

KT 2016

14. Gemeinsames Kolloquium

Konstruktionstechnik

6. und 7. Oktober 2016 in Rostock

Klaus Brökel

Frank Rieg

Ralph Stelzer

Jörg Feldhusen

Karl-Heinrich Grote

Peter Köhler

Norbert Müller

Gerhard Scharr

Traditio et Innovatio

Entwicklung und Konstruktion

Tagungsband

Klaus Brökel, Frank Rieg, Ralph Stelzer, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich
Grote, Peter Köhler, Norbert Müller, Gerhard Scharr

14. Gemeinsames Kolloquium **Konstruktionstechnik**

Traditio et Innovatio
Entwicklung und Konstruktion

am 6.und 7.Oktober 2016
in Rostock

Vorwort

Konstruktionstechnik oder Engineering Design, Integrierte Produktentwicklung oder Computer Aided Design, Industrie 4.0 oder Internet of Things, gesucht ist ein Ansatz für die effiziente Nutzung aktuell verfügbarer Methoden und ihre Nutzung als Ressourcen zum Zweck der modernen Produktentwicklung und Fertigung. „Nomen est omen“. So bestand und besteht über die Jahrzehnte ein ständiger Zwang, zur Findung immer neuer Bezeichnungen für Methoden und Arbeitsweisen, die sich quasi selbstständig durch die endlose Weiterentwicklung unserer Entwurfs-, Simulations-, Konstruktions- und nicht zuletzt der Fertigungswerkzeuge ergeben. Es werden Workbenches entwickelt und auf Workshops diskutiert. Der Ingenieur begibt sich in Workspaces, Common Spaces, Virtual Reality Spaces und Caves. Er begibt sich in eine Augmented Reality und bleibt doch weiterhin der durch die Grundlagen der Angewandten Physik, der Mathematik und vor allem durch einen gesunden technischen Menschenverstand und effektive Organisationsformen getriebene und inspirierte kreative Mensch. Die bisherigen Ansätze für Methoden der Künstlichen Intelligenz sind im Alltag des Maschinenbauingenieurs erstaunlicherweise noch nicht angekommen.

Aktuell besteht die Möglichkeit, fast alle durch die Forschung und Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte bereitgestellten Methoden mit den verfügbaren Computern auf Software abzubilden. Geometrische Modellierung im 3D-Raum hat sich innerhalb von zwei Jahrzehnten als normale Arbeitsform für die Generierung des digitalen Mastermodells etabliert. Der digitale Master ist heute das primäre Modell in der Wirtschaft. Digital Mockup zur Überprüfung des Modells, CNC-Steuerdaten, tesselierte Modelle für den 3D-Druck sowie für Visualisierungen und Simulationen sind sekundäre Ergebnisse, die bei Bedarf aus dem Mastermodell abgeleitet werden. Auch numerische Simulationen von Verformung, Schwingung, Temperaturverteilung und Strömungsgeschwindigkeit als Lösungen von Feldproblemen durch direkte Lösung von Differentialgleichungen sind im Alltag des Ingenieurs verfügbar. Stationäre und instationäre Vorgänge lassen sich für fast alle Problemfälle hinreichend genau modellieren und durch experimentelle Lösungen validieren.

Parallel zu den beschriebenen geometrisch-physikalisch basierten Problemen entwickelte sich die informationstechnische Seite der Produktentwicklung. Beginnend mit dem Austausch von Modelldaten zwischen unterschiedlicher Software entstanden zum Teil

sehr abstrakte Ansätze für die produktneutrale Beschreibung von Informationswelten. Die entwickelten Informationsmodelle sind die Grundlage für das Produktdatenmanagement. Dies wurde über das Enterprise Data Management bis zum Product Life Cycle Management ausgebaut. Die pure Not gigantischer Datenbestände hat die Unternehmen gezwungen, neben der reinen Produktentwicklung auch die Verwaltung der großen Datenmengen zu organisieren. Vom Management der Zugriffsrechte bis zur Langzeitarchivierung der Entwicklungsergebnisse hat die Digitalisierung der Ingenieurtätigkeit ein neues Entwicklungsfeld der Angewandten Informatik hervorgebracht. Mobile Endgeräte und die Verfügbarkeit der Cloud für die Datenhaltung weisen momentan den Weg in die Zukunft. Hochauflösende Tablets mit Tastatur und Stift sind für viele Fälle, besonders bei der Arbeit mit sekundären Modellen, hervorragende Arbeitsmittel. Wer einmal mit den aufgeräumten Visualisierungslösungen oder einem übersichtlichen Browser-CAD-System auf Cloudbasis gearbeitet hat, wundert sich über die konventionellen CAD-Systeme.

Was bleibt also zu tun in der extrem interdisziplinär geprägten Forschung der Konstruktionstechnik? In speziellen Details besteht immer Forschungsbedarf. Branchentypische Anwendungen, erweiterte physikalische Modelle oder neue Möglichkeiten von Hard- und Software bieten endlose Chancen, um Forschungsprojekte zu initiieren. Aber was definiert die Konstruktionstechnik als Wissenschaftsdisziplin? Bisher waren es die grundlegenden Ansätze der Konstruktionsmethodik aus den vergangenen Jahrzehnten von Kesselring bis Pahl und Beitz. Für die Zukunft werden sie nicht mehr genügen. Schon ein Blick in die Bücher zur Konstruktionstechnik zeigt, viele Inhalte gehören streng genommen in andere Disziplinen und Vieles wurde von der Entwicklung überholt.

Gesucht ist der neue moderne Rote Faden einer durchgehend internetbasierten und komplett digitalisierten Produktentwicklung und Fertigung unter Einbeziehung externer und künstlicher Intelligenz zur Abfederung der Unzulänglichkeiten des Ingenieurs bei gleichzeitiger Erweiterung seiner Fähigkeiten zur Problemlösung in komplexen interdisziplinär geprägten Systemen.

Die Erzielung maximaler Effizienz durch Nutzung aller verfügbaren Ressourcen bei optimalen Kosten, Funktionalität und Qualität des modellierten Produktes bleibt sicher als oberstes Ziel erhalten.

Das 14. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik bietet eine Plattform zur Darstellung und Diskussion neuer Ansätze. Lassen wir uns überraschen, welche Richtung die Entwicklung nimmt.

Rostock, den 11. August 2016

Klaus Brökel

Ein Standardisierungsansatz zur Implementierung ganzheitlicher Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung auf Grundlage komplexer Produktstrukturen	1
Karoline Jackstien, Ingo Jonuschies, Ulf Göpfert Nordex Energy GmbH, Rostock	
Integration von Versuchsergebnissen in C&C²-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems	10
Albert Albers, Bartosz Gladysz, Jonas Kniel, Michael Aschoff, Armin Meyer KIT – Karlsruher Institut für Technologie, IPEK - Institut für Produktentwicklung	
Konzeption und Versuch an hydraulischen Spannbuchsen für Anwendungsbereiche unter geringer Last	21
Franziska Bendig, Enrico Kloß, Klaus Brökel Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD	
Der „first time right“ Ansatz im Spannungsfeld technischer Entwicklungsprojekte	30
Jan Brökel Suzlon Energy Limited – German Branch, Rostock	
Design for Additive Manufacturing – Praxisnahe Hilfsmittel zur Identifikation und Nutzung konstruktiver Freiheiten	38
Hagen Watschke, Martin Kumke*, Thomas Vietor Technische Universität Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Konstruktionstechnik; *Volkswagen AG, Konzernforschung, Wolfsburg	
Empirische Untersuchungen zum visuellen Wahrnehmen beim Lesen und Verstehen technischer Zeichnungen	47
Ali Daryusi, Grit Köhler Hochschule Offenburg, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Professur für Maschinenelemente und CAD/CAE	
Wissensbasierte Unterstützung des Konstrukteurs an der Schnittstelle CAD-CAE	59
René Andrae, Peter Köhler Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Lehrstuhl Rechnereinsatz in der Konstruktion	
Herleitung eines verallgemeinerten CE-Konformitätsbewertungsprozesses	69
Joachim Langenbach, Norbert Müller, Armin Lohrengel Technische Universität Clausthal, Institut für Maschinenwesen	

Methoden und Werkzeuge zur Nutzung von CT-Daten im CAE-Umfeld	77
Dirk Hofmann, Christine Schöne, Ralph Stelzer	
Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD (KTC)	
Produktentwicklung in der Elektromobilität - Opportunismus im Zeichen der Konstruktionsmethodik	86
Tobias Stefaniak, Daniel Maiwald, Michael Eickhoff, Karl-Heinrich Grote	
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik	
Modellbasierte Prinzip- und Gestaltvariation	96
Albert Albers, Georg Moeser	
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung	
Reflexion der praktischen Umsetzung der Konstruktionsmethodik	105
Carsten Haugwitz	
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau Institut für Maschinenkonstruktion (IMK), Lehrstuhl für Konstruktionstechnik	
Konzeptentwicklung für die Beschleunigung von Planungsprozessen durch die Konstruktion	113
Thivakar Manoharan, Peter Köhler	
Universität Duisburg-Essen, Institut für Produkt Engineering, Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion	
Methoden und Methodik zum Generieren von Produktideen der Generation Industrie, Home, Everyday Life 4.0	121
Henrik Schnegas	
Hochschule Wismar, FB Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik, FG Konstruktionstechnik	
Modellbasiertes Systems Engineering – methodische Unterstützung durch PLM	128
Marc Glauche*, Ute Dietrich	
*Bundesdruckerei GmbH Berlin; Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Wirtschaftsingenieurwesen, Fachbereich 4 Informatik, Kommunikation und Wirtschaft	
Gestaltungsrichtlinien zum Leichtbau von komplexen Druckbehältern	137
Thomas Guthmann, Frank Engelmann, Karl-Heinrich Grote*	
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen; *Institut für Maschinenkonstruktion, OvGU Magdeburg	

Federn aus Faser-Kunststoff-Verbund	146
Gerhard Scharr Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Konstruktionstechnik / Leichtbau	
Festere Klebeverbindungen durch Flächenstrukturierung additiv gefertigter Teile	155
Walter Schmidt, Georg Jacobs, Yimin Yang, Manuel Löwer RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus	
Systematische Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen	165
Robin Kaiser, Michael Vielhaber* Daimler AG, Mercedes-Benz Werk Sindelfingen; *Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität des Saarlandes	
Komponentenübergreifende leichtbau- und werkstofforientierte Produktentwicklungsmethodik infolge anforderungsoptimierter Multi- Material-Strukturen	177
Jerome Kaspar, Michael Vielhaber Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik	
Vorgehen zur Optimierung der Entwicklungstätigkeiten im Prüffeldbetrieb	185
Marc Claus Schmitt*, Karl-Heinrich Grote Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik; * BMW Group, München	
Methodische Konstruktion eines Radnabenmotors mit Radialfluss- Luftpaltwicklung für Kleinwagen	194
Andreas Zörnig, Ralf Hinzelmann, Roland Kasper Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mechatronik	
Entwicklung von konstruktiven Hilfsmitteln für den Produktentwicklungsprozess im nicht-elektrischen Explosionsschutz an ausgewählten Beispielen	202
Sabrina Herbst, Frank Engelmann, Karl-Heinrich Grote* Ernst-Abbe-Hochschule Jena; *Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion	
Entwicklung eines Verfahrens zum Austausch von Taschenzellen bei industriell gefertigten Batteriemodule	211
Benedikt Seelhorst, Tobias Stefaniak, Robert Odenbach, Kevin Kuhlmann, Karl-Heinrich Grote Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik	

Parametrisches Konstruktionswerkzeug für die Gestaltung von elektrischen Maschinen mit Luftspaltwicklung	222
Ralf Hinzemann, Andreas Zörnig*, Norman Borchardt, Roland Kasper Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mechatronik	
Systematik zur Bewertung von Baukästen am Beispiel eines Werkzeugmaschinenherstellers	231
Clemens Birk, Albert Albers, Sabine Muschik*, Nikola Bursac Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung; *TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, Ditzingen	
Datenbankbasierte Kompatibilitätsbewertung technologieintegrierender Werkzeugmaschinen	240
Alexander Schmid, Georg Jacobs, Manuel Löwer, Tim Katzwinkel, Walter Schmidt, Justus Siebrecht RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus	
Smart Engineering im Kontext von Industrie 4.0: Baukastensysteme für die erlebbare Absicherung von Montageanlagen	251
Simon Kind*, Konrad Exner*, Rainer Stark* ¹ , Sebastian Neumeyer ¹ *Technische Universität Berlin, Fakultät V, Lehrstuhl Industrielle Informationstechnik ¹ Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Geschäftsfeld Virtuelle Produktentstehung, Berlin	
Zeitlose Algorithmen und ihre Adaption in modernen Simulationsverfahren	259
Roland Wegmann, Stefan Zorn, Klaus Brökel Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD	
Optimierungsmethoden im Konstruktionsprozess Eine kritische Betrachtung	271
Hans-Peter Prüfer Ruhr-Universität Bochum; im Ruhestand	
FE- Netzverformung an Scandaten ähnlicher Objekte	279
Matthias Klaus, Christine Schöne, Ralph Stelzer Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD	
Untersuchung des Leistungspotentials GPU und HPC beschleunigter Gleichungslöser für den Einsatz in der Finiten-Elemente-Analyse mit Z88	288
Markus Zimmermann, Daniel Billenstein, Daniel Goller, Johannes Glamsch, Frank Rieg Universität Bayreuth, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD	

Informationsübertragung zwischen Knoten in der Finite-Elemente-Analyse am Beispiel der Wärmeübertragung **296**

Christian Dinkel, Daniel Goller, Christian Glenk, Frank Rieg

Universität Bayreuth, Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Numerische Betrachtung von Zwangsbedingungen in der Finite Elemente Analyse **302**

Daniel Billenstein, Pascal Diwisch, Christian Dinkel, Frank Rieg

Universität Bayreuth, Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

FEM-Berechnung der Stützwirkung an Durchdringungskerben **310**

Ali Daryusi

Hochschule Offenburg, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik,
Professur für Maschinenelemente und CAD/CAE

Entscheidende Veränderungen in der zukünftigen kollaborativen Produktentwicklung **320**

Pascal Lünemann¹, Carina Freseman², Sebastian Neumeyer¹, Wei Min Wang², Rainer Stark¹

¹ Fraunhofer IPK, Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik;

² TU Berlin, Fachgebiet Industrielle Informationstechnik

Ein Standardisierungsansatz zur Implementierung ganzheitlicher Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung auf Grundlage komplexer Produktstrukturen

Karoline Jackstien, Ingo Jonuschies, Ulf Göpfert

Nordex Energy GmbH

Am Vögenteich 23, D-18057 Rostock

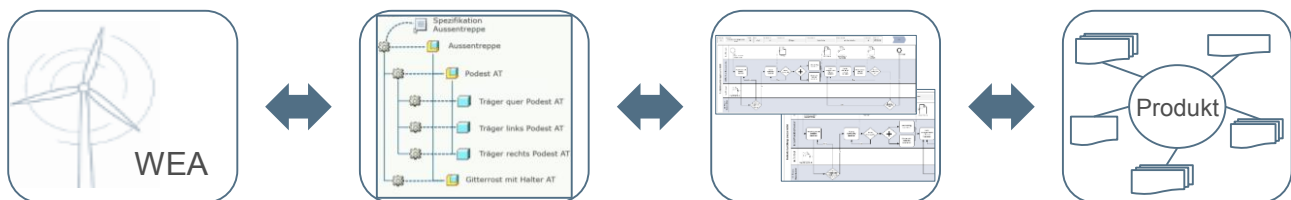
Email: Karoline.Jackstien@gmx.de; IJonuschies@nordex-online.com; UGoepfert@nordex-online.com;

Internet: <http://www.nordex-online.com/de>

Inhalt: Wechselnde Kundenanforderungen sowie dynamische und kürzer werdende Entwicklungsintervalle erfordern eindeutige Prozessstrukturen. Der Einsatz von etablierten Vorgehensmodellen zur Beschreibung von Produktentwicklungen stellt die Wirtschaft immer wieder vor Herausforderungen. Am Beispiel der Nordex Energy GmbH wird die Implementierung von Vorgehensmodellen (Grundlage VDI-Richtlinie 2221) in Verbindung mit den Wechselwirkungen zwischen Produkt-, Prozess- und Dokumentenstrukturen erläutert und ein Umsetzungsvorschlag aufgezeigt.

In der Theorie ist das Vorgehen bei der Entwicklung von Produkten auf Grundlage der VDI 2221 eindeutig. Die Grundlage erfolgreicher Produktentwicklung bilden dabei die Randbedingungen auf der Metaebene. Bei der praktischen Umsetzung der VDI 2221 werfen diese jedoch Fragen auf, die für ein international agierendes Unternehmen mit komplexen Produkten zur Herausforderung werden. Exemplarisch sind folgende Randbedingungen zu nennen:

+ variable Marktanforderungen + Organisationsstrukturen + Prozesslandschaften + interdisziplinäre Entwicklungsteams + heterogene Produkte + Produktstruktur + abteilungsübergreifende Standardisierung + einheitliche Dokumentensätze.



Wechselwirkungen zwischen Produkt-, Prozess- und Dokumentenstrukturen

Im folgenden Beitrag wird über einen Standardisierungsansatz ein möglicher Lösungsweg aufgezeigt, um Produkt- und Prozessstrukturen ableiten zu können.

Abstract: Changing customer requirements, dynamic and shorter development sequences demand a clearly process structure. The use of established process models for the description of product development

represents a major challenge for the economy every time again. The implementation of process models (based on VDI 2221) in connection with the interactions between product-, process- and document structure will be explained with an example of the Nordex Energy GmbH and a proposal of implementation is shown.

The theory for product development based on VDI 2221 is clearly. For a successful product development the boundary conditions on the meta-level are the base. In the practical application of the VDI 2221 these preconditions raise many questions, which are challenging for an international operating company with a complex product structure. For example, the following preconditions could be mentioned:

+ variable market requirements + organizational structures + process landscapes + interdisciplinary development teams + heterogeneous products + product structure + cross-departmental standardization + uniform sets of documents.

The following article shows a possible solution with a standardization approach to derive a product- and process structure.

Stichwörter: Produktentwicklungsprozess; Produkt; Produktstruktur; Standardisierung; Produkt Daten Management System (PDM-System)

Keywords: Product Development Process; Product; Product Structure; Standardization; Product Data Management System (PDM-System)

1 Einleitung

Im vorliegenden Beitrag wird ein Lösungsansatz zur Implementierung von Produktentwicklungsprozessen auf Grundlage eines Standardisierungsansatzes aufgezeigt. Ausgangspunkt ist das Vorgehensmodell der VDI 2221, welche als Basis für die Definition des Entwicklungsprozesses fungiert. Der Wandel von historisch gewachsenen, dokumentenzentrischen Ansätzen zu einem steigenden Einsatz produktzentrischer PDM-Systeme stellt die Implementierung von Entwicklungsprozessen vor Herausforderungen [8]. Zu diesen zählt unter anderem die Kompatibilität zu komplexen Produktstrukturen. Diesem Grundgedanken folgend wird ein Lösungsansatz vorgestellt, der die Wechselwirkungen zwischen Produkt, Prozess und Organisation aufzeigt.

