstand wird zwei voneinander unabhängige Regelkreise umfassen. Zum einen wird ein positionsgeregelter Linearmotor mit einem vorgegebenen Bewegungsprofil, beispielsweise einer Sinus-Funktion, angesteuert (vgl. Abbildung 6 linke Seite). Zum anderen soll ein kraftgeregelter seriell elastischer

Aktor (vgl. Abbildung 6 rechte Seite) den positionsgeregelten Linearmotor kontaktieren und anschließend, unter Vorgabe einer konstanten Kontaktkraft, dessen Bewegung verfolgen. Der seriell elastische Aktor setzt sich aus dem in Kapitel 2 vorgestellten Federmodul mit adaptiver Steifigkeit und einem Linearmotor zusammen. Folgende Abbildung stellt den prinzipiellen Aufbau des Prüfstands dar.

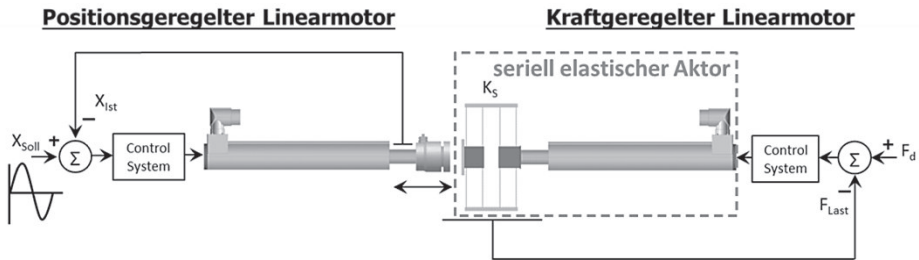


Abbildung 6 Prinzipskizze des Prüfstands

Neben den zwei bereits genannten Linearmotoren und dem nachgiebigen Mechanismus werden noch Steuerungskomponenten und Sensoren benötigt. Grundsätzlich muss die Kontaktkraft innerhalb des SEAs bestimmt werden, damit ein realer Industrieanwendungsfall, wie beispielsweise das Kontaktieren einer Bauteiloberfläche, nachgebildet werden kann. Die Kontaktkraft kann direkt oder indirekt bestimmt werden. Die direkte Messung kann mit Hilfe eines Kraftsensors, beispielsweise einer Kraftmessdose, durchgeführt werden, die zwischen dem Läufer und dem nachgiebigen Mechanismus des SEAs implementiert wird. Der Nachteil dieser Messmethode ist, dass die Masse der Kraftmessdose in diesem Aufbau Teil der bewegten Masse des Gesamtsystems ist und somit die Dynamik des kraftgeregelt seriell elastischen Aktors beeinträchtigt. Auf Grund dessen, wird im Rahmen des angestrebten Prüfstands eine indirekte Messung der Kraft bevorzugt. Hierfür wird ein Sensor eingesetzt, der die Längenänderung des nachgiebigen Mechanismus bestimmt. Mit diesem Messergebnis kann die resultierende Kontaktkraft über die bekannte Steifigkeit des nachgiebigen Mechanismus errechnet werden. Solche Wegsensoren haben ein relativ geringes Gewicht und beeinträchtigen somit die Dynamik nur geringfügig. Im Rahmen des Prüfstands soll außerdem eine Kraftmessdose an dem Läufer des positionsgeregelten Aktors montiert werden und als Referenzmessung der indirekten Messmethode dienen.

3 Zusammenfassung und zukünftige wissenschaftliche und technische Herausforderungen

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird ein neuer innovativer Ansatz eines SEAs mit adaptiver Steifigkeit vorgestellt. Im Gegensatz zu bestehenden Systemen, wird durch den Einsatz von nachgiebigen Mechanismen mit selektiver Nachgiebigkeit und einer Steifigkeitsänderung durch Formadaption ein reibungsfreier Betrieb ermöglicht. Dieser strukturintegrierte Ansatz stellt auf Grund der fehlenden Systemreibung in Kombination mit einer niedrigen mechanischen Impedanz eine sehr vielversprechende Lösung für kraftgeregelte Systeme dar. Anhand eines Parallelgelenks mit flächig applizierten Piezoaktoren wird der vorgestellte generelle Ansatz anhand eines Beispiels verdeutlicht. Im Folgenden werden die technischen und wissenschaftlichen Herausforderungen des vorgestellten generellen Ansatzes aufgezeigt.

Das Mechanismusdesign stellt eine wesentliche Herausforderung des Ansatzes dar. Bestehende SEAs betrachten in den meisten Fällen nur Systeme mit einem translatorischen oder einem rotatorischen Freiheitsgrad. Für viele Robotersysteme oder Verfahreinheiten werden Systeme mit mehreren Freiheitsgraden benötigt. Solche Systeme können zum einen durch eine serielle Hintereinanderschaltung von bestehenden Ein-Freiheitsgrad-Systemen, beispielsweise dem oben genannten Parallelgelenk, realisiert werden. Zum anderen kann ein integriertes Design durch Methoden der Strukturoptimierung erstellt werden. Eine weitere Herausforderung an das Mechanismusdesign ist durch die Formadaption für die Steifigkeitsänderung gegeben. Für automatisierte Kontaktaufgaben, insbesondere für den Erstkontakt, wäre eine sehr niedrige Steifigkeit wünschenswert. Im optimalen Fall würde das Federmodul eine Null-Steifigkeit für den Erstkontakt aufweisen. Die geeignete Formadaption kann zum einen, wie in dem hier vorgestellten Parallelgelenk-Beispiel, durch eine geschickte Wahl des Aktorangriffspunkts in Verbindung mit einem geeigneten Mechanismus-Design realisiert werden. Zum anderen können zur Erstellung eines geeigneten Designs ebenfalls die Methoden der Strukturoptimierung genutzt werden. Neben den genannten Herausforderungen an das Mechanismusdesign ist die konstruktive Umsetzung von entscheidender Bedeutung. Die Schwierigkeit besteht darin, die gewünschte Formänderung nicht durch den konstruktiven Aufbau, beispielsweise durch Einspannstellen, zu behindern. Zusätzlich zu dem Mechanismus-Design trägt die Wahl des Aktortyps entscheidend zu der realisierbaren Formänderung bei. Bei der Wahl des Aktortyps ist zu beachten, dass die Aktoren zum einen reibungsfrei agieren und zum anderen eine schnelle Reaktionszeit aufweisen müssen, damit die gewünschte Federsteifigkeit ohne Verzögerung eingestellt werden kann. In der hier vorgestellten, beispielhaften Umsetzung des Ansatzes, vgl. Kapi-

tel 2.2, kommen piezoelektrische Aktoren zum Einsatz, wobei beispielsweise pneumatische Muskeln oder elektroaktive Polymere die Aktoranforderungen ebenso erfüllen könnten. Eine weitere Herausforderung im dynamischen Betrieb von SEAs stellen mechanische Schwingungen dar. Ein geeignetes Konzept zur reibungsfreien Schwingungsdämpfung ist zu erarbeiten und in das Federelement zu integrieren. Neben den genannten Herausforderungen müssen eine geeignete Systemintegration und ein reaktionsschnelles Regelungskonzept realisiert werden. Zusätzlich soll, unter Berücksichtigung der genannten Herausforderungen, eine generelle Methodik zur Erstellung von reibungsfreien SEAs mit nachgiebigen Mechanismen mit selektiver Nachgiebigkeit und adaptiver Steifigkeit entwickelt werden.

Literatur

- [1] Williamson, M. M.: "Series Elastic Actuators", Artificial Intelligence Laboratory A.I. Technical Report No. 1524, MIT, Massachusetts, 1995.
- [2] Pratt, G. A., et al.: "Stiffness isn't everything." experimental robotics IV. Springer Berlin Heidelberg, 1997. 253-262.
- [3] Spiller, A.: Unterstützung der Werkstückhandhabung kooperierender Industrieroboter durch Kraftregelung. 2014.
- [4] Pratt, J., Krupp B., Morse C.: "Series elastic actuators for high fidelity force control." Industrial Robot: An International Journal 29.3 (2002): 234-241.
- [5] Pratt, G. A., Williamson M.M.: "Series elastic actuators." Intelligent Robots and Systems 95.'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on. Vol. 1. IEEE, 1995.
- [6] Balas, M. J.: "Active control of flexible systems." Journal of Optimization theory and Applications 25.3 (1978): 415-436.
- [7] Grün, M., Müller R., Konigorski U.: "Model based control of series elastic actuators." 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). IEEE, 2012.
- [8] Föllinger, O., Konigorski U.: Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung;[aktualisierter Lehrbuch-Klassiker]. 11. völlig neu bearbeitete Auflage. VDE Verlag, Berlin, 2013.

-
- [9] Van Ham, R., et al.: "Compliant actuator designs." IEEE Robotics & Automation Magazine 16.3 (2009): 81-94.
- [10] Vanderborght, B., et al. "Variable impedance actuators: A review." Robotics and autonomous systems 61.12 (2013): 1601-1614.
- [11] Hasse, A.: "Synthesis of Planar Compliant Mechanisms with Selective Compliance for Shape Adaptation", Diss., ETH Zürich, Nr. 19585, 2011.

Zustandsdiagnose von Maschinen im Kontext von Industrie 4.0 unter Einsatz von Data-Mining Methoden

Christof Küstner¹, Jürgen Mitsch¹, Matthias Hegwein¹,
Moritz Fröhlich², Nico Meintker², Konrad Mönks², Sandro Wart-
zack¹

¹ *Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)*

² *GE Jenbacher GmbH & Co OG*

Abstract

Today, the machine industry offers a range of After-Sales-Services, including the installation and commissioning of the purchased products, the provision of spare parts, inspections or comprehensive maintenance contracts. Studies prove that After-Sales-Services often generate revenues that are several times higher than the original purchase price, which is why these services significantly contribute to a company's balance sheet. Worldwide operation of machines could lead to long machine downtimes before service technicians reach the operating site. Therefore, companies are interested in machine prognostics and predictive maintenance techniques. To accomplish this, an approach for condition-based maintenance in context of the internet of things and the use of data mining is presented in this contribution.

Keywords: condition-based maintenance, machine prognostics, internet of things, data mining

1 Einleitung und Herausforderung

Industrieunternehmen bieten heutzutage eine Vielzahl an Zusatzprodukten und Dienstleistungen an, die den Kunden über den Erwerb eines Produktes hinaus unterstützen und an das Unternehmen binden sollen. Diese werden unter dem Begriff After-Sales-Services zusammengefasst und beinhalten bspw. die Installation und Inbetriebnahme der erworbenen Produkte, die Bereitstellung von Ersatzteilen, Inspektionen oder umfassende Wartungsverträge. Doch die Bedeutung von After-Sales-Service geht heute weit über die Kundenbindung hinaus. Sie sind sowohl Unterscheidungsmerkmale im globalen Wettbewerb zur Neukundengewinnung, als auch zuverlässige und vor allem langfristige Einnahmequellen [3]. Studien zeigen, dass im Verlauf des Lebenszyklus eines Produktes durch die After-Sales-Services oftmals ein Vielfaches des ursprünglichen Kaufpreises erwirtschaftet und so ein erheblicher Beitrag zur Gesamtbilanz eines Unternehmens geleistet wird [5]. Besonders bei komplexen Maschinen und Anlagen wie z. B. Automobilen, Turbinen oder industriellen Großmotoren sind Wartungsverträge weit verbreitet, um einen reibungslosen Betrieb für den Kunden zu gewährleisten. Diese Maschinen werden i. d. R. weltweit betrieben (bspw. Gasmotoren für Biogasanlagen), weshalb im Fall von kleinen Wartungsintervallen oder Störungen der Betrieb für mehrere Tage ausfallen kann, bis die Wartungstechniker den Betriebsort erreichen.

Aus diesem Grund sind Unternehmen an einer prädiktiven Zustandsdiagnose von Maschinen interessiert, um u. a. dem Aspekt des *Designs for Maintenance* im Kontext von Industrie 4.0 gerecht zu werden. In diesem Beitrag wird in diesem Kontext eine Methode vorgestellt, womit die datengetriebene, prädiktive Zustandsdiagnose von Maschinen ermöglicht wird. Hierdurch können Störungen vorhergesagt, bzw. im Fall einer Störung die Dauer des Maschinenstillstandes verkürzt werden.

2 Wartungskonzepte von Maschinen im Kontext von Industrie 4.0

Allgemein betrachtet gibt es drei Konzepte, wie die Wartung und Instandhaltung einer Maschine erfolgen kann [7]: (vgl. Bild 1) Reaktive Wartung: Wartungs- und Reparaturmaßnahmen erfolgen erst nach Eintritt einer Störung; Zeitbasierte/vorbeugende Wartung: Inspektionen und Wartungen erfolgen in festen, periodischen Zeitintervallen; Zustandsabhängige Wartung: der Maschinenzustand wird kontinuierlich überwacht, die Wartungen erfolgen, sobald sich der Maschinenzustand verschlechtert und eine Störung droht.

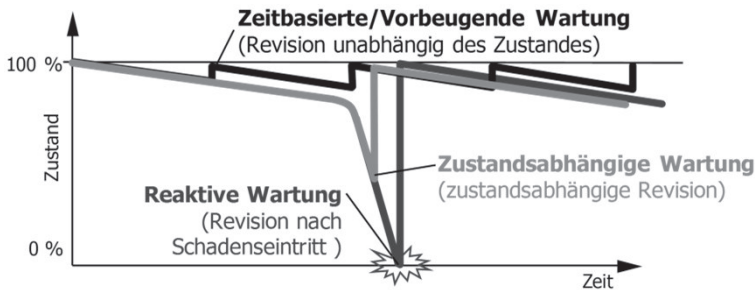


Bild 1: Wartungskonzepte von Maschinen nach [6]

In der Praxis am weitesten verbreitet ist die klassische, vorbeugende Wartung. Sie bietet für viele Unternehmen den besten Kompromiss aus Planbarkeit, Realisierbarkeit und Gewährleistung einer hohen Maschinenverfügbarkeit, denn sie kann durch die klassischen Dimensionierungsansätze ermittelt werden. Die vorbeugende Wartung erfolgt stets mit einer ausreichend großen Sicherheit (dementsprechend Vorlaufzeit), um eine mögliche Störung und somit Stillstand der Maschine zu vermeiden.

Im Kontext von Industrie 4.0 und der stetig zunehmenden Vernetzung von Maschinen werden sehr viele SCADA-Daten (Supervisory Control And Data Acquisition) der Maschinen erhoben. Diese SCADA-Daten stellen die sensorisch erfassten Zustandsdaten einer Maschine dar, welche die Basis für die Steuerung und Überwachung einer Maschine darstellen und deshalb kostenneutral zur Verfügung stehen. Ziel der zustandsabhängigen Wartung ist, auf Basis der SCADA-Daten eine Verschlechterung des Maschinenzustandes zu antizipieren und im Idealfall selbstständig eine Wartung einzuleiten. Dies beugt unnötig frühen Austausch von Komponenten und auf lange Sicht häufigere Wartungsarbeiten vor, wodurch im Vergleich zur vorbeugenden Wartung erhebliche Kosten eingespart werden können. [7]

3 Zeitabhängige Daten

SCADA-Daten sind zeitabhängige Daten, auch Zeitreihen genannt. Sie lassen sich allgemein als eine Menge von Werten eines Vektors $Y = \langle y_1, y_2, y_3, \dots, y_T \rangle$ beschreiben, welcher über einen definierten Zeitraum (Index T) nacheinander gemessen und nach der Zeit geordnet sind [1]. Prinzipiell wird zwischen stationären und instationären Zeitreihen unterschieden. Stationäre Zeitreihen schwanken stets um einen konstanten Mittelwert (Niveau), z. B. mechanische Spannungsschwingungen (vgl. Bild 2-a). Instationäre Zeitreihen hingegen weisen Trends oder zyklische Wiederholungen auf, sodass kein konstantes Niveau vorliegt, z. B. Aktienkurse (vgl. Bild 2-b).

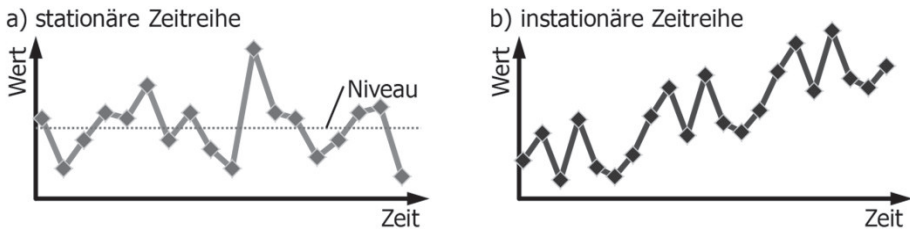


Bild 2: Qualitative Darstellung einer stationären und instationären Zeitreihe

Stationäre Zeitreihen lassen sich in erster Linie durch ihr Niveau beschreiben, instationäre Zeitreihen hingegen können zur Beschreibung in mehrere Komponenten aufgeteilt werden [10]: Trendkomponente, Saisonkomponente, Zyklische Komponente und Restkomponente. Die Trendkomponente beschreibt die langfristige Veränderung, d. h. den Anstieg oder den Abfall des Niveaus über den betrachteten Zeitraum. Die zyklische Komponente und die Saisonkomponente hingegen beschreiben wiederkehrende Schwankungen in unterschiedlich langen Perioden. So bezieht sich die Saisonkomponente meist auf Schwankungen innerhalb eines Jahres, während die zyklische Komponente Schwankungen über den Zeitraum mehrerer Jahre beschreibt. Schließlich werden in der Restkomponente sämtliche Einflüsse gesammelt, welche sich keiner der anderen Komponenten zuordnen lassen. Darunter fallen unvorhersehbare, kurzfristige Einflüsse wie z. B. Naturkatastrophen eines Aktienkurses. Dieses Komponentenmodell nach Schlittgen [10] kann für instationäre Zeitreihen für die Prognose des zukünftigen Verlaufs der Zeitreihe verwendet werden. Sensoren an technischen Systemen erzeugen i. d. R. stationäre Zeitreihen, weshalb auf deren Charakterisierung und Analyse in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird.

4 Einsatz von Data-Mining zur Mustererkennung in Zeitreihen

Aufgrund des stetig steigenden Daten- und Informationsaufkommens werden das gezielte Finden, Auslesen und Verarbeiten von Mustern aus Datenbanken oder -strömen zu immer größeren Herausforderungen. Ohne technische Hilfsmittel können diese in vielen Fällen nicht mehr identifiziert werden. Dies liegt an der Anzahl der Variablen eines Systems oder der Komplexität der Daten einer betrachteten Maschine, welche vom Ingenieur nicht mehr interpretiert werden können. Die computergestützte Analyse großer Datensätze unter Anwendung statistischer Methoden wird unter dem Begriff *Data-Mining* zusammengefasst. Scarpa [9] bspw. definiert Data-Mining als die Tätigkeit grafischer oder numerischer Analyse von großen, Datensätzen oder -strömen, um für den Dateneigentümer nützliches Wissen zu finden. Der Ausdruck nützliches Wissen ist hierbei bewusst allgemein gehalten, da oft vor

Beginn der Analyse noch nicht feststeht, was der Gegenstand des Interesses ist. Bissantz und Hagedorn [2] beschreiben das durch Data-Mining zu extrahierende Wissen allgemein als ein Muster, das im Auge des Betrachters interessant ist und mit ausreichender Sicherheit tatsächlich existiert. Der Begriff Muster wiederum bezeichnet Beziehungen von Daten und Regelmäßigkeiten zwischen mehreren Datensätzen oder innerhalb eines Datensatzes. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte vorgestellt, die bei der Mustererkennung in stationären Zeitreihen mittels Methoden aus dem Bereich des Data-Minings berücksichtigt werden müssen.

4.1 Auswahl der Data-Mining Methodengruppe zur Mustererkennung in stationären Zeitreihen

Die Data-Mining Methoden werden generell in überwachtes und unüberwachtes Lernen unterteilt (s. Bild 3). Welche der beiden Verfahren durchgeführt werden kann, hängt von den verfügbaren Daten ab: Ist die Zielgröße (zu analysierendes Attribut eines Datensatzes) nicht bekannt oder zu aufwändig zu bestimmen, kommen unüberwachte Lernverfahren zum Einsatz [11]. Dies ist der Fall, wenn zwar verschiedene Sensordaten zur Verfügung stehen, aber nicht bekannt ist, ob, wann und wo eine Störung oder ein Wartungsfall eingetreten ist. Hierbei werden anhand der Struktur der Sensordaten eindeutige Attribute (engl. features) identifiziert, welche die Daten bspw. in Störungsklassen (Art der Störung) oder zeitliche Priorität für eine Wartung unterteilen. Sind die Zielgrößen der Daten hingegen bekannt, wird von überwachtem Lernen gesprochen [11]. Dies ist der Fall, wenn bspw. für verschiedene Sensordaten vorab die Störungsklassen oder zeitlichen Prioritäten für eine Wartung bekannt sind. Beide Verfahrenstypen suchen Muster, welche die Beziehung zwischen den bekannten Zielgrößen in den Datensätzen und den Attributen möglichst genau beschreiben. Dieser Vorgang wird als Lernen oder Trainieren eines Modells bezeichnet. Das Resultat dieser Trainingsalgorithmen werden u. a. Metamodelle genannt.

Für jedes Data-Mining Verfahren stehen charakteristische Methodengruppen zur Verfügung (vgl. Bild 3). Beim überwachten Lernen kommen Algorithmen aus den Methodengruppen der Klassifikation oder Regression zum Einsatz mit welchen prognosefähige Metamodelle trainiert werden können [11]. Unter der Prognose kann eine Inter- und Extrapolation verstanden werden. Diese Metamodelle können bspw. direkt auf den Maschinensteuerungen betrieben werden, und somit das zukünftige Verhalten der Maschine abschätzen, womit Störungen vorhergesehen werden können. Beim überwachten Lernen im Kontext der Zeitreihenanalyse eignet sich besonders die Klassifikation zur Unterscheidung von Störungsklassen, wobei die Regression beim

Extrapolieren von Sensorsignalen zum Einsatz kommt. Hier sind rekurrente neuronale Netze als bekannteste Algorithmengruppe zu nennen, welche eine Rückkopplung in ihrer internen Struktur aufweisen, womit eine Prognose des zukünftigen Sensorsignalverlaufs auf Basis der Signalhistorie möglich ist [8]. Beim unüberwachten Lernen gibt es vier Methodengruppen (vgl. Bild 3). Hier eignen sich die Visualisierung und vor allem das Clustern für die Zeitreihenanalyse. Beim Clustern können Maschinen identifiziert werden, welche sich nicht durchschnittlich verhalten.

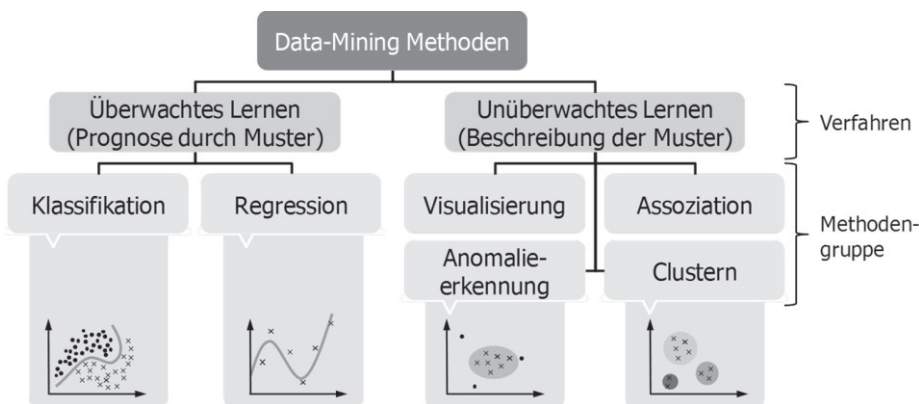


Bild 3: Strukturierung der Data-Mining Methoden nach [11]

4.2 Klassifikation stationärer Zeitreihen

Zeitabhängige Daten sind in ihrer „rohen Form“ (s. Kapitel 3) für Klassifikationsverfahren nicht geeignet, weshalb die Daten durch eine Transformation reduziert werden müssen. Diese Datenreduktion, welche ebenso als Identifikation von Attributen bezeichnet wird, wird allgemein Featureextraktion genannt. Möglichkeiten der Featureextraktion sind u. a. die Berechnung von Ähnlichkeits- oder Distanzmaßen zwischen Zeitreihen, Fourier- und Wavelettransformation und die Hauptkomponentenanalyse [4]. Neben der Featureextraktion stellt die hohe Dimensionalität der Zeitreihendaten bei häufig gleichzeitig kleiner Anzahl von Trainingsdaten im Kontext einer Klassifikationsaufgabe eine weitere Herausforderung dar. Letztere Datenknappheit ist unter anderem eine Folge dessen, dass sich auch besonders umfangreiche Zeitreihen mit einer hohen Zahl an Datenpunkten für die Klassifikation auf eine einzige Instanz (Datenpunkt) reduzieren lassen.

Eng verknüpft mit der Anzahl der verfügbaren Trainingsdaten ist auch die maximale Anzahl der für das Training nutzbaren Attribute. Mit steigender

Anzahl von Attributen erhöht sich die Dimensionalität der Klassifikationsaufgabe. Wird die Dimension der Klassifikation überproportional groß, werden die Modelle entweder sehr instabil oder es kommt zu einem Overfitting. In der Literatur findet sich für dieses Problem häufig die Bezeichnung *curse of dimensionality* (deutsch: Fluch der Dimensionalität) [12]. Veranschaulichen lässt sich dies anhand eines Beispiels: Gegeben sei ein Datensatz von zehn Bildern, auf denen jeweils Äpfel oder Birnen abgebildet sind (s. Bild 4). Ziel ist die Entwicklung eines Klassifikationsmodells zur Unterscheidung der beiden Obstsorten. Hierfür wird ein erstes Attribut gewählt. Der offensichtlichste in diesem Fall ist bspw. der durchschnittliche Grünanteil im Farbwert der Bilder (s. Bild 4-a).

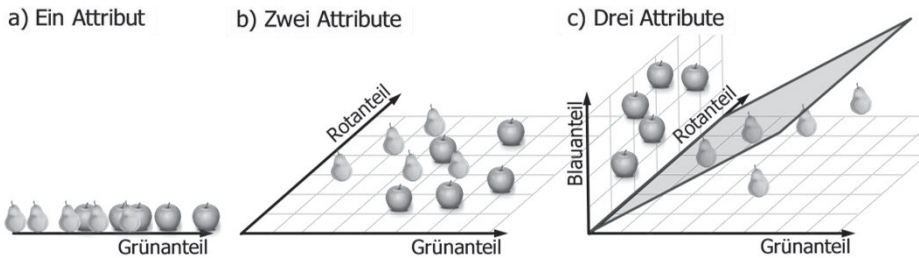


Bild 4: Klassifikation von Äpfeln und Birnen bei der Nutzung einer unterschiedlichen Anzahl von Attributen

In Bild 4-a ist zu sehen, dass sich die einzelnen Instanzen anhand nur eines Attributs nicht eindeutig und fehlerfrei voneinander trennen lassen, es kommt zu Überschneidungen. Wird der Betrachtung nun ein zweites Attribut „durchschnittlicher Rotanteil“ hinzugefügt, so erweitert sich der Feature Raum um eine Dimension (s. Bild 4-b). Nun sind die Instanzen zwar besser voneinander getrennt als vorher, eine vollständige Trennung von Äpfeln und Birnen ist jedoch nach wie vor nicht möglich. Ebenfalls wird deutlich, dass sich durch die Erhöhung der Dimension die Dichte der Trainingsdaten im Feature Raum deutlich verringert hat. Durch die erneute Erweiterung um ein Attribut verteilen sich die Instanzen noch stärker im Feature Raum und eine eindeutige Trennung wird nun möglich (Bild 4-c). Der Prozess zur Auswahl der notwendigen Attribute zur Lösung einer Klassifikationsaufgabe wird Featureselektion bezeichnet. Diese ist i. d. R. ein iterativer Vorgang beim Training eines Klassifikationsmodells.

Generell nimmt die Wahrscheinlichkeit für eine perfekte Trennung der Trainingsdaten mit steigender Anzahl an Attributen zu. Gleichzeitig sinkt jedoch die Dichte der Instanzen im Raum mit jeder weiteren Dimension. Das hat zur Folge, dass bei steigender Anzahl von Attributen die Wahrscheinlich-

keit sinkt, dass das trainierte Klassifikationsmodell für die Gesamtheit der zu unterscheidenden Klassen gültig ist. Bei der Klassifikation von Zeitreihen entsteht sehr häufig das Problem der zu hohen Dimensionalität, da je nach genutzter Featureextraktionsmethode eine Vielzahl an Attributen generiert wird. Insbesondere im Fall von multivariater Zeitreihen können so mehr Attribute entstehen, als die Menge vorhandener Instanzen in den Zeitreihen. [11, 12]

4.3 Validierung von Klassifikationsmodellen

Die gängigsten Validierungsmethoden für die trainierten Klassifikationsmodelle basieren auf der Konfusionsmatrix (s. Bild 5-a). Sie bildet die Grundlage für die Berechnung von vielen Validierungskennzahlen, welche im Kontext von Data-Mining als Performanz bezeichnet werden. Die Konfusionsmatrix stellt die vorhergesagten Klassen der Testdatensätze den tatsächlichen Klassen gegenüber. Die Testdaten sind Datensätze zur Validierung des Klassifikationsmodells, in welchen der tatsächlichen Klasse bekannt ist, wodurch eine Gegenüberstellung möglich ist. In Bild 5 ist eine Konfusionsmatrix für den binären Klassifikationsfall dargestellt.

a) Konfusionsmatrix

		Vorhergesagte Klasse	
		Klasse A (●)	Klasse B (x)
Tatsächliche Klasse	Klasse A (●)	True-Positives (TP)	False-Negatives (FN)
	Klasse B (x)	False-Positives (FP)	True-Negatives (TN)

b) Visualisierung

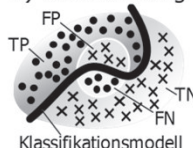


Bild 5: Konfusionsmatrix und entsprechende Visualisierung für den binären Klassifikationsfall nach [11]

Die True-Positives (TP) beschreiben die Anzahl an Datensätzen, welche der Klasse A angehören und auch korrekt vom Klassifikationsmodell als A klassifiziert wurden. Die False-Positives (FP) beschreiben die Anzahl an Datensätzen, welche der Klasse B angehören, jedoch fälschlicherweise als A klassifiziert wurden. Analog dazu beschreiben die True-Negatives (TN) korrekt als B klassifizierte B-Fälle und die False-Negatives (FN) fälschlicherweise als B klassifizierte A-Fälle. [11] Eine Visualisierung hierfür ist in Bild 5-b dargestellt. Im Kontext der Zeitreihenanalyse werden TP als „echte Störungen“, FP als „Fehlalarme“, FN als „nicht erkannte Störungen“ und TN als „Normalbetrieb“ bezeichnet. Zur Quantifizierung der Performanz eines Klassifikationsmodells gibt es verschiedene Kennwerte. Die Performanzkennwerte, die am häufigsten eingesetzt werden, sind im Folgenden aufgeführt: [11]

$$\text{Genauigkeit (engl. accuracy): } \text{Acc} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (4.1)$$

$$\text{Präzision (engl. precision): } P = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (4.2)$$

$$\text{Trefferquote (engl. recall): } R = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (4.3)$$

$$\text{F1-Wert: } F1 = 2 \cdot \frac{P \cdot R}{P + R} \quad (4.4)$$

Die Genauigkeit Acc errechnet sich aus der Konfusionsmatrix (vgl. Bild 5-a) als das Verhältnis aller richtigen Vorhersagen beider Klassen zu der Gesamtanzahl aller Instanzen. Sie ist in der Praxis zwar weit verbreitet und auf den ersten Blick ein stimmiges Performanzkennwert, hat jedoch Schwächen bei ungleichen Klassenhäufigkeiten in den Trainingsdaten oder bei Fällen, in welchen es von großer Bedeutung ist, dass eine Klasse in allen Fällen richtig vorhergesagt wird [11]. Die Präzision P , Trefferquote R und $F1$ -Wert sind Performanzkennwerte, die sich ebenfalls aus der Konfusionsmatrix errechnen. Im Gegensatz zur Genauigkeit Acc , konzentrieren sich die drei zuletzt genannten Kennwerte auf die positive Klasse. [11] Die Fokussierung auf eine interessante Klasse, für welche möglichst gute Vorhersagen erzielt werden sollen, ist auch im Kontext der Klassifikation des Maschinenzustandes von hoher Relevanz. Aus diesem Grund sind die zuletzt genannten Kennwerte der Genauigkeit Acc vorzuziehen. Dies liegt daran, dass vor allem die Wartungszustände als positive Klasse (TP) ohne teure Fehlalarme (FP) klassifiziert werden müssen und somit der Fokus auf der positiven Klasse liegt.

5 Prozess zur Zustandsdiagnose von Maschinen unter Einsatz von Data-Mining Methoden

In diesem Kapitel wird ein datengetriebener Ansatz zur Klassifikation von Maschinenstörungen vorgestellt. Das Ziel ist die Beurteilung einer Störung nach einer erfolgten Abstimmung aufgrund einer kritischen Warnung der Maschinensteuerung. Die Grundlage sind Sensordaten sowohl zu Abstimmungen mit Störungen, als auch Maschinenabstellungen, bei welchen im Nachhinein keine Schäden an der Maschine festgestellt wurden (Sicherheitsabstellung im Normalbetrieb). Das wichtigste Kriterium, welcher der entwickelte Prozess zur Charakterisierung der Störung zu erfüllen hat, ist eine geringe Fehlalarmrate. Fälschlicherweise als Schaden klassifizierte Störungen führen zu Maschinenstillstand und unnötigen Inspektionen und somit zu hohem Kostenaufwand und sind daher unbedingt zu vermeiden. Die Priorität liegt demnach in der Minimierung des Fehlers 1. Art auf Kosten eines größeren Fehlers zweiter Art,

bei welchem der Wartungsbedarf nicht als solcher erkannt wird. Der Gesamtprozess in Bild 6 dargestellt.

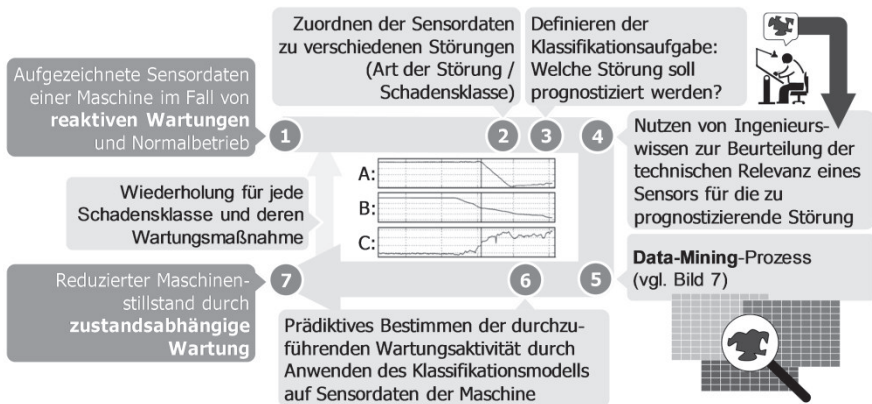


Bild 6: Prozess zur Nutzung von Sensordaten reaktiver Wartungsaktivitäten für die zustandsabhängige Wartung

Der Prozess in Bild 6 beginnt bei den aufgezeichneten Sensordaten einer Maschine im Fall von reaktiver Wartung und im Normalbetrieb. Nachdem die verfügbaren Aufzeichnungen der Sensoren zu den verschiedenen Schadensklassen aufgeteilt wurden, muss sich vorerst auf eine Schadensklasse fokussiert werden. Nicht alle verfügbaren Sensoren haben für eine bestimmte Störung eine technische Relevanz, z. B. der Lagerschaden mit dem Abgasstrom. Aus diesem Grund wird mithilfe von Entwicklungsingenieuren eine Vorselektion vorgenommen, um die Dimension des Datensatzes für den Data-Mining-Prozess im Vorfeld zu reduzieren. Danach wird für jede Schadensklasse und deren Wartungsmaßnahme ein Klassifikationsmodell trainiert (s. Bild 7). Dieses Klassifikationsmodell erkennt, unter der Randbedingung der Minimierung des Fehlers 1. Art, ob die trainierte Schadensklasse eingetreten ist. Durch das Konsultieren aller trainierten Klassifikationsmodelle findet eine sehr sichere Schadensklassifizierung nach einer Störung statt. Sofern alle Schlussfolgerungen der Klassifikationsmodelle negativ ausfallen, kann von einer Sicherheitsabstellung im Normalbetrieb ausgegangen werden, d. h. der Zustand der Maschine ist in Ordnung, und der Maschinenbetrieb ohne dem Einleiten einer Wartungsaktivität fortgesetzt werden. Hierdurch kann der Maschinenzustand prädiktiv ermittelt werden, ohne einen Wartungstechniker an den Betriebsort zu schicken.

In Bild 7 ist der Prozess zum Trainieren eines Klassifikationsmodells abgebildet. Dieser beinhaltet die Ansätze, welche in Kapitel 4 vorgestellt wurden.

Er startet bei den verfügbaren Sensordaten einer Schadensklasse, welche bereits von Entwicklungsingenieuren hinsichtlich der Schadensklasse auf Relevanz geprüft wurden. In der Datenvorverarbeitung werden aus den Sensorrohdaten in Form von Zeitreihen nach einer Datenaufbereitung die Attribute extrahiert (Featureextraktion). Der „Holdout Split“ spaltet die vorbereiteten Daten zufällig in einem festen Verhältnis in Trainings- und Validierungsdaten auf. Beim Training des Modells findet die Featureselektion statt. Durch die Validierung des Modells kann die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 1. Art berechnet werden.



Bild 7: Prozess zum Trainieren eines Klassifikationsmodells

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein datengetriebener Ansatz zur Klassifikation von Maschinenfehlerzuständen unter Einsatz von Data-Mining Methoden vorgestellt. Einsatzzweck ist die Beurteilung des Maschinenzustandes nach einer erfolgten Abstimmung aufgrund einer kritischen Warnung. Datengrundlage sind Sensordaten (SCADA-Daten) sowohl zu Abstimmungen mit vorliegendem Maschinenschaden, als auch gewöhnlichen Maschinenabstellungen, bei welchen keine Beschädigungen festgestellt wurde. Anhand des in diesem Beitrag vorgestellten Prozesses zur prädiktiven Zustandsdiagnose können Maschinenstillstandszeiten gegenüber der klassischen, vorbeugenden Wartung reduziert und gleichzeitig die Ausfallzeiten durch Maschinenschäden vermieden werden. Die Maschinen werden hierdurch zuverlässiger, wodurch Unternehmen die Wartungsarbeiten im Zuge des After-Sales-Service im Kontext des *Designs for Maintenance* kostengünstiger gestalten können.

Danksagung

Die Autoren danken der DFG für die Förderung des Teilprojekte B1 „Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems“ im Rahmen des SFB/TR73 für die Unterstützung bei der hier vorgestellten Arbeit.

Literatur

- [1] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: "Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung", 14. Auflage, Springer, Berlin, 2016.
- [2] Bissantz, N.; Hagedorn, J.: "Data Mining", Business & Information Systems Engineering, Vol. 1 No. 1, 2009, S. 118–122.
- [3] Brock, D.: "Aftersales management. Creating a successful aftersales strategy to reduce costs, improve customer service and increase sales", Kogan Page, London, 2009.
- [4] Buza, K. A.: "Fusion Methods for Time-Series Classification", Dissertation, Universität Hildesheim, 2011.
- [5] Cohen, M.; Agrawal, N.; Agrawal, V.: "Winning in the Aftermarket", Harvard Business Review, Bd. 84 (2006) Nr. 5.
- [6] Endig, M. et al.: "Instandhaltung technischer Systeme – Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs", Springer Science + Business Media, 2010.
- [7] Kolerus, J.; Wassermann, J.: "Zustandsüberwachung von Maschinen. Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker", 6. Auflage, Expert, Renningen, 2014.
- [8] Petersohn, H.: "Data Mining: Verfahren, Prozesse, Anwendungsarchitektur", Oldenbourg, 2005.
- [9] Scarpa, B.: "Data-Mining", In: Lovric, M. (Hrsg.): "International Encyclopedia of Statistical Science", Springer, 2011, S. 336–339.
- [10] Schlittgen, R.; Streitberg, B.: "Zeitreihenanalyse", Oldenbourg, 2001.
- [11] Tan, P.-N.: "Introduction to Data Mining", Addison-Wesley, 2006.
- [12] Verleysen, M.; François, D.: "The Curse of Dimensionality in Data Mining and Time Series Prediction", International Work-Conference on Artificial Neural Networks, 2005, S. 758–770.

Entwicklung von Smart Machine Elements – Ansatz einer smarten Ausgleichkupplung

Stefan Schork, Sebastian Gramlich, Eckhard Kirchner

*Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente
Technische Universität Darmstadt*

Abstract

Future projects like „Industrie 4.0“ often aim for an increase in networking and data exchange between machines and processes. To collect these process relevant data, more sensors are needed. The data is afterwards used to e.g. make decentralized decisions on how the process should be influenced to optimize the process outcome. To influence the process, more actuators are needed. The idea behind Smart Machine Elements is to use the standardized interface between machine elements and adjacent components to implement the needed sensors and actuators. This paper first points out the motivation for the development of Smart Machine Elements and thereafter shows their potential. To further increase the understanding of this idea, the example of the smart compensating coupling is given.

Keywords: Smart Machine Elements, Industrie 4.0, functional integration; compensating coupling

1 Die Motivation hinter Smart Machine Elements

Elemente des Maschinenbaus werden seit Jahrzehnten stets weiterentwickelt. Dabei werden in den meisten Bereichen Werkstoffe, Geometrien und Wirkprinzipien dahingehend optimiert, dass eine bessere Erfüllung der Funktion erreicht werden kann. Einige Elemente, die Maschinenelemente, haben

sich dabei in ihrer Form und Funktion zu Standardlösungen entwickelt, die in nahezu jeder technischen Konstruktion Anwendung finden und sich in ihrer Gestalt stark ähneln. Durch Zukunftsprojekte wie „Industrie 4.0“ treten jedoch neben einer optimalen Funktionserfüllung weitere Anforderungen an technische Systeme und die darin enthaltenen Elemente in den Vordergrund, die beispielsweise eine genauere Prozessüberwachung, eine verbesserte Prozesssteuerung oder auch die Kommunikation und Vernetzung der Maschinen untereinander ermöglichen.

Das Projekt „Industrie 4.0“, das für die vierte industrielle Revolution steht und einen sehr hohen Stellenwert in aktuellen Entwicklungen einnimmt, kann durch die flächendeckende Vernetzung verschiedener Produktionsbereiche beschrieben werden. So entstehen *Cyber-Physical-Systems* (CPS), die eigenständig Informationen untereinander austauschen und auf diese reagieren, um sich gegenseitig selbstständig zu steuern [1]. Daraus resultiert die Anforderung an technische Systeme, Prozessdaten zu erfassen und diese in Informationen über Prozesszustände und Prozessgrößen zu transformieren, die zur Vernetzung und Steuerung der Produktionsnetzwerke benötigt werden. Durch diese informationstechnische Vernetzung von Teilprozessen können weitere Prozesse auf Informationen aus der gesamten Prozesskette zurückgreifen, wodurch sie sich auf die aktuellen Zustände der beteiligten Prozesskomponenten einstellen können. Zur Aufnahme dieser Prozessdaten werden jedoch aufgrund des meist rauen Umfelds Sensoren benötigt, die auch unter dem Einfluss von Schmutz, thermischer Belastung sowie mechanischer Belastung verlässliche Messwerte erzeugen [2]. Besonders sensorische Komponenten, die zum Schutz vor Beschädigungen außerhalb des eigentlichen Prozesses angebracht sind, können dabei oft nicht die gesuchte Messgröße direkt messen, sondern errechnen diese Anhand eines Modells. Die Genauigkeit und die Qualität der ermittelten Messdaten sind damit von der Güte des hinterlegten Modells und der darin getroffenen Annahmen abhängig. Zudem sind diese Modelle oft aufwendig in der Entwicklung und Adaption auf konkrete Anwendungen. Besonderes Augenmerk gilt dabei dem Abstand der erfassten Größe zur gesuchten Größe, da mit der räumlichen Trennung auch die Gefahr von Störeinflüssen steigt, die mit dem im Modell getroffenen Annahmen nicht übereinstimmen und somit das Messergebnis negativ beeinflussen.

Die Idee der „Smart Machine Elements“ (Smart ME) setzt an dieser Stelle an, und sieht unter anderem die Integration sensorischer und/oder aktorischer Komponenten sowie Komponenten zur elektrischen Energie- und Signalleitung in standardisierten und flächendeckend verwendeten Maschinenelementen vor. Abbildung 1 zeigt die prinzipielle Integration eines Smart ME in das Modell der mechatronischen Systemkette. Die mechanische Strecke wird

in diesem Fall durch zwei über ein Smart ME verbundene Bauteile dargestellt. Die direkte Verbindung des Smart ME mit dem Regler verdeutlicht, dass das Verhalten der mechanischen Strecke nun direkter überwacht und beeinflusst werden kann, als es mit den außerhalb der mechanische Strecke angebrachten Sensoren und Aktoren möglich wäre. Prozessgrößen können somit direkt am Entstehungsort gemessen und bei Bedarf beeinflusst werden. Das zur Informationsgewinnung verwendete Modell kann nun aufgrund der Prozessnähe des Sensors deutlich vereinfacht werden, wodurch die Zuverlässigkeit (Reliabilität) der Messwerte erhöht wird. Zusätzlich dazu kann die Anzahl an benötigter Sensorik und Aktorik außerhalb der mechanischen Strecke verringert werden (gestrichelte Linien).

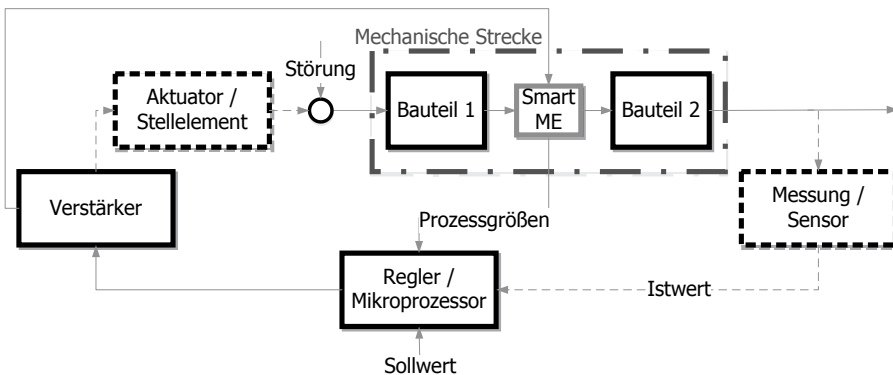


Abbildung 1: Mechatronische Systemkette unter Verwendung eines Smart ME (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [3])

2 Potenziale und Ziele der smarten Maschinenelemente

Der Vorteil, den Maschinenelemente bei der Integration zusätzlicher Funktionen bieten, besteht besonders in der weiten Verbreitung und der Standardisierung der Elemente. Zur Auslegung und Anwendung der Maschinenelemente existieren genormte Berechnungsverfahren und Konstruktionskataloge, durch die der Aufwand in Auslegung und Berechnung stark reduziert wird. Ausgehend davon gilt es jedoch zu beachten, dass das Verhalten der Maschinenelemente bei der Integration von Sensoren und Aktoren nicht grundlegend verändert werden darf, um die in den Berechnungsverfahren getroffenen Annahmen und Vereinfachungen weiterhin einhalten zu können. An dieser Stelle bieten besonders Maschinenelemente, die aufgrund ihrer charakteristischen Gestaltung über ungenutzten oder gering beanspruchten Bauraum verfügen, großes Potential zur Integration zusätzlicher Sensoren. Durch das

Einbringen einer zusätzlichen Struktur, deren geometrische und mechanische Eigenschaften im Vorfeld eindeutig bestimmbar sind, wird beispielsweise ein paralleler Kraftleitungspfad etabliert, dessen Steifigkeit die Kraftleitung des primären Pfads nicht beeinflusst, sich jedoch zur Aufnahme der am Maschinenelement auftretenden Kräfte und Momente eignet.

Bei eventuellen Änderungen an den Maschinenelementen, können die Verfahren und Vorschriften angepasst werden, um die geänderten Eigenschaften abzubilden. Da die Auslegungsnormen für Maschinenelemente meist sehr konservativ gehalten sind und zu einer Überdimensionierung der Bauteile führen, kann die Entwicklung und der Einsatz smarter Maschinenelemente darüber hinaus dazu beitragen, die am Element auftretenden Belastungen besser zu verstehen und bereits in den Auslegungsprozess einzubeziehen. Smart ME bieten daher das Potential, eine effizientere Dimensionierung sowie Gewichtsreduktionen zu ermöglichen. Darüber hinaus kann die Berechnung der Lebensdauer kontinuierlich, beispielsweise anhand des aufgenommenen Belastungskollektivs, während dem Betrieb durchgeführt werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten einer zustandsorientierten oder nutzungsabhängigen Instandhaltung [4]. Zu beachten bleibt, dass auch Smart ME im Allgemeinen nicht alle für die Berechnung der Lebensdauer relevanten Einflussgrößen überwachen können. Je nach gemessener Größe sind jedoch trotzdem Verbesserungen der Instandhaltungsintervalle zu erwarten.

Neben der Zustandsüberwachung des Maschinenelements an sich lassen die aufgenommenen Daten sensorintegrierter smarter Maschinenelemente einen Rückschluss auf weitere Prozessgrößen zu. Dies widerspricht zunächst dem Ansatz, Prozessgrößen möglichst direkt zu messen um genaue Messergebnisse zu gewährleisten, jedoch reicht es in einigen Fällen bereits aus, eine starke Abweichung zu detektieren. Ungewöhnlich hohe Abweichungen der gemessenen Werte von den erwarteten Werten können beispielsweise in Fertigungsprozessen auf eventuelle Mängel hindeuten, die mit den angestrebten Qualitätsstandards nicht vereinbar sind. Durch Vernetzung von Produktion und Qualitätssicherung kann letztere gezielt Bauteile untersuchen, deren Prozessgrößen deutlich vom erwarteten Bereich abweichen. Ein Beispiel dieser Verwendung stellt die Sensorschraube dar, die im Gehäuse von Walzprofiliermaschinen eingesetzt wird. Die Sensorschraube erfährt in diesem Fall erst dann eine deutliche zusätzliche Belastung, wenn die geometrische Ungenauigkeit (zum Beispiel die Dicke) der hergestellten Walzprofile so hoch ist, dass dadurch das Spiel der Lagerung der Walzen überschritten wird [5]. Neben der Erfassung erhöhter Lasten kann auch die Erkennung wiederkehrender qualitativer Belastungsverläufe zu wertvollen Informationen über den Prozess führen. Als Beispiel können hier periodisch auftretende Anregungen herangezo-

gen werden, die auf Drehunförmigkeiten der rotierenden Komponenten hindeuten können. Detektierte Abweichungen von den im Normalbetrieb auftretenden Lasten sowie erfasste Überlasten können ebenfalls als Anlass für Prozessüberprüfungen und Wartungen im Sinne der zustands- und nutzungsorientierten Instandhaltung verwendet werden. Cyber-physische Systeme sind somit in der Lage, selbstständig Handlungsanweisungen über nachgelagerte Qualitätskontrollen sowie benötigte Instandhaltungsmaßnahmen auszugeben.

Durch die Verwendung der standardisierten Schnittstellen der Maschinenelemente entsteht der Vorteil, dass die Komponenten bestehender Systeme nach dem Prinzip des Austauschbaus ohne strukturelle Änderungen der benachbarten Bauteile oder des Gesamtsystems ersetzt werden können, wodurch die Neukonstruktion der Systeme vermieden wird. Dies hat den Vorteil, dass bestehende Anlagen unter Umständen ohne größeren Aufwand mit smarten Maschinenelementen versehen werden und somit Kosten eingespart werden können. In Bezug auf Industrie 4.0 bedeutet dies, dass physische Systeme schrittweise zu cyber-physischen Systemen erweitert werden können, wodurch sich anfallende Kosten auf einen längeren Zeitraum in einem beherrschbaren Rahmen bewegen. Dadurch können auch Unternehmen, die nur über geringes Investitionskapital verfügen, besser an der vierten industriellen Revolution teilnehmen.

3 Smarte Ausgleichskupplungen: Erste prototypische Umsetzungen

Nicht schaltbare, elastische Kupplungen werden zur Verbindung von Wellen eingesetzt und übertragen mechanische Energie in Form von Drehzahl und Drehmoment. Um Fluchtungsfehler auszugleichen, besitzen diese Ausgleichskupplungen elastische Elemente (Ausgleichskörper), wodurch die durch den Versatz auftretenden Belastungen angrenzender Bauteile reduziert werden. Der Wellenversatz kann auf verschiedene Weisen beschrieben werden, wobei in diesem Fall die Beschreibung über Axial-, Radial- und Angularversatz von Bedeutung ist. Je nach Ausrichtverfahren kann der Versatz der Wellen reduziert werden. Ein Restversatz und die damit verbundenen negativen Auswirkungen auf nachgelagerte Komponenten kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Darüber hinaus kann durch Ausrichten zunächst nur der Versatz im statischen Zustand ausgeglichen werden. Durch Setzvorgänge kann erneut Versatz auftreten, der zu unvorhergesehenen Belastungen führt. An dieser Stelle bietet die kontinuierliche Messung des Wellenversatzes großes Potential zur Überwachung des Systemverhaltens. In diesem Zusammenhang kann ein deutlich erhöhtes oder ein plötzlich auftretendes Setzen beispielsweise auf einen Schaden am Fundament hindeuten, der durch den Einsatz der smarten Ausgleichskupplung bereits frühzeitig erkannt werden könnte.

Da die Kupplung neben dem Versatzausgleich auch die Funktion der Energieübertragung zwischen den Wellen übernimmt, eröffnet sich an dieser Stelle weiteres Potential zur Integration sensorischer oder aktorischer Komponenten, die zur Überwachung oder Beeinflussung des übertragenen Drehmoments sowie der Drehzahl eingesetzt werden können. Hervorzuheben ist hierbei das Potential zur Beeinflussung von Torsionsschwingungen in Antriebssträngen, die beispielsweise durch die Drehunförmigkeit von Verbrennungskraftmaschinen hervorgerufen werden. Diese Schwingungen können beispielsweise eine erhebliche Geräusentwicklung nach sich ziehen oder zu stark erhöhten Beanspruchungen weiterer Systemkomponenten führen. Das größte Gefahrenpotential besteht für den Fall, dass die Frequenz der Torsionsschwingungen mit einer Eigenfrequenz des Systems übereinstimmt, wodurch es zur Resonanz und der damit verbundenen deutlichen Erhöhung der Amplitude kommt. Neben den belastungserhöhenden Folgen der Schwingungen, können zudem Komfortprobleme auftreten, die gerade im Bereich der Fahrzeugantriebe unzulässig sind. Mögliche Gegen- und Abhilfemaßnahmen, die meist passiver Natur sind, stellen unter anderem die Reduktion der auftretenden Amplituden durch den Einsatz dämpfender und tilgender Komponenten und das Verschieben der Eigenfrequenz in einen Bereich, der deutlich unterhalb der Anregungsfrequenz im Betriebspunkt liegt, dar. Letzteres führt jedoch im Hochlauf zur Resonanzdurchfahrt, bei der auch niedrige Frequenzen angeregt werden und somit unvermeidbare Schwingungen entstehen. Für die smarte Wellenkupplung ergibt sich daher das Potential durch eine einstellbare Steifigkeit die Eigenfrequenzen des Systems zu beeinflussen oder gar durch die Einleitung von Kräften eine aktive Schwingungsminderung zu erzielen.

Zur Veranschaulichung der Potentiale werden zwei Prototypen smarterer Ausgleichkupplungen vorgestellt, die jeweils unterschiedliche Entwicklungsschwerpunkte und –potentiale veranschaulichen. Der Fokus liegt dabei zunächst auf der Umsetzung einer sensorintegrierten Kupplung. Zur systematischen Konzepterarbeitung wird zunächst die Funktionsstruktur der Ausgleichkupplungen erstellt, welche zunächst unabhängig vom verwendeten Kupplungstyp ist und in Abbildung 2 dargestellt ist.

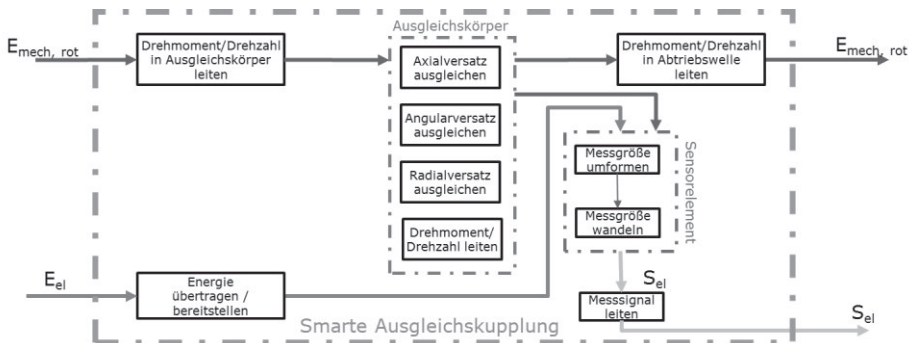


Abbildung 2: Funktionsstruktur der smarten Ausgleichskupplung

Die Funktionsstruktur verdeutlicht, dass die gesuchten Messgrößen am Ausgleichskörper auftreten und an dieser Stelle ein Weg entwickelt werden muss, die Messgrößen aufzunehmen, zu wandeln und das Signal zur Auswerteelektronik (zunächst außerhalb der Systemgrenze) zu leiten. Sowohl die Leitung der elektrischen Energie zur Versorgung der smarten Ausgleichskupplung sowie die elektrische Signalleitung der generierten Signale, werden in der ersten Iterationsstufe durch einfache Kabelverbindungen realisiert.

Die prototypisch umgesetzten Kupplungen werden daher zunächst nur im statischen Betrieb Untersuchungen unterzogen. Im weiteren Verlauf der Entwicklung ist die Frage der Energieversorgung und der Signalleitung in und aus dem rotierenden System zu klären.

3.1 Die smarte Federstegkupplung

Die Analyse des Entwicklungspotentials unterschiedlicher Typen von Ausgleichskupplungen anhand deren Wirkstrukturen hat gezeigt, dass sich eine Federstegkupplung besonders zur Integration eines hochintegrierten Sensorelements zur Messung des Wellenversatzes eignet. Diese Kupplung bietet durch den Hohlraum im Inneren zum einen einen relativ großen, ungenutzten Bauraum und zum anderen handelt es sich bei diesem Hohlraum um einen teilweise abgekapselten Bereich, der zum Schutz des Sensorelements beiträgt. Ziel der Entwicklung der smarten Federstegkupplung ist die Ausnutzung des Hohlraums durch Integration eines zusätzlichen Messelements in einem Kraftleitungspfad parallel zum Kraftleitungspfad des Ausgleichskörpers, dessen Steifigkeit im Vergleich zum Ausgleichskörper vernachlässigbar ist. Durch die Parallelschaltung der Kraftleitungspfade und den großen Unterschied der Steifigkeiten, wird nahezu keine Kraft über das Messelement übertragen, die

Verformung der Kupplung wird diesem jedoch aufgezwungen. Das Messelement an sich verfügt dabei über Bereiche niedriger Steifigkeit mit eindeutiger Geometrie, die eine Messung der Verformung mit Hilfe von Dehnmessstreifen ermöglichen. Aus der detektierten Verformung kann anschließend auf den verformungsverursachenden Wellenversatz rückgeschlossen werden. Zur Bestimmung der Höhe und der Richtung des Versatzes, wird die auftretende Dehnung über eine Umdrehung der Kupplung gemessen und der Verlauf aufgezeichnet. Der Betrag der Dehnung lässt auf die Höhe des Versatzes schließen, wohingegen die Richtung des Versatzes anhand charakteristischer Stellen des Dehnungsverlaufs ermittelt werden kann.

Für die erste prototypische Umsetzung, die hauptsächlich die Verdeutlichung des Prinzips des parallelen Kraftflusses und der generellen Idee des Messelements verdeutlichen soll, wird das Messelement aufgrund des begrenzten Bauraums und des damit verbundenen Aufwands nicht im Inneren der Kupplung integriert, sondern außen angebracht. Abbildung 3 zeigt die Ausgangsform der Federstegkupplung, das Zielkonzept in Form eines CAx-Modells sowie die prototypische Umsetzung.

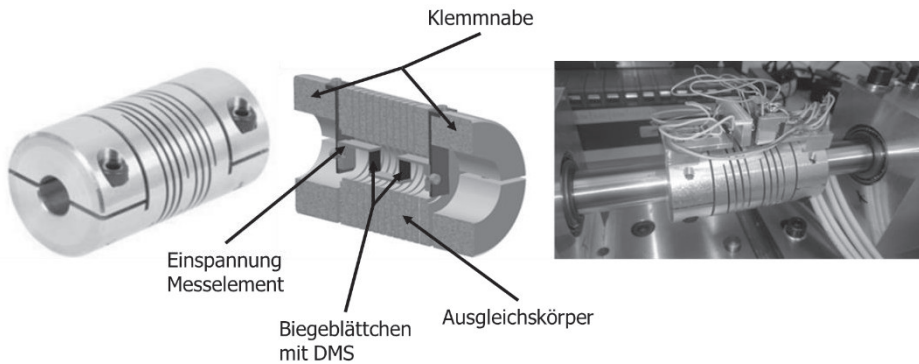


Abbildung 3: Ausgangsform der Federstegkupplung (links, Quelle: www.maedler.de), Konzept als CAx-Modell mit innenliegendem Messelement (Mitte) und prototypische Umsetzung mit außenliegendem Messelement (rechts)

Die ersten experimentellen Untersuchungen an der prototypischen Umsetzung der smarten Federstegkupplung haben gezeigt, dass das Konzept zur Aufnahme unterschiedlicher Versatzarten unterschiedlich gut geeignet ist. Die Messung des Angularversatzes schneidet hierbei am besten ab, wohingegen ein Radialversatz nur unzureichend aufgenommen und bestimmt werden

kann. Besonders die Höhe der gemessenen Dehnungen weicht mitunter stark von den zuvor berechneten Dehnungen ab, wohingegen sich die qualitativen Verläufe, die zur Bestimmung der Versatzrichtung dienen, im erwarteten Bereich aufhalten.

3.2 Die smarte elastische Klauenkupplung

Die elastische Klauenkupplung eignet sich aufgrund des verwendeten Elastomierzahnkranzes besonders aus fertigungstechnischer Sicht zur Integration eines Sensorelements. Die Analyse der vom Zahnkranz übertragenen Kräfte zeigt jedoch, dass sich nur die durch Drehmoment und Radialversatz hervorgerufenen Kräfte in einem im Vorfeld berechenbaren Rahmen bewegen. Die Zielstellung der smarten, sensorintegrierten Klauenkupplung sieht daher die Messung dieser Größen vor.

Um dieses Ziel zu erreichen wird ein Sensorelement auf Basis eines mit Dehnmessstreifen ausgestatteten Biegebleches in einem der Zähne integriert, wie Abbildung 4 zeigt. Die Integration führt dazu, dass der verwendete, bestehende Kraftleitungspfad stark geschwächt wird und somit kaum mehr zur Kraftübertragung beiträgt. Da es sich bei den Zähnen der Klauenkupplung um vier parallele Kraftleitungspfade handelt, werden die verbleibenden Pfade einer höheren Belastung ausgesetzt, wodurch die Gesamtverdrehsteifigkeit der Kupplung sinkt. Die Verformung ist jedoch weiterhin über alle parallelen Pfade gleich hoch und wird dem Messelement aufgezwungen. Aus der vom Messelement aufgenommenen Verformung kann nun auf die ursächlichen Prozessgrößen geschlossen werden. Das Drehmoment verursacht dabei eine über eine Kupplungsumdrehung konstante Verformung, wohingegen der Radialversatz je nach Ausrichtung des Messzahns zur Versatzrichtung unterschiedliche Verformungen hervorruft. Durch Auswertung des Messsignals über eine Kupplungsumdrehung können beide Größen bestimmt werden.

Die prototypische Umsetzung zeigt auch im Fall der elastischen Klauenkupplung das prinzipielle Auftreten der erwarteten Effekte, das Messsignal unterliegt jedoch ebenfalls deutlichen Störeinflüssen. Hier steht besonders das elastomertypische Verhalten des Zahnkranzes in Form von beispielsweise Kriechen und der nichtlinearen Federkennlinie im Fokus. Diese Einflussfaktoren gilt es in weiteren Iterationen der smarten elastischen Klauenkupplung zu eliminieren oder zu kompensieren.

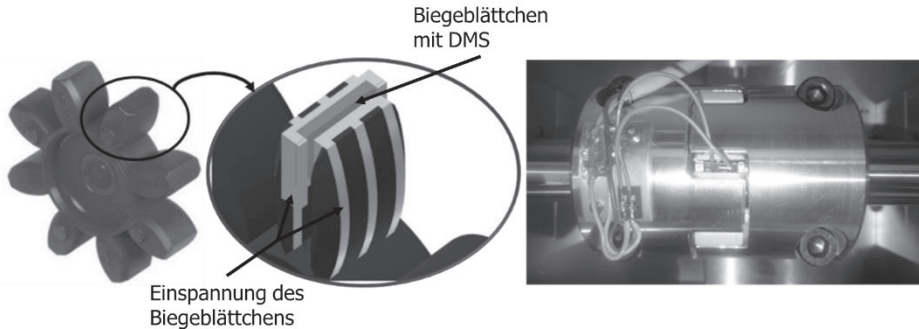


Abbildung 4: Ausgangszustand des Zahnkranzes (links, Quelle: www.maedler.de), konzeptionelle Umsetzung als CAX-Modell (Mitte) und prototypische Umsetzung (rechts)

4 Ergebnisse der Entwicklung

Um die industrielle Vernetzung und die Ziele von Industrie 4.0 weiter voranzutreiben, bietet der Ansatz der Smart Machine Elements eine gute Grundlage. Dabei ist besonders die Substituierbarkeit bestehender Maschinenelemente durch Smart ME ohne konstruktive Anpassungen des Gesamtsystems anzustreben. Damit einher geht das Ziel, die Aufwände in Berechnung, Herstellung und Nutzung einer smarten Komponente im Vergleich zur etablierten Lösung nicht deutlich zu erhöhen und trotzdem einen eindeutigen Nutzenvorteil zu schaffen.

Das Beispiel der smarten Ausgleichskupplung verdeutlicht, wie wichtig es ist, die sensorische Komponente an eine eindeutigen Struktur im Maschinenelement zu koppeln, um daran eindeutige und verwertbare Messgrößen abzuleiten. Die an der Struktur auftretenden und vom Sensor gemessenen Größen müssen bereits im Vorfeld genau zu bestimmen sein, um die Daten des Sensors in eindeutige Informationen über den Zustand des smarten Maschinenelements und damit des Prozesses, zu überführen. In den allermeisten Fällen existieren derart eindeutig zu bestimmende Bereiche noch nicht am Maschinenelement, wodurch eine Anpassung und Überarbeitung gewisser Bereiche notwendig wird. Dies ist zum einen mit zusätzlichem Aufwand verbunden, bietet zum anderen jedoch den Vorteil, eine auf die Anwendung optimierte Struktur zu entwickeln, die die Güte des Messergebnisses bereits positiv beeinflusst. Die Versuche an den prototypischen Umsetzungen der smarten Ausgleichskupplungen haben jedoch auch verdeutlicht, dass eine Reihe von Einflussfaktoren auf das Messergebnis existiert, die im Vorfeld nicht klar iden-

tifizierbar sind. Für die smarte Federstegkupplung bedeutet dies beispielsweise, dass das Messergebnis essentiell von der Geometrie der Kupplung, insbesondere der Bohrung der Klemmnaben, abhängt. Eine eventuelle Abweichung der Bohrungsmittelpunkte führt dazu, dass das Messelement stets einer Verformung ausgesetzt ist. Ähnlich verhält es sich mit den maschinenelementtypischen Passungen und Toleranzfeldern. Bei hohen Fertigungstoleranzen im Vergleich zum Messbereich des Smart ME, ist mit einer starken Beeinflussung des Ergebnisses und einer geringen Zuverlässigkeit zu rechnen. Für den Austausch „klassischer“ Maschinenelemente durch Smart ME muss bedacht werden, dass die Passung von den Toleranzen aller an der Verbindung beteiligter Komponenten abhängt. Eine hochpräzise Fertigung der smarten Ausgleichkupplung in Verbindung mit unpräzise gefertigten Wellen beispielsweise, führt mit hoher Wahrscheinlichkeit zu ungenauen Messergebnissen. Es reicht daher nicht aus, ein Maschinenelement, das über gewisse Ungenauigkeiten verfügt, die dessen Funktionserfüllung nicht beeinträchtigen, mit eindeutigen Strukturen zu versehen. Vielmehr muss ein ganzheitlicher Ansatz der Entwicklung vorgesehen werden, um eindeutige Verhältnisse zu schaffen.

Die Erkenntnisse über die Integration sensorischer Komponenten lassen sich auf die Erweiterung der Maschinenelemente durch Aktorik ebenfalls übertragen. Auch in diesem Fall muss die Wirkstruktur des Maschinenelements und der vor- und nachgelagerten Prozesse eindeutig und beschreibbar erarbeitet werden, um die gewünschte Beeinflussung mit Hilfe des smarten Maschinenelements zu erzielen. Die Integration der Aktorik ist jedoch mit erheblich höheren Aufwänden verbunden, da zum einen ansteuerungstechnische Aspekte mitberücksichtigt werden müssen und zum anderen, da die zu beeinflussenden Größen im Allgemeinen direkt über die Aktorik geleitet werden müssen. Wird der Zahnkranz der smarten elastischen Klauenkupplung beispielsweise mit Piezoaktoren zur Schwingungsbeeinflussung versehen, so erfolgt die Kraftübertragung zwischen den Kupplungshälften direkt über die Piezoelemente. Durch die Position direkt im Kraftfluss kann die Kraftübertragung einerseits gut beeinflusst werden, die Belastung der Aktorik ist dadurch jedoch sehr hoch, wodurch die Gefahr der Beschädigung steigt.

5 Ausblick und weitere Schritte

Zur weiteren Entwicklung der smarten Ausgleichkupplungen müssen nun die Störgrößen, die das Messergebnis maßgeblich beeinflussen, herausgearbeitet werden, anhand derer sich Handlungsempfehlungen zur Vermeidung oder Kompensation ableiten lassen. Darüber hinaus werden weitere Sensorprinzipien sowie der Einsatz multifunktionaler Materialien verstärkt in den Entwicklungsprozess miteinbezogen. Speziell auf die vorhandenen Konzepte

bezogene Ziele umfassen zum einen auf der Seite der smarten Federstegkupplung eine konzeptnahe Umsetzung des Messelements sowie dessen Integration im Innern der Kupplung, um die bei der Konzeptentwicklung identifizierten Potentiale und Effekte besser analysieren zu können. Auf der Seite der smarten elastischen Klauenkupplung wird ebenfalls eine Iteration des Prototyps angestrebt, dessen Kraftleitung eindeutiger über das Messelement erfolgt. Für beide Konzepte gilt es, das Problem der Energie- und Signalleitung an das rotierende System zu lösen, um neben den Versuchen im statischen Betrieb auch Untersuchungen des Verhaltens im dynamischen Betrieb zu ermöglichen.

Das Potential der integrierten Aktorik wird trotz der erwarteten Hürden weiter analysiert und bei der Entwicklung smarter Maschinenelemente fortlaufend beachtet. Dazu werden die Eignung und die Möglichkeiten der smarten elastischen Ausgleichkupplung zur aktiven Schwingungsbeeinflussung weiter untersucht, besonders im Hinblick auf die dafür einzuleitenden Kräfte. Anhand dessen können verschiedene Aktorprinzipien und deren Integration dahingehend analysiert werden, inwieweit sie sich zur Beeinflussung von Torsionsschwingungen eignen.

Literatur

- [1] „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0“, Kagermann, H., Wahlster, W. u. Helbig, J., 2013
- [2] Groche, P., Schreiner, J., Hohmann, J., Birkhold, M. u. Lechler, A.: „Industrie 4.0 – Chance auch für die Umformtechnik?“, VDI-Z, Volume 6, 2014, S. 28–31
- [3] Nordmann, R.: „Mechatronische Systeme im Maschinenbau – Vorlesungen Mechatronik & Maschinenakustik“, Shaker Verlag, Aachen, 2005
- [4] Austerjost, M., Hegmanns, T. u. Kuhn, A.: „Beitrag einer nutzungsabhängigen Instandhaltung zur Planung von Leistungsverfügbarkeit“, 2016
- [5] Groche, P. u. Brenneis, M.: “Manufacturing and use of novel sensoric fasteners for monitoring forming processes”, Measurement, Volume 53, 2014, S. 136–144

Systematische Leistungswandlerauswahl für Hybridantriebsstrangtopologien

Sebastian Ruoff

*IPEK – Institut für Produktentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

Abstract

For the development of hybrid powertrains the developer has to ensure that the customer requirements will be fulfilled in an early state of the product development process. Therefore, he has to know which parameters he has to regard and how to proceed to fulfill them. In this paper a new approach for the selection of the electrical machine and the combustion engine for the hybrid powertrain will be introduced. This approach is based on the method of the systematic selection of materials in construction processes. The parameters that have to be considered to fulfill the customer requirements regarding the driving performance of the vehicle are the acceleration and the maximum speed of the vehicle. The selection of the electrical machine and the combustion engine out of a database is done separately in acceleration-velocity-diagrams, which are also introduced in this paper. After this separate selection the selected motors can be analysed in a combined acceleration-velocity diagram, to identify the limits of the combined operation of both machines. With this information the developer can execute fuel consumption simulations to compare different hybrid topologies regarding their efficiency in the defined use case.

Keywords: Topology synthesis, Selection of propulsion machines, Hybrid electric vehicle

1 Einleitung

Auf Grund immer strengerer CO₂-Richtlinien¹ steht die Automobilindustrie vor der Herausforderung den CO₂-Ausstoß der Fahrzeugflotten zu senken. Da die Maßnahmen am Verbrennungsmotor zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes begrenzt sind, wird die Elektrifizierung der Fahrzeuge fokussiert. Hybridfahrzeuge bieten die Möglichkeit, sowohl lokal emissionsfrei zu fahren als auch lange Fahrstrecken ohne Ladepausen zurückzulegen. Dabei kann der Verbrennungsmotor in einem effizienteren Betriebspunkt betrieben werden als bei rein verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen. Hybridtopologien verursachen auf Grund der zusätzlichen elektrischen Antriebsstrangkomponenten, wie dem Elektromotor, dem Frequenzumrichter und der Batterie als elektrochemischem Energiespeicher, zusätzliche Kosten in der Herstellung. Diese erhöhen den Fahrzeugpreis, weshalb derzeit vermehrt kostengünstige Hybridtopologien auf dem Markt angeboten werden, um eine gewisse Kundenakzeptanz zu gewährleisten. Dies wird durch eine starke Anlehnung an konventionelle Antriebsstrangkonfigurationen erreicht, indem die Entwicklungs- und Fertigungskosten durch die Nutzung der gleichen Entwicklungsplattform und der gleichen Fertigungsstraßen gesenkt werden. Dabei werden die aktuellen Hybridfahrzeuge derart entwickelt, dass bestehende Baukästen modifiziert werden. Das bedeutet, dass der Verbrennungsmotor und Restantriebsstrang vordefiniert sind und lediglich im Bereich des Anfahrlements bei Fahrzeugen mit einem Automatikgetriebe der Drehmomentwandler durch eine elektrische Maschine ersetzt oder kleiner dimensioniert wird, um den nötigen Bauraum für die elektrische Maschine zur Verfügung zu stellen. Auf dem Markt verfügbare und in Serie produzierte Beispiele dafür sind der BMW ActiveHybrid 5², in dem der gleiche Verbrennungsmotor wie im BMW 535i² verbaut wird oder die Daimler-Modelle C300h³ und C250³, bei denen ebenfalls auf die gleichen Verbrennungsmotoren gesetzt wird. Andere Hersteller wie Audi, VW und Porsche verwenden die gleiche Vorgehensweise bei der Hybridisierung ihrer konventionellen Fahrzeugflotte. Als Gegenbeispiel muss an dieser Stelle der Toyota Prius erwähnt werden, von dem kein konventionelles Fahrzeugderivat auf dem Markt verfügbar ist, da er von Beginn an als Hybridfahrzeug konzipiert und entwickelt wurde. Fahrzeuge mit kostengünstigen Hybridtopologien haben zwar einen geringeren Kraftstoffverbrauch als jene mit konventionellem Antrieb, jedoch ist das Potenzial der Kraftstoffeinsparung noch nicht völlig ausgeschöpft, da die Hybridtopologie einen maßgeblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat⁴.

2 Motivation

Um das Potenzial von Hybridtopologien bestmöglich auszunutzen, wird am Institut für Produktentwicklung des KIT an Ansätzen geforscht, mit denen Hybridtopologien für definierte Anwendungsfälle identifiziert und bewertet werden können. Dabei besteht die Herausforderung zum einen in der Identifikation von neuen, technisch realisierbaren Topologien aus einer großen Lösungsmenge, die durch unterschiedlichste Kombinationen verschiedener Antriebsstrangkomponenten erzeugt werden kann. Zum anderen besteht die Herausforderung in der Identifikation der richtigen Leistungswandler für die jeweilige Topologie.

Bestehende Ansätze von Silvas⁵ und Adam⁶ zur Identifikation neuer Antriebsstrangtopologien nutzen für die Simulation und die anschließende Bewertung ihrer Topologien vorgegebene Leistungswandler, deren Auswahl nicht näher beschrieben ist. Da die Leistungswandler ebenfalls einen maßgeblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs haben, benötigt der Entwickler Unterstützung, um geeignete Leistungswandler für den gegebenen Anwendungsfall zu identifizieren. Wird zum Beispiel ein großer Verbrennungsmotor und eine kleine elektrische Maschine ausgewählt, kann die elektrische Maschine den Verbrennungsmotor lediglich unterstützen, um diesen in Bereichen besserer Wirkungsgrade betreiben zu können und dadurch die Energieeffizienz zu erhöhen. Die Leistung der elektrischen Maschine reicht jedoch nicht aus, um rein elektrisch zu fahren, da die Beschleunigungsanforderungen des Kunden nicht erfüllt werden können. Um den Entwickler bei der Auswahl von Leistungswandlern für den Einsatz in Hybridfahrzeugen besser unterstützen zu können, gilt es einen Ansatz zu entwickeln mit Hilfe dessen eine systematische Vorgehensweise zur Leistungswandlerauswahl möglich ist. Dabei sollen die Kundenanforderungen für den definierten Anwendungsfall, wie beispielsweise Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsanforderungen berücksichtigt werden. Diese haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsanforderung der Leistungswandler und müssen erfüllt werden, um den Kunden zufrieden zu stellen. Die Geschwindigkeitsanforderungen resultieren aus der Fahrzeugklasse und dem definierten Einsatzschwerpunkt und können aus dem Anwendungsfall abgeleitet werden. Nach Heinrich⁷ haben unterschiedliche Fahrertypen unterschiedliche Beschleunigungsanforderungen an das Fahrzeug in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen. Bei der Entwicklung eines Stadtfahrzeugs aus dem A- oder B- Segment (nach der EU-Konvention⁸) wird beispielsweise der Fokus auf niedrigeren Geschwindigkeiten liegen. Diese sollen zudem rein elektrisch erreicht werden, um lokal emissionsfrei fahren zu können, da dies wie bereits in der Einleitung erwähnt mit Hybridfahrzeugen kurzzeitig möglich ist. Bei einem Fahrzeug aus dem z.B. D-

oder E-Segment liegt der Fokus auf höheren Geschwindigkeitsbereichen, die erreicht werden müssen. Im Folgenden wird ein Vorgehen vorgestellt, mit dessen Unterstützung eine Vorauswahl der Leistungswandler für die Verbrauchssimulation der Hybridtopologien getroffen werden kann. Zur Veranschaulichung wird ein Anwendungsfall für ein Fahrzeug aus dem C-Segment angenommen, welches sowohl für Stadtfahrten, als auch für längere Strecken eingesetzt wird. Deshalb soll es rein elektrisch bis 40km/h Beschleunigungen von $2,3 \text{ m/s}^2$ und verbrennungsmotorisch bis 120km/h $1,7 \text{ m/s}^2$ ermöglichen. Die erforderliche Höchstgeschwindigkeit liegt bei 180km/h und rein elektrisch bei 90 km/h.

3 Grundlagen der Leistungsquellen

In diesem Kapitel werden in Abschnitt 3.1 die grundlegenden Leistungseigenschaften eines Verbrennungsmotors erläutert. In Abschnitt 3.2 wird auf die charakteristischen Eigenschaften der elektrischen Maschinen eingegangen, die für die vorläufige Auswahl der Leistungswandler für die Verbrauchssimulation der Hybridtopologien von Bedeutung sind.

3.1 Grundlagen des Verbrennungsmotors

Verbrennungsmotoren benötigen zum Anfahren ein Anfahrlement, da sie in niedrigen Drehzahlbereichen nicht betrieben werden können. Sie benötigen eine Mindestdrehzahl, die sogenannte Leerlaufdrehzahl, um den Verbrennungsprozess aufrecht zu erhalten. Das Anfahrlement ermöglicht das Durchfahren des Bereiches zwischen Drehzahl 0 und der Leerlaufdrehzahl. Des Weiteren ist die zur Verfügung stehende Zugkraft durch die Übersetzung im eingelegten Gang des Getriebes eingeschränkt. Da die ideale Zugkrafthyperbel jedoch mit

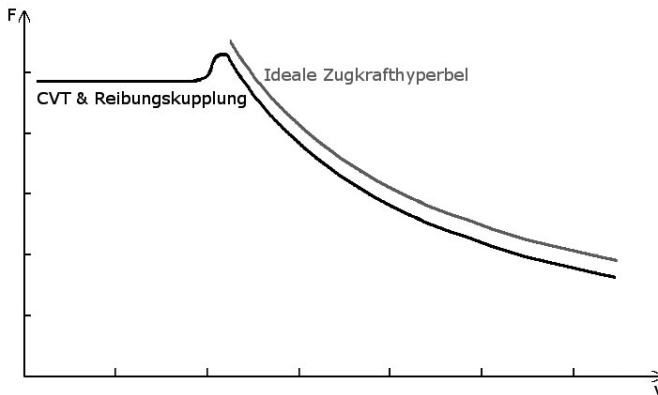


Bild 1: Fahrzustandskurve eines Verbrennungsmotors nach [9]

Hilfe eines CVT-Getriebes näherungsweise im Fahrbetrieb zur Verfügung gestellt werden kann, wird für die Auswahl des Verbrennungsmotors die Annahme getroffen, dass die ideale Zugkrafthyperbel wie in Bild 1 dargestellt zur Verfügung steht. [9]

3.2 Grundlagen der elektrischen Maschinen

Elektrische Maschinen sind dadurch gekennzeichnet, dass das maximale zur Verfügung stehende Drehmoment bereits ab der Drehzahl 0 vorliegt und bis zur sogenannten Eckdrehzahl konstant bleibt, wie in Bild 2 durch die gestrichelten Kurven dargestellt. Ab dieser Drehzahl liegt bei maximalem Drehmoment die maximale Leistung vor, die bei idealisierter Betrachtung der elektrischen Maschine bis zur maximalen Drehzahl, im sogenannten Feldschwächebereich, konstant verfügbar ist, wie in Bild 2 an Hand der durchgezogenen Kurve erkennbar ist. Auf Grund dieser Eigenschaften sind elektrische Maschinen für Fahrtriebe interessant, da sie im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren kein Anfahrlement zum Anfahren benötigen und eine konstante Beschleunigung bis zum Feldschwächebereich ermöglichen können. Die maximale Drehzahl einer elektrischen Maschine ist ungefähr zwei bis dreimal so hoch wie die Eckdrehzahl. Das zur Verfügung stehende Drehmoment fällt im Feldschwächebereich ab. Die schwarz dargestellten Kurven beschreiben den maximalen Drehmomenten- und Leistungsverlauf, welche nicht dauerhaft zur Verfügung gestellt werden können.

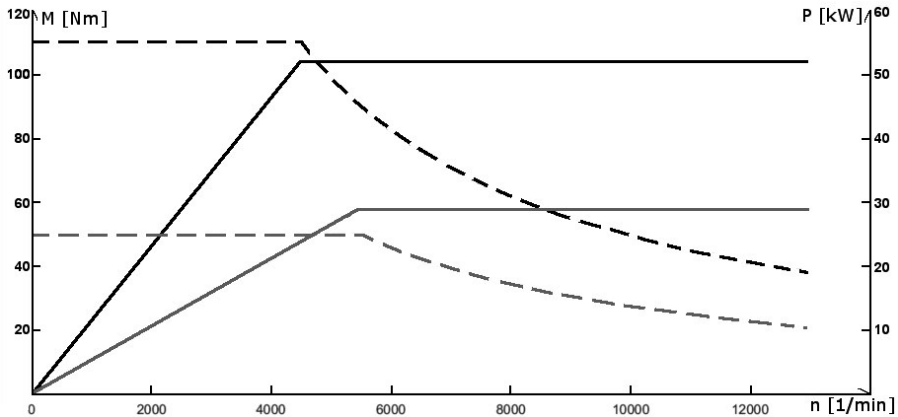


Bild 2: Drehmoment- und Leistungskurven einer elektrischen Maschine nach [10]

Die dauerhaft zur Verfügung stehenden Drehmomente und Leistungen sind durch die grauen Kurven in Bild 2 dargestellt. Um die Kundenanforderungen dauerhaft gewährleisten zu können, wird bei der Auswahl der elektrischen Maschine lediglich das dauerhaft zur Verfügung stehende Drehmoment und die dauerhaft zur Verfügung stehende Leistung betrachtet. [10]

4 Systematische Vorgehensweise zur Auswahl der Leistungsquellen

Analog zur systematischen Werkstoffauswahl¹¹ im Bereich der Konstruktion, bei der verschiedene Materialeigenschaften in einem Werkstoffauswahldiagramm gegeneinander aufgetragen werden, wie in Bild 3 am Beispiel der Elastizitätsmodul-Dichte-Karte dargestellt, soll ein solches Verfahren zur Auswahl von Leistungswandlern in diesem Beitrag vorgestellt werden.