2 Komplexe Produktstrukturen

Historisch bedingt folgte die Entwicklung bei der Nordex Energy GmbH (Nordex) in den letzten Jahrzehnten einem dokumentenzentrischen Ansatz. Als zentrales Element diente ein Datenbanksystem zur Verwaltung von Dokumenten sowie als Mittel zur Kommunikation innerhalb und außerhalb des Unternehmens. Parallel dazu wurden CAD-

Daten in einem eigenen System erstellt und verwaltet. Datenredundanzen sowie erhöhter Verwaltungsaufwand waren die Folge.

Steigender Druck in den Entwicklungsabteilungen, welcher auf schnell wechselnde Kundenanforderungen, kürzeren „time to market“ oder Kostenziele zurückzuführen ist, erfordert neue Strategien in der Entwicklung. Für eine Steigerung der Effizienz sowie der Qualität der Entwicklung wurde ein PDM-System eingeführt. Dieses verfolgt den Zweck, Produktinformationen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes konsistent zu speichern, zu verwalten und bereit zu stellen [2]. Mittelpunkt eines PDM-Systems ist die Produktstruktur, welche die physische Zusammensetzung von Komponenten eines Produktes darstellt [1]. Aufgabe der Produktstruktur ist es, Produktdaten je nach Sicht in geeigneter Form zur Verfügung zu stellen, wie beispielsweise Entwicklungs-, Einkaufs- oder Fertigungssicht.

Die Umstellung von einem dokumentenzentrischen zu einem produktzentrischen System erfordert ein Umdenken in der gesamten Organisation. Die Einführung von Produktstrukturen erzwingt neue Handlungsabläufe in der Handhabung neuer Objekttypen eines PDM-Systems. Daraus ergeben sich neben neuen Aufgabenfeldern und Verantwortlichkeiten auch neue Konzepte zum methodischen Vorgehen, welche die Arbeitsweisen in der Bearbeitung von Dokumenten betreffen. Dokumentenzentrische Ansätze stellen die Beziehung der Produkte zueinander über die Verknüpfung von Dokumenten dar, infolge muss bei der Umstellung auf ein PDM-System das gesamte Dokumentenkonzept auf einen produktzentrischen Ansatz angepasst werden (Bild 1). Grund dafür ist die Nutzung von Produktstrukturen, welche die Beziehung der Produkte zueinander regelt und Grundlage für bereichsspezifische Produktstruktursichten ist. Im System PTC Windchill PDMLink, welches von Nordex genutzt wird, werden die Punkte einer Produktstruktur als WT-Parts definiert. Diese Produktstrukturpunkte sind Container, die CAD-Daten und Dokumente sammeln. Wie ihre Verwendung im Detail definiert wird, ist wiederum eine Prozess- und keine Systemfrage, die sehr stark mit dem firmeninternen Entwicklungsprozess einhergeht und im Folgenden analysiert wird.

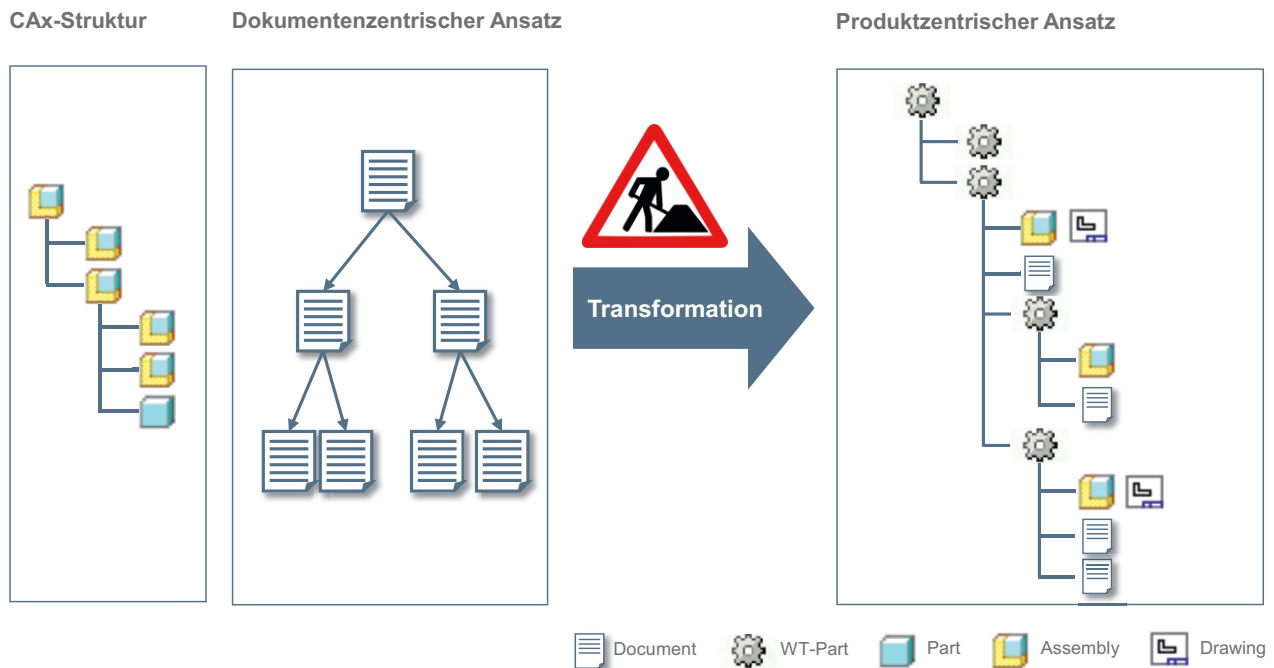


Bild 1: Herausforderungen vom dokumentenzentrischen zum produktzentrischen Ansatz

3 Prozesse in Anwendung auf komplexe Produktstrukturen

Vorgehensmodelle, wie die VDI 2221, sind in der methodischen Produktentwicklung etabliert und theoretische Entwicklungsprozesse können abgeleitet werden. Bei der Implementierung von Prozessen zur Einführung eines PDM-Systems stellt sich die Frage, worauf soll der Prozess bezogen werden. Eine mögliche Antwort ist die Anwendung des Entwicklungsprozesses auf allen Ebenen der Produktstruktur. Da Prozesse mit einem definierten Output zusammenhängen, führt dies jedoch bei näherer Betrachtung aufgrund von stark ansteigendem Dokumentationsaufwand zu verringerter Effizienz im Produktentwicklungsprozess. Das bedeutet, dass die Anwendung des Prozesses auf einer Ebene erfolgen sollte, welche das richtige Verhältnis zwischen Dokumentationsaufwand und Informationsgehalt darstellt. Dies wird im Sinne der Standardisierung deutlich, da standardisierte Produktstrukturpunkte als geschlossene Container mit einer vollständigen Produktdokumentation hochgradig wiederverwendbar sind.

Folglich lässt dies zwei Denkansätze zu. Die Auswahl von Produktstrukturpunkten zur Implementierung von Produktentwicklungsprozessen auf höheren Ebenen oder auf niedrigeren Ebenen (Bild 2). Höhere Produktstrukturpunkte fassen Produktgruppen zusammen, die im Vergleich zu niedrigeren Produktstrukturpunkten weniger Dokumentation bei der Anwendung des Prozesses und somit geringere Arbeitsaufwände

nach sich ziehen. Jedoch korreliert dies mit einem höheren Abstraktionsgrad in der Dokumentation, welcher mit Informationsverlust bzw. weniger Detailtiefe einhergeht. Niedrigere Produktstrukturpunkte folgen dem Standardisierungsgedanken, da sie als vollständig beschriebenes Element immer wieder eingesetzt werden können. Der Detaillierungsgrad der Dokumentation ist bei der Anwendung des Entwicklungsprozesses auf niedrige Produktstrukturpunkte hoch und bezogen auf die gesamte Produktstruktur führt dies zu höheren Dokumentationsaufwänden.

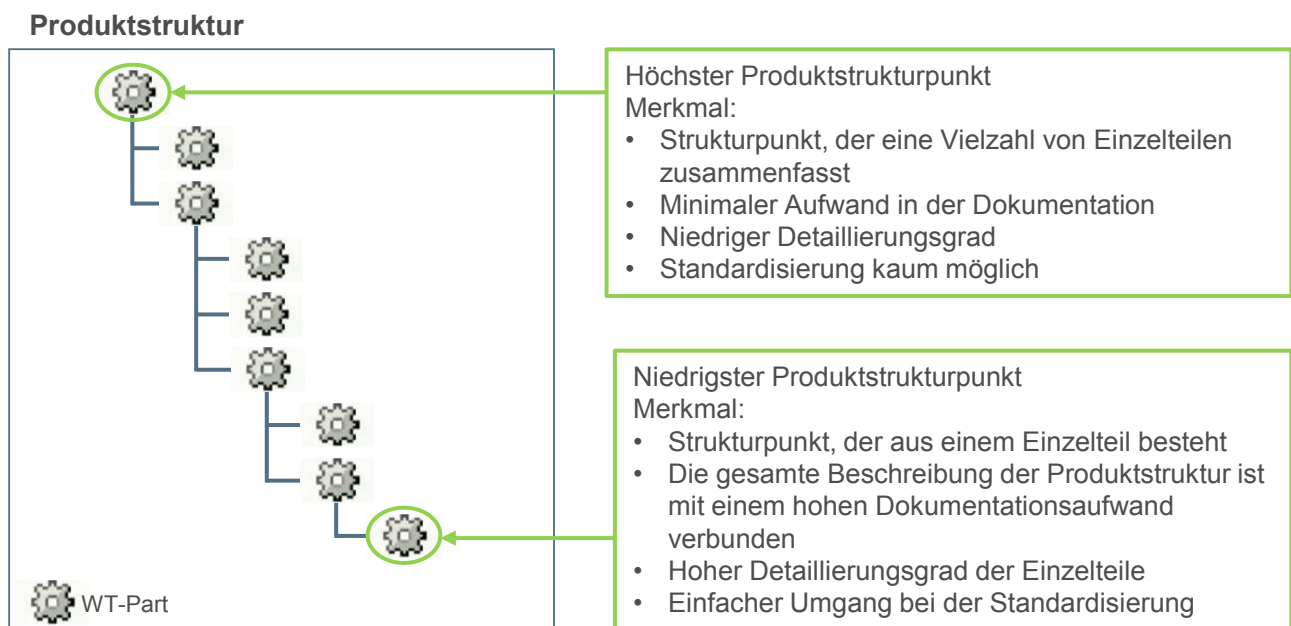


Bild 2: Produktstruktur mit charakteristischen Produktstrukturpunkten

Bei detaillierter Betrachtung von niedrigen Produktstrukturpunkten ziehen diese eine hohe Komplexität in der Produktdefinition nach sich. Zur Analyse dieses Aspektes werden Einzelteile als letzte, nicht mehr demontierbare physische Elemente eines Produktes definiert. Sie stellen die niedrigsten Produktstrukturpunkte dar. Bei der Entwicklung von Produkten reicht diese Definition jedoch nicht aus, da bestimmte Einzelteilkategorien aus mehreren Unterebenen zusammengesetzt sein können. Aus diesem Grund sind weitere Ebenen für eine vollständige Produktbeschreibung notwendig (Bild 3). Diese Ebenen lassen sich aus dem Lebenszyklus des Einzelteils ableiten. Die unterste Ebene ist dabei der Werkstoff selbst, aus dem das zukünftige Einzelteil bestehen soll. Vom Werkstoff ausgehend wird mit zunehmender Fertigungsreife über das Halbzeug, Halbfabrikat, Fabrikat und Rohteil der Weg zum Einzelteil beschrieben.

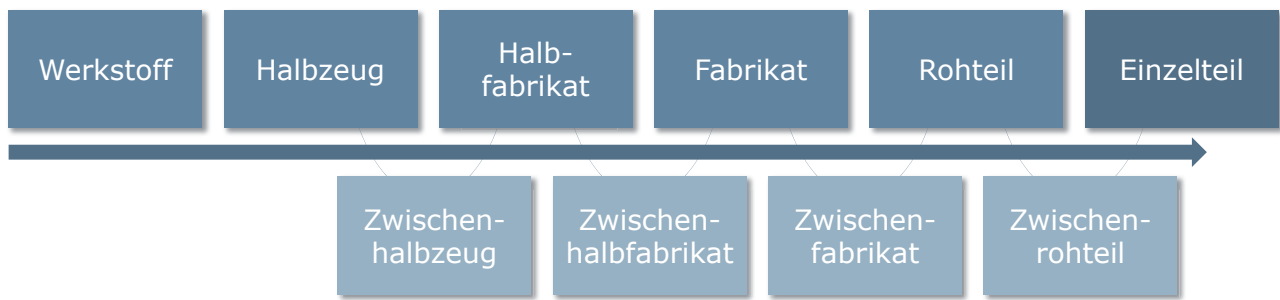


Bild 3: Einzelteildefinition - der Weg vom Werkstoff zum Einzelteil

Ein Beispiel für die Notwendigkeit dieser Definition ist eine Schweißbaugruppe, die aus Halbfabrikaten besteht. Laut Definition ist die Schweißbaugruppe ein Einzelteil, welches physisch vorliegt und verbaut wird. Um diese Schweißbaugruppe herzustellen, werden Informationen zu den Halbfabrikaten benötigt. Dem oben genannten Ansatz folgend, müssen Konstruktionszeichnungen auf den Ebenen unterhalb des Einzelteils vorhanden sein, jedoch ebenso auf der Ebene des Einzelteils, in diesem Beispiel auf Ebene der Schweißbaugruppe. Die Bezugsebene eines Entwicklungsprozesses sollte aus Gründen der Effizienz so hoch wie möglich in der Produktstruktur liegen. Aus Sicht von Produktqualität, Transparenz und Standardisierung ist eine niedrige Ebene anzustreben. Ein Konzept für das optimale Maß zwischen einem hohen Detaillierungsgrad der Dokumentation und einem minimalen Arbeitsaufwand wird nachfolgend vorgestellt.

4 Generischer Ansatz zum produktzentrischen Vorgehen

Die Bezugsebene für die Anwendung eines Entwicklungsprozesses wird im Folgenden als Konstruktionseinheit (KEi) definiert. Eine KEi ist eine virtuelle, organisatorische Einheit. Sie wird aus der Summe aller Einzelteile gebildet, die mindestens eine gemeinsame Funktion erfüllen und prozessual, dokumentarisch und planerisch als Gesamtheit betrachtet werden können. Merkmal einer KEi ist die Eindeutigkeit der Zuordnung von Prozessen, Dokumenten und Verantwortlichkeiten. Da Prozesse durch festgelegte Outputs definiert sind, resultiert daraus ein eindeutiger Daten- und Dokumentensatz für jede KEi (Bild 4), der u. a. aus Produktspezifikationen, Konstruktionszeichnungen, Technische Spezifikationen, Nachweisen oder Realisierungsberichten besteht. Die KEi ist nicht nur aus dokumentarischer Sicht, sondern auch aus organisatorischer Sicht notwendig, um eindeutige Zuordnungen von Produktverantwortlichkeiten zu regeln.

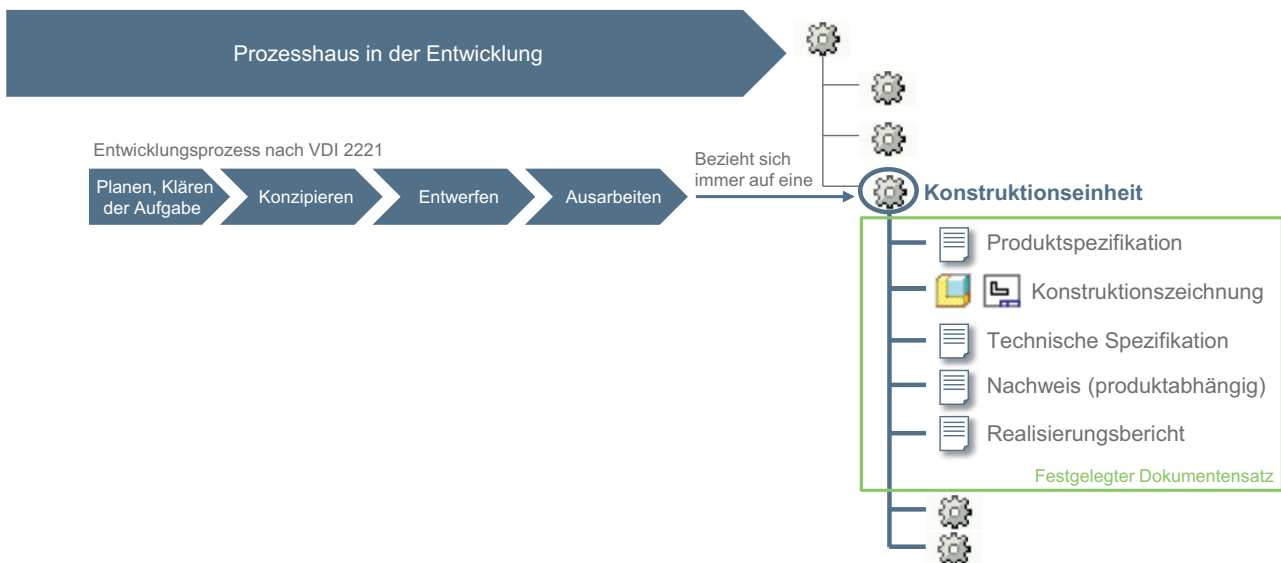


Bild 4: Zusammenhang zwischen einer Konstruktionseinheit, Prozessen und Dokumenten

Am Beispiel eines verstellbaren Halters (Bild 5) wird die KEi näher erläutert. Die Funktion des Halters ist, es einen Sensor zu tragen. Der Halter besitzt zwei Schnittstellen und besteht aus zwei gebogenen Blechen sowie dem Verbindungsmittelsatz Schraube, Scheibe und Mutter. Blech eins besitzt zwei Bohrungen. Blech zwei besteht aus einem Langloch sowie einer Bohrung und ist in der Höhe verstellbar. Die Bleche werden durch den Verbindungsmittelsatz zusammen gehalten.