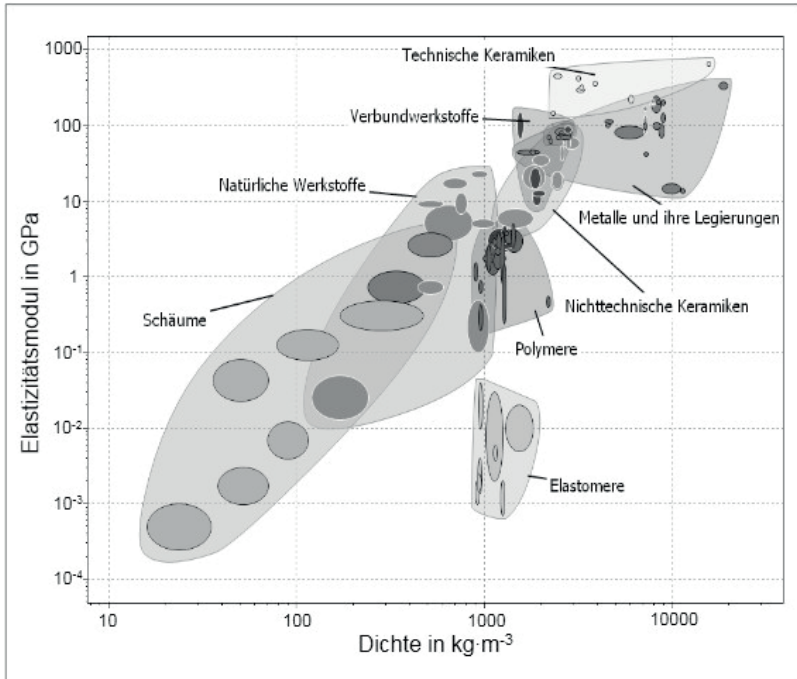


Bild 3: Werkstoffauswahldiagramm: Doppelt-logarithmische Elastizitätsmodul-Dichte-Karte¹¹

Dazu sind zunächst die entscheidenden Parameter zu identifizieren, die für die Auswahl der Leistungswandler notwendig sind. Wie bereits in der Motivation beschrieben, sind die entscheidenden Kriterien für die Erfüllung der Kundenanforderungen bezüglich der Fahrleistungen für den definierten Anwendungsfall, die zur Verfügung stehende Beschleunigung in einem definierten Geschwindigkeitsbereich und die maximal erreichbare Fahrzeuggeschwindigkeit. Aus diesen Kriterien lassen sich für ein Leistungswanderauswahldiagramm die Parameter Beschleunigung und Geschwindigkeit ableiten, sodass ein a-v-Diagramm zur Identifikation der Leistungswandler erstellt werden muss. Aus den bekannten Größen Drehmoment, Drehzahl und Leistung der elektrischen Maschine können über die physikalischen Zusammenhänge $M = m \cdot a \cdot r_{\text{dyn}}$ und $v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_{\text{dyn}}$ die zur Verfügung stehenden Drehmomentverläufe über der Drehzahl in Beschleunigungsverläufe über der Geschwindigkeit umgerechnet werden. Dabei gilt die Annahme, dass die Masse des Fahrzeuges und der dynamische Radius der Reifen bekannt sind oder geschätzt werden können und der Elektromotor zunächst über ein Getriebe mit der Übersetzung 1 an die angetriebene Achse angebunden ist. Da die Gleichun-

gen auf Grund der konstanten Faktoren linear sind, kann die Drehmomentkurve über der Drehzahl des Elektromotors direkt in einem a-v-Diagramm abgebildet werden. Analog kann über die Beziehung $F=m \cdot a$ aus dem Fahrzustandsdiagramm des Verbrennungsmotors das a-v-Diagramm mit der idealen Leistungshyperbel für den Verbrennungsmotor nachgebildet werden.

4.1 Auswahl einer elektrischen Maschine mit Hilfe des a-v-Diagrammes

In das a-v-Diagramm für die elektrische Maschine wird zunächst die Fahrwiderstandskurve in Form der aufzubringenden Beschleunigung eingezeichnet, die benötigt wird, um die Fahrzeuggeschwindigkeit konstant aufrecht zu erhalten, wie in Bild 4 durch die untere gestrichelte Linie dargestellt. Dazu wird die Fahrwiderstandskraft analog zur idealen Leistungshyperbel in eine Fahrwiderstandsbeschleunigung umgerechnet. Anschließend wird eine weitere Kurve, mit dem Abstand der in den Anforderungen definierten Beschleunigung von $2,3 \text{ m/s}^2$ (a_{eff}), zur Fahrwiderstandsbeschleunigung in das a-v-Diagramm eingezeichnet. Anschließend werden die für das Unternehmen zur Fahrzeugentwicklung verfügbaren elektrischen Maschinen aus einer Datenbank ausgewählt und in das a-v-Diagramm eingetragen. Dabei werden zunächst die Eckpunkte, in das a-v-Diagramm eingetragen und anschließend die zugehörigen Leistungshyperbeln eingezeichnet. Auf den Leistungshyperbeln lassen sich die Eckpunkte der elektrischen Maschinen bei Variation der Übersetzung des Getriebes verschieben. Dadurch wird sichergestellt, dass tatsächlich nur die Leistungsfähigkeit der verschiedenen elektrischen Maschinen bezüglich der Beschleunigungsanforderung überprüft wird. Nach der Durchführung dieser Schritte liegt das in Bild 4 dargestellte a-v-Diagramm mit den eingezeichneten Leistungshyperbeln der elektrischen Maschinen, deren Eckpunkten beim Einsatz einer Übersetzung von 1 und die Fahrwiderstandsbeschleunigungskurve sowie die Kurve der zusätzlich zur Verfügung zu stellenden Beschleunigung vor.

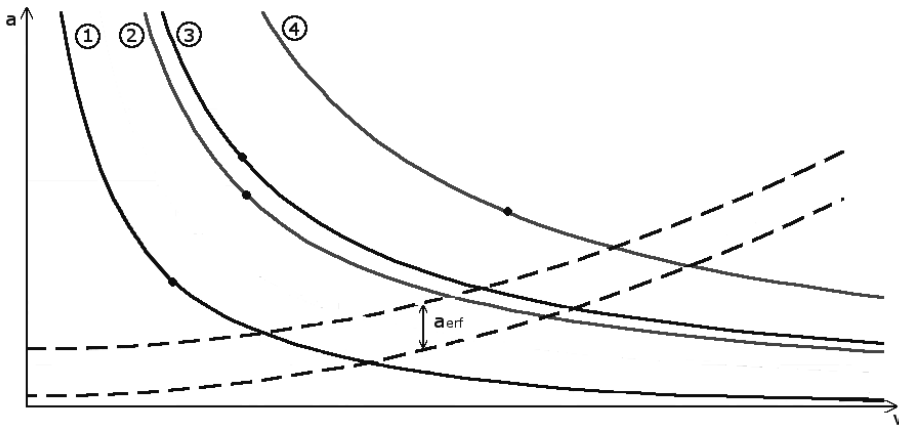


Bild 4: a-v-Diagramm zur Auswahl elektrischer Maschinen mit Leistungskurven

Im nächsten Schritt muss überprüft werden, ob die elektrischen Maschinen die Beschleunigungsanforderung bei der definierten Geschwindigkeit von 40 km/h erfüllen, dazu wird bei dieser Geschwindigkeit ($v_{EM,erf}$) eine parallele Linie zur y-Achse eingetragen. Der Bereich links neben dieser Linie wird ausgegraut, wie in Bild 5 dargestellt, da die Maschinen, deren Leistungshyperbel oberhalb der erforderlichen Beschleunigungskurve nur in diesem Bereich liegen, die Anforderungen nicht erfüllen. Ebenso wird der Bereich unterhalb der erforderlichen Beschleunigungskurve ausgegraut. Die Eckpunkte der Maschinen, deren Leistungshyperbel außerhalb des ausgegrauten Bereichs oberhalb der erforderlichen Beschleunigungskurve verlaufen, werden durch die Verwendung einer Übersetzung, die von 1 abweicht, in den Bereich rechts neben der erforderlichen Geschwindigkeit und oberhalb der Beschleunigungskurve verschoben. Dadurch wird sichergestellt, dass die eingesetzten elektrischen Maschinen in Kombination mit der verwendeten Übersetzung die Beschleunigungsanforderung bei der definierten Geschwindigkeit erfüllen, falls der Eckpunkt zuvor unterhalb der erforderlichen Beschleunigungskurve liegt. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass die Maschinen nicht überdimensioniert sind, falls der Eckpunkt zuvor links neben der erforderlichen Geschwindigkeit liegt und dann entlang der Leistungshyperbel in Bereiche höherer Geschwindigkeiten bei niedrigerer Beschleunigungsreserve verschoben wird. Die elektrischen Maschinen, deren Eckpunkt sich durch Verschiebung im zulässigen Bereich befindet, werden anschließend hinsichtlich der Erfüllung der Anforderung an die elektrische Maximalgeschwindigkeit von 90 km/h ($v_{max,erf}$) überprüft. Dazu wird im Schnittpunkt der Leistungshyperbel mit der Fahrwiderstandsbeschleunigungskurve die vorliegende Geschwindigkeit betrachtet und mit der erforderlichen Maximalgeschwindigkeit verglichen. Falls mehrere Maschinen die

Anforderungen erfüllen, wird aus Kostengründen zunächst die kleinstmögliche Maschine ausgewählt. Für den vorliegenden Anwendungsfall erfüllt lediglich die elektrische Maschine 4 in Bild 5 sowohl die Anforderung an die erforderliche Beschleunigung als auch die Anforderung an die Maximalgeschwindigkeit und übertrifft diese sogar.

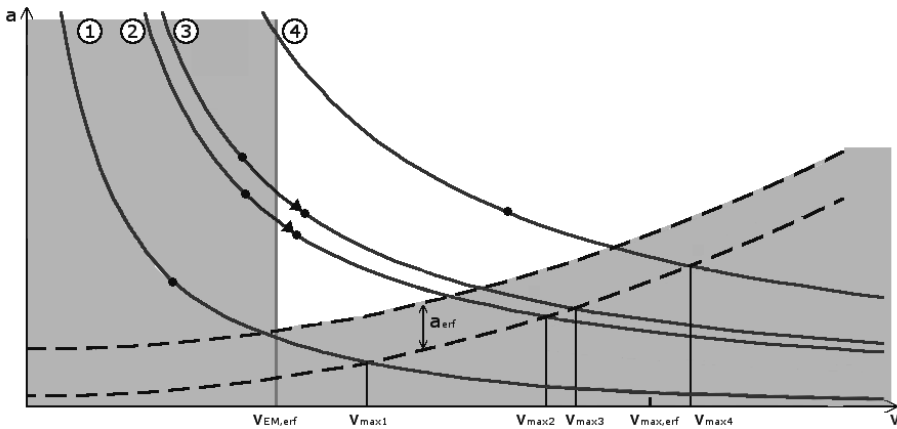


Bild 5: a-v-Diagramm zur Auswahl elektrischer Maschinen mit Eckpunktverschiebung und erforderlicher Maximalgeschwindigkeit

4.2 Auswahl eines Verbrennungsmotors mit Hilfe des a-v-Diagrammes

Das Vorgehen zur Auswahl des Verbrennungsmotors ist analog zur Auswahl der elektrischen Maschine unter der Annahme, dass alle Punkte der Leistungshyperbel im Fahrbetrieb durch eine entsprechende Übersetzung angefahren werden können. Daher erfolgt die Auswahl durch Überprüfung der Beschleunigungsvorgabe bei der vorgegebenen Geschwindigkeit. Anschließend werden die Leistungshyperbeln, die durch den zulässigen Bereich verlaufen auf die Maximalgeschwindigkeitsanforderung im Schnittpunkt mit der Fahrwiderstandsbeschleunigungskurve überprüft. Auch hier gilt es aus Kostengründen den kleinstmöglichen Verbrennungsmotor auszuwählen.

4.3 Überprüfung der Gesamtleistung der ausgewählten Maschinen im a-v-Diagramm

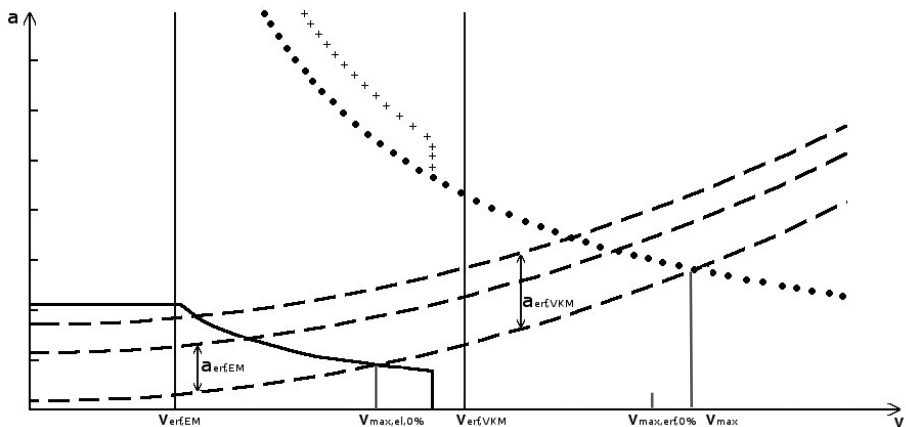


Bild 6: a-v-Kurve Elektro- und Verbrennungsmotor kombiniert

Nach der Auswahl der elektrischen Maschine und des Verbrennungsmotors können deren Leistungshyperbeln in ein gemeinsames Diagramm eingezeichnet werden, wie in Bild 6 dargestellt. Die durchgezogene Leistungshyperbel ist die der elektrischen Maschine und die gepunktete Linie die des Verbrennungsmotors. Die mit Kreuzen dargestellte Leistungshyperbel ergibt sich durch die Addition der Leistungshyperbel der elektrischen Maschine zu der des Verbrennungsmotors. Dabei ist die maximale Drehzahl der elektrischen Maschine zu beachten, die bei der ungefähr zwei- bis dreifachen Eckdrehzahl liegt. Mit der gewählten Übersetzung kann bis zu Geschwindigkeiten von 100 km/h rein elektrisch gefahren werden und bei Gefälle oder im kombinierten Betrieb mit dem Verbrennungsmotor bis ungefähr 110 km/h. Danach wird die Drehzahlgrenze der elektrischen Maschine erreicht. Ohne eine geeignete Übersetzungsauswahl kann die elektrische Maschine nicht bei höheren Geschwindigkeiten eingesetzt werden, weshalb in diesen Betriebsbereichen nur rein konventionell angetrieben werden kann. Der Verbrennungsmotor kann das Fahrzeug bis zur geforderten Maximalgeschwindigkeit von 180 km/h und darüber hinaus antreiben und erfüllt die Beschleunigungsanforderung von $1,7 \text{ m/s}^2$ bis 120 km/h. Im kombinierten Betrieb von elektrischer Maschine und Verbrennungsmotor in Geschwindigkeitsbereichen bis 110 km/h ist die Beschleunigungsreserve im Vergleich zur geforderten Beschleunigung sehr hoch.

Die vorgestellte Vorgehensweise zur Leistungswandlerauswahl hat den Anspruch auch für das bisherige konventionelle Vorgehen eingesetzt zu werden, da die Abfolge der Leistungswandlerauswahl seriell erfolgt und deshalb auch bei gegebenem Verbrennungsmotor eine elektrische Maschine ausgewählt und der kombinierte Betriebsbereich der Leistungswandler analysiert werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorgestellten systematischen Vorgehensweise zur Leistungswandlerauswahl für Hybridantriebsstrangtopologien können für einen definierten Anwendungsfall die entsprechenden elektrischen und verbrennungsmotorischen Leistungswandler aus hinterlegten Datenbanken ausgewählt werden. Dabei wird das a-v-Diagramm als Auswahldiagramm eingesetzt, um die für den Fahrbetrieb zu erfüllenden Kundenanforderungen, Beschleunigung und Geschwindigkeit, bewerten zu können. In der kombinierten Betrachtung der elektrischen Maschine und des Verbrennungsmotors im a-v-Diagramm können Grenzen des kombinierten Betriebs beider Leistungswandler identifiziert werden. Die vorgestellte Vorgehensweise kann erweitert werden, indem weitere Kriterien, wie die Kosten der Leistungswandler in die Auswahl als Parameter Euro je Kilowatt in die Leistungswandlerauswahl integriert werden und damit zum Beispiel eine Paretofrontoptimierung durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Council of the European Union (Hrsg.): Informal agreement on car CO₂ emissions reduction. Pressemitteilung, 29.11.2013.
- [2] <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/5er/limousine/2013/technische-daten.html>
- [3] http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/class/w205/facts/technicaldata/models.html
- [4] Li, X.; Williamson, S.: "Comparative Investigation of Series and Parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) Efficiencies Based on Comprehensive Parametric Analysis", Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, TX, 2007.

-
- [5] Silvas, E. et al.: "Functional and Cost-Based Automatic generator for Hybrid Vehicles Topologies", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.20, No.4, 2015.
- [6] Adam, H.: "Automated Topology Synthesis and Optimization of Hybrid Electric Vehicle Powertrains", Waterloo, 2014.
- [7] Heinrich, D.: "Modellierung des Fahrerverhaltens zur Ermittlung von Bauteilbelastungen im Fahrzeugantriebsstrang", Dissertation: Universität Karlsruhe, Institut für Produktentwicklung, 2016.
- [8] Europäische Kommission: "Kraftfahrzeugvertrieb und Kundendienst in der Europäischen Union", 2002.
- [9] Naunheimer, H. et al.: "Fahrzeuggetriebe", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [10] Doppelbauer, M.: "Elektrische Antriebe für hybride und vollelektrische Fahrzeuge, Teil 2", ETG-Mitgliederinformation, VDE, Frankfurt am Main, 2016.
- [11] Henning, F.; Moeller, E.: "Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung", Carl Hanser Verlag, München, 2011.



Modellbasierte Anforderungsermittlung durch systematische Prozessanalyse als Basis des Hygienic Designs

Jean-Paul Beetz, Hermann Kloberdanz

*Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente
Technische Universität Darmstadt*

Abstract

This paper presents an approach to identify hygienic and ergonomic requirements for the development of food processing machines by an extensive process analysis. For the development of such machines, it is essential to detect hygiene risks in order to consider them as early as possible. Since hygiene risks occur in processes within the life cycle processes of the machine, they can be analysed using the detailed process model. The extended process model enables the detection of unwanted interactions between the process, the user and the product. Thus, the proposed approach allows extracting hygienic and user oriented requirements comprehensively and uses the result a basis for the development process.

Keywords: Hygienic Design, Requirements Engineering, Process Analysis, Process Model

1 Einleitung und Zielsetzung

Maschinen und Anlagen, die für die Verarbeitung von Lebensmitteln eingesetzt werden, unterliegen hohen Hygieneanforderungen. Unter hygienege- rechtem Gestalten („Hygienic Design“) wird die Gestaltung von Maschinen für

eine einfache Reinigung und eine kontaminationsfreie Lebensmittelproduktion verstanden [1]. Für die Entwicklung hygienegerechter Maschinen existieren Normen und Gestaltungsrichtlinien, in denen Hinweise zur Gestaltung hygienegerechter Maschinen gegeben werden. Die Zielsetzung dieser Dokumente ist beispielsweise das Auflisten von verwendbaren Werkstoffen und deren erforderlichen Eigenschaften (u. a. die Zusammensetzung und die Oberflächenbeschaffenheit) sowie die Beschreibung weiterer konstruktionspezifischer Anforderungen zur Reduzierung des Kontaminationsrisikos [2, 3]. Im Vergleich zur Entwurfsphase bzw. der Phase der Feingestaltung stehen Hilfsmittel zur Erfassung der Hygieneanforderungen während früherer Produktentwicklungsphasen bislang nicht zur Verfügung. Für ein hohes Maß an Hygiene ist es weiterhin notwendig, eine einfache manuelle Reinigung der Maschine durch den Nutzer zu gewährleisten. Daher ist es bei der Entwicklung von Lebensmittelmaschinen – neben der Beachtung von Hygieneanforderungen – von großer Wichtigkeit den Bediener bzw. Nutzer (ergonomische Aspekte) bei der Anforderungsermittlung zu berücksichtigen [4]. In den frühen Phasen der Produktentwicklung sind die Beeinflussungsmöglichkeiten hinsichtlich der Funktionalität und der Berücksichtigung spezieller Anforderungen noch sehr hoch und mit geringem Aufwand verbunden [5]. Aus diesem Grund soll ein Ansatz zur Analyse von technischen Systemen vorgestellt werden, der es ermöglicht Hygiene- und Ergonomieanforderungen zu ermitteln und bei der Entwicklung einer Lebensmittelmaschine bewusst zu nutzen. Dabei soll gezielt auf die Möglichkeit der Analyse der Hygiene solcher Maschinen in den frühen Phasen eingegangen werden.

2 Herausforderungen des Hygienic Designs

Bei der Entwicklung von Maschinen, die für die Verarbeitung von Lebensmitteln eingesetzt werden, hat die Einhaltung von Hygieneanforderungen höchste Priorität. Die Produktentwicklung muss während des Produktentwicklungsprozesses der Maschine stets die Prozesse des Produktlebenslaufs antizipieren und sie insbesondere im Hinblick auf Hygieneaspekte analysieren. Mit jeder getroffenen Entscheidung und der Festlegung von Produkteigenschaften während der Entwicklung werden direkt oder indirekt Prozesse des Produktlebenslaufs beeinflusst (siehe Bild 1) [6]. Daher ist es für die Entwicklung einer hygienegerechten Maschine von hoher Wichtigkeit geeignete konstruktive Maßnahmen im Hinblick auf eine Minimierung von Kontaminationsrisiken durch das gezielte Antizipieren von Produktlebenslaufprozessen festzulegen.

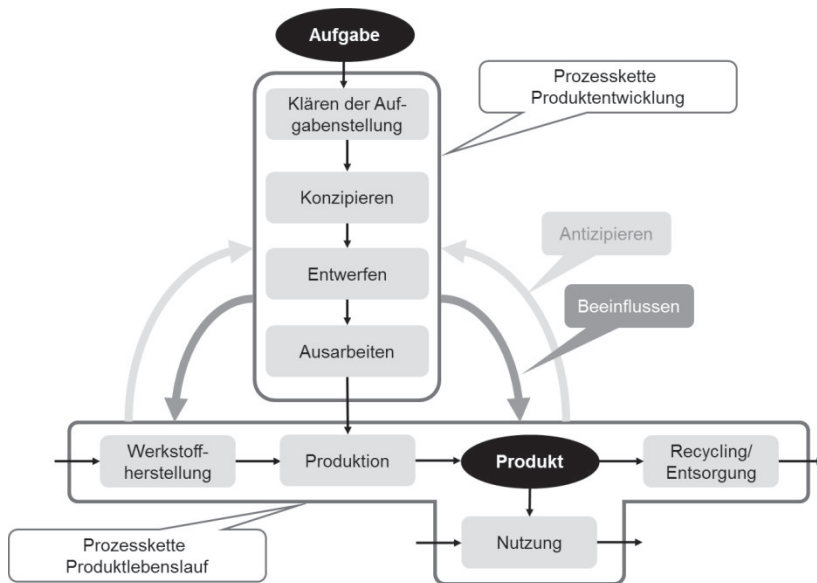


Bild 1: Die Prozessketten Produktentwicklung und Produktlebenslauf [6]

Mittels der Analyse bestehender Anlagen und Maschinen zur Verarbeitung von Lebensmitteln ist es möglich, die für die Hygiene relevanten Produktlebenslaufphasen zu identifizieren. Die Nutzungsphase der Maschine nimmt dabei eine zentrale Rolle ein, da während dieser Phase durch die Verarbeitung des Lebensmittels und beispielsweise der nachfolgenden Reinigung eine Kontamination entsteht. Sollten beim Antizipieren der zugehörigen Prozesse Fehler unterlaufen oder keine darauf aufbauenden konstruktiven Maßnahmen festgelegt werden, besteht ein erhöhtes Kontaminationsrisiko. Ziel der Produktentwicklung ist es also, mittels umfassender Analyse relevanter Prozesse der Produktlebenslaufphasen, insbesondere der Nutzungsphase, Anforderungen abzuleiten und in Produkteigenschaften umzusetzen, sodass das Risiko einer Kontamination des zu produzierenden Lebensmittels auf ein Minimum sinkt.

Im gesamten Lebenslauf der Maschine existieren einige Phasen, die hinsichtlich der Hygiene eine geringe Rolle einnehmen (Kauf, Außerbetriebnahmen usw.) und bei der Ermittlung von Anforderungen im Hinblick auf die Hygiene weniger wichtig sind. Phasen, die hingegen eine hohe Wichtigkeit haben, sind solche, in denen durch stattfindende Prozesse eine Kontamination verursacht wird (siehe Bild 2). Beispielsweise besteht das Risiko, dass nach der Reinigung durch Rückstände von Reinigungsmittel in der Maschine das später zu verarbeitende Lebensmittel verunreinigt wird. Auch während des

eigentlichen, wertschöpfenden Einsatzprozesses besteht das Potenzial zur Kontaminationsbildung beispielsweise durch lokale, sogenannte Totvolumen, aus denen das Lebensmittel ohne zusätzlichen Aufwand nicht entweichen kann. Diese für die Entwicklung einer hygienegerechten Maschine relevanten Phasen müssen eine besondere Aufmerksamkeit während der Entwicklung erfahren.

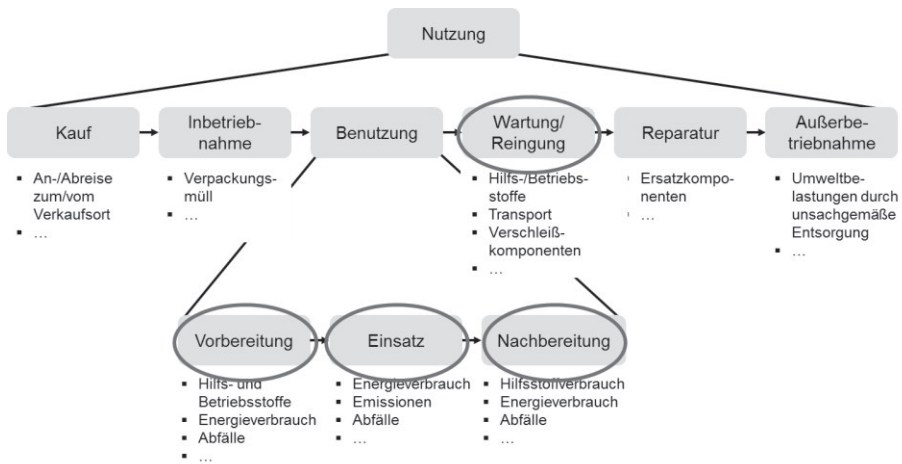


Bild 2: Systematisierung der Nutzungsphase in Teilphasen [7] sowie Markierung hygienerelevante Phasen

Um den Produktentwickler bei der Entwicklung hygienegerechter Maschinen zu unterstützen, existieren eine Reihe von Hilfsmitteln in Form von Gestaltungsleitsätzen bzw. Gestaltungskriterien. Darin werden Beispiele und Regeln zur hygienegerechten Gestaltung der Maschinen beschrieben [2,3]. Diese beziehen sich jedoch zum Großteil auf die Feingestaltung von Bauteilen und die Wahl von Werkstoffen und somit auf einen späten Zeitpunkt in der Produktentwicklung. Nach Hauser umfasst Hygienic Design, neben der hygienegerechten Gestaltung, zudem die Anforderung der „*leichten Reinigbarkeit*“ [1]. Eine weitere Konkretisierung dieser Anforderung wird jedoch nicht getroffen.

Neben den Beispielen, die primär auf die Feingestaltung Bezug nehmen, existiert kein ganzheitlicher Ansatz, der die Anforderungen aus den relevanten Phasen des Produktlebenslaufs berücksichtigt. Hygienische Aspekte werden daher derzeit erst zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt der Entwicklung berücksichtigt und die Umsetzung wird wenig bis gar nicht methodisch unterstützt. Es ist erkennbar, dass die bisherigen Ansätze und Hilfsmittel des Hygi-

enic Designs lediglich auf die „Benutzung“ und Anforderungen an die „Wartung/Reinigung“ in Form von gestalterischen gut/schlecht Beispielen zielen. Ein vollständiger methodischer Ansatz ist nicht bekannt.

Die jeweiligen dargestellten Produktlebenslaufphasen sollten im besonderen Maße bei der Entwicklung einer hygienegerechten Lebensmittelproduktionsmaschine berücksichtigt werden. Die gesonderte Umsetzung der Anforderungen aus jeder Phase in Produkteigenschaften als solches stellt bisweilen keine Herausforderung dar. Durch die bestehenden Wechselwirkungen der Anforderungen aus jeder Phase entstehen zum einen positive Beeinflussungen (z. B. in Form von Synergieeffekten) und zum anderen negative Beeinflussungen (z. B. Zielkonflikte oder Restriktionen). Bei der Entwicklung einer neuen Maschine müssen diese Informationen über Synergien und Zielkonflikte oder Restriktionen zielführend verarbeitet werden. Das Ausnutzen von Synergieeffekten und das Lösen von Zielkonflikten durch die Priorisierung der Anforderungen stellt hierbei eine große Herausforderung dar, für die bislang kein methodisches Vorgehen im Bereich der Lebensmittelhygiene existiert.

3 Methodischer Analyseansatz

Zur Ermittlung von Anforderungen ist es essenziell, die Produktlebenslaufphasen und die stattfindende Prozesse zu antizipieren und diese systematisch zu analysieren. Der hier genutzte Ansatz zur Ermittlung der Anforderungen basiert dabei auf einem abstrakten Modell: dem sogenannten erweiterten Prozessmodell nach Klobardanz, das den Zusammenhang zwischen bestehenden Prozess- und Produktmodellen herstellt [8]. Das ursprünglich für die Analyse technischer Systeme auf Unsicherheit erarbeitete Prozessmodell eignet sich ebenso für die Analyse technischer Systeme hinsichtlich Hygieneaspekte.

3.1 Modellierung des Systems

Das für die Analyse der Prozesse genutzt Prozessmodell ermöglicht eine detaillierte und differenzierte Beschreibung der Wechselwirkung zwischen allen relevanten systemumgebenden Elementen. Weiterhin bietet sich die Unterteilung der Maschine (als Arbeitsmittel im Einsatzprozess) in die Teilgebiete: Lebensmittelbereich, Spritzbereich sowie Nicht-Lebensmittelbereich an, um eine spezifische Analyse der Beziehungen zu ermöglichen (siehe Bild 3) [2]. Das Arbeitsmittel transformiert eine vorgegebene Eingangsgröße (Energie, Signal, Stoff) in eine gewollte Wirkgröße, die auf den Prozess einwirkt. Ungewollte Wechselwirkungen entstehen zwischen Arbeitsmittel und den umliegenden Elementen sowie zwischen dem Prozess und den umliegenden Elementen. Die ungewollten Wechselwirkungen oder Nebengrößen sind

mit schrägen Pfeilen gekennzeichnet, die gewollten durch vertikale bzw. horizontale Pfeile.

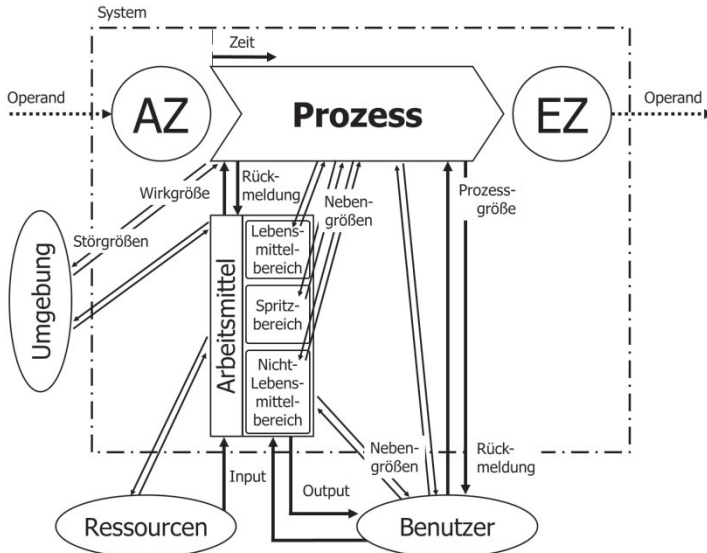


Bild 3: Angepasstes Prozessmodell nach [8]

Während im Einsatzprozess das zu verarbeitende Lebensmittel als Operand fungiert, werden während anderer Prozesse andere Operanden transformiert. Beispielsweise wird während der manuellen Reinigung die verschmutzte Maschine vom Anfangszustand „schmutzig“ in den Endzustand „gereinigt“ überführt. Als Arbeitsmittel dient für diesen Prozess ein Reinigungswerkzeug, das der Benutzer nutzt, um seine Muskelkraft in Kombination mit z. B. chemischen Reinigungsmitteln als geeignete Wirkgröße auf den Prozess wirken zu lassen. Es ist also bei der Modellierung des Systems von großer Wichtigkeit zu beachten, welcher Prozess abgebildet werden soll und welche Elemente als Arbeitsmittel (Operator) dienen.

Entscheidend bei der Entwicklung hygienegerechter Maschinen ist die Vermeidung von ungewollten Wechselwirkungen zwischen Prozess und Arbeitsmittel, Umgebung und Benutzer sowie zwischen Arbeitsmittel, Ressourcen und Benutzer. Diese Wechselwirkungen beschreiben, dass beispielsweise Schmutz von der Umgebung in den Prozess gelangt und Einfluss auf den Operanden (im Einsatzprozess das Lebensmittel) nimmt. Bei der Entwicklung hygienegerechter Maschinen ist es somit von großer Wichtigkeit, diese unge-

wollten Wechselwirkungen durch konstruktive Maßnahmen zu verhindern, sodass keine Kontamination des Lebensmittels entsteht.

Der Einfluss des Benutzers ist mithilfe der Wechselwirkung zwischen ihm und den anderen Elementen direkt beschreibbar. Jegliche Wechselwirkungen des Benutzers mit anderen Elementen haben Einfluss auf ergonomische und hygienische Aspekte. Überschreitet beispielsweise die von Benutzer aufgebraachte Inputgröße auf das Arbeitsmittel seine zulässige Beanspruchbarkeit, widerspricht dies den Anforderungen der Ergonomie [10].

3.2 Aufbau einer beispielhaften Lebensmittelmaschine

Für die Analyse der Gesamtmaschine mithilfe des Prozessmodells sollte zunächst der Aufbau der Maschine in Form einer Baustruktur antizipiert werden (z. B. durch Analyse bestehender, ähnlicher Maschinen). Eine beispielhafte Baustruktur einer Maschine, die das dosierte Fördern einer Gießmasse ermöglicht, ist in Bild 4 dargestellt. Darin finden sich die Gliederung der Maschine in einzelne Komponenten und die Einteilung in „Lebensmittelbereich“ und „Spritzbereich“ wieder.

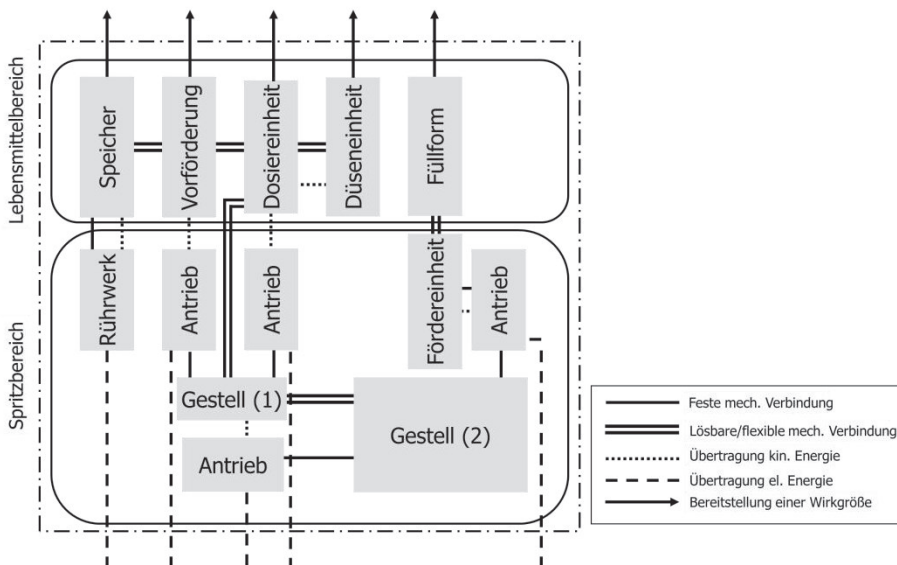


Bild 4: Beispielhafter Aufbau einer Lebensmittelmaschine

Die Einteilung der Maschine in diese Bereiche ermöglicht eine differenzierte Analyse der Neben- und Störgrößen. Weiterhin sind bereitgestellte Wirk-

größen, mögliche mechanische Verbindungen sowie Energieflüsse dargestellt – soweit dies zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung schon bekannt ist. Die erstellte Baustruktur der Maschine dient als Produktmodell zur Beschreibung des Arbeitsmittels im angepassten Prozessmodell.

3.3 Hygienerrelevante Prozesse

Wie bereits erwähnt existieren im Produktlebenslauf der Maschine Phasen und damit verbunden auch Prozesse, die eine hohe Bedeutung und einen hohen Einfluss auf die Hygiene der Maschine haben. Neben dem bereits beschriebenen Einsatzprozess, der die eigentliche Wertschöpfung darstellt (z. B. „dosiertes gießen“), haben andere Prozesse, die ebenfalls beim Kunden stattfinden, sowie Produktionsprozesse Einfluss auf die Hygiene und müssen bei der Entwicklung berücksichtigt werden. In Tabelle 1 ist eine Auswahl hygiene-relevanter Prozesse dargestellt. Diese Prozesse lassen sich nach Konkretisierungsgrad und Ausführung der Maschine weiter detaillieren. Für eine frühzeitige Analyse und Ermittlung von Anforderung sind diese von zweckdienlicher Ausprägung. Bisherige Ansätze des Hygienic Designs beziehen sich primär auf den Einsatzprozess und fordern zudem eine „leichte Reinigbarkeit“ [10]. Eine umfassende Prozessanalyse, wie sie hier beschrieben ist, findet bislang keinen Einzug in die Entwicklung.

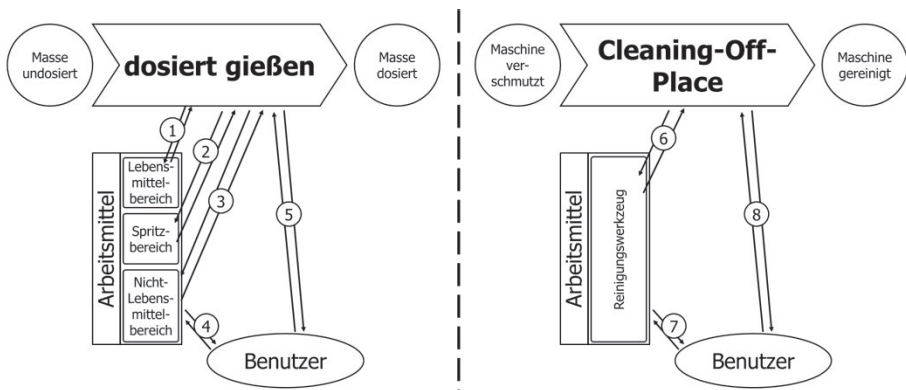
Tabelle 1: Auswahl hygiene-relevanter Prozesse

Phase	Produktion		Nutzung						
	Fertigung	Montage	Inbetriebnahme	Vorbereitung	Einsatz	Nachbereitung	Cleaning-in-Place	Reinigungs- montage	Cleaning-off-Place
Prozesse									

3.4 Systematische Anforderungsermittlung

Zur Ermittlung von Anforderungen werden im folgenden Schritt die vorher beschriebenen Prozesse aus Tabelle 1 mittels des detaillierten und angepassten Prozessmodells systematisch analysiert. Die dadurch ermittelten Wechselwirkungen werden in Form von Anforderungen in einer Anforderungsliste

dokumentiert und müssen systematisch in Produkteigenschaften überführt werden. In Bild 5 ist ein Ausschnitt der Analyse zweier Prozesse dargestellt. Sie stellen eine Basis zur Ableitung von hygienerelevanten Anforderungen dar. Insbesondere ist hervorzuheben, dass beim gewählten beispielhaften Einsatzprozess „dosiert gießen“ das Arbeitsmittel die Lebensmittelmaschine ist. Während des Prozesses „Cleaning-Off-Place“ hingegen erfährt die Lebensmittelmaschine als Operand eine Zustandsänderung von „verschmutzt“ (Anfangszustand) zu „gereinigt“ (Endzustand).



Wechselwirkung	Einsatzprozess („dosiert gießen“)				Cleaning-Off-Place			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Hygiene	- Kontamination des Lebensmittels durch: Verschleiß, Rückstände der Reinigung - ...	- Eintritt von verdorbenem Lebensmittel - Kontamination durch Schmierstoffe, Verschleiß etc. - ...	- Kontamination durch Schmierstoffe, Verunreinigung durch Staub - Verkleben von Antriebskomponenten	- Eintritt von Schmutz durch Benutzer (Haare, ...) - ...	- Beschmutzung des Benutzers durch Lebensmittel - Eintritt von Haaren, Hautpartikeln etc. - ...	- Rückstände des Reinigungswerkzeugs/-mittels - Verschleiß der Reinigungsoberfläche - ...	- Beschmutzung des Benutzers durch Reinigungsmittel - Allergien/Verletzungen durch Werkzeug - Unangenehme Körperhaltung - Hohe Beanspruchung des Körpers - ...	- Beschmutzung des Benutzers durch Gießmasse - Beschädigung der Bauteile - Verletzung durch Bauteile - Beanspruchung durch schwere Bauteile - schlechte Erreichbarkeit der Reinigungsoberflächen
Ergonomie				- Schlechte Erreichbarkeit der Bedienelemente, Fehlbedienung - ...	- Schlechte Kontrolle des Prozesses - Schwierige Einflussnahme auf Prozessparameter - ...			

Bild 5: Auswahl von Wechselwirkungen

Durch diesen Wechsel von Arbeitsmittel (Operator) zu Operand ist es möglich Anforderungen an die Lebensmittelmaschine zu ermitteln, die durch die ausschließliche Analyse des Einsatzprozesses nicht erkannt werden. Dabei lassen sich die Wechselwirkungen durch die differenzierte Einteilung der Maschine in die genannten Bereiche genau benennen. Weiterhin lassen sich die extrahierten Wechselwirkungen klassifizieren. Dabei existieren grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten für eine Klassifizierung. Da bei der Entwicklung hygienegerechter Lebensmittelmaschinen der Benutzer eine zentrale Rolle

während einer Vielzahl von Prozessen einnimmt (z. B. manuelle Reinigung, Einfüllen von Gießmassen etc.), liegt der Fokus – neben der Beachtung von Hygieneanforderungen durch den Einsatzprozess – auf der Beachtung von Ergonomieaspekten, welche den Benutzer beeinflussen. Aus diesem Grund wurde die in Bild 5 dargestellte Klassifizierung gewählt. Die Auswertung der Prozessanalyse zeigt, dass das Vermindern des Risikos einer Kontamination des Lebensmittels maßgeblich von ergonomischen Gesichtspunkten abhängt.

Der Produktentwickler hat die Möglichkeit über die Festlegung von Produkteigenschaften die negativen Wechselwirkungen zwischen Benutzer und anderen Elementen des Systems zu minimieren. Dabei hat er durch die Wahl geeigneter Produkteigenschaften Einfluss auf die Effizienz und Effektivität der Nutzungsprozesse im Hinblick auf Hygieneaspekte. Bild 5 zeigt, dass Wechselwirkungen zwischen Systemelementen existieren, welche sowohl die Hygiene als auch die Ergonomie betreffen und sich gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise erhöht eine schlechte Erreichbarkeit von Bauteilen bei der Reinigung das Risiko eines unzureichenden Reinigungsergebnisses und fördert mithin direkt die Bildung von Keimen. Weiterhin besteht z. B. das Risiko einer Kontamination im Fall einer gründlichen Reinigung, bei der das Reinigungsmittel nicht in ausreichender Weise abfließt und sich im Einsatzprozess mit der Gießmasse vermischt.

Für die umfassende Ermittlung der genannten Wechselwirkungen ist es notwendig, die Ergebnisse der Prozessanalyse wie beschrieben in geeigneten Klassen gegenüberzustellen. Hieraus lassen sich einerseits Anforderungen ableiten, die für einen hohen Grad an Hygiene unabdingbar sind. Andererseits stellt die Ausnutzung der Erkenntnisse der Wechselwirkung eine Möglichkeit dar, indirekt über die Berücksichtigung der benutzerbetreffenden Anforderungen, Einfluss auf die Hygiene zu nehmen. Es zeigt sich weiterhin, dass die Festlegung von Produkteigenschaften nicht nur den eigentlichen Einsatzprozess beeinflusst, sondern ebenfalls einen großen Einfluss auf sämtliche Prozesse der Nutzungsphase hat.

4 Ergebnisse und Ausblick

Es zeigt sich, dass die existierenden Gestaltungsleitsätze bzw. Gestaltungskriterien nicht die gesamte Komplexität der Entwicklung hygienegerechter Maschinen abdecken und somit ein umfassenderer Ansatz notwendig ist. Das vorgestellte Vorgehen zur Ermittlung von Wechselwirkungen von Systemelementen und der Ableitung von Anforderungen mittels Prozessanalyse leistet einen Beitrag für die Entwicklung von hygienischen Lebensmittelmaschinen. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf der umfassenden Prozessanalyse

der Gesamtmaschine bzw. deren Gliederung in einzelne Baugruppen und der Ableitung von notwendigen Anforderungen.

Bei der Entwicklung hygienegerechter Lebensmittelmaschinen ist es möglich, die gewonnenen Erkenntnisse bei der Festlegung des Aufbaus (Topologie) und der Kinematik der bestehenden Baugruppen zu nutzen und somit Einfluss auf Reduzierung des Kontaminationsrisikos zu nehmen. Ein geeignetes methodisches Vorgehen für die Synthese soll in künftigen Forschungsarbeiten ermittelt werden. Des Weiteren sollen die Wechselwirkungen der Gesamtmaschinenebene auf einzelne Baugruppen und Bauteile erweitert werden, um künftig zu einem möglichst frühen Zeitpunkt der Entwicklung auch Hygieneaspekte zu berücksichtigen. Auch hierbei bietet das Prozessmodell für die Analyse der Wechselwirkungen großes Potenzial.

Literatur

- [1] Hauser, G.: "Hygienische Produktionstechnologie", Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2008.
- [2] DIN EN 1672-2: "Nahrungsmittelmaschinen - Allgemeine Gestaltungsleit-sätze - Teil 2: Hygieneanforderungen; Deutsche Fassung EN 1672-2: 2005+A12009", Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [3] Hauser, G. et al.: "Hygienic Equipment Design Criteria", EHEDG Guideline No 8, 2nd edition, EHEDG subgroup Design Principles, EHEDG, Frankfurt, 2004.
- [4] Feldhusen, J., Grote, K.-H. (Hrsg.): "Pahl/Beitz Konstruktionslehre", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- [5] Ehrlenspiel, K. et al.: "Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung", Springer-Verlag, Berlin, 2014.
- [6] Birkhofer, H. et al.: "Umweltgerechtes Konstruieren". In: Rieg, F.; Steinhilper, R.: "Handbuch Konstruktion", Carl Hanser Verlag, München – Wien, 2012, S. 566.
- [7] Oberender, C.: "Die Nutzungsphase und ihre Bedeutung für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. ", VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006. Dissertation.

-
- [8] Kloberdanz, H. et al.: "Process based uncertainty analysis – an approach to analyse uncertainties using a process model". In: "Proceedings ICED'09", 2009.
- [9] DIN 33411-5:1999-11: "Körperkräfte des Menschen - Teil 5: Maximale statische Aktionskräfte, Werte", Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [10] Hauser, G.: "Hygienegerechte Apparate und Anlagen. Für die Lebensmittel-, Pharma- und Kosmetikindustrie.", Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2008.

Priorisierung von Aktivitäten zur Konkretisierung von Produkteigenschaften am Beispiel einer Batteriemodulentwicklung

Martin Eisele¹, Sebastian Schoch², Rainer Puls², Albert Albers¹,
Aline Radimersky¹

¹ *IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

² *Dipl.-Ingenieure Rainer & Oliver PULS GmbH, Karlsruhe*

Abstract

The complexity of battery systems, caused by interaction between the subsystems, makes the design process difficult. Prioritization of activities in product design is necessary to meet requirements in an efficient way. This paper describes an approach to prioritize activities using interactions between characteristics of battery systems. The target is to generate a template to support battery developers in planning the design process for different applications such as a stationary storage unit or a traction battery.

Keywords: Prioritization Process, Battery Design, Design Structure Matrix

1 Einleitung

Der elektrische Energiespeicher hat bei reinen Elektrofahrzeugen großen Einfluss auf die Erfüllung der Kundenanforderungen, bspw. der Reichweite, der Schnellladefähigkeit und den Fahrzeugpreis.¹ Im Entwicklungsprozess werden unter Berücksichtigung der Anforderungen die Subsysteme des Batteriesystems gestaltet und kontinuierlich in ihren Eigenschaften konkretisiert. Eine Priorisierung der Aktivitäten zur Gestaltung stellt aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Subsystemen eine Herausforderung dar. So ist die Wahl des Kühlkonzepts von der Wahl der Batteriezelle, deren Form und Wirkungsgrad bei Lade- und Entladevorgängen abhängig. Das Kühlsystem beeinflusst aber auch die Betriebsbedingungen und damit das Verhalten der Zelle im Batteriesystem. In den derzeitigen Elektro- und Hybridfahrzeugen kommen verschiedene Zellbauformen zum Einsatz, die sich in ihrer Geometrie als auch in ihren elektrischen Eigenschaften voneinander unterscheiden. Diese beeinflussen die Auslegung und Gestalt des Batteriesystems. So sind beispielsweise in den Fahrzeugen Nissan Leaf, BMW i3 und im Tesla Model S, welche zu den fünf meistverkauften Elektrofahrzeugen 2016 gehören², drei verschiedene Batteriezelltypen mit unterschiedlichen Kühlsystemen verbaut. Bei der Gestaltung des Batteriesystems sind die Abhängigkeiten zu berücksichtigen, um die Anforderungen seitens der Anwendung zu erfüllen. Aufgrund der Komplexität des Systems kann der Entwickler nicht alle Abhängigkeiten gleichzeitig berücksichtigen und beeinflussen, er muss in der Gestaltung und Entscheidungsfindung priorisieren. Die gegenseitigen Abhängigkeiten erschweren eine Priorisierung der Entwicklungstätigkeiten zur Konkretisierung der Batteriesystemeigenschaften. Modelle zur Abbildung der Wechselwirkungen im Batteriesystem können den Umgang mit der Komplexität des Systems erleichtern und somit den Entwicklungsprozess unterstützen.

2 Stand der Forschung: Batteriesystementwicklungsprozess

Produktspezifische Referenzprozesse stellen eine Möglichkeit zur Prozessunterstützung bei der Batteriesystementwicklung dar. Diese haben den Anspruch Entwicklungsprozesse detailliert beschreiben zu können und dadurch die Planung und Durchführungen von Entwicklungsprojekten für entsprechende Produkte zu unterstützen. Der Entwicklungsprozess von Batteriesystemen für E-Fahrzeuge ist bisher wenig beschrieben und Gegenstand der Forschung.

ROTHGANG gibt einen Überblick über die Aktivitäten des Batteriepackdesigns und deren zeitliche Einordnung im Produktentstehungsprozess. Dabei teilt die Autorin den Prozess des Batteriepackdesigns in drei Phasen ein, welche nacheinander zu vollziehen sind. In der Vorfeldphase werden zunächst

grundlegende Entscheidungen, wie die Batteriesystemgröße, die Auswahl der Zellchemie und des zu verwendenden Zelltyps (Pouch, zylindrisch oder prismatisch) getroffen. Anschließend wird in der Phase der Systemauslegung das Schaltungskonzept der Zellen, die Zellverbinder etc. festgelegt. Außerdem werden Sicherheitseinrichtungen wie Schütze und Sensoren ausgelegt und ein Thermomanagement für das Batteriesystem entwickelt. Diese Phase schließt mit der Auslegung und Integration des Batteriemagementsystems ab. In der dritten Phase werden Überlegungen zu Produktion, Betrieb und Wartung getätigt. Hierbei werden Konzepte zum Aufbau und zur Prüfung erstellt.³ Dieses Prozessmodell stellt die übergeordneten Aktivitäten des Batteriesystementwicklungsprozesses dar und ordnet sie zeitlich ein. ROTHGANG zeigt zudem die Komplexität des Batteriedesignprozesses in der Vorfeldphase auf. Bei der Batteriesystementwicklung für Elektrofahrzeuge, interagieren Einsatzszenario, Fahrzeuganforderungen und Anforderungsprofil des Batteriesystems untereinander und wirken sich auf die Auswahl des Zelltyps, dessen Kühlung, Kontaktierung usw. aus.³ Die gesamtssystemischen Wechselwirkungen stellen den Entwickler somit bei der Entscheidungsfindung im Batteriedesign vor Herausforderungen.

Das Holistic Battery Design nach BOUVY ET AL. stellt einen, auf einem ganzheitlichen Modell basierenden Entwicklungsansatz dar. Dabei wird auf die mechanischen und thermischen Zielkonflikte, sowie den Zielkonflikt des Gesamtsystem-Designs eingegangen. Der Entwicklungsprozess wird als sogenannter „Battery Development Circle“ abgebildet. Dabei besteht der Prozess aus drei Teilprozessen: der Bearbeitung des ganzheitlichen Batteriemodells, der Prototypenfertigung und der Softwareentwicklung sowie den Aktivitäten des Testens und der Validierung. Diese Teilprozesse werden nacheinander vollzogen und können iterativ wiederholt werden, bis das für die Anwendung optimale Batteriesystemdesign gefunden und hinreichend validiert wurde.⁴ Über andere Teilprozesse wie die Teilsystem- und Komponentenauswahl wird wenig Information bereitgestellt. Die Beschreibung der Zielkonflikte gibt einen Überblick über die Komplexität des Gesamtsystems, liefert jedoch keine Methode mit dieser Komplexität umzugehen.

3 Stand der Forschung: Prozessplanung und Priorisierung

Die aufgezeigten Beiträge bieten Ansätze zur Einordnung übergeordneter Aktivitäten der Batteriesystementwicklung, wie der Systemauslegung, Validierung und Gestaltung. Auch die Komplexität und Wechselwirkungen der Subsysteme werden von beiden Autoren aufgezeigt. Damit gehen komplexe Entscheidungsvorgänge einher, in denen es sich anbietet den Entwickler methodisch zu unterstützen. Es wird ein Ansatz zum Umgang mit der Systemkom-

plexität bei der Entscheidungsfindung in der Batteriesystementwicklung gesucht. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung matrixbasierender Methoden dar. Die Design Structure Matrix (DSM) oder Einflussmatrix bzw. Domain Mapping Matrix (DMM) (Betrachtung zweier Systeme/Domänen) wird vielseitig eingesetzt und dient dazu Zusammenhänge innerhalb bzw. zwischen Systemen zu modellieren. Anwendung findet die DSM in der Produktentwicklung, bei der Projektplanung, im Projektmanagement, beim Systems Engineering und bei der Organisationsgestaltung.⁵ Der grundlegende Aufbau einer DSM ist in Bild 1 zu sehen. Die untersuchten Elemente (A - D) werden hinsichtlich ihres Einflusses auf ein anderes Element bewertet, wobei der Wert 0 für keinen Einfluss und 2 für einen sehr hohen Einfluss steht. Die Aktivsumme repräsentiert den Einfluss des Elementes auf das untersuchte Gesamtsystem, welches über die Elemente A - D beschrieben werden kann. Die Passivsumme beschreibt hingegen die Beeinflussbarkeit eines Elementes durch die restlichen Elemente des Gesamtsystems. Im Rahmen dieses Beitrags dient die DSM zur Abbildung von Wechselwirkungen zwischen den Batteriesystemeigenschaften, um daraus Aktivitäten zur Konkretisierung der Produkteigenschaften abzuleiten und zu priorisieren.

hat Einfluss auf	A	B	C	D	Aktivsumme
A		2	0	1	3
B	1		1	1	3
C	0	1		0	1
D	0	2	0		2
Passivsumme	1	5	1	2	

0: kein Einfluss
 1: geringer Einfluss
 2: starker Einfluss

Bild 1 Beispiel DSM

BAUMBERGER U. LINDEMANN nutzen matrixbasierte Werkzeuge zur Prozess- und Entwicklungsplanung. Die Autoren verfolgen den Ansatz einen Entwicklungsprozess anhand der an das Produkt gestellte Anforderungen zu planen. Dabei werden Anforderungen unterschiedlicher Domänen wie Benutzer- und Produkthanforderungen oder Komponenten des Produkts in einer DSM gegenübergestellt. Aus der Analyse der Abhängigkeiten können Schlussfolgerungen für individuelle Anforderungen geschlossen werden. So kann aus der Koppelung zweier Elemente durch Schwingungen, bspw. die Anforderung einer Schwingungsdämpfung abgeleitet werden. Mittels Domain Mapping Matrix werden den ermittelten Produkthanforderungen Elemente der Produktstruktur, als Komponenten oder Baugruppen zugeordnet. Aus den identifizierten Relationen lassen sich Prozesse ableiten.⁶



Simultanes Entwickeln von Produkten bietet das Potenzial Entwicklungszeiten und Kosten zu senken. Diese Vorgehensweise wurde im letzten Jahrzehnt verbessert, bringt aber immer noch Herausforderungen mit sich. Die zunehmende Komplexität von Produkten führt zu Wechselwirkungen, so dass auch die Aktivitäten und die darin involvierten Personen stark vernetzt sind. Änderungen können durch wechselseitige Abhängigkeiten zu Iterationen im Entwicklungsprozess führen.⁷ Um die Anzahl an Iterationen auf ein Minimum zu senken, clustern YASSINE U. BRAHA voneinander abhängige Elemente. Bild 2 (a) zeigt die Ausgangslage einer ausgefüllten DSM. Werden die Elemente der Reihenfolge nach bearbeitet, so kann es passieren, dass die Veränderung von F gegen Ende des Prozesses zur Änderung des Elements A führt. Durch eine Clusterung wie in Bild 2 (b) und (c) werden jene Elemente zeitlich nah und thematisch gruppiert bearbeitet, welche starke wechselseitige Abhängigkeiten besitzen und deshalb Iterationen wahrscheinlich sind. Die sich ergebenden Cluster können weitestgehend unabhängig voneinander und damit parallel bearbeitet werden.⁷

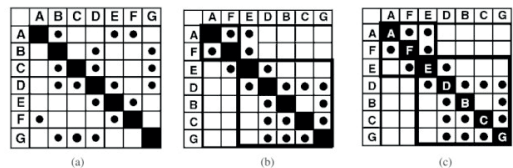


Bild 2 Clusterbeispiel: (a) originale DSM; (b) geclusterte DSM; (c) alternative Clusterung nach YASSINE U. BRAHA⁷

ALBERS ET AL. priorisiert Aktivitäten der Validierung von Teilsystem über drei Kriterien: Die Bekanntheit der Anwendungsszenarien, die Vertrautheit mit der angewandten Technologie sowie der Einfluss des Teilsystems auf das Produkt. Letzteres wird über eine DSM ermittelt. Der Einfluss der einzelnen Elemente zueinander wird bewertet. Durch Multiplikation von Aktiv- und Passivsumme ergibt sich die Kritikalität, welche dem beschriebenen Kriterium des Einflusses gleichzusetzen ist. Die Priorisierung der Teilsysteme zur Validierung erfolgt über die Addition der drei Kriterien je Teilsystem. Das Teilsystem mit der größten Summe sollte in der Validierung priorisiert werden.⁸

Zwischenfazit: Um die Anwendung einer matrixbasierenden Methode zur Priorisierung von Entwicklungsaktivitäten zu erleichtern, bietet es sich an eine batteriesystemspezifische Vorlage bereitzustellen. Diese kann den Aufwand und die Hemmschwelle zur Nutzung einer solchen Methode senken. Somit könnte die Methode mit minimalem Aufwand für verschiedene Batteriesystementwicklungsprozesse eingesetzt werden. Die bisher beschriebenen Ansätze

zur Prozessplanung und Priorisierung von Aktivitäten, sind meist anforderungsgetrieben. Die Anforderungen werden Elementen der Produktstruktur zugewiesen, welche in Wechselwirkungen zueinander stehen. Anforderungen als auch Produktstrukturen sind projektabhängig und können nur bedingt verallgemeinert für Batteriesysteme gelten. Es bedarf eines Ansatzes welcher ermöglicht eine für Batteriesystementwicklungen gültige Vorlage zu erstellen und dabei die Wechselwirkungen als auch Anforderungen im Batteriesystem berücksichtigt. Dabei sollen Aktivitäten im Entwicklungsprozess priorisiert werden, welche die Gestalt und die Systemeigenschaften konkretisieren bzw. festlegen. Der Ansatz von YASSINE UND BRAHA ermöglicht eine Clusterung von Elementen welche in Relation zueinander stehen. Hier liegt der Fokus auf der Parallelisierung von Aktivitäten und weniger auf der Priorisierung dieser untereinander. ALBERS ET AL. nutzt als Kriterium zur Priorisierung unter anderem die Kritikalität. Der Einfluss und die Beeinflussbarkeit eines Teilsystems bezüglich des Gesamtsystems werden jedoch nicht einzeln betrachtet. Auch die anderen vorgestellten Methoden unterscheiden nicht zwischen Elementen, mit hohem Einfluss und geringer Beeinflussbarkeit, welche als Stellhebel gelten und Elementen mit hoher Beeinflussbarkeit und zugleich niedrigem Einfluss, die als Indikatoren im Entwicklungsprozess dienen.⁹

4 Vorstellung des Ansatzes

In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, aus den physikalischen, technischen und funktionalen Wechselwirkungen innerhalb eines Batteriesystems Gestaltungsaktivitäten für den Entwicklungsprozess abzuleiten und zu priorisieren. Der Ansatz soll im Produktentstehungsprozess primär in den Aktivitäten der Ideenfindung sowie Prinzip- und Gestaltmodellierung Anwendung finden. Die Verwendung der Methode bietet sich besonders dann an, wenn das Zielsystem, welches Ziele und Rahmenbedingungen der Produktentstehung beinhaltet, vage ist und erst wenige materielle als auch immaterielle Projektergebnisse im Objektsystem vorliegen. Ziel ist es, eine Methode zu entwickeln, welche mittels einer batteriespezifischen Vorlage einfach auf Entwicklungsprozesse von Traktionsbatterien und stationären Speichern anwendbar ist. Einsatz findet die Methode bspw. beim OEM zur Integration eines Batteriesystems in ein Elektrofahrzeug oder beim Batteriesystemhersteller zur Entwicklung neuer Produkte und Produktgenerationen. Hierfür bieten die Batteriesystemeigenschaften die Möglichkeit ein Batteriesystem bis zu einem gewissen Abstraktionsgrad allgemein zu beschreiben. Dabei kommen Teile der in Absatz 3 vorgestellten Methoden zum Einsatz und werden entsprechend abgewandelt. Erste Ansätze hierzu gingen aus der Entwicklung eines Batteriemoduls für Elektrofahrzeuge hervor, an dessen Beispiel der Einsatz der Methode vorgestellt werden soll.

4.2 Analyse der Wechselwirkungen mittels Einflussmatrix

Im Zuge der Zielsystemkonkretisierung werden im Laufe eines Entwicklungsprozesses Entscheidungen gefällt, die den Lösungsraum im weiteren Prozess einschränken. So sind bei der Konzeptionierung des Batteriemoduls ein Kühlprinzip sowie die Anzahl der Zellen festzulegen. Aufgrund der Systemkomplexität ist es für den Entwickler schwierig die Auswirkungen einer Entscheidung hinsichtlich der Batteriesystemeigenschaften vollständig vorherzusehen. Um die Anforderungen des Zielsystems zu erfüllen sind die Entscheidungen zu priorisieren, wofür ein entsprechendes Systemverständnis notwendig ist. Zur Aufschlüsselung der Komplexität des Batteriesystems wird eine DSM mit den in Absatz 4.1 identifizierten Eigenschaften ausgefüllt und der Einfluss der Eigenschaften zueinander mit 0 – 2 quantifiziert. Welche Zusammenhänge als allgemeingültig gelten oder ob andere Faktoren die Bewertung beeinflussen, wird in weiten Arbeiten geprüft. Die gebildeten Aktiv- und Passivsummen, welche den Einfluss bzw. die Beeinflussbarkeit der Eigenschaften hinsichtlich aller anderen aufgeführten Eigenschaften quantifizieren, werden relativiert. Hierfür wird der größten auftretenden Summe der Wert 100 zugeordnet. Im Beispiel der Modulentwicklung hat die Aktivsumme der Zelleigenschaften den Maximalwert. Durch die Relativierung geht zwar die Information des absoluten Einflusses einer Eigenschaft verloren, allerdings lassen sich die Bewertungen durch unterschiedliche Personen oder für unterschiedliche Batteriesystementwicklungen besser vergleichen. Zudem sind für die Priorisierung nur relative Werte zwischen den Eigenschaften von Interesse.

4.3 Auswertung mittels Streudiagramm

Zur Priorisierung der Eigenschaften wird in einem Diagramm die Passiv- über die Aktivsumme aufgetragen. Die Aktivsumme ist gleichbedeutend mit dem Einfluss einer Eigenschaft und die Passivsumme entspricht der Beeinflussbarkeit einer Eigenschaft. Die Position einer Eigenschaft im Diagramm zeigt den Einfluss und die Beeinflussbarkeit gegenüber allen anderen aufgelisteten Eigenschaften. Um Anforderungen aus dem Zielsystem in die Priorisierung einfließen zu lassen, werden mittels DMM Anforderungen und Batteriesystemeigenschaften einander zugeordnet (Wertebereich 0 – 2). Dadurch wird jede Eigenschaft hinsichtlich des aktuellen Zielsystems gewichtet, was über die Größe der Kreise im Diagramm visualisiert wird. Zur Priorisierung der Eigenschaften wird das Diagramm in vier Quadranten aufgeteilt (s. Bild 4) die im Folgenden beschrieben werden.

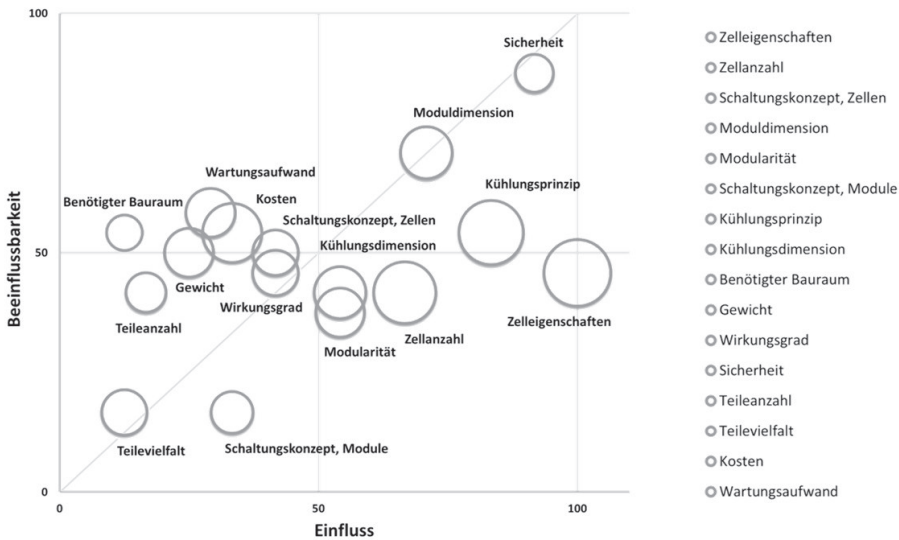


Bild 4 Streudiagramm mit gewichteten Eigenschaften

Eine erste graphische Einordnung der Eigenschaften lässt sich anhand der Winkelhalbierenden vornehmen. Eigenschaften die auf der Winkelhalbierenden liegen haben gleichermaßen Einfluss auf die anderen Eigenschaften, als dass sie durch diese beeinflusst werden. Alle Eigenschaften, die unterhalb der Winkelhalbierenden liegen, haben somit einen hohen Einfluss auf das ganze Produkt wohingegen sie nur wenig von den anderen Eigenschaften beeinflusst werden. Ihnen ist somit eine eher aktive Rolle zuschreiben. Der Quadrant rechts unten liegt vollständig unter der Winkelhalbierenden. Eigenschaften in diesem Quadranten sie gelten als Stellhebel⁹ und sollten unter ständiger Prüfung des Einflusses auf andere Eigenschaften zu Beginn einer Entwicklung konkretisiert werden. Nachfolgende Veränderungen oder Festlegungen anderer Eigenschaften haben somit wenig Einfluss auf die bereits konkretisierten Eigenschaften. Iterative Anpassungen von Eigenschaften in diesem Quadranten sind deshalb weniger wahrscheinlich. Bei der Modulentwicklung liegen alle Eigenschaften des Quadranten nah an der Winkelhalbierenden oder nahe angrenzender Quadranten, wodurch keine eindeutigen Stellhebel zu identifizieren sind. Die Eigenschaft Zellanzahl hat einen starken Einfluss auf das Gewicht und das Verschaltungskonzept, wird aber auch gleichermaßen durch die Modulkosten und bereits konkretisierten Moduldimensionen beeinflusst, weshalb sich die Eigenschaft nahe des oberen rechten Quadranten befindet. Eigenschaften im Quadranten rechts oben sind als kritisch zu werten, da sie einen hohen Einfluss und auch eine hohe Beeinflussbarkeit aufweisen. Dadurch ist bei diesen Eigenschaften mit einem iterativen Festlegungsprozess

zu rechnen. Die auch als Schlüsselfaktoren⁹ bezeichneten Eigenschaften werden nach den Stellhebeln festgelegt. Aufgrund der hohen Beeinflussbarkeit sollten die Eigenschaften im weiteren Entwicklungsprozess bzgl. Änderungen geprüft werden. Die Eigenschaft Sicherheit, gleichermaßen auch Anforderung, beeinflusst viele Subsysteme des Batteriemoduls. So wird bei der Zellauswahl der Sicherheitsaspekt berücksichtigt. Gleichermaßen beeinflussen die Zelleigenschaften aber auch andere Eigenschaften wie das Kühlprinzip, wodurch sich der hohe Einfluss als auch die hohe Beeinflussbarkeit erklären lässt. Im Quadranten links oben liegen Eigenschaften, welche nur einen geringen Einfluss ausüben und eine sehr hohe Beeinflussbarkeit besitzen. Sie dienen als Indikatoren für die Konkretisierung anderer Eigenschaften. Diesem Quadranten wird eine geringere Priorität hinsichtlich der direkten Festlegung der Eigenschaften zugeordnet, da die Eigenschaften stark durch andere Eigenschaften beeinflusst werden. Frühzeitige Konkretisierungen können zu iterativen Anpassungen führen. So wird der benötigte Bauraum für das Batteriesystem bei der Batteriemodulentwicklung, durch Zelleigenschaften, Batteriemoduldimensionen, Kühlprinzip etc. stark beeinflusst. Die Konkretisierung der Baumeigenschaft geschieht durch mehrere Aktivitäten, welche die Gestalt unterschiedlicher Subsysteme festlegen. Sofern ein starker Zusammenhang zwischen Bauraum und einer Anforderung steht ist die Eigenschaft während der Entwicklung umso mehr auf indirekte Beeinflussungen zu überprüfen. Die Eigenschaften im Quadranten links unten haben weder großen Einfluss noch werden sie stark beeinflusst. Ihr Einflussverhalten ist eher entkoppelt von den anderen Eigenschaften. Sie können zeitlich weitestgehend variabel konkretisiert werden. In der Darstellung liegt die Eigenschaft Teilevielfalt in diesem Quadranten. Sie beeinflusst die restlichen Eigenschaften zum Zeitpunkt der Erstellung der Einflussmatrix nur gering und wird auch nur geringfügig beeinflusst. Dies lässt sich damit begründen, dass die anderen Eigenschaften weitestgehend gestaltungunabhängig sind und ein Einfluss hinsichtlich der Teilevielfalt nur schwer zu bewerten ist. In wieweit diese Eigenschaft für eine batteriesystemspezifische Vorlage für die Methode in Frage kommt ist noch zu prüfen.

Die beschriebene Einteilung des Diagramms in Quadranten ermöglicht eine Priorisierung der Batteriesystemeigenschaften. Die Korrelation der Eigenschaften bzgl. ihres Einflusses auf die Anforderungen unterstützt bei der Priorisierung der Eigenschaften innerhalb eines Quadranten. Die Eigenschaften werden denjenigen Subsystemen des Batteriesystems zugeordnet, welche die Eigenschaften vornehmlich beeinflussen. Die Zuordnung ist von bereits festgelegten Konzepten und der Gestalt des Systems abhängig. Somit kann die Zuordnung je nach Entwicklungsprozess als auch im Laufe eines Prozesses variieren. Wird eine Eigenschaft nach den beschriebenen Kriterien priorisiert,

sind die zugeordneten Subsysteme hinsichtlich der Eigenschaft unter Berücksichtigung der Produktanforderungen zu konkretisieren. Die Konkretisierung kann in Form einer Konzeptauswahl, der Gestaltung einer Komponente, der Entscheidung für ein Zukaufteil etc. geschehen. Diese Aktivitäten lassen sich meist in mehrere Teilaktivitäten wie z. B. Konstruktion, Validierung etc. aufteilen. Aufgrund der projekt- und unternehmensspezifischen Durchführung der Aktivitäten, werden diese durch den beschriebenen Ansatz nicht näher spezifiziert. In trivialen Fällen kann einer Eigenschaft, ein Subsystem zugeordnet und daraus eine Aktivität abgeleitet werden. So werden die Zelleigenschaften durch die Entscheidung für einen Zelltyp konkretisiert. Andere Eigenschaften betreffen mehrere Subsysteme, woraus sich auch mehrere Aktivitäten ableiten lassen. So wird die Sicherheit des Batteriemoduls durch die Robustheit der Batteriezellen, der mechanischen und thermischen Festigkeit, den Eigenschaften der mechanischen Zellverbinder und durch weitere Komponenten beeinflusst. Bei der Gestaltung und Auswahl der Subsysteme des Batteriemoduls werden die Sicherheitseigenschaften entsprechend der Anforderungen berücksichtigt. Der Wissenszuwachs durch Konkretisierung von Ziel- und Objektsystem im Laufe des Prozesses erlaubt einerseits das Batteriesystem durch detaillierte Eigenschaften genauer zu beschreiben. Andererseits können sich durch den Wissenszuwachs anfängliche Einschätzungen des Einflusses als nicht korrekt erweisen. Eine Anpassung der Einflussmatrix und Überprüfung der Priorisierung sollte in diesem Fall folgen. Die Priorisierung ist somit als dynamisch anzusehen.

5 Zusammenfassung

Vorgestellt wurde ein Ansatz zur Priorisierung von Aktivitäten zur Gestaltung von Batteriesystemen auf Basis der Wechselwirkungen der Batteriesystemeigenschaften. Dieser wurde im Rahmen einer Batteriemodulentwicklung für Elektrofahrzeuge zusammen mit der Firma Dipl.-Ingenieure Rainer & Oliver PULS GmbH entwickelt. Ziel ist es, dem Entwickler eine generalisierte Grundlage für die Priorisierung von Aktivitäten in der Gestaltung von Batteriesystemen zu schaffen. Der Ansatz wurde beispielhaft für die Batteriemodulentwicklung durchgeführt. Die Priorisierung der Eigenschaften und der damit ableitbaren Aktivitäten erscheint plausibel. Durch vordefinierte Eigenschaften von Batteriesystemen, welche noch genauer zu untersuchen sind, soll dem Entwickler die Anwendung der Methode erleichtert werden. Eine vollständig ausgefüllte Einflussmatrix und damit allgemeingültige Priorisierung der Eigenschaften als Vorlage erscheint nach aktuellem Stand nicht sinnvoll. Bei der Bewertung der Einflüsse fließen indirekt projektspezifische Konzeptideen, bereits getroffene Entscheidungen oder Anforderungen ein, die nicht allgemeingültig sind. Eine Bewertung der Abhängigkeiten durch mehrere Personen

erscheint nach ersten Anwendungen empfehlenswert. Trotzdem sind Fehleinschätzungen und falsche Priorisierungen durch unzureichendes Systemverständnis nicht ausgeschlossen. Mathematische Modelle zur Beschreibung von Batteriesystemen können den Entwickler in der Bewertung der Abhängigkeiten unterstützen und die Priorisierung von Aktivitäten zuverlässiger gestalten.

Literatur

- [1] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): "Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung", Berlin, 2014.
- [2] Chris: "Meistverkaufte Elektroautos und Plug-In Hybride in der Europäischen Union (2016)", www.grueneautos.com, 2016.
- [3] Rothgang, S.: "Batteriepacks – System aus vielen Teilen und komplexen Wechselwirkungen mit dem Fahrzeug", Symposium Elektromobilität, 2012.
- [4] Bouvy, C. et al.: "Holistic Battery Pack Design", 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, 2012.
- [5] T. R. Browning: "Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions", IEEE Transactions on Engineering Management, 48, 2001, 292–306.
- [6] Baumberger, C.; Lindemann, U.: "Requirement oriented process planning and configuration", NordDesign 2006, Reykjavik, 2006.
- [7] Yassine, A.; Braha, D.: "Complex Concurrent Engineering and the Design Structure Matrix Method", Concurrent Engineering (CE), 11, 2003, 165–176.
- [8] Albers, A.; Klingler, S.; Wagner, D.: "Prioritization or Validation Activities in Product Development Processes", Design 2014, Dubrovnik, 2014.
- [9] Progenium: "Einflussmatrix: effektive Entscheidungsfindung bei komplexen Problemstellungen", München, 2015.

Szenario-basierte Analyse von Anforderungen im Produktentwicklungsprozess

Iris Gräßler, Philipp Scholle

*Lehrstuhl für Produktentstehung
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn*

Abstract

In this paper a method for the anticipation of future changes of requirements within the product development process is proposed. Based on consistency-based approaches towards scenario-technique, influences among requirements are assessed. After a system-grid based selection of key requirements consistency is evaluated. On this basis requirement scenarios are derived on this basis. The requirement scenarios are taken as an input for risk assessment and reaction strategies during product development process. The benefit of this scenario-based approach of requirements management lies in anticipating potential future problems caused by changing requirements.

Keywords: Requirements, Requirements management, Product development, Scenario technique

1 Einleitung und Motivation

Die Erhebung und Änderungsverfolgung von Anforderungen übt maßgeblichen Einfluss auf den Erfolg von Produktentwicklungsprojekten aus. Aufgrund volatiler Märkte und technologischer Innovationsschübe ergibt sich eine Forderung nach verkürzter Time-to-Market bei gleichzeitig gesteigerter Komplexität von Produkten, Technologien und Anwendungen. Änderungen von

Anforderungen führen zu Iterationen und Verzögerungen im Produktentstehungsprozesses (PEP).

In diesem Beitrag wird daher eine Methode vorgestellt, anhand derer die Wechselwirkungen von Anforderungen analysiert und Auswirkungen der Änderungen einzelner Anforderungen auf das Gesamtsystem der Anforderungen bewertet werden. Die Methode ermöglicht es, begleitend zur Produktentwicklung mögliche zukünftige Auswirkungen der Änderungen der Anforderungen zu antizipieren, um bereits frühzeitig – also vor dem Eintreten der Änderungen – Strategien zum Umgang mit den Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess des Gesamtsystems abzuleiten. Die Methode baut auf der Szenario-Technik auf.

In Abschnitt 2 wird zunächst der Stand der Technik vorgestellt. Im Folgenden wird die entwickelte Methode zur szenario-basierten Analyse von Anforderungen dargestellt (Abschnitt 3). Diese wird anhand eines Praxisbeispiels erläutert (Abschnitt 4). Abschnitt 5 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen in diesem Feld.

2 Stand der Technik

Die Anforderungen definieren das Rahmenwerk, innerhalb welchem sich die Entwickler im Laufe des PEPs bewegen können. Den Anforderungen kommt daher eine zentrale Rolle im PEP zu [1]. Weber et al. gehen darüber hinaus und verwenden die Anforderungen als Steuerungsgröße im PEP, indem Sie einen ständigen Soll-Ist-Abgleich zwischen Eigenschaften und Merkmalen eines Produktes durchführen [2]. Kernthema des PEP ist die Gestaltung der Merkmale auf Basis der Soll-Eigenschaften (Synthese) [3].

Die Bewertung der Veränderlichkeit von Anforderungen innerhalb des PEP ist hierbei Gegenstand verschiedener Betrachtungen. Einerseits kann man die Unschärfe der Anforderungen etwa über Fuzzy-Logiken abbilden [4]. Nolan et al. stellen eine Bewertungsmethode zur Analyse des Risikos der Veränderung von Anforderungen vor [5]. Eben und Lindemann betrachten statt des Risikos der Veränderlichkeit die Wechselwirkungen einzelner Anforderungen auf Basis der Design Structure Matrix (DSM) oder der Multiple Domain Matrix (MDM) [6, 7]. Aus der Matrix, welche die Wechselwirkungen der Anforderungen abbildet, werden anhand der Aktiv- und Passivsumme Bewertungskriterien auf Basis der ein- und ausgehenden Relationen der Anforderungen zu den anderen Anforderungen innerhalb des Systems hergeleitet. Die Wechselwirkungen der Anforderungen stehen auch bei einer Modellierung der Anforderungen im Kontext des modellbasierten Anforderungsmanagements (Model-Based Requi-

rements Engineering (MBRE)) im Rahmen des Model-Based Systems Engineerings im Fokus. Die Wechselwirkungen der Anforderungen werden hierbei über eine Modellierung des Systems und der darin enthaltenen Anforderungen an das System abgebildet [8].

Die Szenario-Technik stammt aus dem strategischen Management und wird dort zum Antizipieren zukünftiger (Umfeld-) Entwicklungen eines Unternehmens verwendet. Neben den Umfeldszenarien können auch Markt- oder Technologienentwicklungen im Rahmen der strategischen Planung betrachtet werden [9]. Die Methode der Szenariotechnik geht auf den 1968 von Gordon und Hayward vorgestellten Ansatz der Cross-Impact Analyse zurück. Hierbei werden die Abhängigkeiten zwischen Einflussfaktoren in einer Matrix (Cross-Impact Matrix) abgebildet. Die Cross-Impact Analyse erfasst nun die Anpassung bedingter Wahrscheinlichkeiten des Auftretens eines Einflussfaktors bei Auftreten mindestens eines weiteren Einflussfaktors [10, 11]. Die so bestimmten bedingten Wahrscheinlichkeiten werden dann zur Berechnung der Szenarien und ihrer Wahrscheinlichkeiten verwendet. Neben den Cross-Impact-Ansätzen werden auch noch konsistenzbasierte Ansätze im Rahmen der Szenariotechnik verwendet. Vorgehensmodelle finden sich etwa bei Reibnitz [12], Gausemeier [13] oder Götze [14]. Im Gegensatz zur dem probabilistischen Vorgehen der Cross-Impact Analyse finden Wahrscheinlichkeiten in diesen Vorgehensmodellen keine Verwendung. Im Rahmen der konsistenzbasierten Ansätze werden zunächst die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren, aus denen sich die zukünftigen Entwicklungen ableiten, untersucht [12]. Dieses erfolgt auf Basis der – analog zur Cross-Impact-Matrix – Einflussmatrix und des System-Grids [12]. Innerhalb dieses werden die Einflussfaktoren anhand ihrer Aktiv- und Passivsumme aufgetragen und die wichtigen Einflussfaktoren, die sogenannten Schlüsselfaktoren, selektiert. Für diese Schlüsselfaktoren werden anschließend Entwicklungsmöglichkeiten („Projektionen“) hergeleitet. Die verschiedenen Projektionen werden im Rahmen der Konsistenzanalyse einer Konsistenzbewertung unterzogen [12]. Ausgehend von dieser Konsistenzbewertung erfolgt im Anschluss die Bildung der Szenarien. Hierzu können bekannte Clusteranalyseverfahren wie Single- oder Average-Linkage [15], aber auch lineare Optimierungsansätze bis hin zu evolutionären Algorithmen [16] zum Einsatz kommen. Die Entwicklung der Szenarien erfolgt hierbei unter Berücksichtigung der Konsistenz, der Stabilität und der Unterschiedlichkeit der Szenarien [15].

Im Anforderungsmanagement wird der Begriff „Szenario“ aktuell nur im Kontext der Erstellung von Nutzer- oder Nutzungsszenarien verwendet. Diese beziehen sich jedoch nicht auf die eigentlichen Anforderungen und ihre Veränderungen, sondern werden nur als Ausgangsbasis zum Erheben von Anfor-

derungen verwendet. Ursprünglich aus der Softwaretechnik stammend [17, 18], wird dieser Ansatz inzwischen auch in der Entwicklung physischer Produkte verwendet [19]. Ein weiteres Anwendungsfeld für Nutzungsszenarien ist Systems Engineering [20].

3 Methode zur szenario-basierten Analyse von Anforderungen

Im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen im Requirements Engineering wird der Begriff des „Szenarios“ im Kontext dieser Methode nicht als Nutzer- oder Nutzungsszenario, sondern als aus der Wechselwirkung der Anforderungen resultierendes Szenario aufgefasst. Die Methode orientiert sich hierbei an den konsistenzbasierten Ansätzen zur Szenariotechnik. Für ein auf der Cross-Impact Analyse basierendes Vorgehensmodell ist die Schätzung bedingter Wahrscheinlichkeiten durch den Anwender notwendig. Aufgrund der Problematik mit der Schätzung bedingter Wahrscheinlichkeiten wird in der Methode zur szenario-basierten Analyse von Anforderungen auf die Implementierung von Wahrscheinlichkeiten verzichtet.



Abbildung 1: Ablauf der szenario-basierten Analyse von Anforderungen

Die Erhebung der Anforderungen kann auf Basis bekannter Ansätze wie dem Hauptmerkmalcatalog nach Pahl/Beitz [1], User-Stories oder Nutzungsszenarien erfolgen. Ausgehend von der Anforderungsliste werden in der zweiten Phase die Wechselwirkungen der Anforderungen betrachtet. Hierzu wird, ähnlich zum DSM/MDM-basierten Ansatz von Eben und Lindemann [6, 7] eine



Einflussmatrix aufgestellt. Innerhalb dieser Einflussmatrix werden die Wechselwirkungen der Anforderungen erfasst. Diese Bewertung schließt eine Erfassung der Stärke der Wechselwirkungen über den numerischen Wert in der Einflussmatrix mit ein. Eine beispielhafte Einflussmatrix ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Einflüsse werden hier auf einer Skala von 0 (kein Einfluss) bis 2 (starker Einfluss) erfasst.