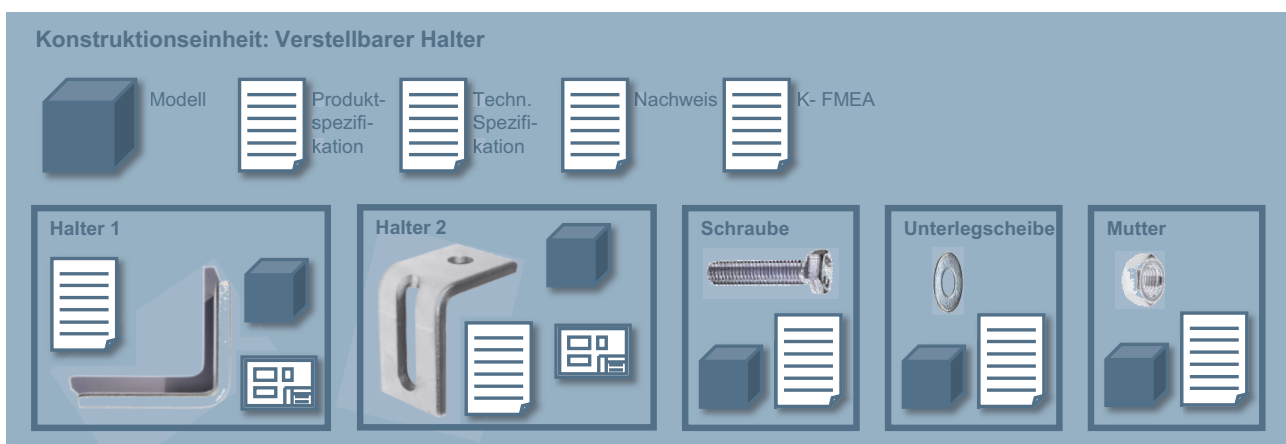


Bild 5: Verstellbarer Halter als Beispiel einer Konstruktionseinheit

Laut Definition ist jede dieser Komponenten ein Einzelteil. Die Summe der fünf Einzelteile bildet die KEi „verstellbarer Halter“. Diese dient wiederum als Bezugsobjekt für den Produktentwicklungsprozess, aus dem ein definierter Dokumentensatz hervorgeht. Da die vollständige Produktdokumentation an der KEi zusammengeführt wird, kann diese folglich

ohne Änderungen an alle Punkte der Produktstruktur angeknüpft werden. Dies ist möglich, da nur Verbindungsmittel innerhalb der KEi ihr selbst zugehörig sind. Verbindungsmittel an den äußeren Schnittstellen gehören zum übergeordneten Produktstrukturknoten und werden dort über einen Verwendungsnachweis dokumentiert. Bei der Entwicklung der KEi selbst ist demnach nicht nur die eigentliche KEi im Verantwortungsbereich, sondern auch die übergeordnete Verwendung. Dies wird deutlich bei der Verwendung von KEi als Standardelemente, deren zukünftige Verwendung und Schnittstellen bei der Entwicklung noch nicht bekannt sind.

Als Bindeglied zwischen der Prozess-, Produkt- und Organisationsstruktur hat die KEi eine wichtige Funktion bei der Implementierung von Produktentwicklungsprozessen. Weiterhin fungiert sie als optimale Ebene für die Anwendung des Prozesses und geht mit einem ausreichenden Detaillierungsgrad in der Dokumentation sowie einem angemessenen Arbeitsaufwand einher. Die Qualität des Produktes ist durch den Einsatz von festgelegten Dokumentensätzen gesichert und kann durch Definitionserweiterungen gesteigert werden. Weiterhin entspricht die KEi einem Standardisierungsansatz, welcher die Effizienz der Entwicklung erhöht, Kosten senkt und den Marktanforderungen nach kürzeren Entwicklungszeiten genügt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Lösungsansatz zur Verknüpfung von Entwicklungsprozessen mit komplexen Produktstrukturen vorgestellt. Ausgangspunkt neben der Implementierungsfrage war die Umstellung von einem dokumentenzentrischen zu einem produktzentrischen System. Diese Herausforderungen konnte Nordex durch die Einführung von KEi und darauf zugeschnittene Entwicklungsprozesse bewältigen. Nach ausgiebigen Testphasen wird eine höhere Effizienz in der Entwicklung, steigende Produktqualität sowie mehr Transparenz innerhalb des Unternehmens erwartet. Erste Projekte wurden erfolgreich durchgeführt und bestätigen diese Annahmen. Zusammenfassend soll sich der KEi-Ansatz zur erfolgreichen Implementierung von Entwicklungsprozessen etablieren und zur Bewältigung von unterschiedlichen dynamischen Markteinflüssen beitragen.

Aus der engen Kopplung zwischen Produktentwicklungsprozess und PDM-System resultieren weitere positive Effekte. Das Prozessverständnis der Anwender wird durch die Verknüpfung von prozessualen Elementen, wie Meilensteinen oder Rollenzuordnungen,

mit dem PDM-System geschärft. Systemgestützte Workflows für Produktdaten- oder Dokumentenprüfungen sind jederzeit verfügbar, nachvollziehbar und bieten die Möglichkeit, Qualitätsmängel aufzuzeigen und Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. So tragen die vom System bereitgestellten und gelenkten Templates zur Arbeitserleichterung sowie zu einheitlicher Dokumentenqualität bei.

Zusammenfassend kann ein PDM-System bei der Implementierung von Entwicklungsprozessen unterstützen und zu höherer Akzeptanz der Anwender führen. Jedoch stellt das PDM-System selbst keine Lösung dar, sondern nur in Kombination mit einem ausgereiften und eindeutigen Entwicklungsprozess. Daher muss auf Seiten des Prozesses die Frage nach der richtigen Implementierungsebene in der Produktstruktur genau betrachtet werden. Zur Beantwortung dieser Frage hat Nordex den KEi-Ansatz entwickelt.

Literatur

- [1] Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-29569-0
- [2] Vajna, Sándor; Weber, Christian; Bley, Helmut; Zeman, Klaus: *CAX für Ingenieure*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-36038-4
- [3] Kurbel, Karl: *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie*. 8. Aufl. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2016. – ISBN 978-3-11-044168-0
- [4] Feldhusen, Jörg: *Produktarchitektur/Produktstruktur*. Available: http://ikt.rwth-aachen.de/Download/KL2/V02_-_Produktstruktur_Produktarchitektur.pdf [26.07.2016]
- [5] Richtlinie VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. 05-1993.
- [6] Parametric Technology GmbH: *Produkt- und Prozesssteuerung* Available: <http://www.ptc.de.com/produkt-lebenszyklus-management/windchill/pdmlink> [27.07.2016]
- [7] Wehlitz, Pamela Andrea: *Dissertation Nutzenorientierte Einführung eines Produktdatenmanagement-Systems*. München: Herbert Utz Verlag, 2001. – ISBN 3-89675-876-4
- [8] Drewinski, Roland: *PDM / PLM – Marktübersicht* Available: <https://www.contact-software.com/de/pdm-plm-wissen/pdm-plm-im-ueberblick/pdm-plm-marktuebersicht.html> [27.07.2016]

Integration von Versuchsergebnissen in C&C²-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems

Albert Albers, Bartosz Gladysz, Jonas Kniel, Michael Aschoff, Armin Meyer

KIT – Karlsruher Institut für Technologie

IPEK - Institut für Produktentwicklung

Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Email: sekretariat@kit.edu; Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

Inhalt Der C&C²-Ansatz (Contact-and-Channel-Approach) unterstützt die Analyse und Synthese technischer Systeme in der Produktentwicklung durch die integrierte Betrachtung von Funktions- und Gestalt-Aspekten. Um den Wissenstransfer von Versuchsergebnissen zwischen Produktentwicklern in der Produktgenerationsentwicklung zu unterstützen, wird ein Vorgehen zur Integration solcher Ergebnisse in C&C²-Modellen vorgestellt. Die exemplarische Anwendung des Vorgehens erfolgt anhand eines trockenlaufenden Kupplungssystems mit dem Ziel der Leistungsoptimierung der nachfolgenden Produktgenerationen.

Abstract: The Contact-and-Channel-Approach (C&C²-Approach) supports the analysis and synthesis in product design of technical systems through the integration of functional as well as embodiment design aspects. In order to support the knowledge transfer between product engineers across different product generations, the authors introduce a new approach for integration of test results into C&C²-models. The approach is exemplified based on a dry clutch system with the aim to optimize the system performance of upcoming product generations.

Stichwörter: Contact-and-Channel-Ansatz, C&C²-A, Wiederverwendung von Modellen, modellbasierte Visualisierung von Versuchsergebnissen, PGE, Produktgenerationsentwicklung

Keywords: Contact-and-Channel-Approach, C&C²-A, Model reuse, model-based visualization of test results, PGE, Product Generation Engineering

1 Einleitung

Der initiale Modellierungsaufwand bei modellbasierten Analyse- und Synthese-Methoden, die im Gegensatz zu rein funktionsbasierten Modellen sowohl Funktions- und als auch Gestalt-Aspekte von technischen Systemen integrieren, ist in der Regel höher, da zusätzliche Informationen im jeweiligen Modell abgebildet werden müssen. Um dies zu

rechtfertigen, müssen diese Modelle und zugehörige Modellierungsmethoden für die mehrfache Wiederverwendung optimiert bzw. weiterentwickelt werden. Die Wiederverwendung von bestehendem Wissen aus Vorgänger-Produktgenerationen zur Entwicklung von nachfolgenden Generationen auf Basis von Referenzsystemmodellen und –technologien [1], ist ein Kernaspekt der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers [2]. Die Zielsetzung dieses Beitrags ist die Weiterentwicklung des „Contact-and-Channel-Approach“ (C&C²-Ansatz) [3] im Kontext der PGE, um eine Wiederverwendung von C&C²-Modellen über Produktgenerationen hinweg zu unterstützen. Hierzu werden Versuchsergebnisse in das bestehende Modell eines trockenlaufenden Kupplungssystems integriert. Auf diese Weise wird eine explizierte Wissensbasis für die Weiterentwicklung des Systems geschaffen.

2 Stand der Forschung, Forschungsbedarf und Zielsetzung

Albers und Matthiesen [4] legen dar, dass eine Komponente allein keine Funktion erfüllen kann, sondern Funktionen das Resultat von Interaktionen zwischen Komponenten und Systemen sind. Daraus wird deutlich, dass „der Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion eines technischen Systems [...] der Schlüssel für deren Verständnis und Beschreibung“ [3] ist. Hierdurch resultiert die Notwendigkeit für ein Modell, das Gestaltaspekte mit Funktionen verbindet. An dieser Stelle setzt der C&C²-Ansatz [4] an. Systeme werden hierbei in ihre Teilfunktionen zerlegt und in C&C²-Modellen abgebildet. Dieser fraktale Charakter [3] des C&C²-Ansatzes ermöglicht ein gezieltes „Hineinzoomen“ in das Modell – also eine stufenlose Variation des Abstraktionsgrades eines C&C²-Modells. In Abhängigkeit des Betriebszustands technischer Systeme umfassen die zugehörigen Modelle nur bestimmte Schnittstellen und physische Strukturen, die aktiv an der Funktionserfüllung beteiligt sind. Diese bilden das sog. **Wirk-Netz** (WN), welches Energie-, Material- und Informationsflüsse unter Verwendung der folgenden C&C²-Grundbausteine [3] beschreibt:

Wirkflächenpaare (WFP) werden gebildet aus zwei Wirkflächen, die in Wirkkontakt (WK) stehen, d.h. in denen Energie, Stoff und/oder Informationen zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt übertragen werden. Wirkflächen sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Wirkkontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen.

Leitstützstrukturen (LSS) sind gestaltungsrelevante Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder feld durchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und eine Leitung von Stoff, Energie oder Information zwischen den Wirkflächenpaaren eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen. Eine Leitstützstruktur kann sich abhängig vom Detaillierungsgrad der Modellbildung über Systeme oder Subsysteme hinweg erstrecken. Leitstützstrukturen existieren gemeinsam mit den zugehörigen Wirkflächenpaaren ausschließlich im Zeitraum der Funktionserfüllung.

Connectoren (C) integrieren die wirkungsrelevanten Eigenschaften, die außerhalb des Betrachtungsbereichs liegen, in die Systembetrachtung. Connectoren sind eine für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante Abstraktion der Systemumgebung. Sie haben eine repräsentative Wirkfläche und ein damit verknüpftes Modell der relevanten Systemumgebung. Sie liegen nicht im betrachteten System und somit nicht im Gestaltungsraum.

In Bild 1 wird der fraktale Charakter des C&C²-A am Beispiel eines Kugellagers verdeutlicht. Hierbei wird die Hauptfunktion 1 in die zugehörigen Teilfunktionen 1.1 bis 1.3 aufgeteilt. Das Beispiel zeigt exemplarisch die Modellierung eines Wirk-Netzes auf zwei Detaillierungsebenen mittels C&C²-A. Die Gesamtheit aller möglichen Wirk-Netze innerhalb der Systemgrenzen des Gestaltungsraums wird als **Wirk-Struktur** (WS) bezeichnet.

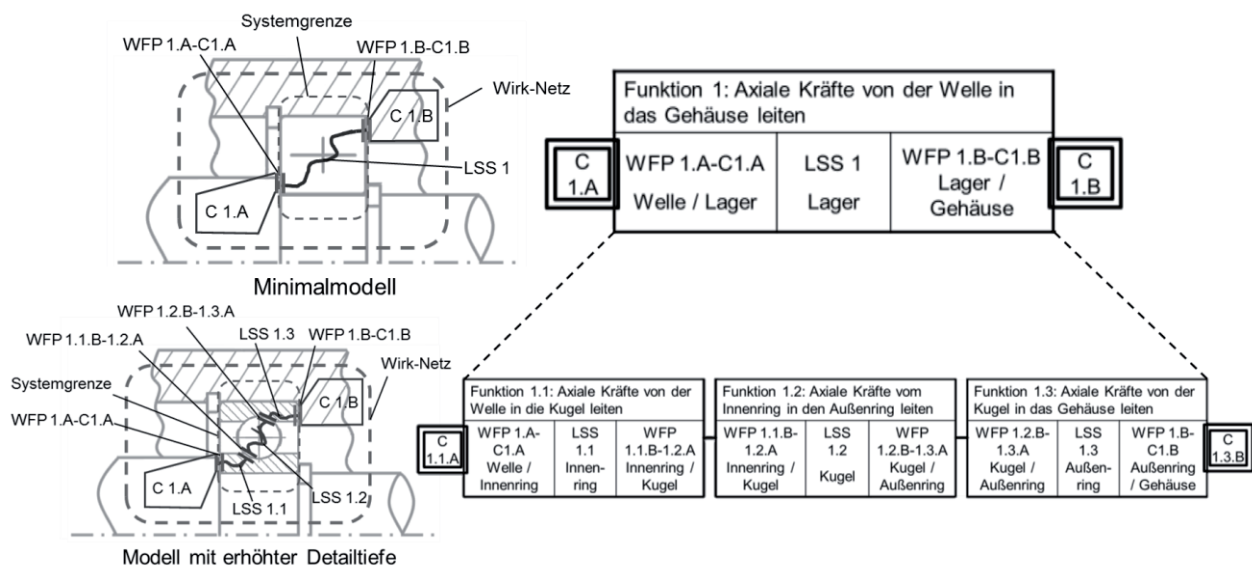


Bild 1: Fraktaler Charakter des C&C²-Ansatzes am Beispiel eines Kugellagers [6]

Auf der linken Seite in Bild 1 ist die Projektion der Funktion auf die Gestalt unter Zuhilfenahme der definierten C&C²-Grundbausteine dargestellt. Rechts daneben ist die Funktionsbeschreibung [7] abgebildet, die der weiteren Spezifikation der Funktion dient. Hierzu werden den C&C²-Grundelementen Eigenschaften zugewiesen, die eine Auswirkung auf die Funktionserfüllung haben. So kann beispielsweise dem Modellelement LSS1 aus Bild 1 die Eigenschaft „Steifigkeit“ zugewiesen werden, die durch die Steifigkeitskennzahl des Lagers weiter spezifiziert wird.

Ausgehend vom Stand der Forschung können durch Simulationen oder experimentelle Versuche ermittelte Wirkkontakte nicht direkt in C&C²-Modellen abgebildet werden. Stattdessen wird das betreffende Wirkflächenpaar fraktal in Teil-Wirkflächenpaare zerlegt bis die Wirkflächen den Wirkkontakten entsprechen. Das Resultat sind sehr feingranulare Modelle mit eng gezogenen Systemgrenzen, die einen effizienten Wissenstransfer erschweren. Eine Abstraktion der so bestimmten Wirkkontakte auf übergeordnete Modellebenen ist nach dem Stand der Forschung nicht möglich. Im Allgemeinen erlauben Modellabstraktionen jedoch dem Produktentwickler eine Vereinfachung und Fokussierung der Entwicklungsaufgabe [5]. Modellabstraktionen unterstützen so einen effizienteren Wissenstransfer zwischen Produktentwicklern über Produktgenerationen hinweg. Zusammenfassend resultiert ein Bedarf nach einem Vorgehen zur Visualisierung von Wirkkontakten auf abstrakteren Modellierungsebenen mittels C&C²-A, um dadurch einen effizienteren Wissenstransfer zu unterstützen. Aufbauend auf dem identifizierten Bedarf wird in diesem Beitrag ein entsprechendes Vorgehen vorgestellt und exemplarisch am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems verdeutlicht.

3 Forschungsmethodik

Als Ausgangsmodell für Entwicklung und Untersuchung des Vorgehens diente ein C&C²-Modell eines trockenlaufenden Kupplungssystems. Aufgrund der großen Anzahl an Modellelementen und zugehörigen Eigenschaften des resultierenden Modells wurde zunächst die Funktionsbeschreibung als fester Bestandteil eines C&C²-Modells erweitert. Das C&C²-Modell der Kupplung wurde anschließend in einem Entwicklungsprojekt mit dem Ziel einer Leistungsoptimierung der nachfolgenden Kupplungsgeneration wiederverwendet (Kap. 5). Hierbei wurden aufbauend auf dem Modell systematisch Optimierungspotentiale identifiziert, analysiert und ausgewählt. Anschließend wurde zwecks Versuchsdurchführung ein physisches Kupplungsmodell aufgebaut und die

resultierenden Versuchsergebnisse zur Unterstützung des Wissenstransfers innerhalb des Entwicklungsteams in die Modelle übertragen.

4 Weiterentwicklung des C&C²-Ansatzes

In diesem Kapitel wird zunächst die überarbeitete Funktionsbeschreibung und anschließend das Vorgehen zur Integration von Versuchsergebnissen in C&C²-Modelle vorgestellt.

Um die Lesbarkeit und Nachverfolgbarkeit von Informations-, Stoff- und Energieflüssen in C&C²-Modellen komplexer technischer Systeme zu verbessern, wurde die Funktionsbeschreibung als Bestandteil des C&C²-Modells erweitert und formalisiert (Bild 2). Hierbei wurden zusätzlich zu der Information „Name und Beschreibung des Grundelementes“, die im Stand der Forschung [7] definiert ist, drei weitere Zeilen hinzugefügt: „Wirkung des Grundelementes“, „übertragene Größe“ und „wirkungsrelevante Eigenschaften“.