	A	B	C	D
A	X	2	0	1
B	1	X	1	2
C	0	1	X	2
D	2	0	0	X

A, B, C, D:
Anforderungen

Abbildung 2: Einflussmatrix zur Wechselwirkungsanalyse der Anforderungen

Die Schlüsselanforderungen werden auf Basis des System-Grids nach Reibnitz [12] in der Phase 3 „Identifikation von Schlüsselanforderungen“ selektiert. Dieser Schritt soll zur Verringerung der Komplexität der Erstellung der Anforderungsszenarien dienen. Hierbei werden auf Basis der Einflussmatrix die Anforderungen in einem System-Grid aufgetragen (Abbildung 3).

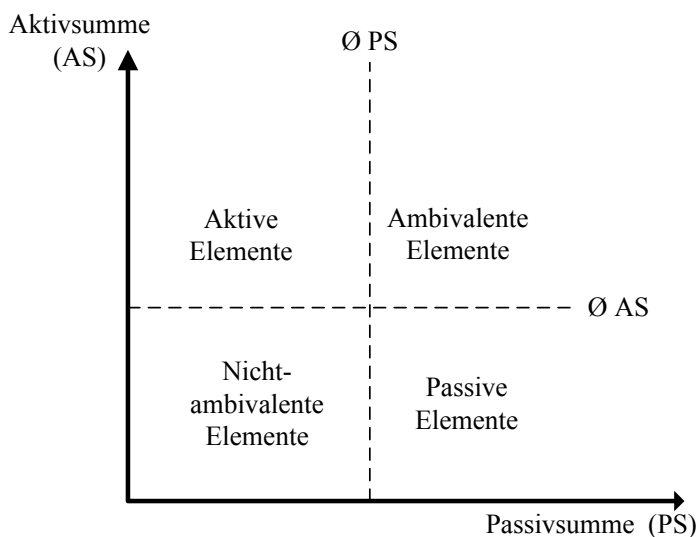


Abbildung 3: System-Grid zur Bestimmung der Schlüsselanforderungen

Analog zur Vorgehensweise nach Reibnitz werden die Anforderungen nach folgender Reihung selektiert [12]: Aktive Elemente, Ambivalente Elemente, Passive Elemente und Nicht-Ambivalente Elemente. Zur Reduktion der Anzahl der zu betrachtenden Anforderungen werden aus der Gesamtmenge Schlüsselanforderungen ausgewählt. Im vierten Schritt schließt sich die Ableitung der Projektionen und die Bewertung der Konsistenz dieser Projektionen an. Unter Projektionen werden hierbei verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten der Schlüsselanforderungen verstanden. Diese können abhängig von der Art der Anforderungen sowohl qualitativ als auch quantitativ angegeben werden. Hierbei sollte vor allem Wert auf die Betrachtung unterschiedlicher Projektionen gelegt werden, um für eine Anforderung verschiedene Entwicklungsrichtungen (bspw. i.S.v. Zu- oder Abnahme eines Wertes) abzubilden. Nach der Ableitung der Projektionen werden die einzelnen Projektionen je Anforderung paarweise auf Konsistenz bewertet. Die Konsistenzbewertung erfolgt hierbei auf einer Skala von -2 (totale Inkonsistenz) bis +2 (totale Konsistenz). Eine beispielhafte Konsistenzmatrix zur Einflussmatrix aus Abbildung 2 ist in Abbildung 4 dargestellt. Hierbei wurden zwei Projektionen je Anforderung (Anforderung A hat bspw. die Projektionen A1 und A2 usw.) berücksichtigt.

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
A1	X	X						
A2	X	X						
B1	0	1	X	X				
B2	2	0	X	X				
C1	-2	2	0	1	X	X		
C2	1	1	1	2	X	X		
D1	0	1	0	2	0	1	X	X
D2	2	0	0	-1	2	0	X	X

A1: Projektion 1 zu Anforderung A

...

D2: Projektion 2 zu Anforderung D

Abbildung 4: Konsistenzmatrix zur Konsistenzbewertung der Projektionen

Ausgehend von dieser Konsistenzbewertung erfolgt im fünften Schritt die eigentliche Bildung der Anforderungsszenarien. In der Szenario-Technik werden hierzu verschiedene Clustermethoden eingesetzt [15]. Die Clusterung dient innerhalb der bisherigen Ansätze der Szenario-Technik zur Bündelung der Szenarien, um aus der Menge aller möglichen Szenarien repräsentative Szenarien zu extrahieren. Die Bildung erfolgt dabei nach den in Abschnitt 2 beschriebenen Kriterien Unabhängigkeit, Konsistenz und Unterschiedlichkeit. Eine Clusterung macht im Kontext der szenario-basierten Analyse von Anforderungen nur begrenzt Sinn, da diese auch immer zu einer Unschärfe in den resultierenden Szenarien führt. Diese ist in der Erstellung von Szenarien zur Antizipierung zukünftiger Markt- oder Technologieentwicklungen durchaus gewünscht, führt aber in der szenario-basierten Analyse von Anforderungen zu einer zusätzlichen Unschärfe. Daher wird in diesem Falle nur nach der Konsistenz der Szenarien gefiltert, ohne eine Clusterung durchzuführen.

Nach der Erstellung der Szenarien werden im letzten Schritt die Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess untersucht. Im sechsten Schritt „Auswirkungsanalyse“ werden Reaktionsstrategien für das Auftreten der Szenarien entwickelt. Diese schließen insbesondere eventuelle Änderungen von Schnittstellen und Baugruppen ein, welche bei einem Auftreten einzelner Szenarien betroffen sind. Auch können auf Basis der Reaktionsstrategien notwendige Mehrkapazitäten und Umplanungen im PEP antizipiert und diskutiert werden.

4 Fallbeispiel Querlenker eines Rennwagens

In diesem Abschnitt wird die im Abschnitt 3 vorgestellte Methode zur szenario-basierten Analyse von Anforderungen im Produktentwicklungsprozess auf die Anforderungen eines Querlenkers eines Rennwagens des Formula Student Racing Teams der Universität Paderborn angewendet.

Die Anforderungsliste enthält 26 Elemente. Innerhalb der Wechselwirkungsanalyse wurden in einer Matrix die Wechselwirkungen zwischen allen Anforderungen betrachtet. Ausgehend von dieser Matrix ergibt sich das folgende System-Grid, welches in Abbildung 5 dargestellt ist:

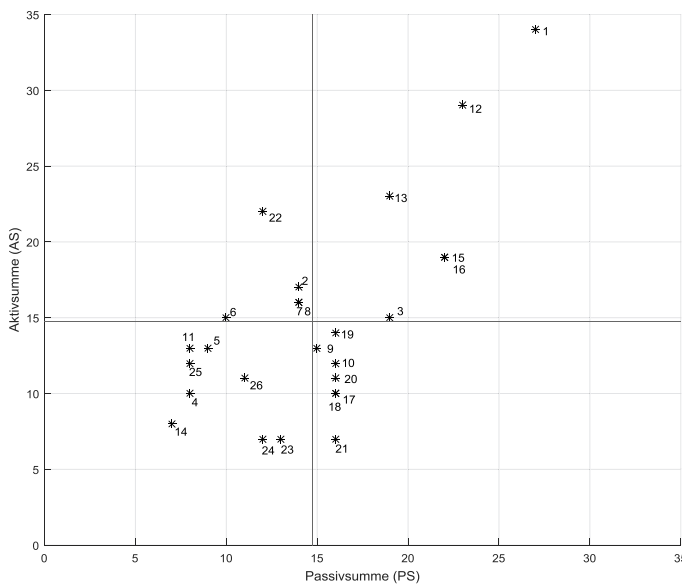


Abbildung 5: System-Grid für das Fallbeispiel „Querlenker eines Rennwagens“

Im Rahmen des Fallbeispiels wurden nach Reibnitz [12] alle Anforderungen, welche im Feld aktiver, ambivalenter oder passiver Systemelemente lagen, als Schlüsselanforderungen selektiert. Die Anforderungen 9, 16 und 19 waren hierbei redundant (aufgrund doppelter Erfassung) und wurden wie die Anforderungen im Feld nicht-ambivalenter Systemelemente ebenfalls nicht berücksichtigt. Für jede der selektierten 12 Schlüsselanforderungen wurden in einem nächsten Schritt jeweils 2 Projektionen entwickelt. Bei rein qualitativen Anforderungen wurden hierbei die Projektionen „Veränderung“, „keine Veränderung“ und „Entfall“ der Anforderungen berücksichtigt. Quantifizierbare

Anforderungen wurden jeweils durch Projektionen in Form einer Ab- und einer Zunahme des quantitativen Wertes berücksichtigt. Für jede Projektionskombination erfolgte eine Konsistenzbewertung. Aufbauend auf dieser Konsistenzbewertung ergaben sich $2^8 * 3^4 = 20736$ mögliche Szenarien. Zur Filterung der Szenarien nach Konsistenz wurden folgende Kriterien angewandt:

1. Zulassen von Szenarien mit einer Konsistenzsumme von mindestens 35 zur Selektion nur der insgesamt konsistenten Szenarien nach Missler-Behr [15].
2. Ausschluss eines Szenarios bei Auftritt mindestens einer inkonsistenten (Wert in der Konsistenzmatrix -2 oder -1) Paarung von Projektionen.

Auf Basis dieser Kriterien blieben im Folgenden noch zwölf Szenarien aus der ursprünglichen Menge der Szenarien übrig. Diese Szenarien sind gekennzeichnet durch ein häufiges Auftreten der gleichzeitigen Zunahme der zulässigen Verformung bei Belastung (18, 20, 21) und verringerter Lebensdauer (22) des Radlenkers. Der verantwortliche Entwickler oder Projektmanager kann somit bei Veränderung der Anforderungen in Bezug auf zulässige Verformungswerte die Wechselwirkung mit der Anforderung zur Lebensdauer des Radlenkers antizipieren. Auf diese Weise können bei Auftreten einzelner Projektionen einzelner oder mehrerer Anforderungen geeignete Reaktionsstrategien zur effizienten Steuerung des Aufwandes innerhalb des PEP abgeleitet werden. Bei einer Veränderung der erlaubten Verschiebung ist somit mit einem gesteigerten Aufwand zur Erreichung der Soll-Lebensdauer des Radlenkers zu rechnen.

5 Zusammenfassung und zukünftige Forschung

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Analyse der Veränderungen im Laufe des PEP auf Basis der Szenario-Technik entwickelt. Die Methode basiert auf den konsistenzbasierten Ansätzen innerhalb der Szenario-Technik. Im Gegensatz zu modellbasierten Ansätzen (MBRE) [8] oder DSM/MDM-Ansätzen [6, 7] werden neben den Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der Anforderungen auch die möglichen Entwicklungen („Projektionen“) berücksichtigt. Auf Basis einer Konsistenzbewertung werden Szenarien entwickelt. Es erfolgt im Unterschied zu den konsistenzbasierten Ansätzen keine Clusterung der Szenarien, da dieses zu einer Unschärfe in den resultierenden Szenarien führen würde. Ausgehend aus von Szenarien lassen sich dann Reaktionsstrategien im Umgang mit den Veränderungen der Anforderungen herleiten.

Die vorgestellte Methode stellt einen Beitrag zur Abschätzung der Risiken der Änderung von Anforderungen innerhalb des PEP dar. Sie ermöglicht das Antizipieren möglicher Veränderungen und Wirkketten innerhalb eines Netzwerkes von Anforderungen. Insbesondere die Erfassung der Wechselwirkungen sowie die Bewertung der Konsistenzen zur Ermittlung der Szenarien sind jedoch im Rahmen zukünftiger Arbeiten zu untersuchen. Denkbar ist etwa die (teil-) automatische Erfassung der Wechselwirkungen auf Basis einer Modellierung oder auch das Training von neuronalen Netzen mit dem Ziel einer automatisierten Konsistenzbewertung. Auch die Verwendung von Unschärfen zur Beschreibung der Projektionen stellt ein Ziel weitergehender Untersuchungen dar. Die Kriterien der Auswahl der Szenarien sind ebenfalls Gegenstand zukünftiger Arbeiten. Die Kriterien sind dahingehend zu standardisieren, um eine breite Anwendung auch in kleinen und mittelständischen Unternehmen ohne Einbeziehung externer Berater sicherzustellen. Die Auswirkung der Verwendung bestimmter Clustermethoden wie average- oder single-linkage Verfahren, aber auch genetischer Algorithmen stellt einen weiteren Anknüpfungspunkt für zukünftige Forschungen dar.

Literatur

- [1] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: "Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung". Springer, Berlin, 2012.
- [2] Weber, C.; Deubel, T.: "New theory-based concepts for PDM and PLM". In: Folkesson, A.; Gralen, K.; Norell, M.; Sellgren, U. (Hrsg.): International Conference on Engineering Design ICED'03, 2003.
- [3] Deubel, T.; Steinbach, M.; Weber, C.: "Anforderungs- und Kostengetriebene Steuerung des Produktentwicklungsprozesses". In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): 15. Symposium "Design for X", 2004.
- [4] Li, Z.; Ruhe, G.: "Uncertainty Handling in Tabular-Based Requirements Using Rough Sets". In: Hutchison, D.; Kanade, T.; Kittler, J.; Kleinberg, J. M.; Mattern, F.; Mitchell, J. C.; Naor, M.; Nierstrasz, O.; Pandu Rangan, C.; Steffen, B.; Sudan, M.; Terzopoulos, D.; Tygar, D.; Vardi, M. Y.; Weikum, G.; Ślęzak, D.; Yao, J.; Peters, J. F.; Ziarko, W.; Hu, X. (Hrsg.): Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular Computing. Berlin, Heidelberg, 2005.

-
- [5] Nolan, A. J.; Abrahao, S.; Clements, P.; Pickard, A.: "Managing requirements uncertainty in engine control systems development: 2011 IEEE 19th International Requirements Engineering Conference (RE).
- [6] Eben, K.; Daniilidis, C.; Lindemann, U.: "Interrelating and prioritising requirements on multiple hierarchy levels". In: Marjanovic, D.; Štorga, M.; Pavkovic, N.; Bojčević, N. (Hrsg.): 11th International Design Conference DESIGN 2010, 2010.
- [7] Eben, K. G. M.; Lindemann, U.: "Structural Analysis of Requirements. Interpretation of structural criterions". In: Wynn, D. C.; Kreimeyer, M.; Eben, K.; Maurer, M.; Lindemann, U.; Clarksen, J. (Hrsg.): 12th International Dependency and Structure Modelling Conference DSM '10, 2010.
- [8] Holt, J.; Perry, S.; Payne, R.; Bryans, J.; Hallerstedde, S.; Overgaard Hansen, F.: "A Model-based Approach for Requirements Engineering for Systems of Systems". In: IEEE Systems Journal 9 (2015) 1, S. 252–62.
- [9] Gausemeier, J.; Plass, C.: "Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen". Hanser, München, 2014.
- [10] Gordon, T. J.; Hayward, H.: "Initial experiments with the cross impact matrix method of forecasting". In: Futures 1 (1968) 2, S. 100–16.
- [11] Götze, U.: "Cross-Impact-Analyse zur Bildung und Auswertung von Szenarien". In: Wilms, F. (Hrsg.): Szenariotechnik. Vom Umgang mit der Zukunft. Bern, Stuttgart, Wien, 2006.
- [12] Reibnitz, U. v.: "Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung". Gabler, Wiesbaden, 1992.
- [13] Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: "Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien". Hanser, München, Wien, 1996.
- [14] Götze, U.: "Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung". Springer-Verlag, 2013.
- [15] Mißler-Behr, M.: "Methoden der Szenarioanalyse". Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 1993.

-
- [16] Grienitz, V.; Schmidt, A.-M.: "Weiterentwicklung der Konsistenzanalyse auf Basis evolutionärer Strategien für die Entwicklung von Markt- und Umfeldszenarien". In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. Paderborn, 2009.
- [17] Gregoriades, A.; Sutcliffe, A.: "Scenario-based assessment of nonfunctional requirements". In: IEEE Transactions on Software Engineering 31 (2005) 5, S. 392–409.
- [18] Sutcliffe, A. G.; Maiden, N.; Minocha, S.; Manuel, D.: "Supporting scenario-based requirements engineering". In: IEEE Transactions on Software Engineering 24 (1998) 12, S. 1072–88.
- [19] Liu, Z.-L.; Zhang, Z.; Chen, Y.: "A scenario-based approach for requirements management in engineering design". In: Concurrent Engineering 20 (2012) 2, S. 99–109.
- [20] SE Handbook Working Group (INCOSE): "Systems Engineering Handbook - A Guide for System Life Cycle Processes And Activities, San Diego, 2011.

Ein integriertes Gesamtsystemmodell für die modellbasierte Entwicklung

Yousef Hooshmand¹, Martin Höner¹, Stéphane Danjou², Peter Köhler¹

¹ *Institut für Produkt Engineering
Universität Duisburg-Essen*

² *Fakultät Technologie und Bionik
Hochschule Rhein-Waal*

Abstract

To cope with the increasing complexity of software-intensive systems consisting of mechanical, electrical and electronic components, an information model for model-based engineering (MBE) has been developed. The system models and structures as well as data models are classified and semantically linked. This ensures the indispensable traceability along the development process and provides the basis for a pragmatic realization of the integrated system model in existing product lifecycle management (PLM) systems. The approach is developed based on requirements and characteristics in machinery and plant design. It is however transferable to other industrial sectors such as Automotive or Aerospace Engineering. It also takes into account the existing peculiarities of federalized IT landscapes.

Keywords: Model-Based Engineering, Product Lifecycle Management, Information Model, Machinery and Process Plant Design

1 Einleitung

Unternehmen mit individualisierten Produkten, wie im Maschinen- und Anlagenbaubereich, befinden sich im Spannungsfeld zwischen vollständiger Individualisierung des Produktportfolios und lang gewünschter Skaleneffekte. In der Regel wird versucht, diverse Kundenwünsche durch das Erstellen und Anbieten von kundenindividuellen Varianten zu erfüllen, was als ein wichtiges Differenzierungsmerkmal zur Verbesserung der Wettbewerbsposition dient. Dies erhöht allerdings drastisch den Variantenreichtum und die Komplexität des Leistungsspektrums, was mit mehr Aufwand in fast allen Unternehmensbereichen verbunden ist [1]. Der erhöhte Individualisierungsgrad verlangt zudem eine frühere Einbeziehung der Kunden in den Entwicklungsprozess [2].

Die frühere Kundeneinbeziehung erhöht die Interaktion mit den Kunden und verstärkt die Kundenintegration, was es den Kunden nicht nur ermöglicht, immer mehr Einfluss auf die zu entwickelnden Produkte zu nehmen, sondern auch die Entwicklungsprozesse und -abläufe des Leistungsanbieters zu beeinflussen [3], [2]. Die kundennahe Entwicklung von individuellen Produkten stellt eine erhebliche Herausforderung dar, wie den ständigen Wandel von internen und externen Rahmenbedingungen sowie die häufige Änderung der Kundenanforderungen während der Auftragsabwicklung. Dies führt zu einer weiteren Erhöhung der Komplexität des Abwicklungs- und Entstehungsprozesses, was u. a. eine Erhöhung der Flexibilität im Unternehmen erfordert [1].

Die steigende Komplexität von multidisziplinären Produkten und Systemen kann in der Regel nicht mehr ohne integrierte Systemmodelle beherrscht werden. Dabei spielt die formale Beschreibung der Systeme – zu erreichen durch die modelbasierte Systementwicklung (MBSE) – eine wesentliche Rolle [4]. Systemarchitektur, Systemanforderungen und Systemverhalten sind drei Bausteine, die zusammengenommen eine Sammlung von Arbeitsprodukten ergeben, welche das System vollständig definieren. Diese Bausteine können mit Hilfe einer formalen Sprache wie SysML beschrieben und miteinander in Beziehung gesetzt werden [5]. Die modelbasierte Entwicklung (MBE) muss darüber hinaus den gesamten Lebenszyklus des Systems von der Produktkonzeption bis zum (idealerweise) Produktrecycling informationstechnisch abdecken [4].

Modellbasierte Ansätze bieten vor allem die Basis für den Paradigmenwechsel von dokumentenzentrischen zur daten- bzw. modellzentrischen Entwicklung von komplexen Systemen. Darüber hinaus dienen solche Ansätze zur vereinfachten Wissensbewahrung und -erfassung [6]. Für ein modellbasiertes

Vorgehen bei der Systementwicklung ist eine kohärente Nutzung des Informationsmanagements erforderlich. Dementsprechend müssen die erzeugten Systemarchitekturen und -artefakte zusammengeführt, gemeinsam verwaltet und semantisch in Beziehung zueinander gesetzt werden. Nur so kann das gesamte Potential der modellbasierten Systementwicklung ausgeschöpft werden. In diesem Zusammenhang wird von Systems Lifecycle Management gesprochen [7].

In der Systementwicklung werden eine Vielzahl von Softwarewerkzeugen und Datenformaten in den verschiedenen Lebenszyklusphasen und Disziplinen verwendet [8]. Die meisten Softwarewerkzeuge können allerdings nicht direkt miteinander kommunizieren. Das führt dazu, dass Produktdaten häufig redundant gehalten werden, um in verschiedenen Applikationen verwendet zu werden [4]. Die Applikationen exportieren (vollständige) Daten in der Regel nur in einem proprietären Format, das von anderen Programmen nicht verstanden wird. Das Problem wird dadurch verstärkt, dass auch bei interdisziplinären Aufgaben oft verschiedene Softwarewerkzeuge in den unterschiedlichen Disziplinen verwendet werden.

Die Grundidee, die in Adam et al. [4] ausgedrückt wird, ist die Nutzung von domänenspezifischen Tools, mit denen die jeweiligen Nutzer vertraut sind. Keinem Nutzer soll dementsprechend ein domänenübergreifendes neuartiges Tool aufgezwängt werden. Das PLM soll dabei als Backbone dienen, um die verschiedenen Softwarewerkzeuge zu verbinden (s. Bild 1).

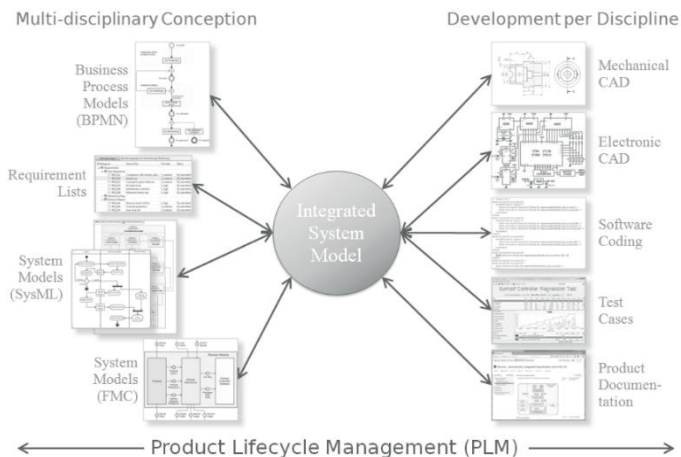


Bild 1: Das integrierte Systemmodell als Entwicklungsreferenz und zur Kombination von Informationen aus unterschiedlichen Ressourcen [4]

Maßgebend ist hierbei auch die Integration und Verknüpfung von disziplinspezifischen und -übergreifenden Modellen, die entlang des Produktentstehungsprozesses erzeugt werden.

Zur pragmatischen Realisierung der in Bild 1 dargestellten Idee wird in diesem Beitrag ein Informationsmodell vorgestellt. Das Modell definiert vor allem eine Klassenhierarchie von im Maschinen- und Anlagenbau anzutreffenden Modellklassen. Parallel wird eine auftragsneutrale Referenzstruktur entwickelt und mit dem Informationsmodell kombiniert. Anschließend wird auf die semantische Verknüpfung und Verlinkung der Modellklassen und Referenzstrukturelementen eingegangen und das integrierte Gesamtsystemmodell vorgestellt. Das Informationsmodell wird schematisch in UML definiert.

2 Aufbau des Informationsmodells

Das Informationsmodell beschreibt eine Metaebene losgelöst von der eigentlichen Systemdefinition und ist damit ein Modell der Modelle für die modellbasierte Entwicklung [9]. Das Informationsmodell soll dadurch sicherstellen, dass alle Domänenmodelle sinnvoll durch eine a priori definierte Klassifizierung erfasst und durch Traceability [10] verknüpft sind. Bild 2 zeigt das UML-Paketdiagramm des Informationsmodells.

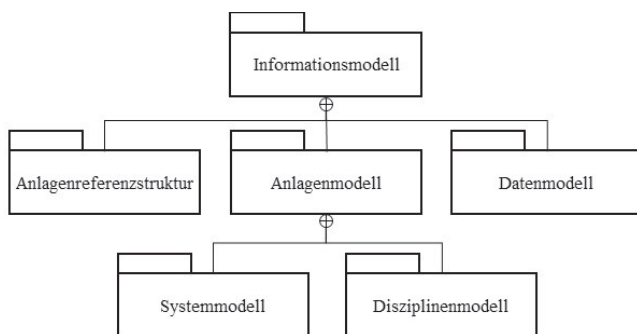


Bild 2: UML-Paketdiagramm des Informationsmodells

Das Paketdiagramm des Informationsmodells besteht aus den folgenden Bausteine:

Anlagenreferenzstruktur. Setzt sich zusammen aus Elementen der Systemlösung (Anlage) sowie aus allgemeinen Elementen, welche die Systementwicklung und -lieferung ermöglichen.

Anlagenmodell: Enthält die System- und Disziplinenmodelle und damit die gesamten Anlagenmodelle.

Systemmodell: Umfasst alle Systemmodelle, die das System schematisch und formal beschreiben.

Disziplinenmodell: Umfasst alle detaillierten technischen und numerischen Modelle des Systems.

Datenmodell: Beschreibt, klassifiziert und verknüpft den Dateninhalt einzelner Modellelemente.

Die oben aufgelisteten Bausteine des Informationsmodells werden in weiteren Schritten klassifiziert und abschließend semantisch verknüpft. Die Verlinkung der Modellklassen und Strukturen ermöglicht u. a. die Veranschaulichung von Assoziationen und sichert die Rückführbarkeit von Änderungen. Abhängig von dem zu betrachtenden Industriebereich und Unternehmen können die Modellklassen und Assoziationen im Detail variieren.

2.1 Anlagenreferenzstruktur

Die Anlagenreferenzstruktur ist generisch aufgebaut und beinhaltet alle Elemente, die zur Abdeckung der gesamten Portfolioleistungen erforderlich sind. Auf Grund der projekt- und auftragsorientierten Charakteristik der Produktentstehung im Maschinen- und Anlagenbaubereich wird die Anlagenreferenzstruktur beruhend auf der Methodologie des produktorientierten Projektstrukturplans (PSP) entwickelt [1]. Der Projektstrukturplan dient zur Identifizierung und Bestimmung von Hardware, Software und allen weiteren Projektleistungen, die zur Erreichung des Projektzieles notwendig sind [11]. Die Anlagenreferenzstruktur hat zwar eine projektorientierte Perspektive, ist aber projekt- und auftragsneutral und beinhaltet die wesentlichen Systemelemente des betrachteten Portfolios. Die Anlagenreferenzstrukturelemente dienen zudem als Modellkonfigurationsitem [12] u. a. zur Sicherstellung der Rückverfolgbarkeit von Änderungen.

Der Aufbau der Anlagenreferenzstruktur erfolgt in Anlehnung an Hoosmand [1] in den folgenden Schritten:

Aufbau der Struktur: Die generische Strukturierung der Anlage erfolgt Top-Down, so dass ein schrittweiser Aufbau der Struktur erfolgt. Dafür sind insbesondere die Modularisierungsansätze wie z. B. Modular Function Deployment oder METUS zum Aufbau der Anlagenstruktur zu empfehlen. Bei

dem Strukturaufbau geht es vor allem um die wichtigsten relevanten Elemente und nicht um den Detaillierungsgrad einer Stückliste bis auf die letzte Schraube. Für die Anlagenstrukturierung und Auswahl von Anlagenelementen sind unterschiedliche Faktoren, wie die strategische Bedeutung für das Unternehmen, das Niveau der Eigenfertigung, Komplexität des Elementes und Kostenanteil für die Herstellung oder den Kauf des Elementes zu berücksichtigen.

Ergänzung der allgemeinen Elemente: Zur Entwicklung und Lieferung des Systems sind mehrere unterstützende Leistungen, wie z. B. Projektmanagement, Test und Qualitätssicherung, notwendig. Diese Leistungen werden als allgemeine Elemente definiert und der im letzten Schritt festgelegten Struktur hinzugefügt [11]. Die allgemeinen Elemente können bei Bedarf auch unter anderen Elementen der Anlagenstruktur eingeordnet werden.

Klassifizierung der Strukturelemente: Abhängig von Unternehmensportfolio und -zielen können die Strukturelemente ganz unterschiedlich klassifiziert werden. Hier werden die Elemente in Hardware (HW), Elektrik/ Elektronik (EE), Software (SW) und allgemeine Elemente (AE) klassifiziert. Bild 3 zeigt die dementsprechende Klassifizierung der Anlagenstrukturelemente.

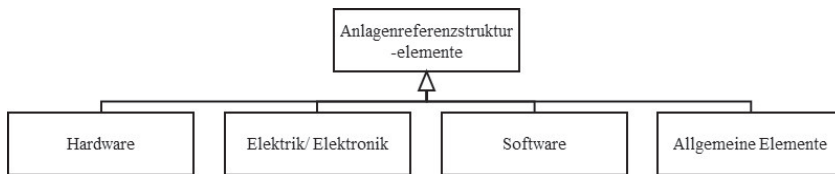


Bild 3: Klassifizierung der Anlagenstrukturelemente

Kennzeichnung der Strukturelemente: Jedes Element der Anlagenreferenzstruktur ist mit einem eindeutigen Code versehen, so dass auf dessen Basis die Position in der Referenzstruktur und die Vererbungshierarchie des Elementes ermittelt werden kann. Die Codes sind projekt- und auftragsneutral und dienen zur eindeutigen Identifikation der Elemente in der Struktur. Sie werden ebenfalls entlang aller Phasen eines Projektes als Referenzpunkt zur technischen und finanziellen Identifikation einzelner Strukturelemente benutzt [11]. Die Kennzeichnung wird je nach Element-Hierarchie und -Ebene mit weiteren Ziffern für Systemelemente oder Buchstaben für allgemeine Elemente ergänzt. Zum Beispiel wird ein allgemeines Element auf der dritten Strukturebene mit id:String="01.01.AA" gekennzeichnet.

Versionierung der Strukturelemente: Da die Anlagenreferenzstrukturelemente zusätzlich als Modellkonfigurationsitem dienen, stehen die Elemente



unter Versionskontrolle. Die auftragsneutrale Versionierung einzelner Elemente erfolgt auf Basis von dahinterstehenden Wissenseinheiten und Tools [1]. Die auftragsspezifische Versionierung der Elemente geschieht dagegen auf Basis von Änderungen der zugewiesenen und verlinkten Disziplinenmodelle. Dabei können auch die Einflüsse der Disziplinenmodelle aufeinander berücksichtigt werden. Dies wird im Abschnitt *Integriertes Gesamtsystemmodell* näher erläutert.

2.2 Anlagenmodell

Wie im Paketdiagramm des Informationsmodells (vgl. Bild 2) ersichtlich ist, enthält das Anlagenmodell die System- und Disziplinenmodelle. Dies umfasst die gesamten Anlagenmodelle, die für die Auftragsabwicklung notwendig sind.

Das Systemmodell umfasst alle Modelle zur schematischen und formalen Beschreibung des Systems. Wie in Bild 4 dargestellt, wird das Systemmodell in Architekturmodell, Anforderungsmodell und Verhaltensmodell klassifiziert, wobei eine tiefere Klassifizierung in weitere Unterklassen möglich ist. Das Architekturmodell kann dabei z. B. in Strukturmodell (inkl. Anlagenstruktur und RI-Fließbilder) und Mathematisches-Modell (inkl. dynamische und formelbasierte Modelle) klassifiziert werden. Manche Softwarewerkzeuge generieren integrierte Systemmodelle bestehen aus allen Systemmodellklassen. Solche Modelle werden dann als Systemmodell klassifiziert.

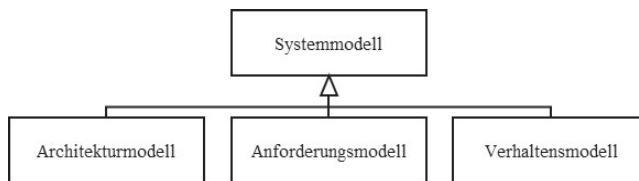


Bild 4: Klassifizierung des Systemmodells

Das Disziplinenmodell enthält alle domänenspezifischen technischen und numerischen Modelle des Systems. Das Disziplinenmodell wird hier in MCAD-, ACAD-, ECAD-, Quellcode-, FEA-, CFD- sowie Informelles-Modell (wie z. B. textbasierte Produktdokumentationen und -beschreibungen) klassifiziert (vgl. Bild 5). Unternehmensspezifisch können noch weitere Klassen erforderlich sein.

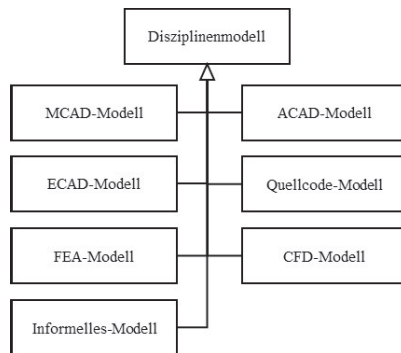


Bild 5: Klassifizierung des Disziplinenmodells

Die definierten System- und Disziplinenmodellklassen werden noch zueinander und zu den Anlagenreferenzstrukturelementen semantisch in Beziehung gesetzt. Dies wird im Abschnitt Integriertes Gesamtsystemmodell beschrieben.

2.3 Datenmodell

Das Datenmodell dient zur Beschreibung und Klassifizierung und verknüpft den Dateninhalt einzelner Modellelemente. Das Datenmodell wird in Nativmodell, Neutralmodell und Metadatenmodell klassifiziert (s. Bild 6). Auch hier kann eine Unterteilung in weitere Klassen erfolgen. Das Nativmodell und das Neutralmodell werden ähnlich wie das Disziplinenmodell klassifiziert (MCAD-Modell, ACAD-Modell etc.). Diese Modelle werden unterklassifiziert z. B. Nativ-MCAD-Modell in Creo-prt etc. oder Neutral-MCAD-Modell in JT etc. Die Klassifizierung kann hier ebenfalls unternehmensspezifisch anders ausfallen.

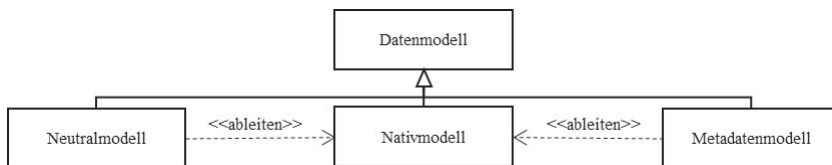


Bild 6: Klassifizierung des Datenmodells

Die Neutral- und Metadatenmodelle werden aus den Nativmodellen erzeugt und abhängig von dessen Änderungen aktualisiert. Das Datenmodell ist semantisch mit den Anlagenreferenzstrukturelementen verlinkt und spielt eine

wichtige Rolle bei der Verbesserung der Interoperabilität zwischen unterschiedlichen Softwarewerkzeugen.

Im nächsten Abschnitt wird das Zusammenspiel zwischen der Anlagenreferenzstruktur, dem Anlagenmodell und dem Datenmodell zur Erstellung eines integrierten Gesamtsystemmodells erläutert.

3 Integriertes Gesamtsystemmodell

Nach Adam [4] kombiniert das integrierte Systemmodell Informationen aus unterschiedlichen Ressourcen und dient als Referenz zur Systementwicklung. Wie in Bild 1 dargestellt, wird das integrierte Systemmodell die erzeugten disziplinspezifischen und -übergreifenden Modelle zu einem Gesamtsystemmodell zusammenführen. Das in dieser Arbeit vorgestellten Informationsmodell bietet demnach die Basis zur Integration unterschiedlicher Systemmodelle und -strukturen in ein Gesamtsystemmodell der zu betrachtende Anlage. Aufgabe ist hier zum einen die Festlegung der Abhängigkeiten zwischen den im Abschnitt 2 definierten Modell- und Strukturklassen und zum anderen die bidirektionale Integration der Anlagenreferenzstruktur (Modellkonfigurationssystems) und Modellklassen. Diese wird in den folgenden Abschnitten erfolgen.

3.1 Festlegung der Abhängigkeiten zwischen den definierten Klassen

Die Abhängigkeiten zwischen Modellklassen können in unterschiedlichen Unternehmen ganz unterschiedlich ausfallen. Dabei wird definiert wie die Modell- und Strukturklassen zu einander stehen und einander beeinflussen. Diese Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt zur Entwicklung des integrierten Gesamtsystemmodells verwendet.

Hierbei wird festgelegt, dass z. B. ein MCAD-Modell ein Architekturmodell verfeinert (vgl. Bild 7) oder ein FEA-Modell ein MCAD-Modell zugewiesen wird. Zudem kann festgelegt werden, welche Anlagenreferenzstrukturelemente (HW, EE, SW AE) welchen Modellklassen zugeordnet werden können.

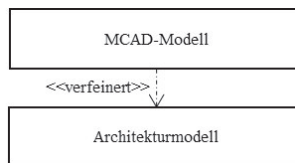


Bild 7: Festlegung der Abhängigkeit zwischen dem MCAD-Modell und dem Anforderungsmodell

3.2 Bidirektionale Integration der Anlagenreferenzstruktur und Modellklassen

Dieser Schritt ist maßgebend für die Entwicklung des integrierten Gesamtsystemmodells. Einerseits enthalten einzelne Modelle die Information über die zu beinhaltenden Anlagenreferenzstrukturelemente. Somit weiß z. B. ein Teilanlagen-MCAD-Modell, dass es die Anlagenreferenzstrukturelemente Rohrleitung, Ventil, Druckbehälter und Pumpe beinhaltet oder eine Schnittstelle zu diesen Elementen hat (s. Bild 8). Andererseits enthalten einzelne Anlagenreferenzstrukturelemente die Information über die zugewiesenen Modelle. Somit weiß z. B. das Anlagenreferenzstrukturelement Ventil, dass es die MCAD-Modell, FEA-Modell und Architekturmodell etc. zugewiesen bzw. überwacht sind (s. Bild 9).

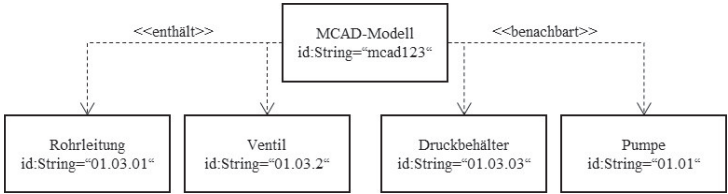


Bild 8: Festlegung der Anlagenreferenzstrukturelemente in Modellklassen

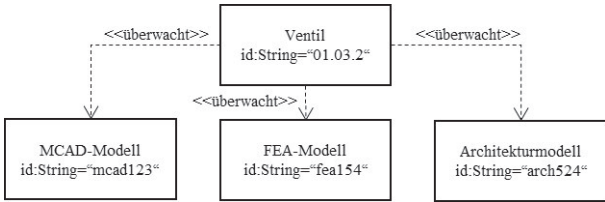


Bild 9: Integration der Modellklassen in Anlagenreferenzstruktur

Folgendes Szenario verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Modellen und Strukturelementen.

Nachdem ein Nutzer ein Modell (Anforderungsmodell, MCAD-Modell etc.) in einem domänenspezifischen Tool bearbeitet und speichert, wird das Modell als Nativmodell, Neutralmodell und Metadatenmodell gespeichert bzw. aktualisiert. Das Metadatenmodell enthält die benötigten Informationen zu betroffenen Anlagenreferenzstrukturelementen (Bild 8). Diese Elemente sind gleichzeitig als Modellkonfigurationsitem definiert und stehen unter Versions-

kontrolle. Bei der Aktualisierung eines der zugewiesenen Modelle (inkl. Metadatenmodellen) und auf Basis der im Abschnitt 3.1 definierten Abhängigkeiten, werden weitere Modelle zur Aktualisierung benachrichtigt (Bild 9). Somit enthält jedes Anlagenreferenzstrukturelement die gesamte Entwicklungshistorie und sichert die Nachvollziehbarkeit der Änderungen.

Die Festlegung der Abhängigkeiten zwischen Anlagenreferenzstrukturelemente kann sowohl in Modellen als auch in der Anlagenreferenzstruktur erfolgen. Abhängig von Unternehmensprozessen kann die Bearbeitung von weiteren betroffenen Anlagenreferenzstrukturelemente parallel oder sequentiell erfolgen.

Die auftragsspezifischen Anlagenreferenzstrukturen werden von der entwickelten Anlagenreferenzstruktur abgeleitet. Die festgelegten Abhängigkeiten zwischen Klassen und Strukturelementen werden daher vererbt (auftragsspezifische Konfigurationen sind evtl. notwendig). Die Versionierung erfolgt dann auftragsspezifisch.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Informationsmodell für die modelbasierte Entwicklung (MBE) im Maschinen- und Anlagenbau vorgestellt. Das Informationsmodell berücksichtigt alle Systemmodelle (System- oder Disziplinenmodell) und -strukturen. Durch die Benutzung der Anlagenreferenzstruktur als Bindeglied zwischen unterschiedlichen Modellen werden die Änderungen in einem Modell in weiteren assoziierten Modellen erkennbar und nachvollziehbar. Dies ermöglicht die föderalisierte Realisierung des erwünschten integrierten Gesamtsystemmodells. Damit wird eine Implementierung in gängigen PLM Systemen mit begrenztem Aufwand im Vergleich zu zentralisierten Lösungen realisierbar.

Zur Validierung des Ansatzes muss noch eine beispielhafte Implementierung des Informationsmodells in einem PLM-System mit exemplarischen Authoring-Systemen und realen Praxisdaten erfolgen. Zudem muss die Entwicklung von Metadatenmodellen und Datenschnittstellen untersucht werden. Der Ansatz wird zurzeit im Rahmen des Verbundprojektes „JMEK“ umgesetzt.

Literatur

- [1] Hooshmand, Y.: „Transparenzerhöhung bei der Entwicklung von individualisierten Produkten in der Einzelfertigung“, Verlag Dr.Hut, München, 2015.

-
- [2] Hildebrand, V. G.: „Individualisierung als strategische Option der Marktbearbeitung. Determinanten und Erfolgswirkungen kundenindividueller Marketingkonzepte“, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 1997.
- [3] Gausmann, O.: „Kundenindividuelle Wertschöpfungsnetze. Gestaltungsempfehlungen unter Berücksichtigung einer auftragsorientierten Produktindividualisierung“, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [4] Adam, A. et al.: “10 theses about MBSE and PLM”, PLM4MBSE Working Group - GfSE e.V., Position Paper V1.1, 2016.
- [5] Alt, O.: „Modellbasierte Systementwicklung mit SysML“, Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [6] Friedenthal, S.; Moore, A.; Steiner, R.: “A practical guide to SysML, The systems modeling language”, Morgan Kaufmann, Boston, 2011.
- [7] Broy, M.: „Modellbasiertes Software und Systems Engineering als Element eines durchgängigen Systems Lifecycle Managements (SysLM)“, In: (Sendler, U. Hrsg.): Industrie 4.0. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [8] Eigner, M., Daniil, R. & Zafirov, R.: „Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung“, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [9] Höner, M.: „Erarbeitung eines Ansatzes für die modellbasierte Systementwicklung im Anlagenbau“, Abschlussarbeit, Universität Duisburg-Essen, IPECAE, Duisburg, 2016.
- [10] ISO/IEC/IEEE 24765:2010(E): “Systems and software engineering – Vocabulary”, 2010.
- [11] “NASA Work Breakdown Structure (WBS) Handbook”, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington, D.C., 2010.
- [12] Fisher, A. et al.: “Model Lifecycle Management for MBSE”, OMG Workshop 2015.

Agilität als Alternative zu traditionellen Standards in der Entwicklung physischer Produkte: Chancen und Herausforderungen

Tobias Sebastian Schmidt¹, Kristin Paetzold²

¹ *Institut für Innovations- und Technologiemanagement
Universität der Bundeswehr München*

² *Institut für Technische Produktentwicklung
Universität der Bundeswehr München*

Abstract

Product development becomes increasingly uncertain and dynamic. Under these conditions, traditional approaches such as VDI 2221 and VDI 2206 reach their limits as they are too stiff to handle large numbers of changes efficiently. Agile methods, however, are flexible and embrace changes. In software development, they have been proven very beneficial which is why they belong to the standard procedures there. In the development of physical products, crucial challenges (e.g. building prototypes frequently) exist. Considering that, the paper investigates, if agile methods are serious alternatives to traditional approaches for physical product development, too. It turns out that they are not. Nevertheless, maturing technologies such as 3d printing could potentially serve as a game changer soon.

Keywords: Agile Development of Physical Products, VDI 2221, VDI 2206

1 Einleitung

Produktentwicklung als Summe aller Aktivitäten, die mit der Herleitung einer Produktidee und dem Kreieren eines marktreifen Produkts einhergehen, verfolgt das Ziel, einen speziellen Kundenbedarf mit Hilfe einer technischen Lösung möglichst schnell, möglichst hochwertig und möglichst günstig zu befriedigen. Unternehmensseitig spielt dabei die Wirtschaftlichkeit eine große Rolle, um die eigene Wettbewerbsposition zu sichern oder idealerweise zu verbessern. Kundenseitig dominiert der Grad der Zufriedenheit, inwiefern das Produkt das spezielle Problem löst.

In zunehmend mehr Märkten sehen sich Unternehmen dabei herausfordernden Trends konfrontiert, denn die Rahmenbedingungen der Entwicklungsprojekte unterliegen einer steigenden Unsicherheit und Dynamik. Bspw. sind Stakeholder immer weniger in der Lage, ihre Bedürfnisse bzw. Produktanforderungen explizit auszudrücken [1], [2], verfügbare Entwicklungszeiten sinken [3] und der Funktionsumfang und die Abhängigkeiten der Funktionen untereinander nehmen zu [4]. Dies führt dazu, dass Produkthanforderungen erst im Laufe der Entwicklung bewusst werden und initiale Annahmen zu revidieren sind. Unter diesen Umständen stoßen bewährte, traditionelle Produktentwicklungsmethoden wie die VDI 2221 oder VDI 2206 immer öfter an ihre Grenzen [4]–[7].

Eine Alternative zu diesen Standardmethoden stellen agile Ansätze dar, die aus der Softwareentwicklung stammen. Sie versprechen mittels kurzen Iterationen einerseits die notwendige Flexibilität, um auf Unvorhersehbares zu reagieren, und andererseits die geforderte Prozesseffizienz, um dabei trotzdem den monetären Anforderungen zu genügen. In der Softwareindustrie gehören agile Methoden mittlerweile zu den Standardvorgehen. Bedingt durch den derzeitigen Hype um agile Entwicklungsmethoden und den beeindruckenden Erfolgsgeschichten aus der Softwareentwicklung sind hohe Erwartungen mit dem Begriff verbunden [7], [8]. Es stellt sich daher die Frage, ob sich Agilität auch außerhalb der Softwareindustrie dazu eignet, obigen Trends zu begegnen:

- Ist Agilität auch in den Non-Softwareindustrien eine ernstzunehmende Alternative zu den bewährten, traditionellen Produktentwicklungsstandards wie VDI 2221 und VDI 2206?
- Wo liegen die Chancen und derzeitige Grenzen der agilen Entwicklung physischer Produkten?

Dazu führt die Untersuchung eine Literaturrecherche durch. Im Fokus stehen dabei aktuelle Anforderungen an die Vorgehensweisen sowie die Chancen und Herausforderungen agiler Produktentwicklung.

2 Produktentwicklungsmodelle im Überblick

Als definitorische Grundlage folgt eine kurze Vorstellung der bewährten, traditionellen Vorgehensmodelle sowie der agilen Entwicklungsmethoden, sodass im Anschluss ein Vergleich stattfinden kann. Da VDI-Richtlinien das Ziel verfolgen, wesentliche Forschungserkenntnisse und Praxiserfahrungen für die angewandte Produktentwicklung zu sammeln und zu verdeutlichen, fungieren VDI 2221 und VDI 2206 als Repräsentanten traditioneller Vorgehensweisen.

2.1 VDI 2221

Die VDI 2221 beinhaltet ein Entwicklungsvorgehen, das produkt- und branchenunabhängig Anwendung findet. Es gliedert sich in die vier Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten und ordnet diesen sieben Arbeitsschritten zu. Sie beginnen mit dem Klären der Problemstellung, führen über das Gliedern und Gestalten von Modulen und enden schließlich mit dem Protokollieren der Ergebnisse. Wiederholungen der Phasen als Ganzes oder als Teil sind zwecks Lösungsoptimierung explizit zugelassen [9].

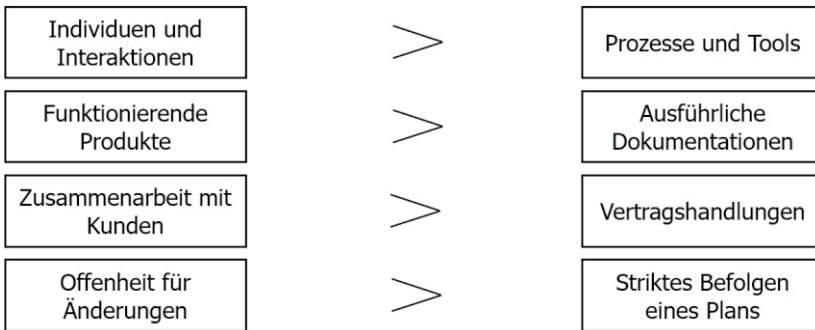
2.2 VDI 2206

Die Produktentwicklung nach VDI 2206 bildet ein Vorgehensmodell speziell für mechatronische Systeme ab und beinhaltet drei fundamentale Wesensmerkmale. Auf der *Mikroebene* beruht das Vorgehen auf einem allgemeinen, iterativen Problemlösungszyklus (Ist-Aufnahme, Zieldefinition, Problemanalyse, Lösungssynthese, Bewertung und Entscheiden). Die *Makroebene* folgt dem V-Modell, das ein domänenübergreifendes Lösungskonzept vom Allgemeinen ins Detail zunächst in Teilfunktionen zerlegt, domänenspezifisch ausarbeitet und anschließend zum Gesamtsystem, sprich vom Detail ins Allgemeine, integriert. Bei der Systemintegration spielt die Eigenschaftsabsicherung, also der Vergleich zwischen beabsichtigtem Zielzustand und vorhandenem Ist-Zustand, eine große Rolle. Diese Makroebene gestaltet sich ebenfalls iterativ, wobei die Produktreife bei jedem Durchgang steigt. Als drittes Wesensmerkmal dienen *Prozessbausteine* für repetitive Aufgabenstellungen, die bspw. die Arbeitsschritte der Eigenschaftsabsicherung konkretisieren und so die Konsistenz und Prozessverlässlichkeit über die gesamte Entwicklung hinweg sicherstellen [10].

2.3 Agile Methoden

Agilität ist „die Fähigkeit, schnell und kooperativ auf Veränderungen in unvorhersehbaren Umwelten (zumeist reaktiv) einzugehen, um Bedarfe effizient und effektiv zu befriedigen.“ [11] Sehr ähnlich definiert Conboy Entwicklungssagilität als die Bereitschaft einer Entwicklungsmethode, Veränderungen zu begrüßen und aus ihnen zu lernen, um Kundenwert zu erzeugen [12]. Agile Produktentwicklung referenziert in dieser Untersuchung somit nicht das Hervorbringen agiler Produkte, sondern eine agile Entwicklungstätigkeit [13].

Agile Ansätze stammen aus der Softwareentwicklung, in der sich 2001 17 Programmierer wegen großer Unzufriedenheit mit zu steifen, bürokratischen und innovationshemmenden Prozessstandards auf vier Werte und zwölf Arbeitsprinzipien geeinigt haben (s. Abbildung) [14]. Dieses Manifest der agilen Softwareentwicklung verkörpert die Art und Weise, wie die 17 Programmierer arbeiten wollen. Da sich herausstellt, dass das Manifest die Meinung von sehr vielen anderen Softwareentwicklern widerspiegelt, reift der Agilitätsgedanke rasant zu einem neuen Standardvorgehen in der Softwareindustrie [15].



Wir erkennen sehr wohl den Wert der Dinge auf der rechten Seite an, wertschätzen jedoch die auf der linken Seite noch mehr.

Abbildung 1: Werte des Manifests für agile Produktentwicklung [14], [16]

Um das werte- und prinzipiengerechte Handeln zu unterstützen, wurden diverse agile Methoden entwickelt. Die bekanntesten heißen Scrum, eXtreme Programming (XP), Crystal, Feature Driven Development (FDD) und Kanban, wobei im Folgenden Scrum exemplarisch näher beleuchtet wird.

Nach der Scrum Methode erarbeitet ein interdisziplinäres und selbstorganisiertes Team (≤ 10 Personen) in Iterationen, bei Scrum Sprints genannt, von

zwei bis vier Wochen einen potentiell auslieferbaren Prototypen, den der Kunde am Ende jedes Sprints evaluiert. Das Kundenfeedback fließt schließlich in den nächsten Sprint ein, sodass von Sprint zu Sprint der Produktreifegrad steigt. Scrum verfolgt die Logik, nur aus Kundensicht essentielle Funktionen in den Prototypen aufzunehmen (Minimum Viable Product) und den Funktionsumfang sukzessive zu erweitern. Mit jedem Inkrement lernt das Team die Kundenbedarfe besser kennen und es kristallisiert sich eine gemeinsame Produktvision heraus. Neben der Prototypenevaluation findet am Ende jedes Sprints eine Retrospektive statt, in der das Team Erfahrungen des letzten Sprints kritisch reflektiert und für zukünftige Sprints lernt. Zusätzlich zum Entwicklungsteam existieren die Rollen Scrum Master, der das Team methodisch unterstützt und für gute Arbeitsbedingungen sorgt, und Product Owner, der als interner Vertreter der Kundeninteressen agiert [16], [17].

2.4 Gegenüberstellung

Traditionelle Produktentwicklung geht davon aus, dass sich die Informationsgrundlage zu Projektbeginn kaum ändern wird. Dazu analysieren sie das Problem profund und erwarten vom Kunden, dass er eine konkrete Vorstellung von seinem Bedarf hat und diesen nur mit geringen Unschärfen beschreiben kann. Diese Genauigkeit ist notwendig, denn traditionelle Vorgehen streben nach einem idealen Ablaufplan, der für einen speziellen Anwendungsfall optimale Maßnahmen vor der Ausführung definiert [5], [18].

Agile Produktentwicklung jedoch geht davon aus, dass sich die anfängliche Informationsgrundlage ohnehin ändern wird, weshalb ein initialer und detaillierter Ablaufplan nicht notwendig ist [18]. Vielmehr akzeptiert Entwicklungssagilität die Präsenz von Unsicherheit [19] und strebt danach, die Konsequenzen von Fehlprognosen möglichst klein zu halten [2]. Statt vom Kunden möglichst konkrete Bedarfsangaben zu erhoffen, erwarten agile Methoden, dass der Kunde zwecks Evaluierung in regelmäßigen Abständen ein Feedback abgibt [18]. Agile Vorgehen verlassen sich auf die Fähigkeiten der Mitarbeiter, die situationsadäquate Maßnahmen selbstständig einleiten und durchführen [18]. „Agile Methoden fokussieren also auf die Adaptionfähigkeit, nicht auf die Vorhersage von spezifischen Ereignissen.“ [4] Weitere Wesensunterschiede fasst Tabelle zusammen.

Tabelle 1: Traditionelle versus agile Entwicklungsansätze (in enger Anlehnung an [5], [18])

Kategorie	Traditionell	Agil
Entwicklungsprozess	Durchdacht und formal, Abfolge von Arbeitsschritten, plan- und regelgetrieben	Emergent, iterativ und explorativ, Wissen und Handlung untrennbar, wertgetrieben
Ziel	Optimierung	Adaptierung, Flexibilität, Reaktionsfreudigkeit
Problemlösung	Auswahl der besten Maßnahmen, planvoll und formalisierte Aktivitäten	Lernen durch Experimentieren, kontinuierliches Reframing der Probleme und Lösungen
Wahrnehmung der Umwelt	Stabil, vorhersehbar	Turbulent, schwierig vorhersehbar
Wesensmerkmale	Command-and-Control Führungsstil Vermeidet Konflikte Formalisierter Innovationsprozess Manager = Kontrolleur Erst Gestaltung, dann Implementierung	Selbstorganisierte Teams, dezentrale Entscheidungen Begrüßt Konflikte und Dialektik Animiert zur Exploration und Kreativität Manager = Vermittler Gestaltung und Implementierung sind untrennbar und entwickeln sich iterativ
Kundenintegration	Wichtig, Kunde am Anfang und am Ende involviert	Erfolgskritisch, Kunde kontinuierlich involviert
Theoretische Verankerung	Logischer Positivismus, wissenschaftliche Methoden	„Learning by Doing“, Dewey's Pragmatismus, Phänomenologie, Cynefin Framework

3 Aktuelle Anforderungen an die Produktentwicklung

Rahmenbedingungen der Produktentwicklung wie Stakeholder-Interessen etc. können nur selten als sicher angenommen werden. In der Regel unterliegt ihnen eine unvorhersehbare Dynamik. Diese Unsicherheit kann technischer (Wird das Produkt funktionieren?), produktionstechnischer (Ist eine wirtschaftliche Produktion möglich?), bedarfs- (Was genau will der Kunde?) oder marktbezogener Natur (Wird sich das Produkt verkaufen?) sein [2].

Unsicherheitstreiber sind zum einen neue Technologie [4], die sich immer schneller ändern. Jede neue Technologie birgt das Risiko, dass Kunden Produkte mit alter Technologie weniger wertschätzen und sich somit die erhofften Margen nicht einstellen. Zum anderen trägt die kundenseitige Schwierigkeit, Produkthanforderungen explizit zu spezifizieren, stark zur Präsenz von Unsicherheit in der Produktentwicklung bei [1], [4]. Dies resultiert sowohl daraus, dass die Übermittlung impliziten Wissens kostspielig ist („sticky information“) [1], als auch daraus, dass die Technik existierender Produkte aus Kundensicht oft intransparent ist (Black Box) [4]. Auch der Wettbewerb wird aufgrund zunehmender Globalisierung intensiver, womit wirtschaftliche Unsicherheiten einhergehen [3], [4]. Des Weiteren verursachen der zunehmende Funktionsumfang in Produkten sowie die wachsende Stärke und steigende Zahl von Abhängigkeit zwischen den Funktionen Unsicherheiten, denn mit zunehmender Komplexität erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Entwicklungsfehlern [4].

Wegen steigender Dynamik und Unsicherheit in den Rahmenbedingungen der Produktentwicklung ist es ratsam, Produkte entweder sehr schnell zu entwickeln, um möglichst wenigen Veränderungen ausgesetzt zu sein, oder möglichst flexibel vorzugehen und den Design Freeze sehr spät durchzuführen [20]. Daneben ist es denkbar, entweder eine Strategie der Unsicherheitsvermeidung bzw. -minimierung durch z.B. profunde Analysen und planvoller Voraussicht, oder eine Strategie der Unsicherheitsakzeptanz durch z.B. die Minimierung von Konsequenzen von Prognosefehlern zu verfolgen [2], [19]. Während traditionelle Ansätze auf Ersteres setzen, referenzieren agile Ansätze Letzteres.

4 Chancen der agilen Entwicklung

Der wohl größte Vorteil agiler Methoden gegenüber traditionellen Herangehensweisen ist die Fähigkeit, auf Unvorhersehbares durch kurze Iterationen und enge Kollaboration im Team sowie mit dem Kunden zu reagieren. Da agile Ansätze Testen nicht als reines Verifizierungsinstrument, sondern darüber hinaus als Möglichkeit zum Lernen verstehen [2], wird die steigende Dynamik und Unsicherheit in Entwicklungsrandbedingungen langfristig beherrschbar. Funktionierende Prototypen, die das Ergebnis jeder Iteration darstellen, schärfen zudem mit jeder Wiederholung eine gemeinsame Produktvision, da sie nicht nur explizites, sondern auch implizites Wissen vermitteln [4], [21].

Agile Methoden schöpfen des Weiteren das Potential der Humanressourcen tiefschürfender aus, indem sie (a) Mitarbeitern weite Handlungs- und

Entscheidungsfreiheiten gewähren [22], [23], (b) selbstorganisierte Teams fordern und fördern (dezentrale Entscheidungen – Prinzip: viele Augen sehen mehr als wenige)[22], [23] und (c) eine Leadership-and-Collaboration statt Command-and-Control Strategie verfolgen [18]. Dies resultiert schließlich in einer hohen Motivation und Commitment der Mitarbeiter, fördert kreatives und unkonventionelles Denken und Handeln, und stimuliert somit radikale Innovationen [5].

5 Derzeitige Grenzen der agilen Entwicklung

Den vielseitigen Chancen stehen in der Praxis herausfordernde Probleme gegenüber. Vorliegende Untersuchung nimmt eine Unterteilung zwischen grundsätzlichen Problemen, die unabhängig der Produktgestalt (virtuell oder physisch) auftreten können, und Problemen, die darüber hinaus mit der Entwicklung physischer Produkte einhergehen, vor. Letztere werden als Einschränkungen der Körperlichkeit bezeichnet und sind somit als Grenzen definiert, die eine Minderung der Einsatztauglichkeit agiler Entwicklungsmethoden bedingt durch die physische Produktgestalt implizieren.

5.1 Grundsätzliche Probleme unabhängig der Produktgestalt

Empirische Studien berichten von der mitarbeiterseitigen Angst vor Transparenz, die persönliche Schwächen aufdeckt [24], [25], dem managerseitigen Gefühl von Kontrollverlust, der mit selbstorganisierten Teams einhergeht [24], einer beschränkten Skalierbarkeit auf Großprojekte [25], einer bedingten Tauglichkeit für dezentrale bzw. verteilte Teams [15], [25], [26] und davon, dass das Team agile Praktiken wie Kochrezepte anwendet anstatt die agilen Werte und Prinzipien zu verstehen und zu leben [24], [25]. Ausführliche Erläuterungen dieser und weiterer grundsätzlichen Probleme finden sich in [24]–[26].

Ovesen, der sieben Unternehmen bei der Einführung agiler Methoden in die Entwicklung physischer Produkte über mehrere Jahre begleitet hat, identifiziert sehr ähnliche Probleme [27]. Daher haben sie eine prinzipiell gestaltungsabhängige Bedeutung, auch wenn Sie derzeit hauptsächlich im Kontext der agilen Softwareentwicklung untersucht werden [15], [23].

5.2 Einschränkungen der Körperlichkeit

Um agile Methoden von der Entwicklung von Softwareprodukten in die Entwicklung von Non-Softwareprodukten zu überführen, stellt das Überwinden der Einschränkungen der Körperlichkeit das erfolgskritische Kriterium dar

[27]. In anderen Worten: Sind die Einschränkungen der Körperlichkeit eliminiert, gibt es keinen Grund, in der Problem- bzw. Lösungserforschung eine Kontextunterscheidung zwischen virtuellen und physischen Produkten vorzunehmen.

Zum einen bestehen die Einschränkungen der Körperlichkeit aus Herstellungsproblemen der Prototypen binnen Iterationen von zwei bis vier Wochen. Während sich Software innerhalb weniger Sekunden kompilieren lässt, benötigt die Herstellung von physischen Prototypen je nach Produkt mehrere Tage bis Monate. Damit verbunden gehen Flexibilitätsprobleme einher, denn externe Abhängigkeiten z.B. zu Zulieferern (lange Lieferzeiten, Änderungsmöglichkeiten von aufgegebenen Bestellungen etc.) erschweren die Erzeugung von physischen Prototypen erneut. Außerdem ist es herausfordernd, Iterationsziele festzulegen. Dies begründet sich vor allem darin, dass in physischen Produkten eine Komponente in der Regel mehrere Funktionen abbildet und somit Separierungsprobleme auftreten [27].

Zum anderen bestehen die Einschränkungen der Körperlichkeit aus Organisationsproblemen. Insbesondere die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme benötigt Expertenwissen von sehr unterschiedlichen Domänen (z.B. Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik). Da agile Methoden nach einer möglichst großen Fähigkeits- und Wissensredundanz zwischen den einzelnen Teammitgliedern streben, ist es schwierig, ein agiles Team zu besetzen. Es dürfen nicht zu viele Personen sein, es erfordert eine große Redundanz und es müssen alle notwendigen Fähigkeiten integriert sein [27].

Nichtsdestotrotz stellt Conforto et al. fest, dass eine Anwendung agiler Werte und Prinzipien theoretisch auch in Non-Softwareindustrien möglich ist [21]. Dies belegen ebenfalls einige Fallbeispiele praktisch, in denen Industrieunternehmen ihre Produktentwicklung – zumindest teilweise – von einer traditionellen zu einer agilen Arbeitsweise umgestellt haben [27]–[30].

6 Diskussion und Fazit

Eine „kanonisierbare Optimalform des Konstruktionsprozesses, der der Entwickler in einem festen Ablaufplan folgen kann“ ([31] zit. nach [10]), existiert nicht. Individuelle Kontextfaktoren machen eine Adaption der Vorgehensmodelle an die spezifischen Einsatzbedingungen unausweichlich. Für eine Adaption traditioneller Ansätze an Einsatzbedingungen mit hohen Unsicherheiten (z.B. radikale Innovationen) sind sie jedoch nicht ausgelegt.

Agile Entwicklungsansätze dagegen sind insbesondere für unsichere und dynamische Einsatzbedingungen konzipiert. Sie begünstigen grundsätzlich eine innovations- und kreativitätsfördernde Arbeitskultur und steigern über das regelmäßige Einholen von Stakeholder-Feedback die Chance, dass das Produkt am Markt Erfolg hat. Im Vordergrund steht die Lösung der tatsächlichen Kundenbedarfe und nicht wie in traditionellen Standards das Erfüllen von Vertragsvereinbarungen. Darüber hinaus stimulieren agile Ansätze das Hervorbringen von radikalen Innovationen, was insbesondere im Hinblick auf die Wettbewerbsposition positive Effekte haben kann. Demnach wecken agile Ansätze Begierden (z.B. nach mehr Flexibilität, selbstorganisierte Teams etc.), die traditionelle Standards aufgrund ihrer Steifigkeit und Plangetriebenheit nicht erfüllen.

Auch wenn agile Entwicklungsansätze prinzipiell gewinnbringend sind, stoßen sie in Non-Softwareindustrien wegen der physischen Produktgestalt derzeit schnell an die Grenze des Machbaren. Bspw. ist die Herstellung von physischen Prototypen in Iterationen von wenigen Wochen eine Herausforderung, ebenso das Besetzen der Teams. Um die agilen Werte und Prinzipien tatsächlich zu leben, ist das Lösen dieser Einschränkungen der Körperlichkeit unverzichtbar.

Zusammengefasst stellen agile Entwicklungsansätze momentan keine ernstzunehmende Alternativen zu bewährten, traditionellen Produktentwicklungsstandards wie der VDI 2221 oder VDI 2206 dar. Solange die Einschränkungen der Körperlichkeit existieren, bleiben sie in der Entwicklung physischer Produkte Gedankenexperimente und Ausdruck nach Begierden. Nichtsdestotrotz können neuartige Technologien wie z.B. additive Fertigungsverfahren sowie Augmented und Virtual Reality, deren technologische Reifegrade mittlerweile eine verlässliche Alltagstauglichkeit aufweisen [32], [33], als potentielle Lösungsansätze fungieren. Zukünftige Forschung sollte daher versuchen, die Einschränkungen der Körperlichkeit z.B. mit Hilfe obiger Technologien zu minimieren. Werden die Einschränkungen der Körperlichkeit auf ein Minimum reduziert, ist es naheliegend, dass die agilen Ansätze, die wie das V-Modell zunächst in der Softwareindustrie hervorgekommen sind, gewinnbringend in Non-Softwareindustrien diffundieren.

Literatur

- [1] E. Von Hippel, "'Sticky information' and the locus of problem solving: implications for innovation.," *Manage. Sci.*, vol. 40, no. 4, pp. 429–439, 1994.
- [2] S. Thomke, "Learning by experimentation: Prototyping and testing," in

-
- Handbook of New Product Development Management*, C. H. Loch and S. Kavadias, Eds. Oxford: Elsevier, 2008, pp. 401–420.
- [3] S. Minderhoud and P. Fraser, "Shifting paradigms of product development in fast and dynamic markets," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 88, no. 2, pp. 127–135, 2005.
- [4] P. Link, "Agile Methoden im Produkt-Lifecycle-Prozess: Mit agilen Methoden die Komplexität im Innovationsprozess handhaben," in *Komplexitätsmanagement in Unternehmen*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014, pp. 65–92.
- [5] S. Nerur and V. Balijepally, "Theoretical reflections on agile development methodologies," *Commun. ACM*, vol. 50, no. 3, pp. 79–83, 2007.
- [6] H. Adickes et al., "Lean Innovation – Auf dem Weg zur Systematik," in *AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium*, Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik - Aachener Perspektiven, Ed. Aachen: Apprimus, 2008, pp. 473–512.
- [7] M. Laanti, O. Salo, and P. Abrahamsson, "Agile methods rapidly replacing traditional methods at Nokia: A survey of opinions on agile transformation," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 276–290, 2011.
- [8] A. Janes and G. Succi, "The dark side of agile software development," in *Proceedings of the ACM International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming and Software*, 2012, pp. 215–227.
- [9] VDI 2221, "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte." VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986.
- [10] VDI 2206, "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme." VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [11] T. S. Schmidt, F. Guaragni, and K. Paetzold, "Demerging agility, leanness, flexibility, reconfigurability and changeability: Towards a clear distinction," in *22th Int. Conf. Eng. Technol. Innov.*, 2016.
- [12] K. Conboy, "Agility from first principles: Reconstructing the concept of agility in information systems development," *Inf. Syst. Res.*, vol. 20, no. 3, pp. 329–354, 2009.
- [13] R. Haberfellner and O. de Weck, "Agile SYSTEMS ENGINEERING versus AGILE SYSTEMS engineering," *INCOSE Int. Symp.*, vol. 17, no. 2, pp. 1–17, 2005.
- [14] K. Beck et al., "Manifesto for Agile Software Development," 2001. [Online]. Available: agilemanifesto.org. [Accessed: 08-Jul-2016].
- [15] T. Dingsøyr et al., "A decade of agile methodologies: Towards explaining agile software development," *J. Syst. Softw.*, vol. 85, no. 6, pp. 1213–1221, 2012.

-
- [16] J. Bahlow et al., "Scrum als Methode für agiles Projektmanagement," in *Agiles Projektmanagement in der Praxis der Produktentwicklung*, G. Kullmann et al., Eds. Chemnitz: aw&I Wissenschaft und Praxis, Technische Universität Chemnitz, 2013, pp. 11–19.
- [17] K. Schwaber and J. Sutherland, "Der Scrum Guide," 2013.
- [18] S. Nerur, R. Mahapatra, and G. Mangalaraj, "Challenges of Migrating to Agile Methodologies," *Commun. ACM*, vol. 48, no. 5, pp. 73–78, 2005.
- [19] C. Ingvarsson Munthe et al., "Dealing with the devil of Deviations: Managing Uncertainty During Product Development Execution," *R&D Manag.*, vol. 44, no. 2, pp. 203–216, 2014.
- [20] S. Thomke and D. Reinertsen, "Agile Product Development: Managing development flexibility in uncertain environments," *Calif. Manage. Rev.*, vol. 41, no. 1, pp. 8–30, 1998.
- [21] E. Conforto et al., "Can Agile Project Management Be Adopted by Industries Other than Software Development?," *Proj. Manag. J.*, vol. 45, no. 3, pp. 21–34, 2014.
- [22] N. B. Moe, T. Dingsøy, and T. Dybå, "Understanding self-organizing teams in agile software development," *Proc. Aust. Softw. Eng. Conf. ASWEC*, no. 3, pp. 76–85, 2008.
- [23] T. Dybå and T. Dingsøy, "Empirical studies of agile software development: A systematic review," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 50, pp. 833–859, 2008.
- [24] K. Conboy et al., "People over process: Key challenges in agile development," *IEEE Softw.*, vol. 28, no. 4, pp. 48–57, 2011.
- [25] P. Gregory et al., "Agile Challenges in Practice: A Thematic Analysis," in *16th Int. Conf. on Agile Processes, in Software Engineering, and Extreme Programming*, 2015, vol. 212, pp. 64–80.
- [26] S. Freudenberg and H. Sharp, "The top 10 burning research questions from practitioners," *IEEE Softw.*, vol. 27, no. 5, pp. 8–9, 2010.
- [27] N. Ovesen, *The Challenges of Becoming Agile: Implementing and Conducting SCRUM in Integrated Product Development*. Aalborg University: Ph.D. Thesis, 2012.
- [28] A. Schröder and R. Müller, "Das 90er-Jahre-Denken passt nicht mehr," *Der F&E Manag. - Für mehr Effizienz der Innov.*, no. 1, pp. 22–28, 2015.
- [29] A. Schröder and A. Schrofner, "Hochleistung ist crossfunktional," *Der F&E Manag. - Für mehr Effizienz der Innov.*, no. 4, pp. 6–13, 2015.
- [30] A. Schröder and H. Erretkamps, "Scrum like it hot! Best Practice Interview mit Heinz Erretkamps," *Der F&E Manag. - Für mehr Effizienz der Innov.*, no. 1, pp. 6–11, 2014.
- [31] D. Dörner, "Gedächtnis und Konstruieren," in *Psychologische und Pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren, Ergebnisse des*

-
- Ladenburger Diskurses*, G. Pahl, Ed. Köln: TÜV Rheinland, 1994.
- [32] S. Richter and S. Wischmann, *Additive Fertigungsmethoden*. Berlin: iit-Berlin, 2016.
- [33] S. Choi, K. Jung, and S. D. Noh, "Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions," *Concurr. Eng. Res. Appl.*, vol. 23, no. 1, pp. 40–63, 2015.



Ansatz zur Formalisierung der Design-DNA am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt

Petia Krasteva, David Inkermann, Thomas Vietor

*Institut für Konstruktionstechnik
Technische Universität Braunschweig*

Abstract

Fundamental changes of functional requirements for vehicles affect different aspects of the development including the exterior design. Therefore, the recognition of main design characteristics becomes a major challenge during the design process and requires an early coordination of design and technology. Based on this challenge, this contribution is aiming at supporting the multidisciplinary collaboration in order to detect and handle potential conflicts between form and function. We introduce an approach to formalise the design DNA by identifying characteristic from elements and their relationships. The result is a methodology to formulate the design DNA of vehicles based on the model of nature. Part of the methodology is a tool for the quantitative description of the form aesthetics and the systematic development of the characteristic design language of vehicle generations.

Keywords: engineering design, design aesthetics, design-DNA

1 Einleitung

Die Differenzierung im Markt bei zeitgemäßer Fortführung der Form und Technik ist eine der wesentlichen Herausforderungen der heutigen Fahrzeugkonzeption. Sowohl technologische Entwicklungen wie bspw. automatisches

Fahren als auch Veränderungen der Nutzungsszenarien wie bspw. Carsharing führen zu weitreichenden Veränderungen des People- und Mechanical-Packages von Fahrzeugen [1]. Dies hat grundlegende Veränderungen der klassischen Fahrzeugproportionen zur Folge. Charakteristische Referenzpunkte und -linien der Außengestalt bisheriger Fahrzeuge müssen aufgrund dieser Änderungen oftmals angepasst werden. Dadurch wird die Außengestaltlogik beeinflusst und es können disharmonische Wirkungen des Gesamtprodukts oder sogar Fehlinterpretationen der ursprünglichen Design-Ziele wie Markenwerte hervorgerufen werden.

Um die Wechselwirkungen zwischen Innen- und Außengestalt frühzeitig zu erkennen und potentielle Unstimmigkeiten aufzudecken, müssen Fahrzeugkonstruktion und -design während der frühen Gestaltfindung bestmöglich aufeinander abgestimmt werden. Hierfür sind methodische Hilfsmittel für die Formalisierung und Kommunikation der Design-DNA erforderlich. Die Design-DNA beschreibt in diesem Zusammenhang charakteristische Gestaltelemente und -verhältnisse, die die Harmonie der Form und das individuelle Erscheinungsbild der Fahrzeugfamilie definieren. Vor diesem Hintergrund wird im vorliegenden Beitrag folgenden Forschungsfragen nachgegangen:

- Welche ästhetischen Gestaltelemente bspw. Aufbauräume, Referenzpunkte und -linien bestimmen die Design-DNA der Fahrzeugaußengestalt?
- Welche Ordnungsprinzipien und Verhältnisse bestimmen die Harmonie und das individuelle Erscheinungsbild eines Gesamtfahrzeugs?
- Wie können Ordnungsprinzipien und Verhältnisse quantitativ erfasst werden, um den fachübergreifenden Informationsaustausch und die Abstimmung zwischen Fahrzeugkonstruktion und -design zu unterstützen?

Ziel dieses Beitrags ist es, durch eine syntaktische Analyse der Formsprache einen Ansatz zur Formalisierung der Design-DNA bereitzustellen und Modelle aufzuzeigen, wie die Erkenntnisse in geeigneter Form für Designer und Konstrukteure gleichermaßen verständlich aufbereitet werden können. Im Folgenden wird ein Vorgehen zur Formalisierung der Identitätsbestimmenden Gestaltmerkmale (Gestaltelemente und -ordnungen) vorgeschlagen, die die Transformation der ästhetischen Gesetzmäßigkeiten bspw. der harmonischen Proportionen in quantitative Parameter ermöglicht. Hierzu werden ausgehend vom Fahrzeugentwicklungsprozess die Rolle der Designästhetik und die Hilfsmittel zur ästhetischen Gestaltfindung betrachtet (Abschnitt 2). Für die For-

malisierung der Design-DNA wird die Syntax genetischer DNA analysiert (Abschnitt 3) und das Wissen aus der Natur auf den Ansatz der Design-DNA der Fahrzeugaußengestalt übertragen (Abschnitt 4). Anschließend werden die Ergebnisse hinsichtlich des Nutzens für Fahrzeugdesign und -konstruktion diskutiert (Abschnitt 5).

2 Fahrzeuggestalt und Ansätze zur ästhetischen Gestaltfindung

Die Gestalt eines Gegenstandes ist die anschauliche, räumliche und visuell wahrnehmbare Erscheinung bzw. organisierte Struktur eines dreidimensionalen Gebildes [2]. Sie wird durch Aufbau, Form, Farbe und Grafik gekennzeichnet und als Mittel der Verständigung genutzt [3]. Die Fahrzeuggestalt ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Außen- und Innengestalt und entsteht als Ergebnis der Zusammenarbeit verschiedener Entwicklungsdisziplinen. Ausgehend von einer individuellen Aufgabenstellung werden schrittweise von den Beteiligten am Fahrzeugentwicklungsprozess ästhetische und funktionale Modelle erarbeitet, bewertet, zusammengeführt und weiter detailliert, bis ein optimales Ergebnis für das Gesamtfahrzeug entsteht [4]. Aufgrund der verschiedenen Sichtweisen stellt die Darstellung und Kommunikation der jeweils relevanten Informationen zwischen den beteiligten Disziplinen eine große Herausforderung dar. Eine wesentliche Hürde ist dabei die Übersetzung „weicher“ Design-Eigenschaften wie Schönheit, Harmonie, Einheit usw. in „harte“ technische Anforderungen. Das mangelnde Verständnis zwischen den Beteiligten führt oftmals zu Konflikten bei der späteren Zusammenführung der physischen Modelle und resultiert in Kompromissen zwischen Fahrzeugkonstruktion und -design. Zur Verbesserung des gegenseitigen Verständnisses zwischen Konstruktion und Design kann das Verständnis der Sichtweise der Designästhetik beitragen. Diese wird nachfolgend dargestellt, um anschließend bestehende Hilfsmittel zur Vermittlung der Designästhetik bspw. für die Konstruktion vorzustellen.

2.1 Verständnis und Rolle der Designästhetik

Bis ins 19. Jahrhundert wurde die Ästhetik hauptsächlich als formale Theorie des Schönen (Hegel et al.), der freien Kunst (Kant, Schiller, Schelling et al.) und der sinnlichen Erkenntnis (Wolf, Baumgarten et al.) verstanden. Mit der Industrialisierung wurde der Begriff des „Technikschönen“ eingeführt und der Fokus auf die Informationsfunktion der Zeichen (Morris, Shannon, Osgood, Ellinger et al.) gelegt. Vor allem wurden die Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung erforscht und auf dieser Grundlage drei semiotische Dimensionen – Syntaktik, Semantik und Pragmatik – formuliert (Peirce und Morris). Diese wurden 1958 in einer neuen modernen „Informationsäs-

thetik“ fortgeführt (Bense, Moles, Eppler), 1989 um den Zielaspekt bzw. Aporetik (Gitt) erweitert und auf die Produktsprache (Gros) und das Design (Broadbent, Seeger et al.) übertragen. Die genannten Autoren liefern die wissenschaftliche Grundlage für die heutige Designästhetik, die in ihrem Verständnis über die formale zweckfreie Ästhetik hinausgeht und sich mit den praktischen Fragen der Informationsvermittlung auseinandersetzt [3].

Nach diesem Verständnis folgt die Fahrzeugaußengestalt (Syntaktik) aus ihrem Inhalt (Semantik) bzw. dem Hauptziel (Pragmatik) der Entwicklung, s. Bild 1 links, und vermittelt Informationen, die das Verhalten der Nutzer beeinflussen und bestimmen, s. Bild 1 rechts. Hauptaufgabe des Designers ist dabei, die Wahrnehmungsvorgänge vor auszudenken und unter Berücksichtigung der formulierten Zielsetzung mithilfe der visuellen Sprache eine vollständige Gestalt zu definieren (Gestaltkennzeichnung) sowie nachhaltige individuelle Wiedererkennungsmkmale zu schaffen (Gestaltwahrnehmung).

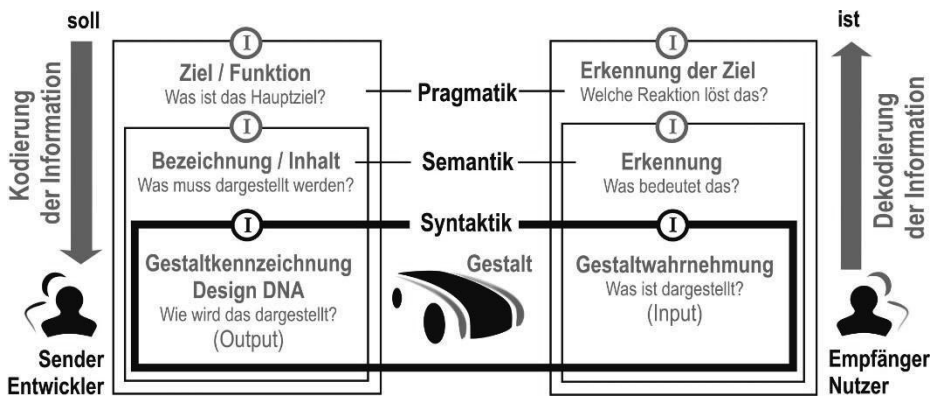


Bild 1: Dimensionen der Gestalt und Ablauf der Informationsvermittlung am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt

Die ästhetischen Eigenschaften (bspw. harmonische Wirkung) werden während des Produktentwicklungsprozesses durch definierte Gestaltmerkmale, d.h. Gestaltelemente und -ordnungen, bestimmt [5], s. Bild 2. Dabei sind die visuell wahrnehmbaren Gestaltelemente wie Punkte, Linien, Flächen und Räume das „Alphabet“ der gestaltbildenden Sprache [6]. Losgelöst von der Gestalt besitzen die Gestaltelemente wenig Bedeutung. Diese entsteht erst durch die individuelle Kombination und Anordnung durch den Designer [5]. Optimal genutzt führt die Ordnung zu einer guten Gestalt, zu Gestaltqualitäten und zu wahrnehmbaren Werten [7]. Die Ordnung muss bei der Zusam-

menführung der Design- und Technikmodelle berücksichtigt werden, da jede Änderung der Elemente und des zugrundeliegenden Regelsystems bspw. aufgrund eines veränderten People-Packages die Ursprungsaussage der Gestalt sowie deren Wirkung verändert.

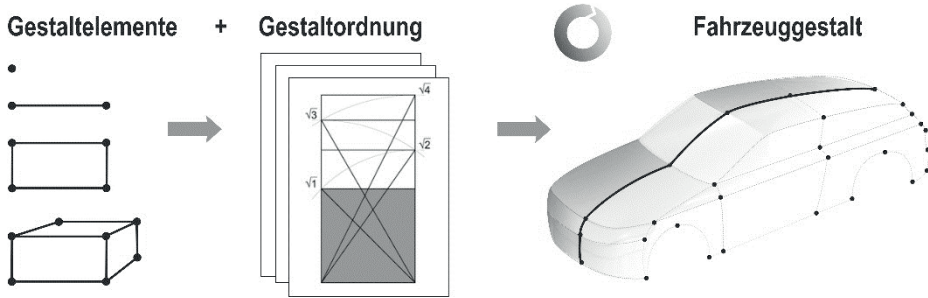


Bild 2: Gestaltkennzeichnung der Fahrzeuggestalt

Als Forschungslücke zeigt sich, dass es bisher keine Ansätze gibt, um die Design-DNA, d.h. die Harmonie der Form und das individuelle Erscheinungsbild der Fahrzeugfamilien und -generationen, zu bestimmen.

2.2 Hilfsmitteln zur ästhetischen Gestaltfindung

Aktuell existieren allgemeine, theoretische und rechnerunterstützte Hilfsmittel zur ästhetischen Gestaltfindung, die grundsätzlich in zwei Hauptkategorien unterteilt werden können: Hilfsmittel zur Formalisierung und Analyse der Gestaltwahrnehmung sowie der Gestaltkennzeichnung. Die Forschungsansätze der ersten Kategorie bauen auf der Gestaltpsychologie auf und suchen nach Analogien zwischen Produktgestalt und Gestaltwahrnehmung mit dem Ziel, grundlegende Gestaltmerkmale zu identifizieren, die die untersuchten Gestalteeigenschaften beeinflussen. Bspw. bietet die von Nagamachi [8] eingeführte "Kansei Engineering"-Methode eine Möglichkeit, die Kundenwahrnehmung objektiv zu erfassen, systematisch zu analysieren, emotionale Kundenanforderungen abzuleiten und die wahrgenommene Produktqualität durch Ableitung konkreter Produktmerkmale aktiv zu gestalten. Weiterhin schlagen Breemen et al. [9] die „Methodology for Design for Aesthetics“ vor, die auf der Kommunikation der Information aufbaut. Weitere Beziehungen wurden zwischen Wahrnehmung und Stil von Chen et al. [10] sowie Farbe und Form von Claessen [11] formuliert. Zusammenhänge auf der Ebene der Semantik zwischen vorgegebenen „image words“ und der tatsächlichen Formgestalt beschreiben Hsiao et al. [12] und schlagen ein semantisches Transformationsverfahren zur Formgestaltung vor.