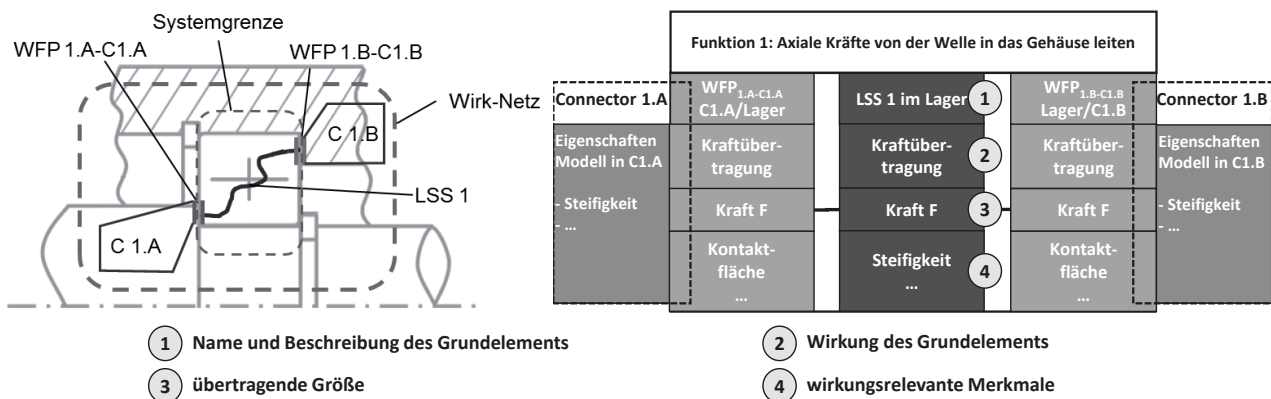


Bild 2: Weiterentwickeltes C&C²-Modell

Zur Visualisierung von detaillierten Versuchsergebnissen auf übergeordneten Modellebenen wurde eine Weiterentwicklung des WFP-Modellelements vorgenommen. Aufbauend auf Bild 3 wird zu Beginn der Systemanalyse ein vereinfachtes WFP angenommen, das noch keine Informationen über die Wirkkontakte innerhalb eines WFP umfasst. Im Rahmen einer Versuchsdurchführung werden die tatsächlichen Wirkkontakte und folglich die effektiven Wirkkontaktflächen ermittelt. Diese werden anschließend in das präzierte Modell der ersten Produktgeneration (Gen.1) übernommen und spiegeln somit die Ausgangssituation vor der Optimierung wieder. Durch eine entsprechend präzise Projektion des Wirkflächenpaares sowie der integrierten Wirkkontakte auf die Gestalt

(bspw. auf Basis eines detaillierten CAD-Modells) sind dadurch sowohl die Position, die Lage als auch die effektive Wirkkontaktfläche und die Verteilung der Wirkkontakte direkt aus dem Modell ablesbar. Auf Basis dieses Modells kann der Produktentwickler die enthaltenen Informationen (wie z.B. Position, Fläche und Verteilung der Wirkkontakte) zur Optimierung der nachfolgenden Produktgeneration (Gen.2) nutzen.

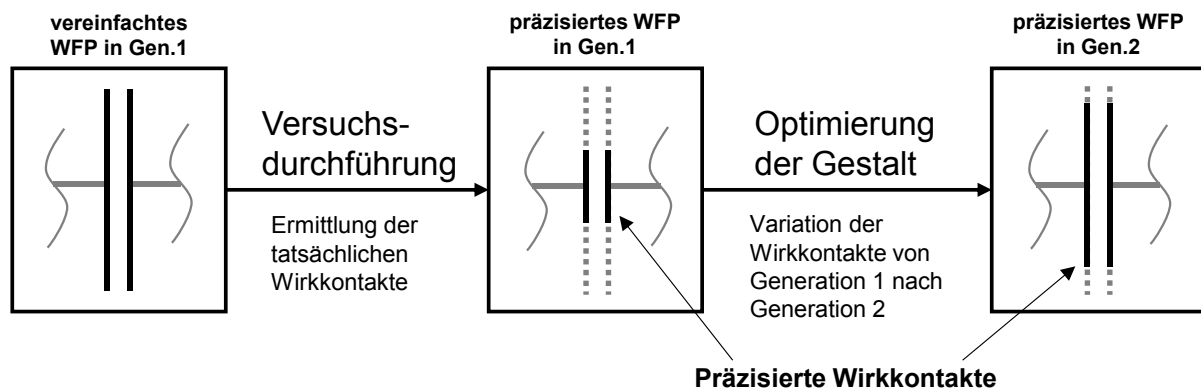


Bild 3: Erweiterung der Wirkkontaktfläche

5 Anwendungsfall – Entwicklung der nächsten Produktgeneration

Das Vorgehen wird am Beispiel der Produktgenerationsentwicklung einer trockenlaufenden Kupplung vorgestellt. Entwicklungsziel ist die Steigerung der Drehmomentkapazität der Nachfolge-Generation, da von einer Steigerung des Motormomentes der nächsten Fahrzeuggeneration auszugehen ist. Hierfür wurde ein C&C²-Modell samt aller zugehörigen Funktionen der Vorgänger-Generation der trockenlaufenden Kupplung nachgebildet, das in Bild 4 vereinfacht dargestellt ist. Dieses ist auf oberster Modellebene in die drei Hauptsystemzustände der Kupplung unterteilt: „offen“, „geschlossen“ und „synchronisierend“. Ausgehend vom Entwicklungsziel, der Steigerung des übertragbaren Drehmoments, sind die Zustände „geschlossen“ und „synchronisierend“ zu betrachten. Das übertragbare Drehmoment kann mit der Gleichung

$$M = n * \mu * r_m * F_N \quad (1)$$

berechnet werden. Dabei beschreibt n die Anzahl der Reibflächen, μ die Reibungszahl der Paarung, r_m den berechneten mittleren Reibradius und F_N die Anpresskraft, mit der die Reibflächen gegeneinandergespreßt werden. Betrachtet werden soll im Folgenden der Zustand „synchronisierend“, da davon ausgegangen wird, dass die Haftreibungszahl μ_{Haft}

größer ist als die Gleitreibungszahl μ_{Gleit} und somit „synchronisierend“ der kritischere Zustand ist. Die weiter zu entwickelnde Kupplung soll in denselben Bauraum integrierbar sein wie ihre Vorgängergeneration.

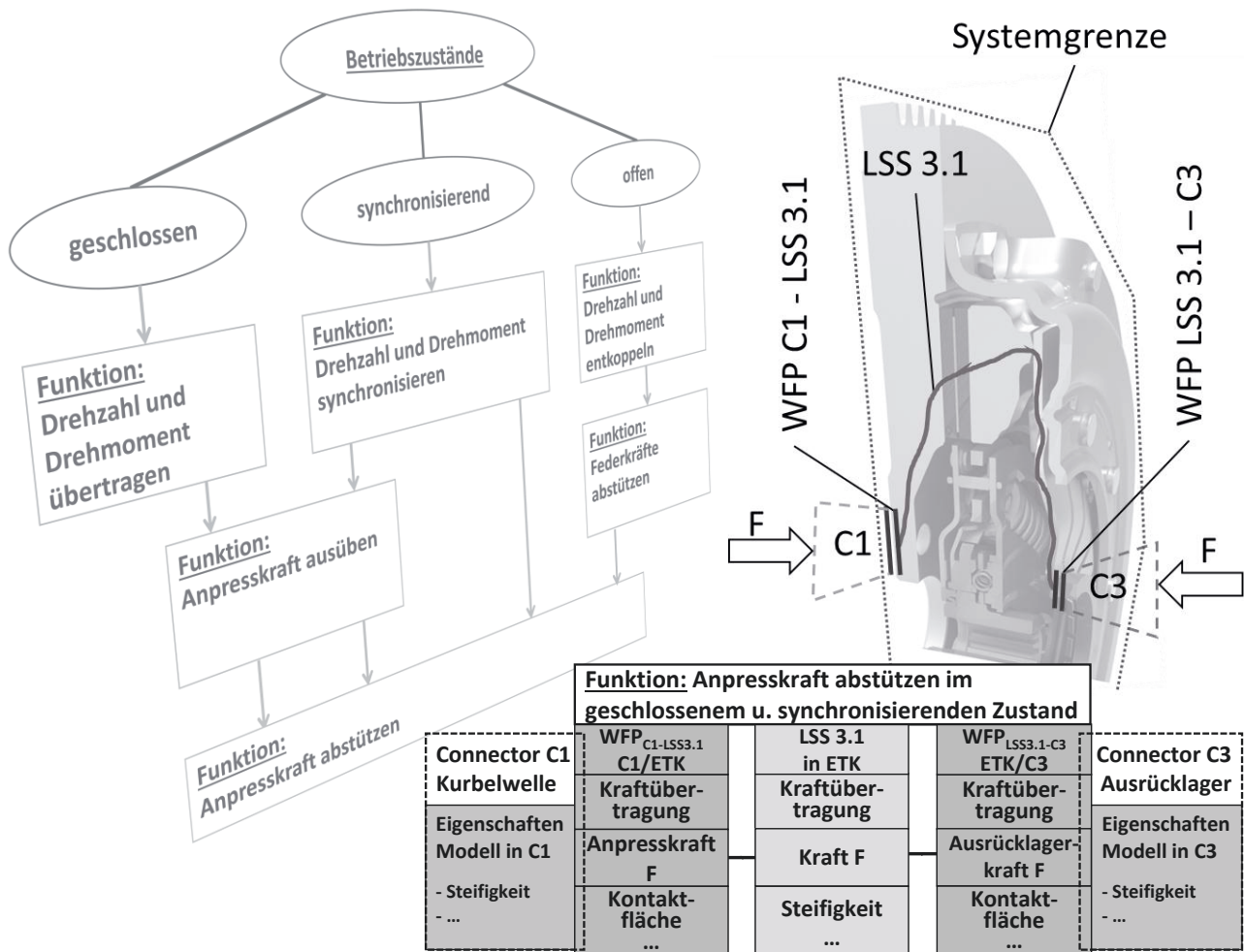


Bild 4: C&C²-Modell einer Einscheibentrockenkupplung (ETK) mit drei Hauptsystemzuständen

Eine Erhöhung der Reibflächenanzahl n bzw. des mittleren Reibradius r_m wird somit ausgeschlossen. Der in (1) vorliegende Zusammenhang zeigt die verbleibenden Möglichkeiten zur Drehmomentsteigerung. Diese sind Erhöhung der Anpresskraft F_N , oder der Gleitreibungszahl μ_{Gleit} . Zuerst soll auf die Erhöhung der Anpresskraft F_N fokussiert werden. Das für die Analyse notwendige C&C²-Modell wird aus dem vorgestellten Modell entnommen (Bild 4). Die Systemgrenze des C&C²-Modells um das Kupplungssystem muss nicht verändert werden. Durch die Erhöhung der Anpresskraft wird das Ziel der Drehmomentsteigerung erreicht. Jedoch kommt es bei Abnahmeprüfungen, bei welchen wiederholte Anfahrten am Berg mit vollbeladenem Fahrzeug durchgeführt werden, zu

Funktionsausfällen des Kupplungssystems. Dies kann durch die erhöhte Reibarbeit und -leistung in Folge der Steigerung des Motormoments erklärt werden. Die Funktionsflächen müssen also einen größeren Energieeintrag aufnehmen. Dies führt zur Erhöhung der Temperatur der Funktionsflächen und dadurch letztlich zum Funktionsausfall des Systems durch ein Abfallen der Gleitreibungszahl, bedingt durch die hohen Temperaturen im Wirkkontakt. Auch die zweite Möglichkeit nach (1), die Erhöhung der Gleitreibungszahl μ_{Gleit} , führt zur erhöhten Reibarbeit und -leistung und letztlich zum Funktionsausfall. Um den Funktionsausfall im Detail zu untersuchen, wird im nächsten Schritt die Systemgrenze um das für die Funktionserfüllung relevante Wirkflächenpaar gezogen, siehe Bild 5.

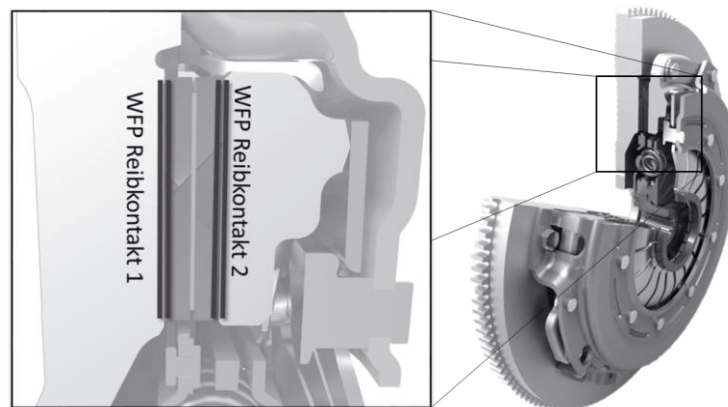


Bild 5: Wirkflächenpaare im Reibkontakt

Innerhalb dieser Wirkflächenpaare soll nun die Ursache für den Funktionsausfall analysiert und somit Optimierungspotentiale identifiziert werden. Zur Analyse der Wirkkontakte innerhalb des Wirkflächenpaares wurde eine auf einen Reibkontakt reduzierte Prüfkupplung aufgebaut und experimentell untersucht. Dabei wurde die Temperatur an über 50 Messstellen, die radial in der Druckplatte verteilt sind, mittels faseroptischer Sensorik erfasst [8]. Da die Temperaturerhöhung das Ergebnis eines Reibprozesses ist, dient die Temperaturverteilung hierbei als Indikator für den tatsächlichen Wirkkontakt und die resultierende Wirkkontaktfläche.

In Bild 6 ist die Visualisierung der Analyseergebnisse auf einer abstrakteren Modellebene verdeutlicht. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Temperaturverteilung während eines Synchronisierungsvorganges. Deutlich zu sehen ist, dass die tatsächlichen Wirkkontakte nur einen sehr geringen Bereich des angenommenen WFPs einnehmen. Im Bereich des äußeren Durchmessers der Druckplatte scheint nahezu keine Reibung aufzutreten, wie an

der gleichbleibenden Temperatur festgestellt werden kann. Dies zeigt das Optimierungspotential dieses WFPs auf. Würde die zur Verfügung stehende Fläche des WFPs besser ausgenutzt, könnte die eingetragene Energie besser verteilt werden und somit die gemessene Temperaturverteilung homogener ausfallen. Durch Änderung der Steifigkeitseigenschaften der Leitstützstruktur, die durch eine Änderung der Anbindung der Anpressplatte an die Umgebungsstruktur erreicht wurde, kann eine Erweiterung der Wirkkontaktfläche realisiert werden [8]. Das technische Ergebnis des Anwendungsfalles ist die Weiterentwicklung des Kupplungssystems (Gen.2) mit erfolgreicher Steigerung der Drehmomentkapazität, deren WFP eine homogenere Temperaturverteilung und entsprechend eine größere effektive Wirkkontaktfläche aufweist (Bild 6).

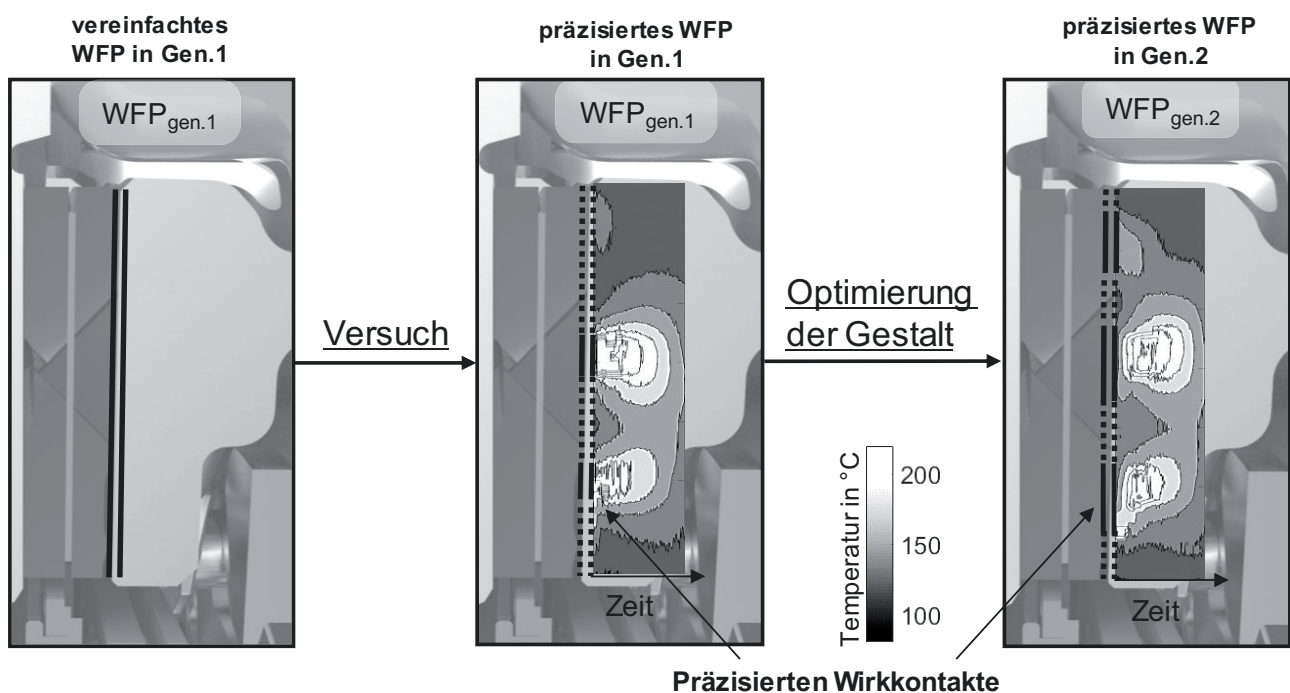


Bild 6: Visualisierung der WFP-Optimierung durch eine Integration von Versuchsergebnissen

6 Diskussion und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Vorgehen auf Basis des C&C²-Ansatzes vorgestellt, das die Integration von Versuchsergebnissen in ein Funktions- und Gestaltbasiertes Modell des betreffenden technischen Systems ermöglicht. Durch die Integration von Versuchsergebnissen in die resultierenden C&C²-Modelle am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems konnte eine Informationsbasis für nachfolgende Produktgenerationen geschaffen werden, die die Leistungsoptimierung des Systems unterstützt. Anhand dieses Anwendungsfalles konnte gezeigt werden, dass C&C²-Modelle

durch Anreicherung um Informationen aus experimentellen Versuchen für die Optimierung bzw. Weiterentwicklung von technischen Systemen genutzt werden können. Der Anwendungsfall zeigt auch ein Effizienzsteigerungspotential beim Wissenstransfer zwischen Produktentwicklern durch eine auf die wesentlichen Informationen reduzierte Visualisierung von Versuchsergebnissen in C&C²-Modelle. Durch die Verbindung von Versuchsergebnisse mit den Funktions- und Gestaltinformationen in einem Modell kann die Ausarbeitung von konstruktiven Maßnahmen auf Basis dieses einen Modells erfolgen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass dadurch der Zusammenhang zwischen Versuchsergebnissen und den Eigenschaften des technischen Systems eingängiger vermittelt wird. Die resultierende Effizienzsteigerung als auch die Grenzen dieser Modellabstraktion werden in folgenden Beiträgen im Detail untersucht werden. Die Übertragbarkeit des vorgestellten Vorgehens auf die Optimierung von Produktionssystemen wird im Rahmen eines BMBF-Projekts (IQ4.0 - Einführung intelligenter Qualitätsregelungs-systeme durch vernetzte Wertschöpfung) untersucht. Hierbei unterstützt die modellbasierte Integration von Versuchsergebnissen bei der Identifikation und Analyse potentieller Regelungsgrößen am Beispiel von drei unterschiedlichen Fertigungsprozessen.

7 Literatur

- [1] Albers, A., Matthiesen, S., Bursac, N., Moeser, G., Schmidt, S., Lüdcke, R.: *Abstraktionsgrade der Systemmodellierung: von der Sprache zur Anwendung*. In: Tag des Systems Engineering. Hrsg. Von M. Maurer, S. O. Schulze. Bremen: Carl Hanser Verlag, 2014, S. 183–192.
- [2] Albers A., Bursac N., Wintergerst E.: *Product Generation Development–Importance and Challenges from a Design Research Perspective*. New Developments in Mechanics and Mechanical Engineering. 2015; 16-21.
- [3] Albers A., Wintergerst E.: The Contact and Channel Approach (C&C²-A): *relating a system's physical structure to its functionality*. In: An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations (Blessing, L.T.M., Chakrabarti, A.). Springer, 2014
- [4] Albers A., Matthiesen S. (2002): Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und Synthese technischer Systeme. Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung; Band 54; Heft 7/8-2002. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [5] Eckert C., Alink T., Albers A.: Issue driven analysis of an existing product at different levels of abstraction. Proceedings of the DESIGN 2010, Dubrovnik

- [6] Wintergerst, E.: Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung. IPEK-Forschungsbericht, Band 86. 2015
- [7] Albers, A., Alink, T., & Deigendesch, T.: Support of design engineering activity – The Contact and Channel Model (C&CM) in the context of problem solving and the role of modeling. Proceedings of the International Design Conference 2008. Dubrovnik, Croatia.
- [8] Albers, Albert; Ott, Sascha; Lorentz, Benoit; Kniel, Jonas; Eisele Martin.: *A new approach for higher first gear ratios by increasing the clutch performance using fiber sensing technology*. VDI-Berichte 2276, 2016, S.469-484

Konzeption und Versuch an hydraulischen Spannbuchsen für Anwendungsbereiche unter geringer Last

Franziska Bendig, Enrico Kloß, Klaus Brökel

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD

Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Email: franziska.bendig@uni-rostock.de; Internet: <http://www.kt.uni-rostock.de>

Inhalt: Für Anwendungen im Bereich der Zahnriementchnik soll ein Element zur Verbindung von Welle und Nabe entwickelt werden. Dabei liegt der Fokus auf lösbaren Spannelementen zur reibschlüssigen Verbindung, die das hydraulische Wirkprinzip nutzen. Der hier vorliegende Beitrag gibt, ausgehend von den mechanischen Grundlagen zur reibschlüssigen Kraftübertragung, einen Überblick der bisherigen Ansätze zur Entwicklung einer innovativen Hohlmantelspannbuchse. Die Variationsmöglichkeiten werden vorgestellt und die Resultate erster Versuche mit veränderten Wirkgeometrien präsentiert.

Abstract: For application at belt technologies, an element for connection of shaft and hub is to be developed. The focus is on a releasable tension element, using the principle of hydraulic generated friction-contact. The present paper will give an overview of advances on developing new kinds of innovative joints, starting from the mechanical fundamentals. Several possibilities for variation and the results of previous test are shown.

Stichwörter: reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindung, hydraulische Spannbuchse

Keywords: friction-locked shaft-hub-connection, hydraulic clamping bush

1 Einführung - Wirksame Konzepte zur Erzeugung des Reibschlusses

Reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen werden derzeit in den meisten Fällen mechanisch umgesetzt. Dabei wird der Kontakt der Fügeflächen mit Hilfe des Prinzips gegeneinander verschobener schiefer Ebenen hergestellt. Das Spannelement besteht aus mehreren konischen Ringen, die z.B. mittels axialer Schrauben so zusammengeschoben werden, dass es zur Ausdehnung in radialer Richtung kommt. Den geringeren Anteil am Markt bilden Spannelemente, die nach dem hydraulischen Prinzip arbeiten. Es wird dazu ein Arbeitsvolumen, eingeschlossen in einem elastischen Buchsen-Hohlkörper, mit einem geeigneten Druckübertragungsmedium gefüllt, auf welches ein definierter Druck aufgebracht wird. Dieser breitet sich, nach dem Pascal'schen Gesetz [1] gleichmäßig in alle Richtungen aus. Unter der Einwirkung dieses Innendrucks neigt das Arbeitsvolumen

zur Ausbreitung, sodass die umschließende Hülse belastet und verformt wird. Voraussetzung dafür ist die Inkompressibilität des Druckmediums sowie die elastische Verformbarkeit der Buchse.

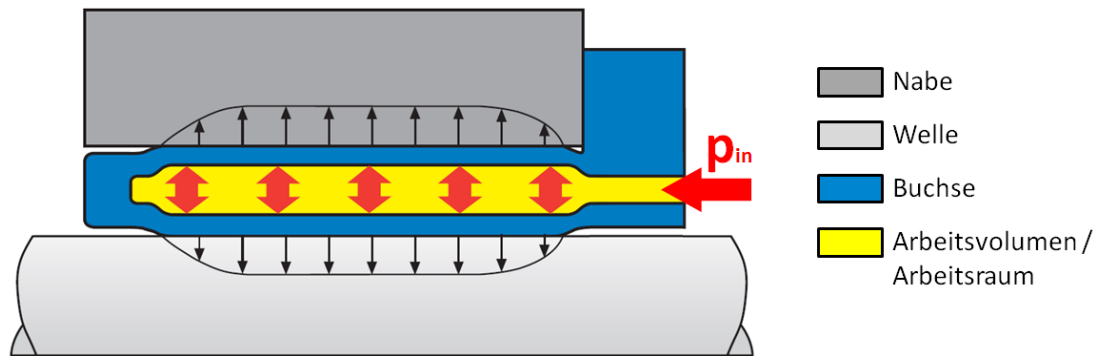


Bild 1: Prinzipskizze ETP®-Spannbuchse, druckbeaufschlagt (nach[2])

Aktuelle Lösungen auf diesem Gebiet bietet vor allem die Firma ETP Transmission AB an. Es handelt sich dabei um rotationssymmetrische Hohlmantelspannbuchsen, gefüllt mit Hydrauliköl. Dies wird in der Regel durch Anziehen einer im Flansch verbauten Schraube mit Druck beaufschlagt, sodass sich die Stahlbuchse zu Welle und Nabe hin ausdehnt (vgl. Bild 1). Die Buchsen des Marktführers sind von sehr hoher Maßhaltigkeit und eignen sich für stark beanspruchte Verbindungen, auch unter stoßartiger und wechselnder Belastung [2]. Masse und Preis der Bauelemente sind daher vergleichsweise hoch. In der Zahnriementechnik sind diese Attribute weniger stark gefragt. Hohlmantelspannbuchsen kommen hier aufgrund ihres guten Rundlaufs und vor allem der hohen Anzahl an möglichen Wechselzyklen bei geringem Aufwand für Montage und Demontage zum Einsatz.

Das Ziel der Entwicklung eines alternativen Spannelements für derartige „low-power“-Anwendungen kann schrittweise über die Analyse der physikalischen und prozesstechnischen Eigenschaften, die Variation und die geeignete Kombination von Prinzipien, Methoden und Werkstoffen erreicht werden. Anhand der nachfolgend dargestellten Gleichung zum übertragbaren Drehmoment M_N (1) [3] können einige Variationsmöglichkeiten zur Umsetzung einer reibschlüssigen Verbindung erkannt werden.

$$M_N = p_w A_w \frac{d}{2} \mu \quad (1)$$

d	-	Durchmesser der rotationssymmetrischen Kontaktfläche
p_w	-	Flächenpressung / Kontaktdruck
A_w	-	Flächeninhalt Kontaktfläche
μ	-	Reibungskoeffizient

Die Flächenpressung resultiert aus dem hydraulisch erzeugten Innendruck, der auf die Hülse wirkt. Es besteht daher eine Abhängigkeit von der Gestalt der Hülse, dem Hülsenwerkstoff und der Qualität der Druckausbreitung im Innenraum. Diese lässt sich über das Druckübertragungsmedium, sowie die Art der Druckerzeugung einstellen. Der Durchmesser der Kontaktfläche wird wesentlich durch die Auslegung der zu verbindenden Teile mitbestimmt. Um den Reibungskoeffizienten geeignet einzustellen, sind sowohl die Materialpaarungen, als auch eine geeignete Oberflächenbehandlung, gegebenenfalls Beschichtung zu betrachten. Einen essentiellen Einfluss auf die Größe der Kontaktfläche haben Gestalt und Verformungsverhalten der Buchse. In dieser Hinsicht sind auch die erforderlichen Passungen und Einbaubedingungen zu berücksichtigen. In Bild 2 werden die verschiedenen Ansätze zur Entwicklung einer Hohlmantelspannbuchse dargestellt. Die nachfolgenden Ausführungen stellen die erzielten Ergebnisse im Bereich A1.3 (indirekten Druckerzeugung), sowie B1.4 zur Konzeption einer Buchse mit zylindrisch-spiralförmiger Arbeitsraumgeometrie dar.

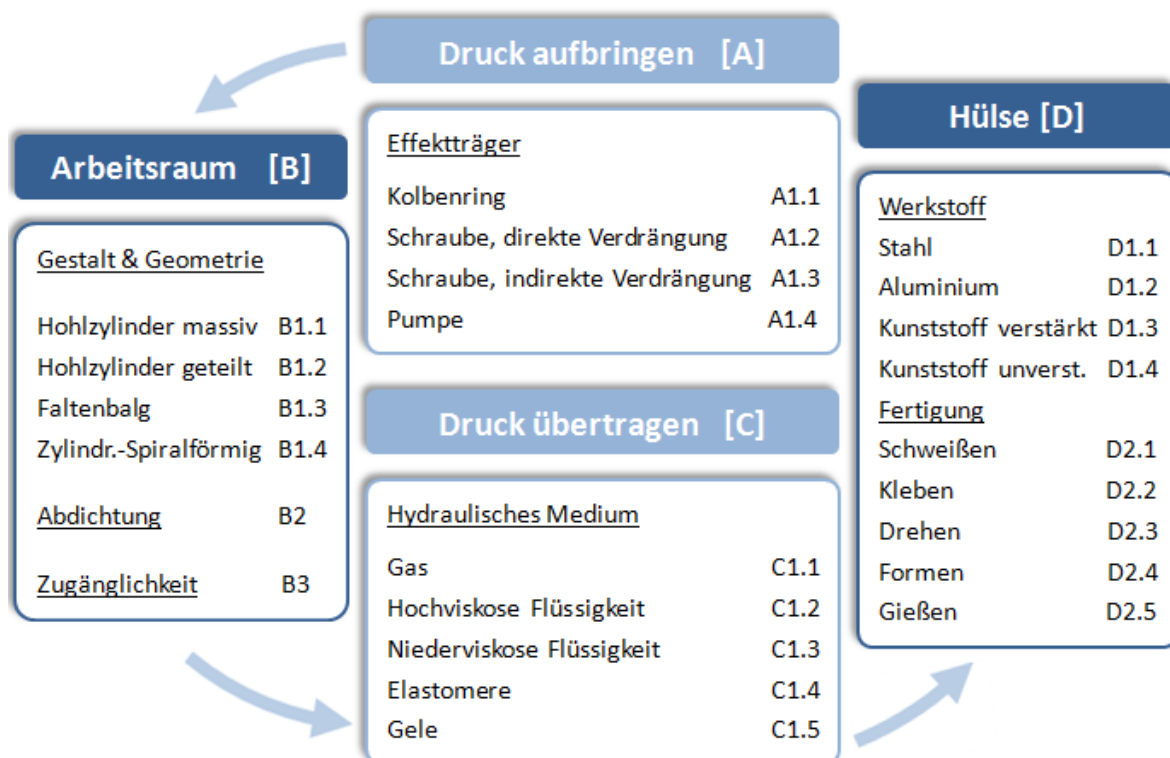


Bild 2: Variationsmöglichkeiten bei der Konzeption einer hydraulischen Hohlmantelspannbuchse

2 Druck-Indizierung

Unter Beibehaltung der klassischen Buchsengeometrie als doppelwandiger Hohlzylinder wurden mittels FE-Simulation verschiedene Konzepte zum Aufbringen eines Drucks im Arbeitsraum erprobt. Im Vordergrund stand dabei die Verwendung einer Umseitig geschlossenen Hülse, sodass das Problem der Abdichtung umgangen werden kann. Die Erhöhung des Drucks im Innenraum kann in diesem Fall mittels lokaler Deformation der Wandung erreicht werden. Mit Hilfe radialer Schrauben durch die Nabe wird dazu auf kleiner Fläche eine Kraft direkt auf die Außenwand der Spannhülse aufgebracht. Die Resultierende Verformung des Arbeitsraums erzeugt einen erhöhten Druck im enthaltenen Medium, welcher sich in alle Richtungen gleichmäßig ausbreitet und wiederum auf die Buchsenwände wirkt. Infolgedessen verformen sich diese radial in Richtung der Welle und der Nabe, sodass ein Reibschluss erreicht werden kann.

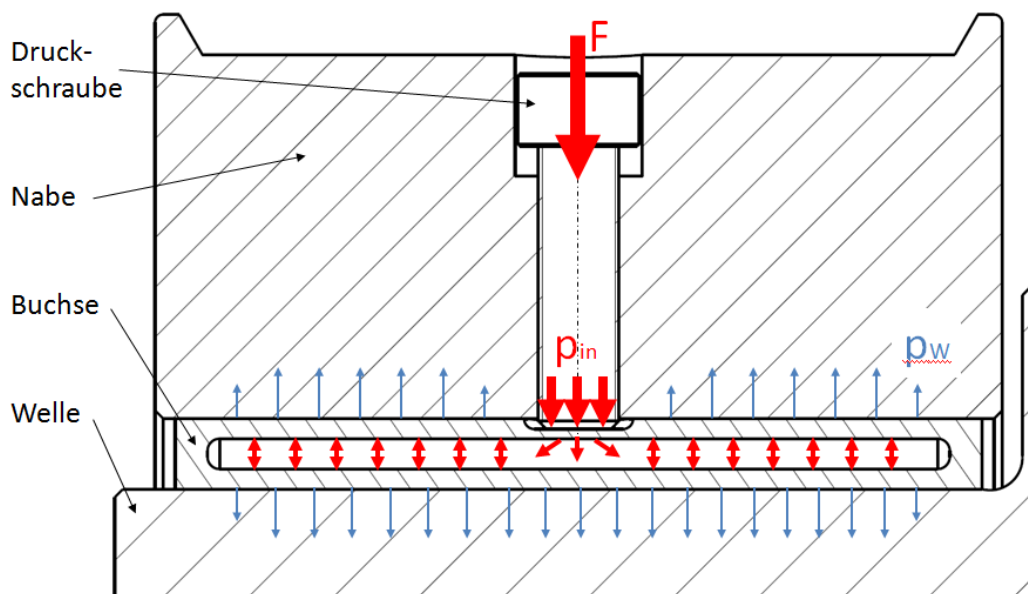


Bild 3: Prinzipskizze zur indirekten Druckerzeugung mittels radialer Kraftaufbringung durch die Nabe

Wie Bild 3 zeigt, wird die Schraube in einer radialen Gewindebohrung im Naben-Bauteil positioniert und dort angezogen. Um eine größere Deformation des Arbeitsraums bei möglichst geringer Krafteinwirkung zu erreichen wird die Aussenwand der Buchse durch geometrische Kerben in Form von Ring- und Rundnuten oder Taschen lokal geschwächt (Bild4). Zudem ist die Anordnung mehrerer Schrauben möglich.

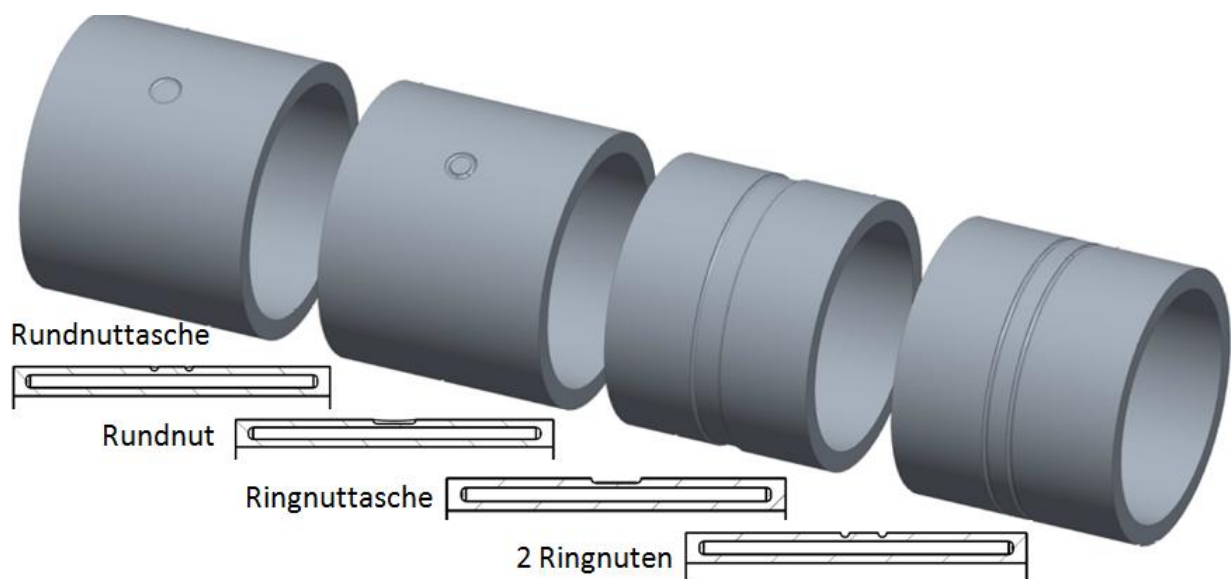


Bild 4: Hülsen mit Oberflächenschwächung der verschiedenen Bauarten

Erste Simulationen untersuchten das Verformungsverhalten einer zylindrischen Halbschale unter Krafteinwirkung, auf einer durch eine Ringnut definierten Stelle. Anhand dieser konnte das Verhältnis der Nutgeometrie zu aufgebrachter Kraft, erzeugter Verformung und Kerbspannung im Bauteil untersucht werden. Bei halbrundem Nutquerschnitt, wie er durch Fräsen mit Kugelkopf näherungsweise erzeugt wird, ergab sich für eine Wandstärke von 2mm eine geeignete Nuttiefe von 1mm. So soll gewährleistet werden, dass sich die für die Druckerhöhung erforderliche Verformung der Hülse infolge Krafteinwirkung, ausschließlich im elastischen Bereich des Werkstoffs bewegt.

Für die Versuche zu Machbarkeit einer derartigen Lösung und Validierung der Simulationsergebnisse wurden einige Prototypen mit Ringnuten (Bild 5 links) hergestellt. Um die Vergleichbarkeit zur herkömmlichen Variante zu erleichtern wurde als Druckübertragungsmedium eine hydraulische Flüssigkeit (ISO 4925:2005) gewählt. Da das Füllen auch in diesem Fall erst nach der Fertigstellung des Hohlkörpers erfolgen kann, entsteht ein Abdichtungsproblem bezüglich der erforderlichen Befüllungs- und Entlüftungsöffnungen. Diese befinden sich auf der Stirnfläche der Hülse und werden mit kurzen Schrauben und Dichtringen verschlossen.