Die Forschungsansätze der zweiten Kategorie untersuchen die Logik der Gestaltkennzeichnung und suchen nach quantitativen mathematischen Erklärungen für die Gestaltbildung. 1928 formulierte Birkhoff [13] das „ästhetische Maß“ (M) als Verhältnis von „Ordnung“ (O) und „Komplexität“ (C) im Aufbau des künstlerischen Objektes als $M=O/C$. Danach ist eine Gestalt umso schöner, je einfacher und je höher geordnet sie ist. Eine allgemeine Hilfestellung zur Ermittlung einer optimalen Ordnung der Gestaltelemente bieten „Ordnungshilfen“ wie das Gesetz der Nähe, der Gleichheit (Ähnlichkeit), der Geschlossenheit, der durchgehenden Kurven, der Erfahrung und „des gemeinsamen Schicksals“ (Katz, Krech, Benesch et al.). Darüber hinaus existieren grundlegende Ordnungsprinzipien, wie bspw. das Prinzip des Gleichgewichts (Balance), das Prinzip der Einheit, das Prinzip der Proportionalität, das Prinzip der Symmetrie und das Prinzip der Harmonie. Bense [14] betrachtete die ästhetischen Produkte als Summe informativer Zeichen und erforschte die mathematischen Formprinzipien in der Kunstgeschichte. Auf dieser Grundlage entwickelte er einen Ansatz, um den „mathematischen Geist in Sprachkunstwerken“ vor allem mithilfe von Metrik und Rhythmik zu erkennen. Die mathematische Behandlung der Ästhetik als Informationsverarbeitung wurde später von Maser [15] und Nake [16] weiter vorangetrieben. Einzelne Vorgehensweisen zur Formulierung von Maßnahmen der Ästhetik und deren geometrische Interpretation schlagen bspw. Ngo et al. [17] und Fujita et al. [18] vor. Ein evolutionärer Algorithmus zur Erfassung ästhetischer Eigenschaften (wie z.B. Einfachheit, Stabilität, Dominanz usw.) hinsichtlich der Formmerkmale (definiert durch primitive Form, Größe und „Blending“) wurden von Case et al. [19] vorgestellt. Die Entwicklung ästhetischer Formen wurde im Rahmen des europäischen Projekts FIORE [20] umfassend untersucht. Als Ergebnis wurde die Methode „Engineering in Reverse“ eingeführt, die eine automatische Formmodellierung durch die Vorgabe der Zieleigenschaften ermöglicht. In weiteren Arbeiten wurden erste Ideen zur Erfassung des ästhetischen Charakters und zu dessen Berücksichtigung der Informationen im Designprozess geschaffen.

Der Überblick über die Hilfsmittel zur ästhetischen Gestaltfindung zeigt, dass verschiedene Vorgehensweisen und Methoden zur Erfassung einzelner ästhetischer Eigenschaften und Merkmale sowie zur Definition zugrunde liegender Beziehungssysteme (Gesetzmäßigkeiten) existieren. Derzeit sind allgemeine Werkzeuge zur Unterstützung des Designprozesses vorhanden, die bisher lediglich begrenzt auf die Fahrzeuggestalt angewendet und nicht weiter detailliert wurden. Hilfsmittel zur systematischen Erfassung und nachhaltigen Erhaltung der Fahrzeug-Design-DNA sind nicht vorhanden. Ebenso fehlen Ansätze zur Formalisierung der Gestaltelemente und -ordnungen, die die individuelle Harmonie und das Erscheinungsbild des Gesamtfahrzeugs bestimm-

men. Hilfestellungen zur Berücksichtigung der charakteristischen Designsprache in anderen Entwicklungsdisziplinen, bspw. durch Ingenieure während der Auslegung der Fahrzeugkonstruktion, sind ebenfalls nicht vorhanden.

Als Grundlage für die Adressierung der identifizierten Bedarfe werden im folgenden Abschnitt Beispiele aus der Natur analysiert. In der Natur sind die Mechanismen der Gestaltkennzeichnung intensiv erforscht worden und die Untersuchung der DNA liefert ein Gestaltssystem zur Kodierung genetischer Informationen, das auf die Gestaltung der Fahrzeugaußengestalt übertragen werden soll.

3 Gestalt der Natur

"Die Natur schafft ewig neue Gestalt; was da ist, war noch nie; was war, kommt nicht wieder: Alles ist neu, und doch immer das Alte." Goethe

Kenntnisse und Erklärungen der Gesetzmäßigkeiten, nach denen biologische Formen gebildet sind, bietet die Formlehre der Organismen bzw. die Morphologie [21]. Abhängig von den Untersuchungszielen lassen sich die experimentelle, funktionale und vergleichende Morphologien unterscheiden. Die experimentelle Morphologie befasst sich mit der Entwicklung einzelner Organismen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bedingungen und Voraussetzungen. Die funktionale Morphologie untersucht die Strukturen und Merkmale im Hinblick auf bestimmte Funktionen. Die vergleichende Morphologie versucht in der Formenvielfalt der Individuen bestimmte Grundaufbaumuster zu identifizieren und eine Klassifikation der Organismen anhand charakteristischer Merkmale abzuleiten. Die verschiedenen Arten der Morphologie bilden die Grundlage für die Biosystematik (Einteilung, Benennung und Bestimmung der Lebewesen) und die Evolutionstheorie (Entstehung und Veränderung der Arten). Es lässt sich feststellen, dass in der Natur hinter vielfältigen Formen ein immer wiederkehrendes gleiches Muster steht. Verwendet werden wenige verwandte Formen in vielen verschiedenen Kombinationen [22]. Alle Formen ähneln dem platonischen Körper (Remane) und es tritt immer wieder ein harmonisches Hauptverhältnis – der goldene Schnitt (auch als "göttliche Proportion" bezeichneten) – auf [23]. Er lässt sich mit der mathematische Gleichung $A:B=B:(A+B)$ errechnen und bedeutet, dass sich der kleinere Anteil (A) zum Größeren (B) so verhält, wie der Größere zum Ganzen, s. Bild 3 links.

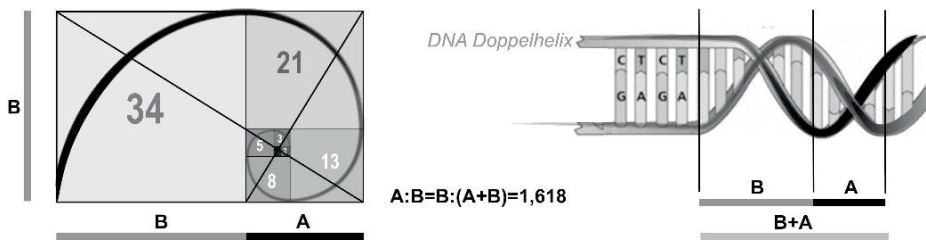


Bild 3: Der goldene Schnitt

Neben makroskopischen wurden auch molekulare Untersuchungen (Ender und Schierwater) durchgeführt, die sich mit der Gestaltbeschreibung der Makromoleküle befassen. Es wurde die Struktur der molekularen Träger der Erbinformation erforscht und ein in allen Lebewesen vorkommendes Biomolekül identifiziert, das die individuellen Erbgutinformationen in sich trägt – die DNA (deoxyribonucleic acid). Diese DNA ist einerseits als der Bauplan des einzelnen Lebewesens und andererseits als das informationstheoretische Protokoll der Stammesgeschichte anzusehen. Der strukturelle Aufbau der DNA wurde erstmals 1953 von Watson und Crick [24] beschrieben. Sie konnten die spiralförmige Doppelhelix der DNA identifizieren und beweisen, dass ein grundlegendes Spiral-Muster in allen Naturbauplänen vorliegt. Dieses Muster entspricht in seinen Dimensionen ebenfalls dem Goldenen Schnitt, s. Bild 3 rechts. Zudem wurde festgestellt, dass der genetische Code im Prinzip bis auf wenige Ausnahmen für alle Lebewesen gleich ist. Es existiert somit eine eindeutige "genetische Sprache", die auf vier Grundelementen: Adenin (A), Guanin (G), Thymin (T) und Cytosin (C) basiert. Diese vier Grundelemente sind bei allen Organismen gleich und die Kodierung der Erbinformationen erfolgt durch Variation ihrer Reihenfolge. Die DNA-Sequenzen beeinflussen die Morphologie und geben sowohl die innere als auch die äußere Form der Organismen vor [25].

Somit gelingt es in der Natur, mithilfe eines Kodierungssystems vielfältige Informationen zu verschlüsseln und alle Eigenschaften der Organismen eindeutig zu bestimmen. Allerdings ist es "sinnlos die Natur bloß zu kopieren" (Nachtigall), stattdessen müssen Prinzipien und geeignete Analogien gesucht und auf andere Gebiete wie die Technik übertragen werden. Unter Berücksichtigung dieser Anmerkung wird im vorliegenden Beitrag daher die grundlegende Logik bzw. die Syntax genetischer DNA extrahiert und als Grundlage für die Erstellung eines methodischen Vorgehens zur Formalisierung der Design-DNA verwendet.

4 Ansatz zur Formulierung der Design-DNA am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, basiert die genetische Sprache auf vier Grundelementen, einem Regelsystem zur Zusammenführung und einem harmonischen Aufbaumuster, s. Bild 4 links. Ausgehend von diesen Erkenntnissen werden für diesen Beitrag folgenden Hypothesen aufgestellt: Die Logik genetischer DNA der Natur kann durch Analogie auf den Ansatz einer Design-DNA bspw. der Fahrzeugaußengestalt übertragen werden (1). Die Design-DNA ergibt sich dabei aus der individuellen Art, Anzahl und Ordnung bestimmter Gestaltelemente (2) und definiert grundlegend das charakteristische Erscheinungsbild des Gesamtfahrzeugs (3).

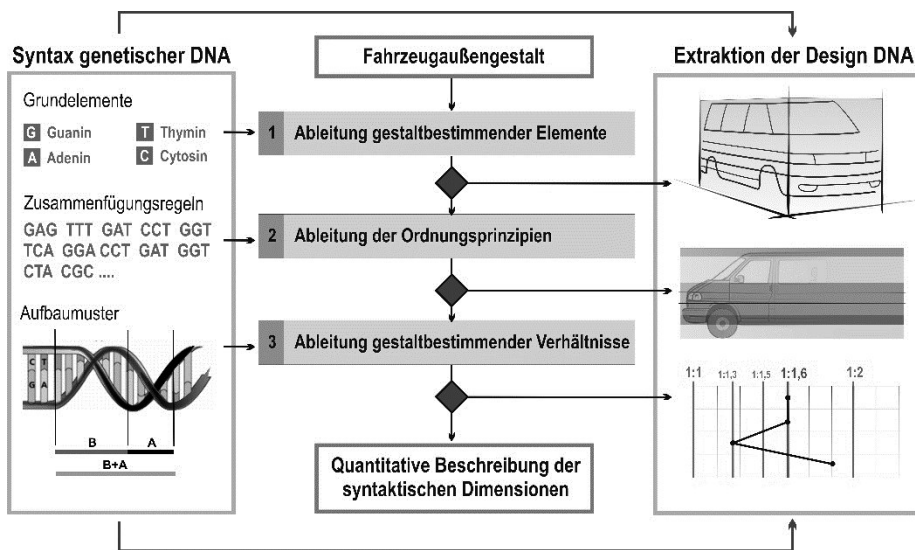


Bild 4: Methodisches Vorgehen zur Formalisierung der Design-DNA am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt vom VW T4

Zur systematischen Übertragung der Logik wurde ein methodisches Vorgehen zur Formalisierung der Design-DNA nach dem Vorbild der Natur erarbeitet, s. Bild 4 Mitte. Der Fokus des Vorgehens liegt zum einen auf der Ableitung der konzeptbestimmenden ästhetischen Gestaltelemente und zum anderen auf der Identifikation zugrundeliegender Ordnungsprinzipien und Verhältnisse. Bild 4 rechts zeigt den vorgeschlagenen Ansatz am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt eines Volkswagen Transporters mit langem Radstand der Generation 4 (kurz: VW T4). Mithilfe des vorgeschlagenen Vorgehens

lassen sich schrittweise die Gestaltelemente erfassen und das Konzeptaufbaumuster sowie das individuell hinterlegte Proportionssystem des Gesamtfahrzeugs ableiten. Darin sind die DNA-Informationen der Harmonie und Identität des Produkts beinhaltet. Die Formalisierung der Gestaltelemente ermöglicht es zudem, die Design-DNA quantitativ zu beschreiben.

Die Ableitung der außengestaltbestimmenden Elemente erfolgt durch eine systematische Analyse der visuell wahrnehmbaren Elemente, d.h. der Referenzpunkte, -linien, -flächen und Räume. Am Beispiel des VW T4 lässt sich identifizieren, dass ein rechteckiger Konzeptaufbauraum und mehrere Referenzlinien der Gestalt zugrunde liegen. Die Referenzlinien sind in der Regel gerade und umranden den Gesamtkörper. Sie lassen sich durch Referenzpunkte im Raum definieren und bestimmen durch ihre individuelle Gestaltung bzw. Art und Anzahl die Form der Flächen und des Gesamttraums, s. Bild 5.

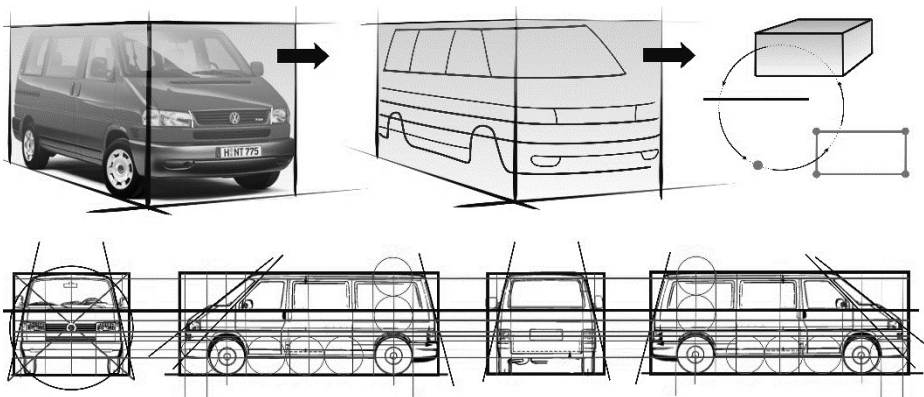


Bild 5: Ableitung gestaltbestimmender Elemente

Nach Erfassung der Gestaltelemente aller Ansichten (Front-, Seiten-, Heck- und Draufsicht) erfolgt im zweiten Schritt des Vorgehens die Ableitung der Ordnungsprinzipien. Hierzu werden die Hauptprinzipien (bspw. Symmetrien), nach denen die Gesamtform gebildet ist, untersucht. Ausgehend davon wird die individuelle Ordnung der Referenzlinien im Konzeptaufbauraum analysiert. Wenn ein asymmetrisches Ordnungsprinzip zugrunde liegt (typisch für alle Seitenansichten konventioneller Fahrzeuge), erfolgt die Analyse durch Zerlegung des Konzeptaufbauraums zunächst horizontal von oben nach unten und anschließend vertikal von links nach rechts, s. Bild 6 links. Bei symmetrischen Ansichten (z.B. Front- und Heckansicht) erfolgt die Zerlegung ausgehend von der Symmetrielinie. Das Ergebnis der Analyse nach Zusammenfügung aller Ansichten ist ein dreidimensionales Modell des Konzeptaufbaumus-

ters, das das individuelle Ordnungsschema der Gestalt repräsentiert und die Informationen über die Verhältnisse bzw. die Proportionen der Elemente zueinander und zum Ganzen beinhaltet.

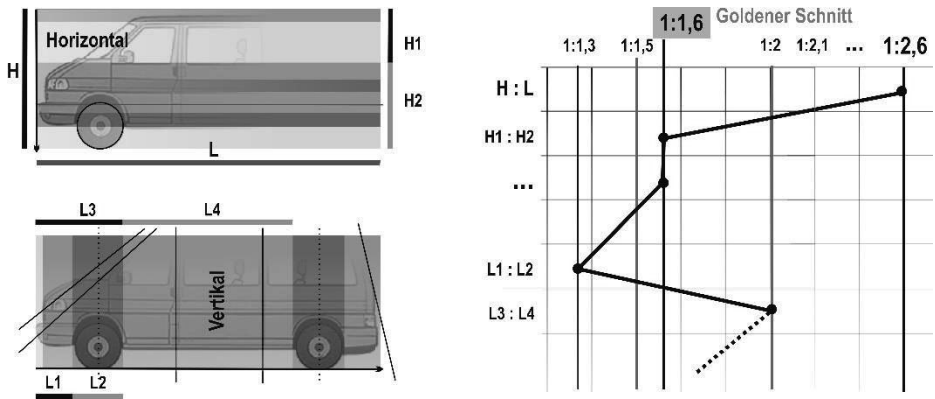


Bild 6: Ableitung der Ordnungsprinzipien und zugrundeliegender Verhältnisse

Aufbauend auf dem Konzeptaufbaumuster erfolgt im dritten Schritt die systematische Ableitung der außengestaltbestimmenden Verhältnisse. Aus dem proportionalen Zusammenhang der Parameter, die den Konzeptaufbaumuster definieren (Gesamthöhe H, -länge L und -breite B), wird das harmonische Hauptverhältnis des Gesamtfahrzeugs bestimmt. Am Beispiel des VW T4 ist das Hauptverhältnis in der Seitenansicht als $H:L=1940:5107=1:2,63$ definiert, s. Bild 6 rechts. Nach dem gleichen Prinzip können schrittweise alle zugrundeliegenden charakteristischen Zusammenhänge im formalisierten Konzeptaufbaumuster quantitativ erfasst werden (bspw. wie gezeigt in Proportionstabellen) und zielgerichtet bei der Entwicklung nachfolgender Generationen als feste Designanforderungen berücksichtigt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit leistet einen Beitrag zum Verständnis der Designästhetik und der Regelsysteme des Designs, die die Harmonie und das individuelle Erscheinungsbild der Fahrzeugaußengestalt bestimmen. Das vorgeschlagene aus der Natur inspirierte Vorgehen ermöglicht es, systematisch die zugrundeliegenden Gestaltelemente, ein Konzeptaufbaumuster und individuelle Proportionen einer Fahrzeugaußengestalt abzuleiten. Durch die aufgezeigte syntaktische Analyse der Designsprache bestehender Fahrzeuggenerationen bietet der Ansatz eine Grundlage für die strategische Fortführung der Design-DNA bei der Gestaltung neuer Fahrzeuggenerationen. Mit der

Formalisierung der Design-DNA in Form von Zahlen wird dabei eine gemeinsame Sprache und damit ein Kommunikationshilfsmittel für die Verknüpfung funktionaler und ästhetischer Eigenschaften während der Fahrzeugkonstruktion bereitgestellt. Somit unterstützt der vorgeschlagene Ansatz die objektive Analyse vorhandener Designsprachen durch Definition der Identitätsbestimmenden Gestaltmerkmale sowie charakteristischer Elemente und der individuellen Harmonie der Gesamtform. Dies kann bspw. die Differenzierung von Produkten am Markt unterstützen, indem die „Sprache“ von Wettbewerberprodukten analysiert und eine Abgrenzung von dieser vorgenommen wird.

Beispielanwendungen zeigen, dass die Erfassung individueller Gestaltkennzeichnungen und deren quantitative Beschreibung mithilfe des vorgeschlagenen Ansatzes grundsätzlich möglich sind. In zukünftigen Forschungsarbeiten müssen jedoch weitere Beispiele untersucht werden, um die optimale Anzahl der zur Formalisierung der Gestaltwirkung erforderlichen Gestaltelemente zu definieren. Neben der hier betrachteten Analogie zur Gestalt der Natur sollen dabei auch Analogien zur Syntax der Musiksprache untersucht werden und auf die Harmonielehre der Form übertragen werden.

Des Weiteren sind Arbeiten geplant, in denen der beschriebene Ansatz in der Zusammenarbeit zwischen Designern und Ingenieuren praktisch angewendet wird. In Fallstudien sollen sowohl Anwendbarkeit und Akzeptanz als auch Vorteile für den Entwicklungsprozess grundlegend evaluiert werden. Voraussetzung für diesen Schritt ist, dass der beschriebene Ansatz zu einem praktisch anwendbaren Hilfsmittel weiterentwickelt wird, das die charakteristische Designsprache für Ingenieure übersetzt und bei der Fahrzeugkonstruktion bereitstellt. Anschließend wird es als elementare Aufgabe der Hochschulen angesehen, die Hilfsmittel bereits in die Ausbildung von Ingenieuren und Designern zu integrieren, damit die gemeinsame Sprache möglichst früh erlernt wird.

Danksagung

Für die konstruktiven Diskussionen und Anregungen zur Formalisierung der Design-DNA danken wir Herrn A.-J. Kirzinger, Designchef VW Nutzfahrzeuge.

Literatur

- [1] Tzivanopoulos, T., Watschke, H., Krasteva, P., Vietor, T.: "Neue Denkansätze in der Fahrzeugkonzeption", In: ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2015, S. 16-21.

-
- [2] Koller, R.: "Konstruktionslehre für den Maschinenbau", Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1998.
- [3] Seeger, H.: "Basiswissen Transportation-Design", Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2014.
- [4] Braess, H.-H. et al.: "Automobildesign und Technik. Formgebung, Funktionalität, Technik", Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [5] Löbach, B.: "Industrial Design. Grundlagen der Industrieproduktgestaltung", Karl Thiemig Verlag, München, 1976.
- [6] Hammad, F.: "Dimensionen der Gestaltwerdung. Ein Beitrag zur Systematik der Produktentwicklung", Diss. TU Braunschweig, München, 2013.
- [7] Schmidt, F.: "Ordnungslehre", E. Reinhardt Verlag, München/Basel, 1956
- [8] Nagamachi, M., "Kansei Engineering: A New Ergonomic Consumer Oriented Technology for Product Development", In: International Journal of Industrial Ergonomics, Elsevier Verlag, 1995, S. 3-11.
- [9] Breemen, van E. et al.: "Developing a methodology for design for aesthetics based on analogy of communication", In: Design Engineering Technical Conferences, USA, 1999, S. 13-16.
- [10] Chen, K. et al.: "A study of computer-supported formal design", In: Design Studies, Elsevier Verlag, 1998, S. 331-359.
- [11] Claessen, J.: "Shaped by Colour, a Study on the Effect of Colour on the Perceived Shape of Objects", Diss. TU Delft, Delft, 1996.
- [12] Hsiao, S. et al. "Applying the Semantic Transformation Method to Product Form Design", In: Design Studies, Elsevier Verlag, 1998, S. 309-330.
- [13] Birkhoff, E.: "Einige mathematische Elemente der Kunst", Deutsch edition rot, Stuttgart, 1968.
- [14] Bense, M.: "Aesthetica: Einführung in die neue Aesthetik", AGIS-Verlag, Baden-Baden, 1982.

-
- [15] Maser, S.: "Numerische Ästhetik", Kurt Krämer Verlag, Stuttgart, 1970.
- [16] Nake, F.: "Ästhetik als Informationsverarbeitung", Springer Verlag, Berlin, 1974.
- [17] Ngo, D. et al.: "A mathematical theory of interface aesthetics", In: Visual Mathematics, 2000, <http://vismath4.tripod.com/ngo/>.
- [18] Fujita, K. et al.: "Integrated Product Design Methodology for Aesthetics, Functions and Geometry with Feature Based Modeling and Constraint Management" In: ICED99, München, 1999, S. 1753-1756.
- [19] Case, K. et al.: "CAD Genetic Algorithms for Evolutionary Form and Function Design", In: Advances in Manufacturing Technology XVI, Professional Engineering Publishing, UK, 2002, S. 103-107.
- [20] Dankwort, W. et. al.: "FIORES - Ein europäisches Projekt für neue Arbeitsweisen im Aesthetic Design", VDI Berichte 1322, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998, S. 177-192.
- [21] Lecointre, G.: "Biosystematik". Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [22] Stevens, P.: "Zauber der Formen in der Natur", R. Oldenbourg Verlag, München, 1983.
- [23] Hagenmaier, O.: "Der goldene Schnitt", Weltbild Verlag, Augsburg, 1988.
- [24] Watson, J. et al.: "Molecular structure of nucleic acids" In: Nature, Bd. 171, Nr. 4356, 1953, S. 737-738.
- [25] Rheinberger, H.-J. et al.: "Vererbung. Geschichte und Kultur eines biologischen Konzepts", S. Fischer Verlag, Frankfurt am Main, 2009.

Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor – Konzipierung und Implementierung eines Live- Lab

Benjamin Walter, Albert Albers, Fabian Haupt, Nikola Bursac

*IPEK – Institut für Produktentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

Abstract

Due to the internationalization of development activities in industry the research of the collaboration of virtual teams in product development becomes more and more important. In this context research in product development focuses on field studies and laboratory studies which both are valuable, but also face some limitations, e.g. concerning transferability of results into (other) companies. To overcome this limitations, the concept of Live-Lab which can be seen as a research approach between field studies and laboratory studies can be used. This paper presents the concept and the implementation of the Live-Lab ProVIL – **P**roduct development in a **V**irtual **I**dea **L**aboratory which is dedicated to research the collaboration of virtual teams in product development.

Keywords: Virtual teams, collaboration, Live-Lab, ProVIL

1 Einleitung und Motivation

Im Zuge der Globalisierung sind Unternehmensbereiche immer stärker auf verschiedene, internationale Standorte verteilt [1]. Diese Entwicklung bezieht sich allerdings nicht nur auf Produktionsstandorte und Vertriebsnetzwerke,

sondern auch auf die Entwicklungsaktivitäten von Unternehmen [2]. Die Internationalisierung dieser Aktivitäten hat unterschiedliche Gründe, wie beispielsweise die Einbeziehung von jeweils lokalem Know-how auf unterschiedlichen Märkten. Gleichzeitig wird sie durch die rasante Entwicklung auf Seiten der Softwaretechnik und Informatik der letzten Jahre beschleunigt. Diese Entwicklung wirft neuartige Fragestellungen auf, die organisationale, methodische, personale, soziale und technologische Aspekte betreffen. Um das komplexe Zusammenspiel dieser Faktoren im Rahmen der Produktentwicklung in Industrieunternehmen zu erforschen, stehen derzeit im Wesentlichen zwei Ansätze zur Verfügung: Auf der einen Seite besteht die Möglichkeit, die Zusammenarbeit in virtuellen Entwicklungsteams im Rahmen von Feldstudien zu untersuchen. Auf der anderen Seite ist es möglich, Problemstellungen und Lösungsansätze zu identifizieren, zu modellieren und im Rahmen geeigneter Laborumgebungen zu erforschen. Die Ergebnisse aus Feld- und aus Laborstudien sind allerdings meist schlecht auf (andere) Unternehmen übertragbar, da die Erkenntnisse aus Feldstudien sehr unternehmensspezifisch, die Erkenntnisse aus Laborstudien meist zu generisch sind, um in Industrieunternehmen direkten Mehrwert zu stiften. Um diesen Schwächen zu begegnen, werden Untersuchungsumgebungen benötigt, in denen einerseits die zu untersuchenden, unabhängigen Variablen wie in Laborumgebungen gezielt variiert werden können. Andererseits sollen aber möglichst realitätsnahe Randbedingungen wie z.B. die Identifizierung von Personen mit dem Projekterfolg herrschen. Eine Ausprägung solcher Untersuchungsumgebungen stellen Live-Labs dar. In diesem Beitrag wird das Live-Lab ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor vorgestellt, welches entwickelt wurde, um die Erforschung der Zusammenarbeit in virtuellen Entwicklungsteams unter möglichst realitätsnahen Randbedingungen zu ermöglichen.

2 Stand der Forschung

2.1 Standortübergreifende Zusammenarbeit

Es existieren verschiedene Arbeiten, die sich mit der Entwicklung von Ansätzen zur Unterstützung der virtuellen Produktentwicklung, wie beispielsweise Produktdatenmanagement- und Product-Lifecycle-Management-Systemen [3] oder deren Trends [4] beschäftigen. Weitere Arbeiten untersuchen wie mit CAx-Systemen der Produktentwicklungsprozess unterstützt werden kann [5]. Jüngere Forschungsarbeiten erforschen, wie Produktentwickler in standortübergreifenden Teams bei der Synthese neuer Produktgenerationen [6] zielgerichtet unterstützt werden können. So wurde beispielsweise die Einbindung einer Innovationsplattform in den Produktentstehungsprozess zur Erzeugung von Innovationsimpulsen untersucht [7][8]. Diese Arbeiten zeigen

gerade bei der Nutzung von Kreativitätsmethoden in virtuellen Teams einen großen Forschungsbedarf auf. So sind zum Beispiel unterschiedliche Varianten der Methoden-Implementierung möglich, die im Rahmen von Laborstudien untersucht wurden [9]. Darüber hinaus steht eine Vielzahl unterschiedlicher Tools zur Verfügung, die Nutzer dabei unterstützen, standortübergreifend miteinander zu kommunizieren sowie Informationen und Daten auszutauschen. Die situationsspezifische Auswahl des richtigen Tools kann dabei methodisch unterstützt werden [10]. In der Praxis von Industrieunternehmen müssen allerdings die komplexen Abhängigkeiten dieser Aspekte untereinander berücksichtigt werden. Dem muss auch die Erforschung von Methoden und Prozessen, die in der standortübergreifenden Zusammenarbeit zum Einsatz kommen, Rechnung tragen [11].

2.2 Arten von Untersuchungsumgebungen

Bei der Erforschung von Entwicklungsmethoden muss darauf geachtet werden, dass diese weder zu abstrakt, noch zu spezifisch beschrieben sind, damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis der Industrieunternehmen gewährleistet werden kann [12]. Forschungsstudien lassen sich hierbei in Labor- und Feldstudien unterteilen [13]. In Laborstudien sind die Randbedingungen leicht manipulierbar, wodurch eine Untersuchungsumgebung mit optimalen Bedingungen geschaffen werden kann und folglich Störvariablen gut kontrolliert werden können. Jedoch kann es passieren, dass die Probanden durch die unnatürliche Untersuchungsumgebung beeinflusst werden und eventuell ihr Verhalten verändern. Da die Erkenntnisse in einer künstlichen Umgebung gewonnen werden, ist eine Übertragung in die Praxis fraglich. Feldstudien hingegen weisen eine hohe externe Validität auf, da sie in realen Umgebungen stattfinden, in denen die Probanden ihrem spontanen und normalen Verhalten folgen. Allerdings können in Feldstudien Störvariablen schlecht kontrolliert und die unabhängigen Variablen nicht in genügendem Maße variiert werden [14]. Zur Erforschung von Produktentstehungsprozessen existieren verschiedene Ansätze, die sich in das Kontinuum zwischen Labor- und Feldstudien einordnen lassen. So werden beispielsweise zur Erforschung künftiger Produktionsprozesse sogenannte Forschungsfabriken verwendet. Diese bieten eine realitätsnahe Umgebung, in welcher die vielfältigen Interaktionen zwischen Mensch, Produktion und Fabrik ganzheitlich betrachtet werden können. So werden beispielsweise ressourceneffiziente Produktion (z.B. E³-Produktion), energieeffiziente Produktion (z.B. ETA-Fabrik) oder standortübergreifende Produktion für die Industrie 4.0 (z.B. SmartFactory-OWL) untersucht. Außerdem werden zur Erforschung des Zusammenspiels von Produkten mit ihren Umgebungen sogenannte Living Labs eingesetzt. In Living Labs werden verschiedene innovative Lösungsansätze in einer nachge-

bildeten, möglichst realitätsnahen Umgebung, in der das Produkt später eingesetzt werden soll, erprobt, wobei insbesondere auch die Bedürfnisse von Nutzern Berücksichtigung finden [15][16]. Anwendungsbereiche von Living Labs sind beispielsweise der Bereich Smart Home (z.B. FZI-House of Living Lab)[17].

2.3 Das Live-Lab Integrierte Produktentwicklung

Zur Erforschung von Methoden und Prozessen der Produktentwicklung für die Zusammenarbeit vor Ort existiert bereits das Live-Lab Integrierte Produktentwicklung (IP). In IP durchlaufen 42 Studierende des Masterstudiums Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in sieben Sechser-teams einen ca. viermonatigen Produktentwicklungsprozess in fünf Phasen, von der initialen Recherche zum Stand der Technik und dem Marktumfeld bis hin zur Erstellung funktionsfähiger Prototypen [18]. IP wird jährlich mit wechselndem Industriepartner durchgeführt, der auch die Entwicklungsaufgabe definiert [19]. Nach jeder Entwicklungsphase findet ein gemeinsamer Meilenstein statt, an dem die Qualität der Arbeitsergebnisse überprüft und das weitere Vorgehen festgelegt wird [18]. Begleitend zu IP werden Forschungsprojekte durchgeführt, in deren Rahmen Methoden und Prozesse der Produktentwicklung erforscht, weiterentwickelt und evaluiert werden [20].

3 Zielsetzung und Forschungsmethodik

Bei Betrachtung des Stands der Forschung wird ersichtlich, dass sich bisherige Ansätze mit diversen Aspekten der Produktentwicklung in virtuellen Teams beschäftigen. Allerdings wurde bisher nicht untersucht, wie ein Live-Lab und der dazugehörige Entwicklungsprozess gestaltet sein sollte, um systematisch untersuchen zu können, wie Entwickler bei der standortübergreifenden Synthese und Analyse neuer Produkte und Produktgenerationen unterstützt werden können. Daher soll eine möglichst realitätsnahe Untersuchungsumgebung geschaffen werden, um die standortübergreifende Zusammenarbeit virtueller Entwicklungsteams untersuchen zu können. Hierzu sollen in einem ersten Schritt folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Wie müssen Live-Labs im Kontext der Produktentwicklung verstanden werden, um neue Methoden und Prozesse effizient erforschen und gestalten zu können, damit ihr Transfer in die Entwicklungspraxis gewährleistet werden kann?

-
2. Wie muss ein Live-Lab gestaltet sein, um Methoden und Prozesse für die Zusammenarbeit in standortübergreifenden Teams erforschen zu können?

Um die Zielsetzung zu erreichen wurde das Live-Lab ProVIL am IPEK – Institut für Produktentwicklung konzipiert und implementiert. Im ersten Schritt wurden dazu die Randbedingungen am IPEK mit Hilfe einer SWOT-Analyse untersucht. Dabei wurde analysiert, in welcher Form das Live-Lab im Curriculum als Lehrveranstaltung angeboten und auf welche Weise die im Projekt verwendete Innovationsplattform SAP Innovation Management bestmöglich in das Projekt eingebunden werden kann. Eine Analyse der beteiligten Stakeholder diente dazu, die beteiligten Stakeholdergruppen zu modellieren, deren Zusammenhänge zu erfassen und daraus Anforderungen an das Live-Lab abzuleiten. Auf Basis dieser Anforderungen wurde in Anlehnung an das Live-Lab Integrierte Produktentwicklung ein initiales Prozessmodell für das Live-Lab ProVIL erarbeitet. Dieses wurde im Anschluss im Rahmen des EU-Projektes Science2Society [21] in insgesamt 16 Workshops über einen Zeitraum von ca. fünf Monaten anhand konkreter Leitfragen mit Vertretern des Projektpartners, des Softwarepartners sowie mit Lehrenden und Studierenden unterschiedlicher Fachgebiete iterativ weiterentwickelt. Hierbei wurden einzelne Elemente des Prozessmodells jeweils hinsichtlich alternativer Lösungsvorschläge untersucht, deren jeweilige Tragweite analysiert und eine finale Auswahl getroffen. Abschließend wurden einzelne Aktivitäten in einer weiterführenden Studie auf der Innovationsplattform mit Studierenden validiert, woraufhin das Prozessmodell von ProVIL noch geringfügig angepasst wurde [22].

4 Live-Labs im Kontext der Produktentwicklung

Ein Live-Lab im Kontext der Produktentwicklung ist eine Untersuchungs-umgebung, die es ermöglicht, Methoden und Prozesse der Produktentwicklung in einem möglichst realen Entwicklungsprozess zu erforschen und gleichzeitig die Randbedingungen in hohem Maße gestalten zu können. Ziel hierbei ist es, Entwicklungsmethoden, Prozesselemente, Werkzeuge und Arbeitsweisen weiterzuentwickeln und zu evaluieren, um diese mehrwertstiftend der Praxis in Industrieunternehmen bereitstellen zu können.

Im Rahmen von Live-Labs bearbeiten geeignete Probanden, wie beispielsweise Studierende technischer Studiengänge aus höheren Fachsemestern, reale Entwicklungsaufgaben aus einem Industrieunternehmen in einem gemeinsamen Entwicklungsprojekt. Zur Erarbeitung von Arbeitsergebnissen wenden sie im Rahmen eines strukturierten Produktentwicklungsprozesses

verschiedene Entwicklungsmethoden wie Kreativitätsmethoden und Bewertungsmethoden sowie Werkzeuge wie z.B. Softwaretools an. Durch geeigneten Formen der Datenerhebung (Beobachtung, Befragung, Messung und Bewertung von Arbeitsergebnissen, etc.) können im Rahmen begleitender Studien wichtige Erkenntnisse über die eingesetzten Entwicklungsmethoden und Werkzeuge, aber auch über prozessuale, soziale und persönliche Aspekte gewonnen werden. Sofern eine größere Anzahl an Probanden am Live-Lab beteiligt ist, sind zudem vergleichende Studien mit Kontrollgruppen möglich, die eine bessere Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Produktentwicklung von Industrieunternehmen sicherstellen können. Im Gegensatz zu reinen Laborumgebungen, in denen Probanden unter streng kontrollierten Randbedingungen Aufgabenstellungen bearbeiten, steht bei der Durchführung eines Live-Lab für die Probanden der Projekterfolg im Vordergrund. Die Probanden nehmen sich dadurch weniger als Probanden, sondern stärker als Produktentwickler wahr, wodurch ihr Verhalten sehr realitätsnah ist. Folglich sind die Probanden kritischer bei unausgereiften Methoden und Prozessen und verwenden diese vor allem dann konsequent, wenn sie dem Projekterfolg zuträglich sind. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Untersuchungsergebnisse im Gegensatz zu denen von Laborumgebungen deutlich erhöhte Praxisrelevanz aufweisen.

Das Live-Lab-Konzept ist somit zwischen Laborstudien und Feldstudien einzuordnen. Live-Labs leisten einen Beitrag, den Zielkonflikt zwischen zu spezifischen und zu generischen Forschungsergebnissen aufzulösen. Gegenüber den Erkenntnissen aus reinen Laborstudien und denjenigen aus Feldstudien in Unternehmen ist die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf reale Anwendungssituationen aus Live-Labs als besser einzuschätzen. Ergebnisse aus Feldstudien sind in der Regel sehr unternehmensspezifisch und haben damit einen stark eingeschränkten Geltungsbereich, während Erkenntnisse aus reinen Laborumgebungen zu allgemein sind, um direkt mehrwertstiftend in Industrieunternehmen eingesetzt werden zu können.

5 Das Live-Lab ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor

5.1 Überblick

ProVIL findet als Fachpraktikum im Rahmen des Maschinenbaustudiums am KIT statt, wodurch verschiedene Randbedingungen zu beachten sind: Die Dauer des Fachpraktikums beträgt max. vier Monate; der Zeitaufwand für die Studierenden sollte 90 Stunden nicht überschreiten; Methoden der Produktentwicklung sollen erlernt werden; die Verwendung der Innovationsplattform

des Software-Projektpartners SAP sowie die Zusammenarbeit der verschiedenen Stakeholder sollte geregelt sein.

In ProVIL 2016 durchlaufen 32 Studierende einen in vier Phasen unterteilten Entwicklungsprozess anhand einer Aufgabenstellung des Projektpartners Porsche AG im Bereich „Smart Mobility“. Sie werden dabei von zehn Innovations-Coaches unterstützt. Die Innovations-Coaches sind Studierende des Wirtschaftsingenieurwesens der Hochschule Karlsruhe für Technik und Wirtschaft, die Kreativitätssitzungen im virtuellen Raum moderieren, Arbeitsergebnisse überprüfen sowie die Studierenden bei der Nutzung der Innovationsplattform coachen. ProVIL folgt dabei einem klar strukturierten Prozessmodell, welches im Folgenden beschrieben wird.

5.2 Der Ablauf von ProVIL

In ProVIL durchlaufen die Studierenden einen Entwicklungsprozess anhand von vier Phasen, die in Bild 1 dargestellt sind.



Bild 1: Überblick über den Ablauf des Live-Lab ProVIL

Die Recherchephase ermöglicht den Studierenden einen ersten Einstieg in die Thematik und das Kennenlernen der Innovationsplattform. Durch die Recherche bauen die Studierenden Wissen zu verschiedenen Bereichen rund um das Themengebiet des Projektes auf. Ziel der Profilphase ist es, den Kunden inklusive seiner Bedürfnisse und Wünsche besser zu verstehen, um so Produkte entwickeln zu können, die ein höheres Innovationspotential aufweisen. Hierzu werden Kunden mithilfe der Persona-Methode beschrieben. Daraufhin werden Produktprofile erarbeitet, die den Anbieter- und Kundennutzen eines potentiellen Produktes lösungsoffen beschreiben. Dafür werden von den Teilnehmern u.a. kurze User-Story-Videos erstellt. Innerhalb der Ideenphase entwickeln die Studierenden Ideen für die Umsetzung des späteren Produktes. In der Konzeptphase werden erste Konzepte für die Produktideen erarbeitet, die die prinzipiellen Lösungen aus der Ideenphase in ein Mockup überführen.

5.3 Das ProVIL-Prozessmodell

Um ProVIL zielführend als Live-Lab verwenden zu können, wurde der Ablauf von ProVIL als umfangreiches, modular aufgebautes Prozessmodell in

Microsoft Visio erstellt. Hierbei befinden sich die jeweils in einer Projektphase zu erreichenden Ziele auf einer Hauptachse. Zur Erreichung der Ziele werden Aktivitäten von den Teilnehmern durchgeführt, welche jeweils aus einem Input (z.B. ein Template) unter Anwendung einer Methode der Produktentwicklung (z.B. eine Kreativitätsmethode) einen Output (z.B. ein Produktprofil) generieren. Die modulare Darstellung des ProVIL-Prozesses ermöglicht es, gezielt relevante Forschungsfelder und -fragen zu identifizieren. Beispielsweise lässt sich untersuchen, wie sich die Reihenfolge von Zwischenzielen oder die Reihenfolge der Anwendung von Methoden der Produktentwicklung auf den Gesamtprojekterfolg auswirken. Zudem können alternative Methoden der Produktentwicklung für verteilte Entwicklungsteams untersucht und die Akzeptanz von Teilnehmern bei der Anwendung dieser Methoden gemessen werden. Darüber hinaus kann auch die Eignung bestimmter Werkzeuge zur Durchführung dieser Methoden evaluiert und der Einfluss personaler und sozialer Faktoren auf den Projekterfolg untersucht werden. Die klar definierten Schnittstellen zwischen der Anwendung einzelner Entwicklungsmethoden stellen sicher, dass alternative Methoden zuverlässig verglichen werden können. Des Weiteren ermöglichen sie mithilfe von Kontrollgruppen Vergleichsergebnisse innerhalb eines Durchlaufs von ProVIL zu erzielen.