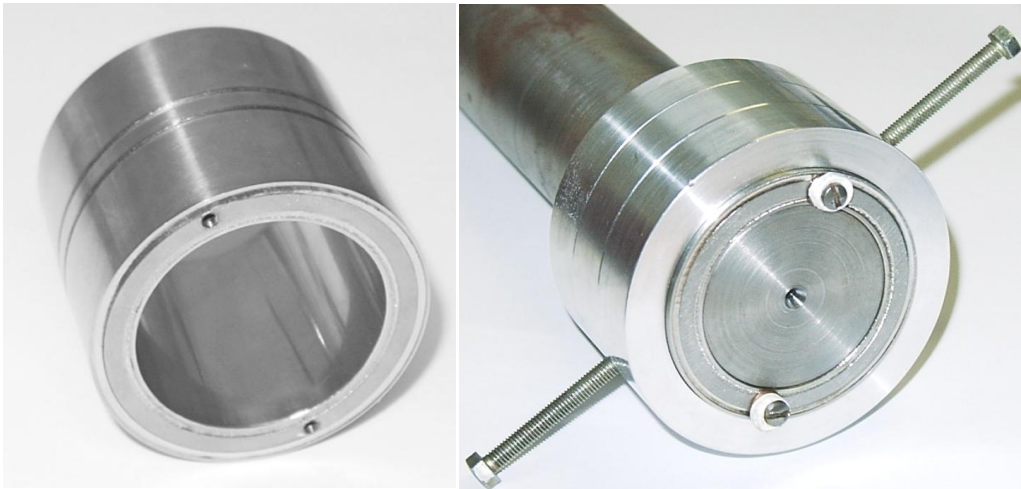


Bild 5: Prototyp mit Ringnuten links: unbefüllt, rechts: verspannt mit Welle und segmentierter Nabe

Um bei der Verbindung die Momentenübertragung infolge des hydraulischen Effekts ohne den Einfluss der unmittelbaren Verspannung von Welle und Nabe über die Schrauben zu prüfen, wird eine geteilte Nabe gewählt (Bild 5 rechts). Die Schraubengänge werden im mittleren Ring positioniert, über den die Krafteinbringung erfolgt. Die äußeren Ringe sollen nach Verformung der Buchse infolge Druckausbreitung im Medium nur durch den Reibschluss gehalten werden.

Obwohl die erforderlichen geometrischen Parameter entsprechend der Simulation gewählt und die rechnerisch notwendige Einschraubtiefe erreicht wurde, konnte mit diesem Prototyp kein Drehmoment übertragen werden. Während zur Welle hin ein Kraftschluss erreicht werden konnte, war die Nabe auf der Buchse nahezu ohne Widerstand verdrehbar. Trotz enger Fertigungstoleranzen konnte die Passung offenbar nicht überwunden werden. Ein erneutes Rundschleifen der Oberflächen wäre notwendig um die Fertigungstoleranzen auszugleichen. Bei weiteren Prototypen ist dies zu berücksichtigen.

3 Geometrie des Arbeitsraumes

Die Betrachtungen der Referenzbuchse ETP CLASSIC® zeigt, dass der Hohlraum in welchem der Druck erzeugt werden muss, nur sehr klein ist. Diese Ausführung ergibt sich ebenso aus der folgenden Gleichung (2) [3] zur Kompressibilität ΔV von Flüssigkeiten.

$$\Delta V = \frac{-\Delta p \cdot V_0}{K} \quad \begin{array}{ll} V_0 & - \text{Ausgangsvolumen} \\ \Delta p & - \text{Drucksteigerung vom Umgebungsdruck} \\ & \text{auf das erforderliche Innendruckniveau} \\ K & - \text{Kompressionsmodul des Füllstoffs} \end{array} \quad (2)$$

Daran wird deutlich, dass bei kleinem Ausgangsvolumen des Arbeitsraumes eine geringe Verdrängung ausreicht, um eine angestrebte Druckerhöhung zu erreichen. Diese geringe Verdrängung kann mit einem verringerten Krafteintrag und Aufwand bei der Montage einhergehen. Jedoch birgt ein schmaler Hohlspalt zwischen den Mantelflächen der Hülse einige technologische Schwierigkeiten z.B. hinsichtlich Kerbspannungen, Kapillareffekten sowie Anforderungen an das Fertigungs- & Befüllungskonzept, die tiefergehend zu untersuchen sind.

4 Zylindrisch-Spiralförmige Arbeitsraumgestalt

Einen innovativen Ansatz zur Umsetzung des Prinzips als bisheriges Ergebnis des Projekts zur Hohlmantelspannbuchse stellt die Ausprägung des Arbeitsvolumens als Helix dar. Dabei besteht die Hülse aus einem Profilrohr, welches ähnlich seiner zylindrischen Feder in Windungen gewickelt ist. Während des Fertigungsprozesses soll ein kreisrunder, maßhaltiger Rohrquerschnitt so abgeflacht werden, dass sich eine Buchse ähnlich der in Bild6 abgebildeten Geometrie ergibt. Durch das Zusammendrücken entstehen parallele Flächen, die als Wirkflächen des Reibschlusses dienen sollen. Dabei sind verschiedene Ausprägungen des Querschnitts möglich (vgl. Bild6 rechts), deren unterschiedliche Eigenschaften und Eignung für den Herstellungsprozess noch zu untersuchen bleibt.

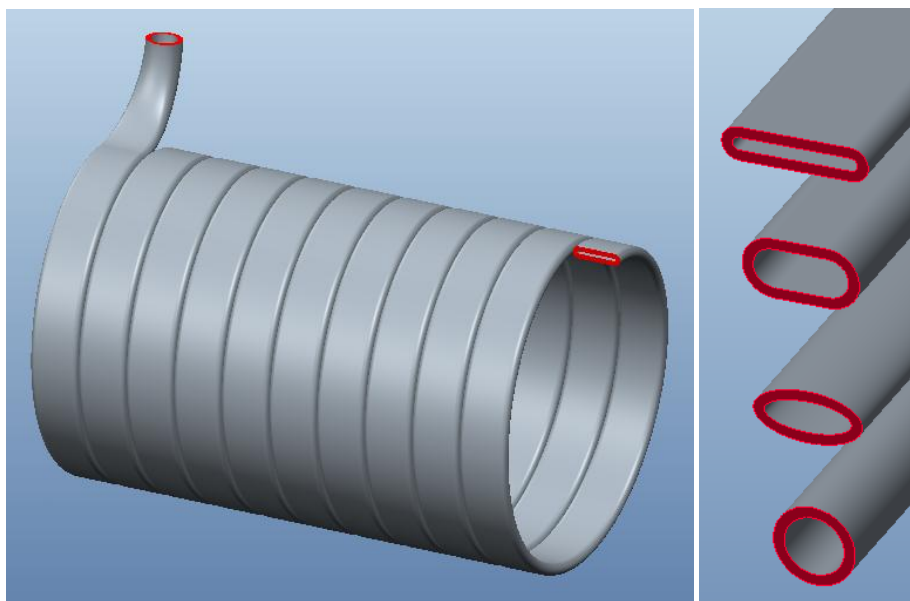


Bild 6: Gestaltprinzip der zylindrisch-spiralförmigen Hohlmantelspannbuchse
rechts: mögliche Rohrquerschnitte

Der so als Helix ausgeprägte Innenraum des Rohres, definiert das Arbeitsvolumen. Dies ist mit inkompressiblem Druckübertragungsmedium zu füllen und mittels einer Schraube zu verschließen. Durch Anziehen der Schraube kann das Volumen verringert werden. Der erzeugte Druckanstieg breitet sich im Medium gleichmäßig über den Arbeitsraum aus und wirkt weitend auf die Rohrwandungen. Zusätzlich kann der Effekt genutzt werden, dass eine mit Innendruck belastete Rohrfeder dazu strebt, sich aufzubiegen [7]. Diese zusätzliche Verformung der Buchse kann dazu dienen, Maßungenauigkeiten besser auszugleichen und die Flächenpressung zu erhöhen.

Unter Verwendung eines dünnflüssigen Mediums kann die Befüllung durch Eintauchen erreicht werden. Dabei sind beide Enden der spiralförmigen Buchse geöffnet, sodass Luft entweichen kann. Das Verschließen wird einseitig durch Kaltverformung oder Punktschweißen mit nur geringem Wärmeeintrag, nach dem Füllen, realisiert. Auf der anderen Seite ist die bereits angesprochene Druck-Schraube zu platzieren und die Buchse abzudichten. Die Orientierung der Schraubenachse ist nahezu frei einstellbar, sodass ein etwaiges Bauraum-Problem, welches aus einer großen erforderlichen Einschraubtiefe resultieren könnte, umgangen werden kann. Das Fertigungskonzept sieht derzeit vor, dass das schraubenseitige Ende des Rohres unverformt bleibt. Dies ist entsprechend des benötigten Winkels auszurichten und mit einem Innengewinde definierter Länge zu versehen, in dem die Schraube angezogen werden kann. Es ist ebenso möglich, auf den Schraubengang zu verzichten und die Druckbeaufschlagung direkt über einen Pumpenanschluss vorzusehen.

5 Ausblick

Die beschriebenen Konzeptansätze sollen in der weiteren Forschungstätigkeit untersucht und zu einem alternativen Spannelement kombiniert werden. Dabei wird das besondere Augenmerk auf der Eignung der zylindrisch-spiralförmigen Hohlmantelspannbuchse für den technischen Einsatz und die Fertigung liegen. An noch herzustellenden Testbuchsen sollen Untersuchungen zum maximal übertragbaren Drehmoment, zum Montageverhalten sowie zur Dauerfestigkeit erfolgen. Ein geeigneter Prüfstand für diesen Zweck ist zu entwickeln und einzurichten. Des Weiteren sind effiziente Herstellungskonzepte zu erarbeiten um einen praktischen Einsatz zu ermöglichen.

Literatur

- [1] Sigloch, Herbert: *Technische Fluidmechanik*. 9. Aufl. Berlin: Springer 2014. - ISBN 978-3-642-554291-6
- [2] ETP-Produktkatalog Antriebstechnik: *Schnell, einfach und präzise – Hydraulische Welle-Nabe Verbindungen*. ETP Transmission AB. Linköping. – 2016
- [3] Steinhilper, Waldemar; Sauer, Bernd: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1 - Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen*. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2012. - ISBN 978-3-642-24300-4
- [4] Kloß, Enrico: *Entwicklung einer Hohlmantelspannbuchse*. Abschlußbericht zum FuE-Projekt Förderkennzeichen: KP 0123 302 BN 6B. Rostock 2008
- [5] Pahl, Manfred; Gleißle, Wolfgang; Laun, Hans-Martin: *Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere*. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995. – ISBN 3-18-234192-8
- [6] Hagl, A.: *Verklebung mit Silikon*, Präsentation; Stahlbaukalendertag, Stuttgart: DSTV, 07.10.2005
- [7] Wuest, W.: *Die Berechnung von Bourdonfedern*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1962

Der „first time right“ Ansatz im Spannungsfeld technischer Entwicklungsprojekte

Jan Brökel

Suzlon Energy Limited – German Branch
Kurt-Dunkelmann-Str. 5 | 18057 Rostock | Germany
Email: jan.broekel@suzlon.com

Inhalt: Wie in einem Produktionsbetrieb kann der first time right Ansatz auch in einem Entwicklungsprojekt angewandt werden. Wie bei einer optimierten just in time Fertigung kann das Produkt, in dem Fall die Stückliste mit allen Fertigungsunterlagen, nur geliefert werden, wenn die Qualität aller Einzelteile stimmt. Da diese Qualität nur durch Aufwand oder Zeit erreicht werden kann, muss das Unternehmen hier sein auf das Produkt abgestimmtes Optimum finden. Am konkreten Beispiel einer Windkraftanlagenentwicklung konnte gezeigt werden, dass ein sehr geringes Maß an Fehlern mit entsprechenden Korrekturen tolerierbar ist, wenn dadurch andere Ziele, wie time to market, erreicht werden.

Abstract: Similar to any production plant a development project can also be handled with the first time right approach. In both the cases the 100% quality of all parts and subassemblies is required. Since this high quality requirement can only be achieved with time and cost effort, any business has to define its product specific optimum. Looking at a wind turbine generator development it is shown that a reasonable failure rate can be accepted if other business targets like time to market can be reached.

Stichwörter: Produktqualität, Pareto Prinzip, Windkraftanlage, first time right

Keywords: design quality, first time right, Pareto rule, Wind Turbine Generator

1 Einleitung

In den meisten technisch getriebenen Unternehmen kommt spätestens am Ende eines Entwicklungsprojektes im Rahmen der Manöverkritik der Anspruch „first time right“ auf die Agenda. Damit soll das unternehmerische Ziel einer höheren Lieferqualität möglichst ohne Beanstandungen und ohne Nacharbeit für das nächste Projekt unterstrichen werden. Als Kennzahl zur Überwachung der Qualität kann die first time right ratio, also der Anteil der Dienstleistungen bei denen nicht nachgebessert werden muss, genutzt werden. In Bezug auf eine technische Entwicklung sind die Lieferprodukte und Dienstleistungen als Zeichnungen, Berechnungen, Spezifikationen und Kosten- und Zeitpläne zu verstehen.

Es gibt durchaus kontroversen Sichten auf diesen Ansatz. Einerseits gilt, dass der Erfolg von vielen Geschäftsprozessen im direkten Verhältnis zur Qualität der Lieferprodukte

steht. Andererseits gilt aber auch, dass Qualität Arbeits- und Kontrollzeit kostet und Investitionen in Personal und Ausrüstung notwendig macht.

2 First time right

First-Time-Right ist Bestandteil des Total-Quality-Management Konzeptes und beinhaltet die theoretische Verpflichtung gegenüber Kunden, keine Fehler zu machen. Diese Verpflichtung fordert von Mitarbeitern auf allen Unternehmensebenen Verantwortung zu übernehmen dieses Ziel zu erreichen. Im amerikanischen Raum wird dieser Qualitätsanspruch noch griffiger „Do it right the first time“ (DRIFT) genannt und steht im engsten Zusammenhang mit dem Ansatz „just-in-time“ (JIT). Hier wird die klare Abhängigkeit zwischen Qualitätsmanagementmethoden und Produktionsprozessen sichtbar. Erklärtes Ziel beider Ansätze sind die Erhöhung der Kundenzufriedenheit, die Reduktion der Korrekturkosten und die Verringerung der Lagerhaltungskosten. Als Resultat ergibt sich für das Unternehmen ein wesentlicher Wettbewerbsvorteil. Im industriellen Rahmen setzte wohl Toyota erstmals den JIT Ansatz zur Produktionsoptimierung und Kostenreduktion ein und konnte so wirtschaftlich gegen die wesentlich größeren Konkurrenten aus den USA bestehen [1]. Die Eliminierung von kostenintensiven Lagern und Warenhaltung durch die zeitgenaue Lieferung machte sich später vor allem während der Ölkrise bemerkbar. Selbstredend kann eine optimierte just-in-time Produktion nur mit einer entsprechend hohen Prozess- und Produktqualität interner als auch externer Lieferanten gelebt werden. Es müssen also alle Bauteilabweichungen von den Spezifikationen ausgeschlossen werden, da keine Lagerhaltung eventuelle Fehlchargen ausgleichen kann und somit die just-in-time Produktion sofort zum Erliegen kommt.

Projiziert man die Abläufe eines Produktionsunternehmens auf den technischen Entwicklungsprozess, in dem die komplette Stückliste das virtuelle Produkt darstellt, dann müssen alle virtuellen Bauteile (3D-Modell, Spezifikationen, Zeichnungen, Berechnungen, Kostenmodelle und Zeitpläne) ohne Fehler zur richtigen Zeit vorliegen. Nur dann kann das virtuelle Produkt als komplette Stückliste von der Entwicklungsabteilung an die Fertigung übergeben werden (hier beginnt der reale JIT Prozess). Durch möglichst kurze Markteinführungszeiten und Produktlebenszeiten verringern sich auch die reinen Entwicklungszyklen weiter und Projektzeitpläne werden entsprechend ohne Puffer erstellt.

	Produktentwicklung	Fertigung
Produkt	Virtuell (Fertigungsunterlagen)	Real (z.B. Windkraftanlage)
Kunde	Interne Fertigung / Montage	Externer Endkunde
Arbeitsablauf	Flexibles Arbeiten teilweise möglich, begrenzt durch sequentielle Abhängigkeiten	Kontinuierliche Fertigung mit konstantem Bauteilbedarf
Infrastruktur	CAD, PDM, PLM Software IT und Serverinfrastruktur	Optimierte Werkzeuge und Montage Hohe Werkzeugverfügbarkeit
Prozess	Konstruktionsrichtlinien Review Prozesse 3D-Zusammenbauprozess	Kurze Rüstzeiten Standardisierte Fertigungs- und Montageprozesse
Kapazität	Geringe, aber flexible Reserven	Geringe, aber flexible Reserven
Qualität	Prozessbegleitende Qualitätssicherung	Prozessbegleitende Qualitätssicherung
Planung	Plangesteuert	Plan- oder Verbrauchsgesteuert
Lieferanten	(hoch) qualifizierte Mitarbeiter Eingearbeitete externe Partner	Nur qualifizierte Zulieferer
Direkte Fehlerkosten	Mehr Arbeitsstunden Mehr Rechenzeit Produktionsverzögerung	Überstunden Produktionsausschuss Überarbeitete Werkzeuge Zusätzliche Lagerkosten Ungenutztes Inventar
Folgekosten	höhere IT Kosten Mehr Personal (Ingenieure)	Verlorenes Kundenvertrauen Produktionskapazitätsverlust Regressforderungen Zusätzliches Wartungspersonal

Tabelle 1: Vergleich virtuelle vs. reale DRIFT/JIT Merkmale

Daraus resultiert, dass ein Abweichen vom Plan oder auch nur kleine zusätzliche Aufgaben zu einer direkten Verschiebung des Projektzieles führen. Unterstützt wird dieser Umstand durch sehr verschlankte Personaldecken, welche eine Fehlerkorrektur oder ungeplante Studien kaum zu lassen. Die viel gepriesenen externen Ingenieursdienstleister bieten in plötzlichen Krisensituationen kaum Hilfe, da oft Expertenwissen notwendig ist und eine Einarbeitung in das Thema zu lange dauert.

Dementsprechend muss sich das Entwicklungsteam unter Führung der Projektleitung tiefgehend mit dem Entwicklungsprozess beschäftigen und die Abhängigkeiten zwischen Entwicklungsqualität für jedes technische Zwischenergebnis und just-in-time Zeitplan ohne Puffer erarbeiten. Es ist natürlich nicht Aufgabe des Projektteams eine hohe Entwicklungsqualität zu gewährleisten, aber durch die zeitliche Abhängigkeit muss die

Projektleitung die Qualitätssicherungsprozesse und Methoden hinterfragen und durchsetzen das der DRIFT Ansatz in allen notwendigen Bereichen umgesetzt wird.

Rigide wirtschaftliche Rahmenbedingungen (kürzere Entwicklungszeiten, längere Werkzeugstandzeiten), wachsende Qualitätsanforderungen (engere Toleranzen, definiertes Crash-Verhalten) und neue Materialtechnologien lassen sich jedoch immer schwerer mit einer iterativen Verfahrensweise in Einklang bringen, die schnell Kosten im kritischen Bereich verursachen und gravierende Folgen nach sich ziehen kann, bis hin zu einem verzögerten Serienanlauf und entsprechenden Umsatzeinbußen.

Die prinzipiellen Vorteile der Simulation – schnelle, frühzeitige und kostengünstige Überprüfung und Optimierung eines Designs – sind inzwischen hinlänglich bekannt und natürlich auch für den Bereich der Windkraftanlagen gültig.

Nicht nur aus technischer Sicht stellt die Erstellung von fehlerfreien Konstruktionsunterlagen eine Herausforderung dar. Mehr denn je spielen auch ökonomische Aspekte eine Rolle – herkömmliche Trial-and-Error-Methoden erweisen sich oft als inkompatibel mit schlanken Konstruktionsprozessen.

Numerische Simulationsprogramme ermöglichen ein zeit- und kostensparendes „right the first time“. Neben dem Einsatz von numerischen Simulationsprogrammen und der detailgetreuen 3D Konstruktion bieten rapid prototyping, digital mock-up und virtuelle reality weitere Möglichkeiten um die Konstruktionsqualität zu erhöhen. Ein besonderes Augenmerk sollte auch auf lessons-learned liegen, also dem systematischen Review von gemachten positiven und negativen Projekt- und Entwicklungserfahrungen.

3 Das Pareto Prinzip und DRIFT

An dieser Stelle soll das Pareto Prinzip, auch bekannt als 80:20-Regel, mit in die Betrachtung einbezogen werden. Es stellt, wenn auch vereinfacht, einen allgemeinen Ansatz zur Abschätzung der Qualitätskosten bereit. Die Pareto Regel stellt klar, dass in vielen Fällen 80% der Resultate mit nur 20% des Gesamteinsatzes erzielt werden können. Daraus ergibt sich, dass der Aufwand um 100% zu erreichen nicht linear gestaffelt ist, sondern das für das Abschließen der letzten 20% einer Aufgabe die Aufwände exponentiell auf 80% in die Höhe schießen. Dieses Prinzip findet sich in vielen Lebensbereichen wieder und muss unbedingt in die Bewertung des DRIFT Ansatzes mit einbezogen werden.

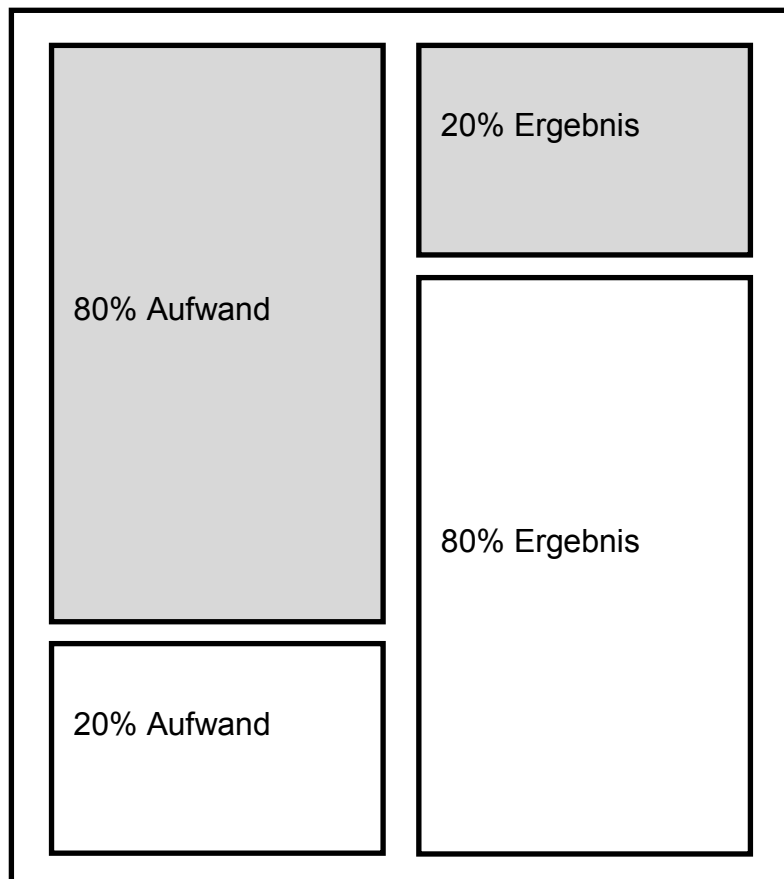


Bild 1: Das Pareto Prinzip

Soll nun der DRIFT Ansatz mit dem Anspruch des 100%igem Ergebnisses (Perfektionismus) umgesetzt werden, muss ein Unternehmen unverhältnismäßig hohen Aufwand betreiben um die 100% zu erreichen. Natürlich kann nicht pauschalisiert werden, da es Produkte gibt, bei denen die menschliche Sicherheit nahezu jeden Aufwand rechtfertigt, was sich dann aber im Preis niederschlägt. Beispiele sind hier die Nuklear- und Medizintechnik oder auch Luft- und Raumfahrt.

Bei den meisten Konsum- und Industriegütern ist aber auch eine nicht 100% Qualität akzeptierbar (natürlich nur statistisch und nicht aus Sicht des einzelnen Kunden).

Für Entwickler oder Projektmanager kann das Spannungsgefüge im „Teufelsquadrat“ nach Sneed [2] gut veranschaulicht werden.

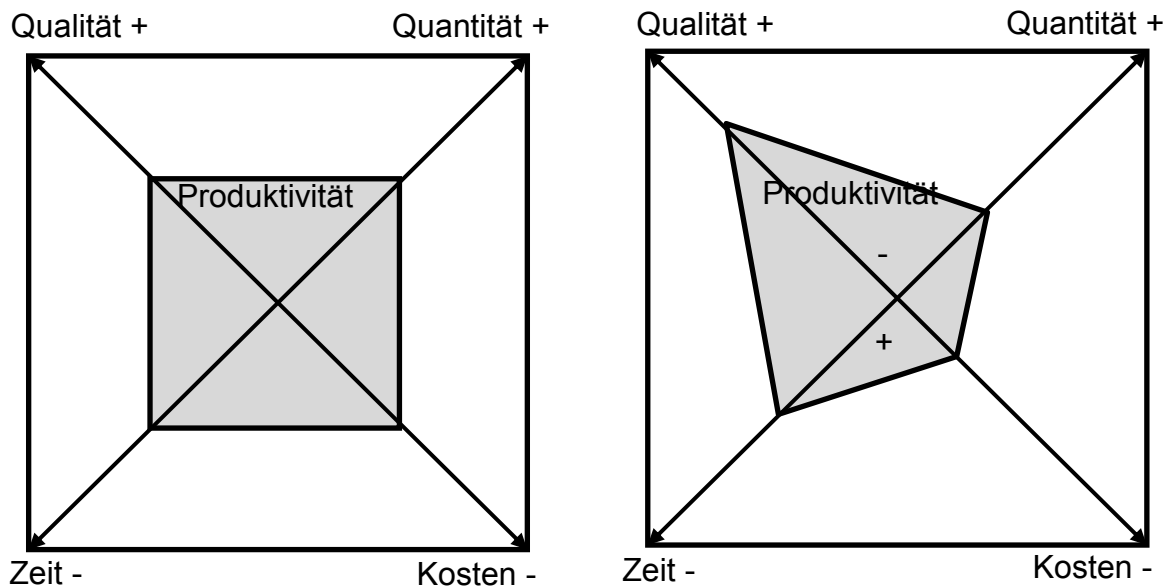


Bild 2: Das Teufelsquadrat zeigt die Gegenläufigkeit von Zielen [2]

Wenn die Produktivität (grau) als Konstante genommen wird, aber eine höhere Qualität (DRIFT) in gleicher Zeit gefordert wird, dann sinkt die Produktion und/oder steigen die Kosten. Wieder gilt es das Optimum zu finden, um nicht mit schlechter Qualität Kunden zu verlieren, aber auch um nicht überzogenen Perfektionismus teuer bezahlen zu müssen.

4 Ein Beispiel

Am Beispiel einer abgeschlossenen Windkraftanlagenneuentwicklung wurde untersucht, ob ein höheres Maß an initialer Lieferqualität in den Konstruktionsunterlagen auch einen unternehmerischen Vorteil gebracht hätte. Im Rahmen des Neuentwicklungsprozesses gibt es den speziellen Change Note Prozess, welcher alle Änderungen nach der Initial Stückliste (Prototyp) bis zur Serienstückliste (Serienprodukt) behandelt. Diese ergaben sich aus den Erfahrungen während:

- der Komponentenherstellung (auch bei Lieferanten)
- der Anlagenmontage (in der Fabrik)
- dem Anlagentransport (z.B. Anschlagpunkte)
- dem Anlagenaufbau (z.B. kritische Schnittstellen im und zum Turm)
- der Anlageninbetriebnahme (z.B. dynamische Belastungen des Gesamtsystems)
- der Anlagenoptimierung (z.B. Leistung und Kosten)
- der Serienlieferantenentwicklung

Im Rahmen des Change Note Prozesses wurden 274 Änderungswünsche erfasst, von denen 90 abgelehnt und 184 umgesetzt wurden. Unterteilt man die 184 akzeptierten Änderungen, dann ergeben sich:

- 14 Kostenreduktion
- 12 Lieferantenentwicklung
- 71 Fertigungsoptimierung
- 33 Aufbau- und Inbetriebnahmeoptimierung
- 54 Designkorrekturen

Aus Sicht des DRIFT Ansatzes sind die 54 Designkorrekturen klare Fehler und die gefundenen Optimierungspunkte hätten mit einer engeren Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Teams von der Technik, der Montage und der Inbetriebnahme reduziert bzw. vermieden werden können.

Im Verhältnis zu den mehreren Tausend Bauteilen in mehr als 50 Baugruppen ergibt sich eine Fehlerquote von kleiner als 1% (first time right ratio > 99%). Nimmt man für die Korrektur der Designfehler einen durchschnittlichen Aufwand von 50h für je 80,-€ an, dann ergibt sich ein Korrekturaufwand von 216.000,- €.

Zum Verhindern dieser Fehler müssten weitere detaillierte Prüfzyklen eingeführt werden. Beschränkt man sich auf die Baugruppenprüfung im Teamreview (mehr Augenprinzip) und setzt 2 Stunden pro Baugruppe an, ergeben sich 40.000,- € Prüfaufwand, was ca. 20% des Korrekturaufwandes entspricht.

Unter dem Gesichtspunkt, dass bei Windkraftanlagen eine klare Trennung von Prototypenanlagen und Kundenanlagen eingehalten wird, besteht auch kein Risiko für die Kundenzufriedenheit. Daher ist die zeitliche Komponente im Gesamtprojekt mit der schnellstmöglichen Errichtung des Prototypen (als Grundvoraussetzung zum schnellen Markteintritt) wesentlich höher zu bewerten als einige hunderttausend Euro. Eine genauere Abschätzung der Kosten für spätere Korrekturen und für entsprechenden Mehraufwand zusätzlicher Reviews bedarf weiterer Analysen.

Nichts desto trotz darf selbst diese <1% Fehlerquote bei Kundenanlagen nicht akzeptiert werden und sämtliche notwendigen Korrekturen vom Prototypen zur Serienstückliste müssen umgesetzt werden.

5 Zusammenfassung

Es kann dargelegt werden, dass das generelle Dogma des first time right nicht immer der beste unternehmerische Ansatz ist und es durchaus Situationen gibt, in denen ein gewisse Fehlerquote akzeptabel ist, vor allem wenn eine strikte Trennung von Prototypen und Serienprodukt gegeben ist (was im Energieanlagenbau nicht immer der Fall ist). Ausgehend vom Pareto Prinzip muss sich auf jeder Unternehmensstufe, von der Geschäftsführung bis zum Konstrukteur, entschieden werden wieviel Einsatz gerechtfertigt ist, um das notwendige Maß an Lieferqualität zu erreichen.

Oft ist eine „Gut-genug-Lösung“ besser als eine perfekte Arbeit, weil so eventuell wesentlichere Projektziele (Kosten oder time to market) möglich werden oder auch Zeitfenster für andere, mitunter wichtigere Projekte frei werden.

6 Literatur

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Just-in-time-Produktion>
- [2] Sneed, H.M., Software Management. 1987, Cologne: Müller GmbH

Design for Additive Manufacturing – Praxisnahe Hilfsmittel zur Identifikation und Nutzung konstruktiver Freiheiten

Hagen Watschke, Martin Kumke*, Thomas Vietor

Technische Universität Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau

Institut für Konstruktionstechnik

Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig

Email: h.watschke@tu-braunschweig.de; Internet: <http://www.tu-braunschweig.de/ik>

*Volkswagen AG, Konzernforschung

Berliner Ring 2, 38440 Wolfsburg

Email: martin.kumke@volkswagen.de; Internet: <http://www.volkswagenag.com>

Inhalt: Additive Fertigungsverfahren (AM) bieten neue Freiheiten in der Konstruktion. Im Forschungsfeld des Design for Additive Manufacturing (DfAM) wurden verschiedene Methoden und Hilfsmittel entwickelt, die Konstrukteure beim Erzeugen neuer Lösungen unterstützen. Viele dieser Methoden erfordern jedoch tiefgreifende AM-Kenntnisse, wodurch ihre Anwendung auf Experten beschränkt ist. In diesem Beitrag werden DfAM-Methoden vorgestellt, die von Experten und Novizen angewendet werden können. Basierend auf einer Systematisierung der AM-Freiheiten wird eine Toolbox mit additiv gefertigten Modellen erarbeitet, die zur besseren Veranschaulichung dient und das Verständnis fördert. Hierdurch unterstützt sie Anwender bei der Identifikation und Nutzung neuer Freiheitsgrade. Zusätzlich hilft ein interaktives Katalogsystem ihnen bei der Beachtung neuer Konstruktionsregeln. Die Anwendung der Methoden wird durch eine Fallstudie gezeigt.

Abstract: Additive Manufacturing (AM) provides unprecedented freedom in product design. The research field Design for Additive Manufacturing (DfAM) has led to various methods and tools that support designers at creating new design solutions. However, many of these methods require substantial AM knowledge, limiting their application to experts. This paper proposes DfAM methods applicable by both experts and novices. Based on a systematization of AM design potentials, a toolbox containing hardware objects for a better visualization and understanding is developed. It thereby supports its users in identifying and utilizing new degrees of freedom. In addition, an interactive catalogue system helps them adhering to new design rules. The application of the methods is demonstrated by a case study.

Stichwörter: Design for Additive Manufacturing (DfAM), Konstruktionsregeln, Konstruktionsmethoden

Keywords: Design for Additive Manufacturing (DfAM), Design Rules, Design Methods

1 Einleitung

Additive Fertigung (Additive Manufacturing, AM) bezeichnet eine Gruppe von Verfahren, bei denen Bauteile durch schichtweises, selektives Verfestigen bzw. Auftragen von Material hergestellt werden. Gegenüber den traditionell etablierten, z. B. abtragenden und urformenden, Fertigungsverfahren resultieren aus dem AM-Verfahrensprinzip neue konstruktive Freiheiten [1]. Bedingt durch die vergleichsweise junge Historie der additiven Fertigungsverfahren mangelt es vielen Konstrukteuren allerdings an tiefgehendem Wissen und einem Bewusstsein für die AM-spezifischen Gestaltungsfreiheiten und -grenzen. Eine zentrale Herausforderung besteht im Lösen fest verankerter Regeln für die fertigungsgerechte Bauteilgestaltung im Sinne der konventionellen Fertigung (Design for Manufacturing, DFM) [2]. Als Parallele zum Begriff Design for X hat sich in der additiven Fertigung das Design for Additive Manufacturing (DfAM) etabliert [1].

2 Bestehende Ansätze im Design for Additive Manufacturing (DfAM) und Forschungsbedarf

Innerhalb der DfAM-Forschung können folgende Ansätze unterschieden werden [[3], [4]]:

- *Restriktive DfAM-Ansätze* beschreiben die spezifischen Konstruktionsregeln (Restriktionen), deren Einhaltung zur Gewährleistung der Herstellbarkeit erforderlich ist. Hierbei handelt es sich zum einen um qualitative Konstruktionsregeln, z. B. den Einfluss der Bauteilorientierung in der Baukammer und Strategien zur Vermeidung von Stützstrukturen. Zum anderen werden quantitative Grenzwerte bereitgestellt, z. B. minimal realisierbare Wandstärken. Konstruktionsregeln werden in umfangreichen Versuchsreihen insbesondere für die Verfahren Laser-Strahlschmelzen (LBM), Laser-Sintern (LS) und Fused Layer Modeling (FLM) entwickelt [5]. Sie erhalten zunehmend Einzug in Lehrbücher und Richtlinien, z. B. VDI-Richtlinie 3405 Blatt 3 [6].
- *Opportunistiche DfAM-Ansätze* stellen Methoden und Hilfsmittel zur Ausnutzung der konstruktiven Freiheiten bereit, da diese die AM-spezifischen Restriktionen i. d. R. deutlich überwiegen. Neben Checklisten mit allgemein gehaltenen Hinweisen zu den konstruktiven Möglichkeiten sowie der Vorstellung erfolgreicher Fallstudien bestehen derartige Hilfsmittel beispielsweise in Datenbanken mit AM-Konstruktionsfeatures [7] und in modifizierten Kreativitätsmethoden [3].

- *Kombinierte Ansätze und Vorgehensmodelle* integrieren restriktive und opportunistische Bestandteile. Beispielsweise werden Methoden der Strukturoptimierung in der Konzeptphase eingesetzt und um Elemente aus der Bionik ergänzt; erst am Ende des Konstruktionsprozesses werden die Regeln des restriktiven DfAM berücksichtigt [8]. Darüber hinaus wird in [4] ein gesamtmethodisches DfAM-Rahmenwerk im Sinne von VDI-Richtlinie 2221 entwickelt, das unabhängig von Konstruktionsart und -ziel angewendet werden kann. Es dient einerseits als Vorgehensmodell zur systematischen Lösungsentwicklung, andererseits bietet es durch einen modularen Aufbau die Möglichkeit, bestehende und zukünftige DfAM-Methoden und -Hilfsmittel zu integrieren. Darüber hinaus wird innerhalb jedes Moduls die DfAM-Erfahrung des Konstrukteurs als ein Kriterium zum Vorschlagen passender Hilfsmittel herangezogen.