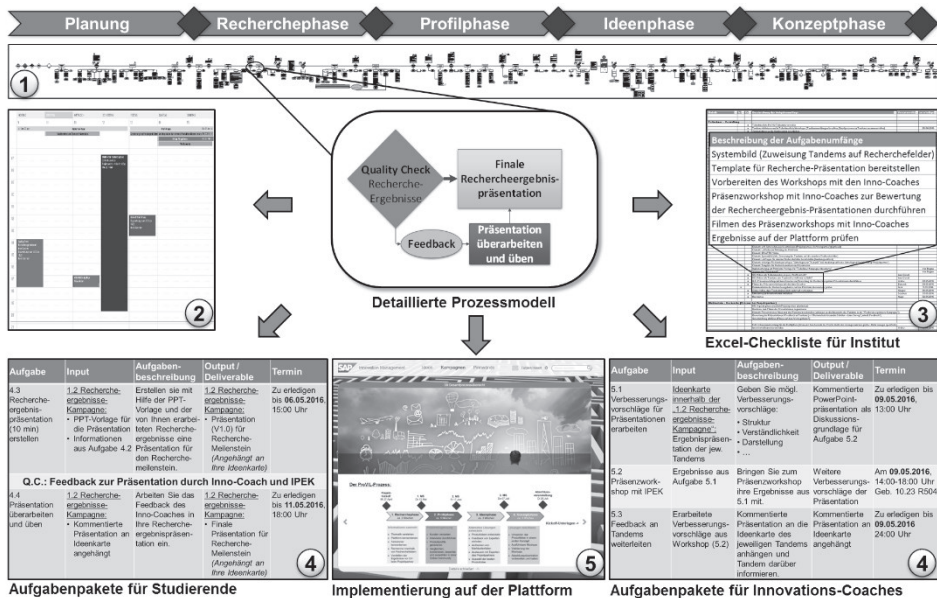


Bild 2: Überblick über den Ablauf des Live-Lab ProVIL

Zur Durchführung von ProVIL werden aus dem Visio-Prozessmodell (1) in Bild 2 unterschiedliche Dokumente für die beteiligten Stakeholder ausgeleitet. Zur Koordination der Projekt- und Terminplanung auf Seiten des IPEK werden eine Outlook-Terminplanung (2) sowie eine Checkliste in Excel (3) erstellt. Die Teilnehmer und Innovations-Coaches erhalten für jede Projektphase jeweils detaillierte Aufgabenpakete in tabellarischer Form (4). Zudem wurden der Ablauf sowie die Prozesselemente auf der Innovationsplattform implementiert (5) und die Einzelaktivitäten für die Teilnehmer in den jeweiligen Kampagnen-Beschreibungen detailliert erläutert.

6 Diskussion und Ausblick

Das Live-Lab ProVIL stellt eine Forschungsumgebung zur Untersuchung von Methoden und Prozessen virtueller Entwicklungsteams dar. In dieser Umgebung lassen sich in kurzen Zeitintervallen Randbedingungen variieren und die resultierenden Auswirkungen erforschen. Derzeit laufen bereits entsprechende Studien. Eine Studie beschäftigt sich damit, anhand von Persönlichkeitsmerkmalen Kreativitätsmethoden für virtuelle Entwicklungsteams so weiterzuentwickeln und auszuwählen, dass die Generierung von Ideen personenspezifisch gefördert wird. Eine weitere Studie untersucht, wie Feedback unterschiedlicher Stakeholder gezielt in virtuelle Entwicklungsteams einfließen sollte. Im Rahmen dieser Studien werden bereits erste konkrete Ergebnisse, die im Bereich Methoden und Prozesse in virtuellen Entwicklungsteams angesiedelt sind, erzielt. Zudem wird anhand der Durchführung der genannten Studien ProVIL als Live-Lab evaluiert. Hierzu werden u.a. wöchentliche Umfragen mit Teilnehmern und Innovations-Coaches durchgeführt. Auf Basis dieser Erkenntnisse können Schwächen des Live-Lab bereits während der Durchführung erkannt und mit entsprechenden Maßnahmen unterlegt werden.

Live-Labs nehmen eine Mittelstellung zwischen Laborstudien und Feldstudien in Unternehmen ein. Sie sollte daher auch nicht als Alternative zu ihnen aufgefasst werden. Vielmehr ergänzen sie das Portfolio entwicklungsmethodischer Untersuchungsumgebungen um einen weiteren Baustein. Angesichts der übergreifenden Zielstellung, Methoden und Prozesse der Produktentwicklung zu erforschen und diese – gemessen an konkreten Bedarfen – mehrwertstiftend Industrieunternehmen zur Verfügung zu stellen, schließen Live-Labs die Lücke zwischen Laborumgebungen und Feldstudien. Im Idealfall greifen sie, wie im Fall von ProVIL dargestellt, Erkenntnisse aus Laborstudien auf, entwickeln aus ihnen Methoden und Prozesse in realitätsnäheren Kontexten weiter und evaluieren diese (vgl. Bild 3). Die Erkenntnisse aus Live-Labs

sollten nach Möglichkeit wiederum im Rahmen konkreter Feldstudien z.B. Case-Studies evaluiert werden.

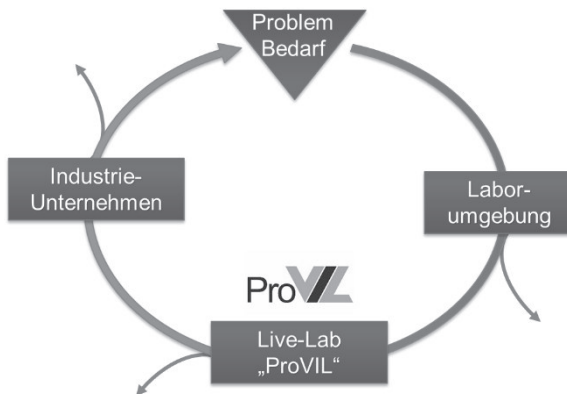


Bild 3: Framework für Untersuchungsumgebungen am Beispiel des Live-Lab ProVIL: Vom Bedarf bis zur Implementierung in Industrieunternehmen

Neben der Modellierung des Ablaufs von ProVIL wurde die Innovationsplattform SAP Innovation Management adaptiert, um sie in allen Projektphasen erfolgreich verwenden zu können. Diese Erkenntnisse fließen über eine Partnerschaft wiederum in die Weiterentwicklung der Innovationsplattform ein. Die detaillierte Gestaltung wird aus Platzgründen separat publiziert [22].

Im kommenden Jahr wird mit Fiat ein Automobilhersteller aus dem europäischen Ausland als Projektpartner am Projekt teilnehmen, wodurch Englisch als Projektsprache verwendet werden wird. Die zusätzlich angestrebte Ausweitung des Teilnehmerkreises auf mittelfristig bis zu 200 Studierende bringt zudem neue Herausforderungen mit sich. Das Live-Lab ProVIL muss daher schrittweise weiterentwickelt werden, wodurch auch neuartige Fragestellungen untersucht werden können. In den kommenden Jahren werden beispielsweise vermehrt VR-Brillen wie die Oculus Rift zum Einsatz kommen. Mit dieser ist es möglich interessierten Gästen bei der Abschlussveranstaltung die Produktkonzepte realitätsnah vorzustellen. Dadurch wird die Digitalisierungskompetenz von Studierenden des Maschinenbaus am KIT gestärkt, um sie für die Produktentwicklung von morgen auszubilden.



Literatur

- [1] Zanker, C., Horvat, D.: „Modernisierung der Produktion – Globale FuE-Aktivitäten deutscher Unternehmen“, Mitteilungen aus der ISI-Erhebung (68), 2015.
- [2] Schmalzl, B. (2004). „Arbeit und elektronische Kommunikation der Zukunft. Methoden und Fallstudien zur Optimierung der Arbeitsplatzgestaltung.“ Springer, Berlin, 2004.
- [3] Eigner, M., Stelzer, R.: „Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2009.
- [4] Abramovici, M.: “The Future of Product Development – Future Trends in Product Lifecycle Management (PLM)”, Springer-Verlag, 2007.
- [5] Vajna, S., Weber, C., Bley, H., & Zeman, K.: „CAx für Ingenieure: eine praxisbezogene Einführung“ Springer-Verlag, 2009.
- [6] Albers, A., Bursac, N., Wintergerst, E.: „Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive“, Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015, Stuttgart, 2015.
- [7] Maul, L.: “Vernetzte Kreativität - Menschzentrierte Gestaltung und Integration einer Community-Plattform für Innovationsimpulse“, Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe Institut für Technologie, 2014.
- [8] Albers, A., Maul, L., Bursac, N., Heisman, R.: “Connected Creativity – A Human Centered Community Plattform for Innovation Impulses“, The Third International Conference on Design Creativity (3rd ICDC), Bangalore, India, 2015.
- [9] Walter, B., Rapp, S., Albers, A.: „The application of creativity methods in virtual teams in Product development“, International Design Conference - Design 2016, Dubrovnik, 2016.
- [10] Walter, B., Rapp, S., Albers, A.: “Selecting appropriate tools for synchronous communication and collaboration in locally distributed product development“, NordDesign, Trondheim, 2016.

-
- [11] Albers, A., Bursac, N., Walter, B., Hahn, C., Schröder, J.: „ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor“, Entwerfen Entwickeln Erleben 2016, Dresden, 2016.
- [12] Marxen, L.: „A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM“, Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2014.
- [13] WPGS: Internetpräsenz der Wirtschaftspsychologischen Gesellschaft – Plattform für Kommunikation in Wirtschaftspsychologie - Fachtexte, Verantwortlicher Webmaster: Prof. Dr. Florian Becker, Lehrstuhl für Öffentliches Recht der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, www.wpgs.de, Stand: 07.06.2016.
- [14] Rettenbach, R., Christ, C.: „Psychotherapie-Prüfung: Kompaktkurs zur Vorbereitung auf die Approbationsprüfung nach dem Psychotherapeutengesetz mit Kommentar zum IMPP-Gegenstandskatalog“, Schattauer GmbH, Stuttgart, 4. Auflage, 2016.
- [15] Schumacher, J.: „Living Lab Vorarlberg“, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 49, 2008. http://f10-institut.org/fileadmin/f10_userdaten/Projekte/NLL_BRO_RZ5_web_ES.pdf (letzter Zugriff: 12.07.2016)
- [16] Hellfeld, S., Oberweis, A., Wessel, T.: „Plattform zur prozessgetriebenen Entwicklung von anwenderinduzierten Innovationen in domänenübergreifenden Anwendungsszenarien“, HMD (HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik) 52:337–346, DOI: 10.1365/s40702-015-0132-6, Springer, 2015.
- [17] FZI-House of Living Labs: <http://www.fzi.de/forschung/fzi-house-of-living-labs> (letzter Zugriff: 15.07.2016)
- [18] Albers, A., Burkhardt, N., Deigendesch, T., Mebold, M.: „Enabling Key Competencies by Educational Project Work Exemplified by Teamwork and Cooperation“, International Conference on Engineering and Product Design Education, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2008.
- [19] Albers, A., Gladysz, B., Heitger, N., Wilmsen, M.: „Categories of product innovations – A prospective categorization framework for innovation pro-

jects in early development phases based on empirical data", 26th CIRP Design Conference, Stockholm, 2016.

[20] Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Walter, B., Gladysz, B.: „InnoFox: Situationsspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess“, In: Proceedings of the Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, 2015.

[21] EU-Projekt „Science2Society“: <http://science2society.atosresearch.eu>

[22] Walter, B., Albers, A., Heck, M., Bursac, N.: „ProVIL -Produktentstehung im virtuellen Ideenlabor: Anpassung einer kollaborativen Innovationsplattform zur Realisierung eines communityorientierten Innovationsprozesses“, 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Berlin, 2016.



Methodische Variantenerzeugung zur Entwicklung eigenschaftsoptimierter Karosseriekonzepte in Mischbauweise

Jan Hasenpusch¹, Andreas Hillebrand¹, Thomas Vietor²

¹ *Konzernforschung, Volkswagen AG*

² *Institut für Konstruktionstechnik (IK)
TU Braunschweig*

Abstract

The area of conflicts ranging between ecology, economy and technology results in different goal conflicts. These are between safety, economic efficiency and environmental compatibility. The outcomes are lots of parameter changes in the early stages of the product development process. To increase the efficiency in the product development process it is necessary to get a fast and holistic evaluation of the influence of the parameter variations to the product's properties. This contribution describes a part of a methodology with that aim and the implementation of a user application.

Keywords: Methodical development of solution concepts, body concepts, SQL-Database, improvement in efficiency

1 Problemstellung

Die Spannungsfelder Umwelt, Wirtschaft und Technik führen in der Fahrzeugentwicklung zu verschiedenen Zielkonflikten. Diese treten u.a. zwischen Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit auf. [1] Durch die

Konstellation diverser Parametervariationen, wie restriktiver Anforderungen, neuer Technologien oder Werkstoffe, kommt es in der frühen Phase der Entwicklung zu einem Informationsdefizit. Dieses schlägt sich negativ auf den Entwicklungsprozess nieder, indem vermehrt Iterationsschleifen notwendig sind, um neue Informationen, den Randbedingungen entsprechend, zu berücksichtigen und umzusetzen. Die Iterationsschleifen wirken einer Verkürzung des Entwicklungsprozesses entgegen und führen zu einer Kostensteigerung. Daher ist das am Anfang vorliegende Informationsdefizit zu minimieren. [2] Eine Möglichkeit besteht in der schnellen systematischen Ermittlung der Auswirkungen von Parametervariation auf die Eigenschaften des Fahrzeugs mittels eines wissensbasierten Produktmodells, um daraus die Entwicklungsrichtung vorgeben zu können. In diesem Beitrag liegt die Fokussierung auf der Fahrzeugkarosserie, daher lautet die Forschungsfrage: Wie können Parametervariationen und deren Auswirkungen auf die Karosserieeigenschaften schnell, günstig und ganzheitlich erzeugt und beurteilt werden?

2 Forschungsansatz und Zielsetzung

Mit einer schnellen, kostengünstigen und ganzheitlichen Beurteilung können neben den Eigenschaften auch Zielkonflikte abgeleitet werden. Eine alleinige Betrachtung eines Bauteils ist dabei nicht anzustreben, daher ist die Integration in ein Umgebungssystem zu untersuchen. Bei der Fahrzeugkarosserie ist die Torsionssteifigkeit einzelner Bauteile für die Torsionssteifigkeit der Gesamtkarosserie nahezu vernachlässigbar. Der vorhandene Bauraum ist dagegen für jedes Bauteil entscheidend. Die Grundlage für die Variantengenerierung sind in dieser Arbeit deshalb neben grundlegenden Maßen nach Hahn et.al. [3] ein grobes Insassen-, Antriebs- und Fahrwerkspackage, um die zur Verfügung stehenden Bauräume zu ermitteln, ähnlich zu Hillebrand et.al. [4].

Die Art und der Detaillierungsgrad der Lösungsvarianten hängen mit der Phase des Produktentwicklungsprozesses zusammen. Je weiter dieser fortgeschritten ist, desto mehr Merkmale sind festgelegt. Die Auswirkungen auf die Eigenschaften sind für jede Merkmalskombination zu untersuchen. In der hier betrachteten frühen Phase ist vor allem das Informationsdefizit eine Herausforderung. Ausgehend vom Startpunkt, bspw. einer Idee sind Parameter zu variieren, um die optimale Lösung zu gestalten. Die Auswahl der Parameter und die Art der Variation sind ein entscheidender Faktor für die Effizienz der frühen Phase. Werden Parameter wahllos miteinander kombiniert führt dies höchstens per Zufall zum Erfolg. Werden alle Parameter miteinander kombiniert steigt der Aufwand. Eine zielgerichtete Variation in geeigneter Schrittweite

ist der Schlüssel zum Erfolg. Beispielweise sollte die Blechstärke funktionsabhängig in bestimmten Schritten variiert werden.

Ziel dieses Beitrags ist es, eine methodische Vorgehensweise als Hauptbestandteil einer übergeordneten Methodik [5, 6] aufzuzeigen, die es ermöglicht, in einer sehr frühen Phase der Fahrzeugentwicklung fertigungs- und verbindungstechnisch mögliche Bauteilvarianten zu erzeugen und deren technische, wirtschaftliche und ökologische Eigenschaften zu beurteilen. Der geforderte Detaillierungsgrad und die Zielrichtung steuern die Variantenerzeugung. Die Integration in das wissensbasierte Produktmodell, siehe Bild 1, wird dabei berücksichtigt.

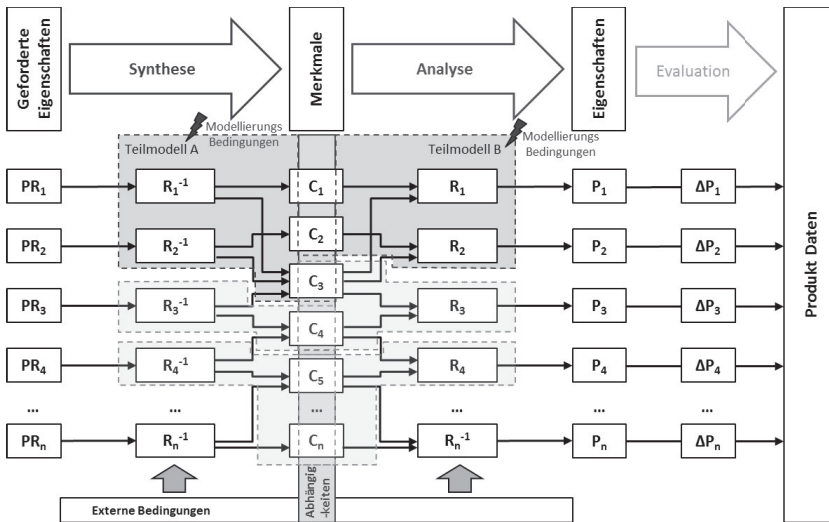


Bild 1: Schematische Darstellung des wissensbasierten Produktmodells aus [6]. Allgemeines und firmenspezifisches Wissen ist in den Beziehungen zwischen geforderten Eigenschaften und Merkmalen und diesen zu den Eigenschaften in den Teilmodellen und der Parametrik gespeichert; nach [7]

3 Methodik

Ausgehend vom Ziel dieses Beitrags werden zunächst die übergeordneten Zusammenhänge der Methodik in Kapitel 3.1 beschrieben. Unter diesen Randbedingungen wird in 3.2 auf die Lösungsvariantenerzeugung eingegangen. In Kapitel 3.3 wird die Umsetzung des theoretischen Prozesses erläutert. Das Ergebnis ist ein Software-Tool, das in der Methodik anwendbar ist.

3.1 Übersicht

In [6] wird das grundlegende Beziehungssystem und das Vorgehen der Methodik zur Entwicklung und Beurteilung eigenschaftsoptimierter Produkte vorgestellt. Die Ausgangsbasis bildet das Characteristic-Properties-Modelling (CPM) nach [7]. Die Weiterentwicklung aus [6] ist in Bild 2 dargestellt. Dieses wissensbasierte Produktmodell wird in drei Phasen verwendet: Synthese, Analyse und Evaluation. In der Synthese wird aus den geforderten Eigenschaften der Lösungsraum der Merkmale aufgespannt. Diese werden miteinander zu Lösungskonzepten kombiniert. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Eigenschaften durch die Analyse der Merkmale der Lösungskonzepte. Die Evaluation vergleicht die ermittelten mit den geforderten Eigenschaften und erstellt mittels eines Bewertungsverfahrens eine Rangfolge. Diese Informationen dienen im Entwicklungsprozess als Entscheidungsgrundlage.

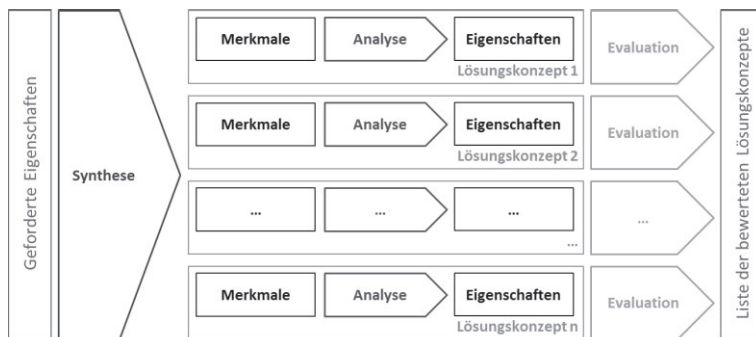


Bild 2: Anwendung des wissensbasierten Produktmodells zusammen mit der Kombinatorik zu verschiedenen Lösungsvarianten innerhalb der Methodik; Eigene Abbildung

Der allgemeine Prozess für die Anwendung des Produktmodells wird für die Entwicklung von Karosseriekonzepten detailliert, siehe Bild 3. Die Merkmale, Eigenschaften und weiteren Randbedingungen der Karosserieentwicklung sind entscheidend. Ausgehend von geforderten Eigenschaften in den Klassen Technik, Wirtschaftlichkeit und Ökologie ist das Package maßgebend. Dazu zählen diverse Komponenten wie bspw. Antriebsaggregate, die Platzierung der Insassen oder Ergonomiemaße. In einem ersten Schritt werden daher die geforderten Eigenschaften definiert und Packagekomponenten ausgewählt. Der Fokus liegt auf der Verwendung bestehender und geplanter Komponenten. Die Karosserie ist dafür in Module geteilt. Sie bilden Hauptbaugruppen, wie ein Vorderwagen für eine Verbrennungskraftmaschine, eine Bodengruppe für ein Elektrofahrzeug, einen Hinterwagen für ein wasserstoffbetriebenes

Fahrzeug oder Dachaufbauten für Coupevarianten. Die Auswahl einer möglichen Modulkombination ist die Voraussetzung für die Ermittlung des Packages, das auf den Inputgrößen wie Haupt- und Außenabmessungen basiert. Mit Hilfe dieser Inputgrößen wird der nachfolgende Prozess gesteuert.

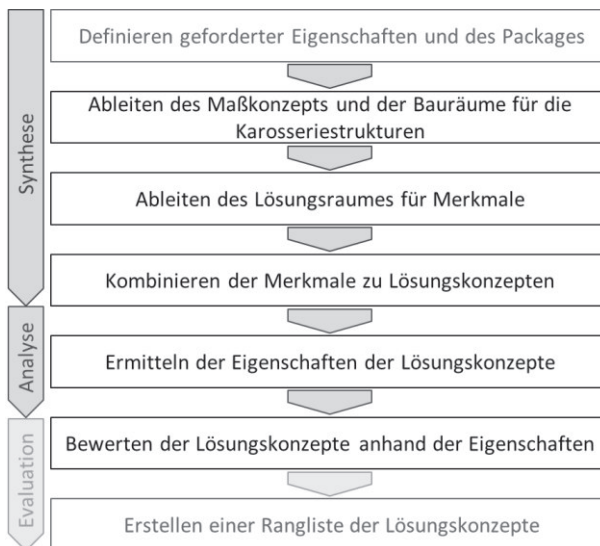


Bild 3: Prozessdarstellung im Rahmen der Methodik; Eigene Abbildung

In dem zweiten Schritt erfolgt die Ableitung des Maßkonzepts des Fahrzeugs, basierend auf dem Prinzip der eigenschaftsbasierten Fahrzeugkonzeption von Hahn [3]. Die Ableitung der Bauräume erfolgt durch ein Teilbeziehungssystem, bestehend aus geometrischen und statistischen Gleichungen.

Der Hauptteil der methodischen Variantenerzeugung erfolgt in den nächsten Schritten. Unter Berücksichtigung der geforderten Eigenschaften, der Bauräume und der Abhängigkeiten der Merkmale untereinander wird der Lösungsraum der Merkmale aufgespannt. Die Kombination der Merkmale zu Lösungskonzepten erfolgt im darauffolgenden Schritt unter weiteren Randbedingungen. Der Hauptteil der methodischen Variantenerzeugung wird in Kapitel 3.2 näher erläutert.

Sind die Lösungskonzepte in ihren Merkmalen bekannt werden im nächsten Schritt die Eigenschaften bestimmt. Je nach geforderten Eigenschaften werden unterschiedliche Teilmodelle aus dem wissensbasierten Produktmodell aktiviert, siehe Bild 3. Die Verwendung unterschiedlicher Modelle basiert auf der Notwendigkeit der Abbildung des physikalischen Verhaltens so detailliert

wie nötig bei gleichzeitiger Minimierung des Aufwands. Die Teilmodelle sind über das Beziehungssystem parametrisch miteinander verknüpft, sodass sie für die hohe Zahl an Lösungskonzepten angewandt werden können.

Die Ermittlung der Eigenschaften unterliegt einem mehrstufigen Bewertungsprozess, um den Aufwand zu minimieren und nicht zielführende Lösungsvarianten frühzeitig auszusortieren. Das verwendete wissensbasierte Produktmodell besteht in der Analysephase aus Teilmodellen mit einem differenzierten Detailgrad und entsprechendem Modellierungs- und Analyseaufwand. Von einer Gewichtsabschätzung bis hin zur automatisierten FE-Modellerstellung, –Berechnung und –Auswertung steigt der zeitliche Aufwand auch mit hohem Automatisierungsgrad. Stufenweise wird der Aufwand durch den Ausschluss von Lösungskonzepten reduziert. In einer ersten Stufe dienen beispielsweise das Gewicht, Materialkosten, Anteil an Standardfügeverfahren oder die Gewichtsverteilung als Kriterien. In den weiteren Stufen werden fertigungstechnische, ökologische und NVH- sowie Sicherheitseigenschaften ermittelt und bewertet. Die Randbedingungen wie Fertigbarkeit und Fügbarkeit werden in der Analyse nicht erneut betrachtet, da sie in der Synthesephase als Ausschlusskriterien dienen.

In jeder Bewertungsstufe wird eine Rangfolge mit den bewerteten Lösungsvarianten erstellt. Diese hängt von den geforderten Eigenschaften, deren Gewichtung als Kriterien und der gewählten Punkteskala ab. Mit der Auswahl nach jeder Bewertungsstufe kann der Aufwand für die nächste Stufe minimiert werden.

Die Informationen über die Lösungskonzepte im Verhältnis zu den geforderten Eigenschaften können für den weiteren Entwicklungsprozess genutzt werden. Sie unterstützen die Entscheidungsfindung für die Richtung des Entwicklungsprozesses. Die Methodik unterstützt den Anwender bei der Entwicklung und Beurteilung von Karosseriekonzepten. Auswirkungen von Parametervariationen können schnell beurteilt und Entscheidungen getroffen werden.

3.2 Lösungsvariantenerzeugung

Die Lösungsvariantenerzeugung wird in die beiden Schritte *Ableiten des Lösungsraumes für Merkmale* und *Kombinieren der Merkmale zu Lösungskonzepten* gegliedert. Prinzipiell kann diese auch als eine Art dreifacher morphologischer Kasten beschrieben werden. Zuerst wird der Morphologische Kasten für jede Baugruppe aufgespannt. Basierend auf den Eingangsdaten werden die möglichen Merkmalsausprägungen als Teillösungen zu den Merkmalen Geometrie, Material und Fügeverfahren aufgespannt. Die benötigten Informa-

tionen sind in einer Datenbank abgespeichert. Die Abfrage der Daten erfolgt über eine Eingangsdaten-gesteuerte Prozedur. Sie trägt alle Daten zusammen und kombiniert diese zu Baugruppenvarianten, bspw. vom Fahrzeugschweller. Bild 4 visualisiert das beschriebene Prinzip schematisch.

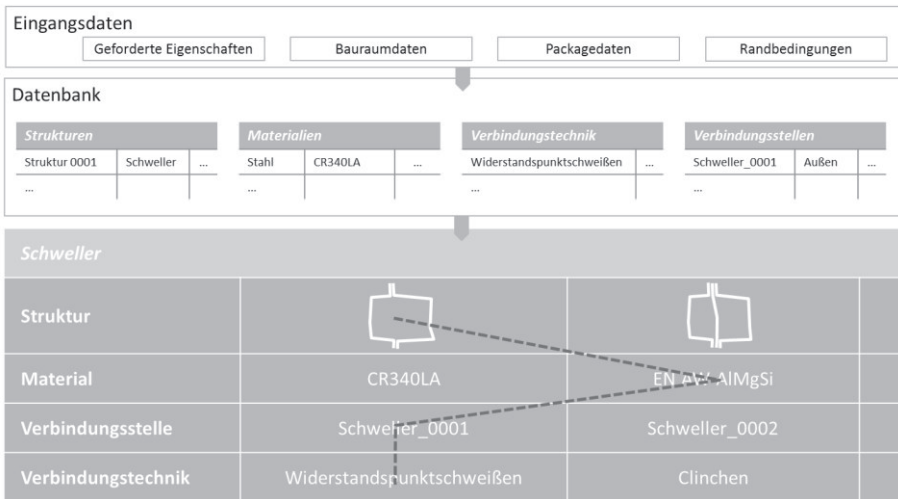


Bild 4: Darstellung einer Eingangsdaten-gesteuerten Prozedur zur Erstellung von Baugruppenvarianten; Eigene Abbildung

Die Abfrage der Daten erfolgt basierend auf den Eingangsdaten. Zunächst werden parametrisch abgespeicherte Strukturen ausgewählt und den Bauraumabmessungen angepasst. Denn aufgrund der Ermittlung des Bauraums im ersten Schritt gilt hier das Prinzip der Ausnutzung des maximalen Bauraums. Dabei werden unterschiedliche Wandstärken berücksichtigt. Beispielsweise werden für einen Fahrzeugschweller alle Strukturen aus der Datenbank zur passenden Fahrzeugklasse ausgewählt und auf den Bauraum der Eingangsdaten angepasst. Damit wird die Fertigbarkeit gewährleistet. Theoretisch kann die Datenbank um jede weitere herstellbare Struktur ergänzt werden. Über Randbedingungen wie minimaler und maximaler Bauraum können fertigungstechnische Parameter, wie bspw. Aushebeschrägen oder maximale Tiefziehtiefen in Kombination mit der Zuordnung der Wandstärken berücksichtigt werden. Strukturen die nicht in den Bauraum passen oder aus anderen Fahrzeugklassen entnommen sind werden nicht weiter berücksichtigt. Damit ist die Geometrie als Teilproblem abgeschlossen.

Mit der bekannten Geometrie (Struktur und Wandstärke) können geeignete Materialien ausgewählt werden. Fertigbarkeit ist eine wichtige Randbedin-

gung, die über die Struktur- und Wanddickeneigenschaften berücksichtigt wird. Des Weiteren werden entsprechend der Funktionen bestimmte Materialgruppen aus der Datenbank ausgewählt und mit den Strukturen kombiniert. Das Ergebnis sind Strukturen mit unterschiedlichen Wandstärken und Materialien. Zum Beispiel werden für die oben generierten Fahrzeugschweller in Abhängigkeit von Wandstärken und Strukturen Materialien einer bestimmten Festigkeit passend zur Funktion ausgewählt.

In Abhängigkeit der Bauteiltopologie sind für mehrteilige Baugruppen Verbindungstechniken zu wählen. Die Struktur gibt die Lage und Geometrie der Verbindungsstellen vor. Zu diesen werden in Abhängigkeit von Materialkombinationen, Materialdickenkombinationen und Fügerichtung anwendbare Technologien ausgesucht und kombiniert. Für einen 2-teiligen Schweller werden für den oberen und den unteren Flansch entsprechend der Randbedingungen Fügeverfahren ausgewählt. Das Ergebnis sind Baugruppen bestehend aus einem Geometrie-, Material- und Fügekonzept.

Die Baugruppenkonzepte dienen dem zweiten Morphologischen Kasten als Eingangsgröße. Dort werden die ausgewählten Module zu Modulvarianten kombiniert. Die zweite Prozedur entnimmt aus der Datenbank die zu entwerfenden Verbindungsstellen in Abhängigkeit von Modul und Baugruppe. Der Fahrzeugschweller eines Bodenmoduls für einen Verbrenner kann aufgrund der Anforderungen bspw. eine andere Geometrie als der Schweller eines Elektrofahrzeugs haben, weshalb diese nicht beliebig mit anderen Baugruppen kombiniert werden können. Das erste Auswahlkriterium ist deshalb die Struktur. Über eine Primär-Fremdschlüsselbeziehung sind Modulbezogen verbindbare Baugruppen hinterlegt. Diese werden passend zu den Verbindungsstellen ausgewählt. Daraufhin werden, wie zuvor, Materialkombinationen, Materialdickenkombinationen und Fügerichtungen als Kriterien für die Auswahl von Fügetechnologien genutzt. Diese werden den Verbindungsstellen zugeordnet. Dabei können auch mehrere Verbindungsmöglichkeiten für eine Stelle ausgesucht werden. Hier obliegt dem Anwender eine direkte Auswahlmöglichkeit oder die Priorisierung von Fügeverfahren unter bestimmte Randbedingungen.

Sind die Modulvarianten erstellt, können diese zu Karosserievarianten kombiniert werden. In dem dritten Morphologischen Kasten werden die Modulvarianten als Teillösungen mit Hilfe von Verbindungsstellen zwischen den Modulen kombiniert. Wie beim Schritt zuvor werden für die Verbindungsstellen u.a. Material- und Materialdickenkombination geprüft. Erfüllen die Verbindungsstellen zwischen zwei Modulen für die Varianten die Kriterien, wird das nächste Modul überprüft bis die Modulvarianten zusammen Karosserievarianten

ten bilden. Durch die Kenntnis der einzelnen Baugruppen können die Merkmale zu den Lösungsvarianten zusammengetragen werden. Sie dienen dem nachfolgenden Analyse-Prozess als Eingangsdaten. Die Modelle basierend weitestgehend auf den hier definierten Merkmalen.

3.3 Umsetzung der Lösungsvariantenerzeugung

Die Umsetzung der gesamten Methodik erfolgt über einen modularen Ansatz. Der Anwender der Methodik steuert den gesamten Prozess über eine zentrale Datenverwaltung. Die Teilprozesse werden in verschiedenen Softwarepaketen umgesetzt. Sie werden von der zentralen Datenverwaltung gesteuert und mit Daten versorgt. Eines der Pakete ist die Lösungsvariantenerstellung. Sie benötigt die Daten aus dem vorherigen Prozess und aus der oben erwähnten Datenbank. Für den Aufbau der Datenbank wurden Datenbanksprachen (u.a. SQL, UML, SysML, QUEL, QBE) und Datenbankmanagementsoftware (u.a. MS SQL Server, MS Access, MySQL, PostgreSQL, DB2) gegenübergestellt. [9] Die Auswahl erfolgte mit Hilfe einer Auswahlliste. Entscheidend waren u.a. die Art des Datenbankmodells, die Art der Modellierung, Möglicher Komplexitätsgrad, Forderung nach parallelem Arbeiten, Nutzung von verschiedenen Berechtigungsstufen und die interne Verfügbarkeit. SQL wird mit dem MS SQL Server angewandt. Die Speicherung von Daten erfolgt in einer SQL Datenbank tabellenbasiert. Die Informationen können miteinander verknüpft werden. Automatisierte Abfragen, wie in Kapitel 3.2 benötigt werden, können damit umgesetzt werden. In SQL können benutzerdefinierte Prozeduren bzw. Routine definiert und ausgeführt werden. [9, 10]

Die oben beschriebenen Morphologischen Kästen stellen jeweils eine eigene Prozedur dar, vgl. Bild 5. Diese erzeugen temporäre Tabellen, welche die nächste Prozedur für die Kombination verwendet. Die Teilprobleme bzw. Teillösungen werden je als eine Tabelle umgesetzt. Die grundlegende Tabelle stellt die Strukturtable dar. In ihr sind die Strukturen parametrisch gespeichert. Weiterhin sind Informationen zu den Bauraumbegrenzungen in Abhängigkeit der Fertigungstechnik, Informationen zu Ursprungsbauteilen oder Radien hinterlegt. Die erste Prozedur erhält aus dem vorangehenden Prozess die Bauraumdaten und wählt aus den Spalten mit den Bauraumdaten der Struktur fertigbare Lösungen aus und speichert die geeigneten Strukturen angepasst an den geforderten Bauraum in eine temporäre neue Tabelle.

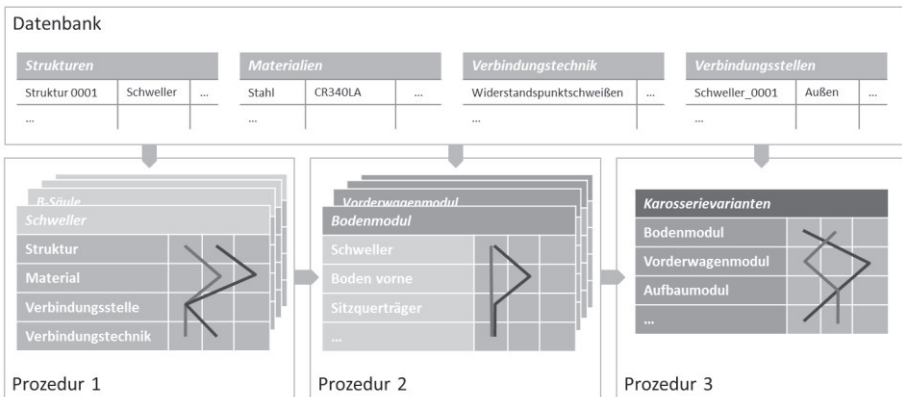


Bild 5: Überblick verwendeter Prozeduren zur Erstellung der Karosserievarianten; Eigene Abbildung

Die Materialien sind mit den spezifischen Eigenschaften in einer weiteren Tabelle gespeichert. Die Verträglichkeitsmatrix wird über die erste Prozedur realisiert. Ausgehend von der verwendeten Struktur und den Eingangsdaten werden geeignete Materialien ausgewählt und in die temporäre Tabelle übernommen. In der dritten grundlegenden Tabelle sind die Verbindungsstellen enthalten. Sie sind den Modulen, Baugruppen und Bauteilen zugeordnet. In der ersten Prozedur werden die Verbindungsstellen innerhalb einer Baugruppe ausgewählt und in der temporären Tabelle ergänzt. Davon ausgehend wählt die erste Prozedur in der vierten grundlegenden Tabelle, der Fügeverfahrenstabelle, mögliche Verbindungstechniken aus. Dazu werden bspw. Materialien, Materialdickenkombinationen oder die Fügerichtung betrachtet. Auf diese Art und Weise entstehen für jede Baugruppe fertigmögliche Varianten.

Die zweite Prozedur erzeugt die Modulvarianten mit der Verbindungstabelle, der Fügeverfahrenstabelle und den Baugruppenvarianten analog zur ersten Prozedur. In der dritten Prozedur werden die Karosserievarianten aus den Modulvarianten mit dem gleichen Prinzip erzeugt. Als Ergebnis werden Tabellen mit den Karosserievarianten und deren Merkmalen ausgegeben. Die zentrale Datenverwaltung verteilt die Daten an die nachfolgenden Teilprozesse zur Analyse.

4 Diskussion und Ausblick

Die Validierung der Lösungsvariantenerzeugung an verschiedenen Fahrzeugprojekten hat gezeigt, dass die Erzeugung der Daten von vielen Faktoren abhängt. Neben der verfügbaren Rechenkapazität des Servers hängt die Er-

zeugung vor allem von den Eingangsdaten ab. Je klarer die Eingangsdaten definiert sind, desto schneller kann die Variantenerzeugung bei gleichem Detaillierungsgrad ablaufen. Alternativ kann der Detaillierungsgrad auch gesteigert werden. Beispielweise können die Schrittweiten für die Wandstärken variabel gewählt werden. Werden die Eingangsdaten mit hoher Genauigkeit definiert kann die Schrittweite detailliert werden. Andersherum sollte die Schrittweite vergrößert werden, wenn die Eingangsdaten einen großen Lösungsraum zulassen. Der Prozess läuft automatisch ab, jedoch benötigen die Prozeduren Kapazität bzw. Zeit. Der Anwender sollte das Software-Tool daher gezielt einsetzen, um die Effizienz steigern zu können. Der Zeithorizont für einen Durchlauf beträgt mehrere Stunden. Hier müssen noch weitere Erfahrungswerte gesammelt werden, um dem Anwender eine Empfehlung für den voraussichtlichen Zeitaufwand zu geben.

Die Qualität der Ergebnisse hängt maßgeblich von der Datenbasis in der Datenbank ab. Neue Fahrzeugstrukturen, Materialien und Fügeverfahren können von einem Key-User in der Datenbank verwaltet werden. Bei der Datenpflege muss das Wissen über die Informationen vollständig vorliegen. Deshalb gibt es Eingabemasken mit Pflichtfeldern. Das Wissen das dort eingetragen wird ist die Grundlage für die erfolgreiche Verwendung der Datenbank. Eine Redundanz der Daten ist zu vermeiden. Daher unterliegt die Ordnung der Daten einem Gliederungskonzept. Die Erweiterung der Datenbestände wird zeigen, ob die Gliederung ausreichend ist oder an die Datenmenge angepasst werden muss.

Zusammenfassend wurde die Lösungsvariantenerzeugung zur Methodik [6] erläutert. Sie basiert prinzipiell auf drei Morphologischen Kästen, die aus den Merkmalen Struktur, Material und Füge-technik Baugruppenvarianten erzeugen. Diese werden zu Modul- und dann zu Karosserievarianten kombiniert. Die Umsetzung erfolgte in einer SQL-Datenbank. Die Kombinatorik wurde mit drei Prozeduren umgesetzt, die aus der Datenbank Informationen verknüpfen. Dadurch werden verschiedene fertigungs- und verbindungstechnische Randbedingungen berücksichtigt. In Abhängigkeit der Eingangsdaten und der Datenbasis werden Karosserievarianten für eine Analyse der Auswirkungen der Parametervariationen erzeugt. Das ist eine wichtige Voraussetzung, um eine fundierte Entscheidungsbasis zu generieren und die Effizienz im Entwicklungsprozess steigern zu können.

Literatur

- [1] Volkswagen AG (Hrsg.): Menschen bewegen - Geschäftsbericht 2015, Wolfsburg, 2016.

-
- [2] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Springer Verlag, Berlin, 2014.
- [3] Hahn, J.; Hazelaar, M.; Grote, K.-H.: Unterstützung der eigenschaftsbasierten Fahrzeugkonzeption in der frühen Konzeptphase, Entwerfen-Entwickeln-Erleben 2012, Dresden, 2012.
- [4] Hillebrand, A.; Hirz, M.; Dietrich, W.: ConceptCar: Ein Werkzeug für die frühe Konzeptphase zur Konzipierung und Bewertung von Fahrzeugen, Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug 2012, Graz, 2012.
- [5] Hasenpusch, J.; Hillebrand, A.; Vietor, T.: Parametrische Methodik zur Entwicklung anforderungsoptimierter Karosseriestrukturen in Multi-Material-Bauweise, 19. Internationales Dresdener Leichtbausymposium, Dresden, 2015.
- [6] Hasenpusch, J.; Hillebrand, A.; Vietor, T.: Erarbeitung eines Beziehungssystems zur Entwicklung eigenschaftsoptimierter Karosseriekonzepte in Mischbauweise, Entwerfen-Entwickeln-Erleben, Dresden, 2016.
- [7] Weber, C.: "Design Theory and Methodology - Contributions of the Computer Support of Product Development/Design Processes", The Future of Design Methodology, Birkhofer, H., Springer-Verlag, 2011, 91-104.
- [8] Vajna, S.; Bley, H., Weber, C.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung, Springer-Verlag, Berlin, 2009.
- [9] Luscher, J.: Wissensbasierte Konzeptentwicklung von Rohkarosserien in Multi-Material-Bauweise, Abschlussarbeit, Institut für Konstruktionstechnik, Braunschweig, 2015.
- [10] Restle, T.: Methodik zur Lösungsvariantenerzeugung von Fahrzeugkarosserien und anschließender Bewertung, Abschlussarbeit, Institut für Konstruktionstechnik, Braunschweig, 2016.

ISBN-978-3-946094-09-8