Bestehende DfAM-Hilfsmittel eignen sich primär für spezialisierte Anwendungsfälle und einzelne Konstruktionsziele. Sie erfordern häufig fundierte Vorkenntnisse. Insbesondere werden unerfahrene Konstrukteure bei der Ausnutzung der konstruktiven Freiheiten nicht systematisch unterstützt, was durch Denkblockaden des fertigungsgerechten Konstruierens für herkömmliche Verfahren zusätzlich erschwert wird. Eine Forschungslücke besteht somit in allgemeingültigeren Hilfsmitteln, die sich durch Praxisnähe und einfache Anwendbarkeit auszeichnen, eine Verknüpfung zu den vertrauten Konstruktionsregeln für andere Fertigungsverfahren herstellen, die kombinierte Ausnutzung mehrerer konstruktiver Freiheiten erleichtern und dadurch AM als weitere Fertigungsalternative etablieren. Erfahrene Konstrukteure können die Hilfsmittel zur Generierung von Konzeptideen oder als Checkliste nutzen.

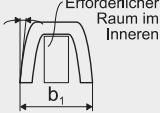
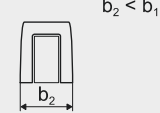
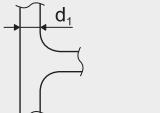
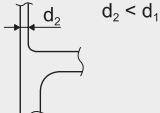

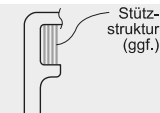
3 Entwicklung praxisnaher DfAM-Hilfsmittel

Ableitung und Systematisierung konstruktiver Freiheiten

Zur Ermittlung konstruktiver Freiheiten reicht es nicht aus, nur die spezifischen Eigenschaften additiver Fertigungsverfahren isoliert zu betrachten. Eine Beurteilung ihrer exakten Ausprägung wird erst durch eine Gegenüberstellung mit den konstruktiven Restriktionen anderer Fertigungsverfahren möglich. Für jede Regel wird untersucht, ob eine vergleichbare Einschränkung auch bei AM vorliegt. Auf dieser Basis wird die

Ausprägung der konstruktiven Freiheit bewertet. Sofern eine Freiheit vorliegt, wird exemplarisch ein zusätzlicher/neuer Nutzen aufgezeigt. Hierdurch entsteht ein „Freiheitenkatalog“, von dem ein Auszug in Tabelle 1 dargestellt ist.

Tabelle 1: Auszug aus dem Katalog konstruktiver Freiheiten am Bsp. Guss vs. Laser-Strahlschmelzen (LBM)

Konstruktionsregel beim Guss	Vergleichbare LBM-Regel	Konstruktive Freiheit LBM	Exemplarischer Nutzen der konstruktiven Freiheit
Entformungs-schrägen vorsehen 	Nein	●	Geringerer Bauraumbedarf 
Konstante Wandstärken anstreben 	Nein	●	Leichtbau durch Materialeinsparung an wenig beanspruchten Stellen 
Hinterschnitte vermeiden 	Ja (teilweise Stützstruktur-entfernung erforderlich)	● (Restriktion bei LBM geringer ausgeprägt)	Leichtbau, höhere Zuverlässigkeit, geringerer Bauraumbedarf usw. durch Integralbauweise 

Zusätzlich zur Gegenüberstellung mit anderen Fertigungsverfahren werden Freiheiten auch aus den inhärenten Merkmalen additiver Fertigungsverfahren abgeleitet, da bislang nicht herstellbare Geometrien i. d. R. gar nicht erwogen oder frühzeitig verworfen werden. Zentrales Merkmal von AM ist die Erreichbarkeit jedes einzelnen Volumenelements eines Bauteils. Für jedes Element kann nicht nur binär festgelegt werden, ob es Material enthält oder nicht, sondern es können auch weitere Eigenschaften lokal definiert werden, sodass z. B. Material- oder Gefügevariationen möglich sind. Zur Systematisierung der erreichbaren Freiheiten kann der Komplexitätsbegriff nach [1] verwendet werden:

- *Formkomplexität/Geometriekomplexität:* Freiheiten bei der herstellbaren Formenvielfalt (Freiformgeometrien, Standardelemente usw.);
- *Hierarchische Komplexität:* Herstellbarkeit und Kombination von Strukturen verschiedener Dimensionen (mikro-, meso- und makroskopisch);
- *Materialkomplexität:* Verarbeitbarkeit und Kombination von Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften in einem Bauteil ohne zusätzlichen Fügeprozess;
- *Funktionale Komplexität:* Realisierung zusätzlicher Funktionen durch die Fertigung in sich beweglicher Teile oder die Einbettung weiterer Komponenten.

Nach [9] handelt es sich bei den Freiheiten um sogenannte Hebel. Diese sollten jedoch nicht zum Selbstzweck, sondern zur Produktverbesserung hinsichtlich eines oder mehrerer Leistungskriterien verwendet werden. Im letzten Schritt werden daher aus den Hebeln sogenannte Nutzenversprechen abgeleitet; hierbei dienen auch AM-unabhängige Analysen, z.B. zur Funktionsintegration [10], als Hilfestellung. Es entsteht eine Gesamtsystematik der konstruktiven Freiheiten, von der ein Ausschnitt in Bild 1 dargestellt ist.

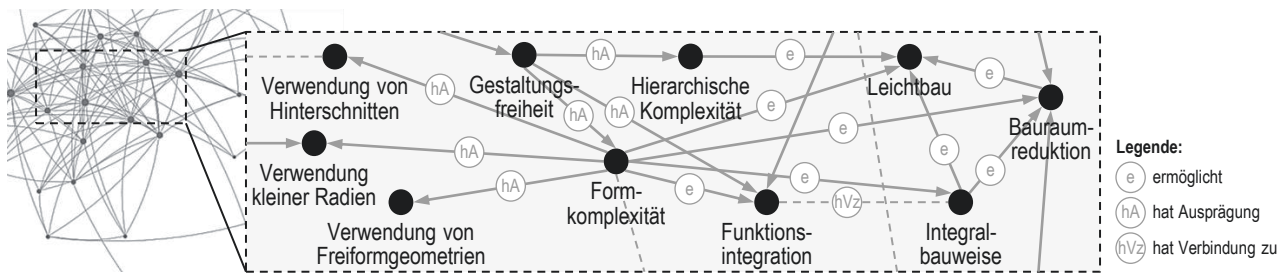


Bild 1: Auszug aus der Systematik AM-spezifischer konstruktiver Freiheiten

Toolbox zur Visualisierung der konstruktiven Freiheiten

Zur zielgerichteten Identifikation und vereinfachten Nutzung der konstruktiven Freiheiten wird eine sogenannte Toolbox entwickelt, welche diese aufbauend auf der Systematik in Form verschiedener Konstruktionsfeatures visualisiert. Die Toolbox besteht aus additiv gefertigten Modellen mit zugehörigen Steckbriefen. In den Modellen spiegeln sich die spezifischen Besonderheiten der unterschiedlichen AM-Verfahren wider. Die Formkomplexität wird in allen Verfahren in ähnlicher Weise berücksichtigt (z. B. bionische Strukturen oder Hinterschnitte), wohingegen gradierte Gitterstrukturen zentrale Elemente der LBM-Modelle darstellen. Die LS-Modelle zeigen zudem bewegliche Baugruppen und Filmscharniere (funktionale Komplexität). Die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe ist u. a. in den FLM-Modellen visualisiert (Materialkomplexität). Bild 2 zeigt exemplarisch ein LBM-Modell mit einem Auszug des zugehörigen Steckbriefs.

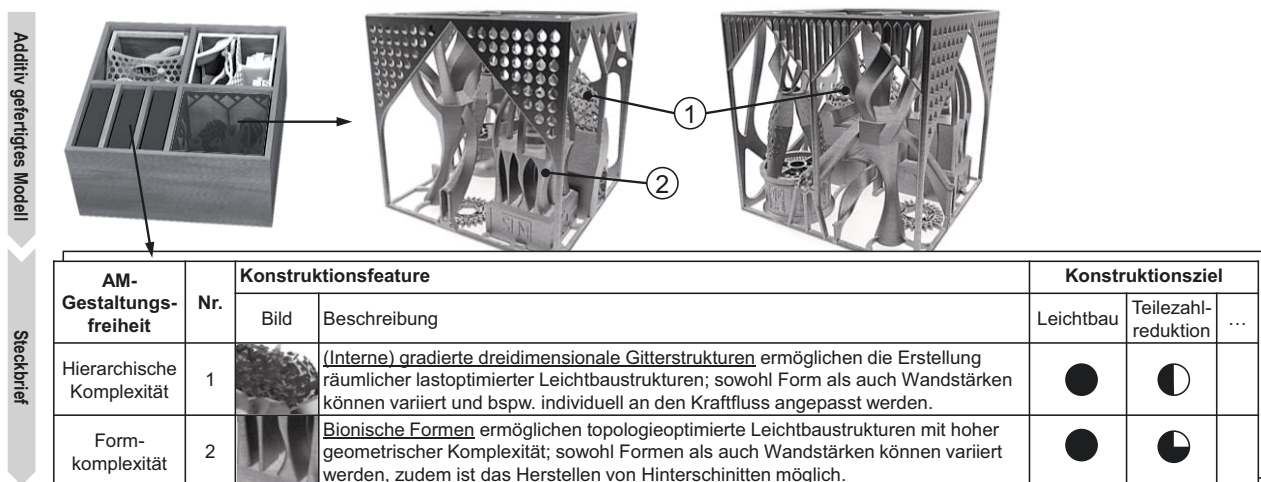


Bild 2: Auszug aus der Toolbox – LBM-Modell und zugehöriger Steckbrief

Die Sammlung der verschiedenen Konstruktionsfeatures kann als Inspirationsquelle für neue Lösungsideen und Assoziation sowie eine angepasste Konstruktionsweise und Produktkonzeptionierung genutzt werden. Das „Anfassen“ eines physischen Modells gibt den Anwendern u.a. einen Eindruck über Größenordnungen der darstellbaren Konstruktionsfeatures, die hohe Funktionsdichte infolge integrierter Baugruppen sowie Limitierungen wie die resultierende Oberflächengüte. Der Modellsteckbrief gliedert die Features entsprechend der Systematik konstruktiver Freiheiten. Mithilfe der Zuordnung der Elemente zu übergeordneten Zielen, z.B. Leichtbau, wird ein zielgerichteter Zugriff gewährleistet. Der Aufbau der Steckbriefe gleicht dem von klassischen Konstruktionskatalogen.

Regelkatalog zur Berücksichtigung konstruktiver Restriktionen

Neben der Identifikation und Nutzung konstruktiver Freiheiten ist – spätestens in der Entwurfs-/Ausarbeitungsphase – eine realistische Beurteilung der Potenziale unabdingbar. Um Konstrukteuren die Beachtung der Konstruktionsregeln zu erleichtern, wird ein interaktiver Katalog entwickelt. Ein Beispiel der standardisierten Systemoberfläche ist in Bild 3 dargestellt. Für jede Konstruktionsregel werden ihre Gültigkeit, eine allgemeine Beschreibung, Skizzen für ungünstige und günstige Lösungen sowie Richtwerte angegeben. Außerdem wird mittels Verknüpfungen auf vergleichbare Regeln hingewiesen. Da die Inhalte des Regelkatalogs aus verschiedenen Quellen synthetisiert wurden, weichen insb. Richtwerte teilweise voneinander ab, z.B. aufgrund unterschiedlicher Anlagen und Fertigungsparameter. Durch die Angabe von Bandbreiten, z.B. 35°–50° als

kritischer Winkel für Stützstrukturen, erhalten Konstrukteure jedoch ein Gefühl für die quantitative Ausprägung.

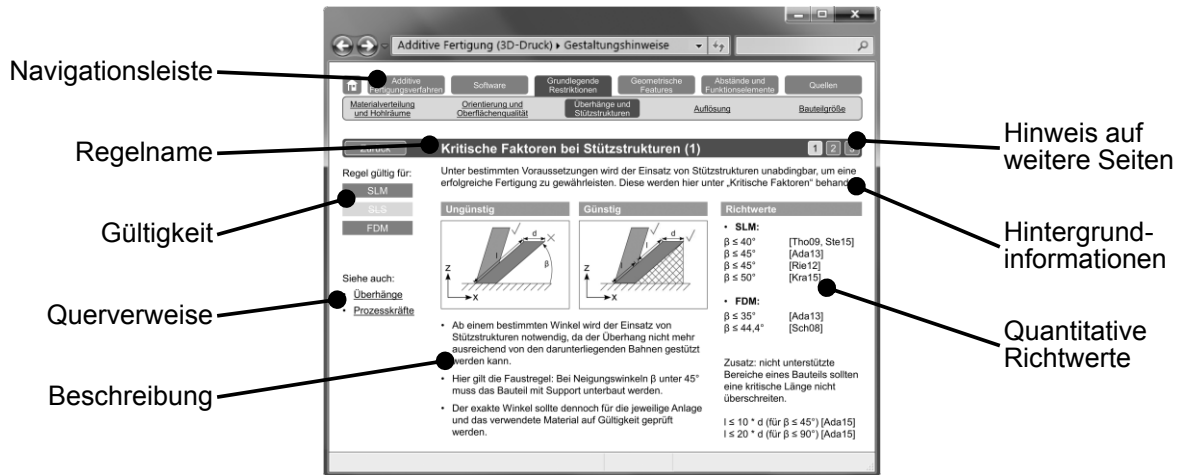


Bild 3: Interaktiver DfAM-Konstruktionsregelkatalog

4 Beispielhafte Anwendung der Toolbox

Am Beispiel der A-Säule eines Pkws soll die Anwendung der Toolbox demonstriert werden. Hierzu sollen Ideen für eine Umgestaltung der bisherigen Struktur – bestehend aus A-Säule-Elementen, Verstärkungen und Schweller (siehe Bild 4) – hinsichtlich Leichtbau entwickelt werden. Zunächst werden der Modellsteckbrief und das LBM-Modell nach geeigneten Konstruktionsfeatures sowie Maßnahmen durchsucht, welche dem Konstruktionsziel Leichtbau zugeordnet sind. Der Anwender identifiziert u. a. Mesostrukturen, lastoptimierte Anpassungen von Wandstärken und Profilformen sowie die Möglichkeit, Verstärkungselemente in die Strukturen zu integrieren. In Bild 4 sind die mithilfe der Toolbox generierten Ideen und deren Auswirkungen exemplarisch dargestellt.

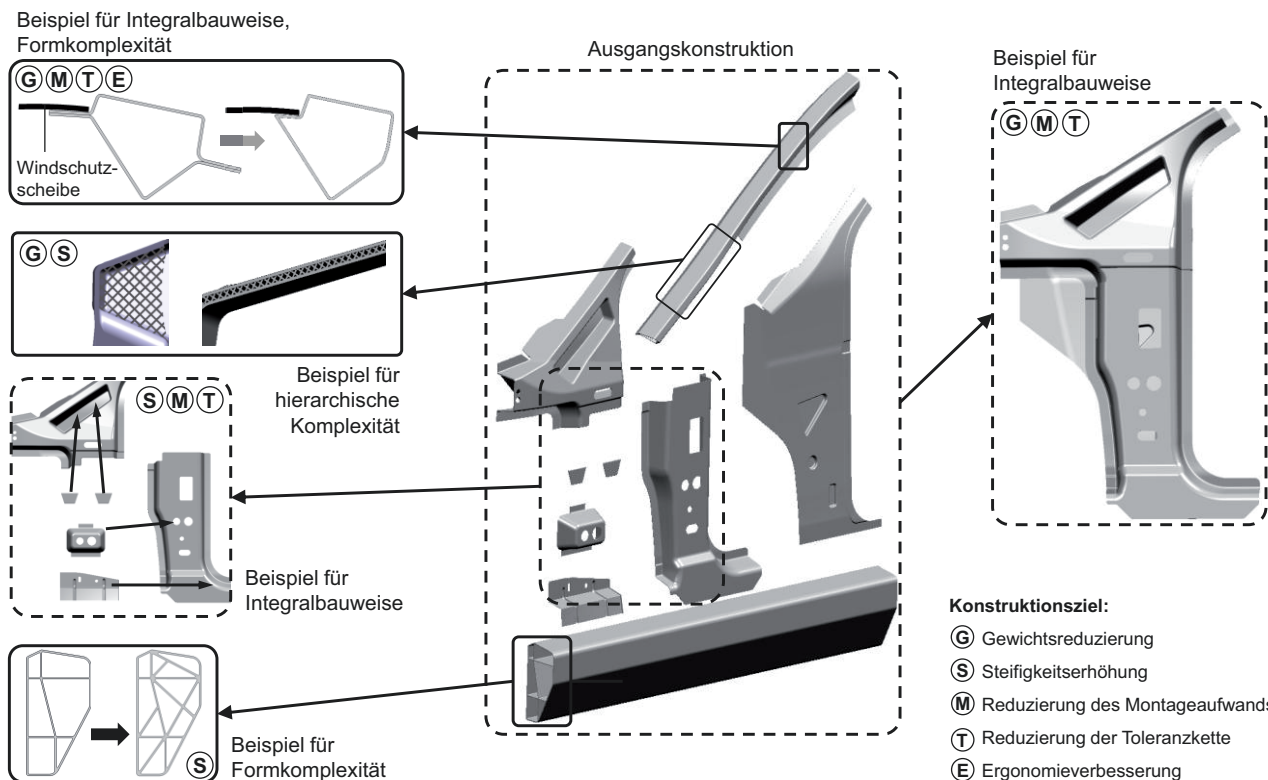


Bild 4: Ideengenerierung zur Umgestaltung am Beispiel der A-Säule

Neben der Möglichkeit, durch Formoptimierung, Reduzierung der Teileanzahl und Mesostrukturen bei gleicher Bauteilsteifigkeit Gewicht einzusparen, wird zusätzlich z. B. durch einen Wegfall der Fügeflansche und eine Variation der Profilform der Bauraumbedarf gesenkt. Hieraus können weitere Vorteile im Bereich des Fahrzeugpackage und der Ergonomie resultieren. Weiterhin wird durch eine Integralbauweise die Toleranzkette verringert.

5 Ausblick

In den nächsten Schritten soll definiert werden, wann die Hilfsmittel innerhalb des Konstruktionsprozesses idealerweise zum Einsatz kommen können. Ferner ist in weiteren Fallstudien zu überprüfen, unter welchen Randbedingungen eher opportunistische Hilfsmittel und wann vermehrt restriktive Hilfsmittel bereitgestellt werden sollten und ob sowohl eine Anwendbarkeit auf Bauteil- und Produktebene als auch bei Neu- und Anpassungskonstruktionen gegeben ist. Weiterhin ist der Einsatz der vorgestellten Hilfsmittel zur Einführung in das DfAM beispielsweise im Kontext von Workshops oder Schulungen denkbar.

Literatur

- [1] Gibson, Ian; Rosen, David W.; Stucker, Brent: *Additive Manufacturing Technologies : 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. 2. Aufl. New York: Springer, 2015. – ISBN 978-1-4939-2112-6
- [2] Boothroyd, Geoffrey; Dewhurst, Peter; Knight, Winston A.: *Product Design for Manufacture and Assembly*. 3. Aufl. Boca Raton: CRC Press, 2011. – ISBN 978-1420089271
- [3] Laverne, Floriane; Segonds, Frédéric; Anwer, Nabil; Le Coq, Marc: Assembly Based Methods to Support Product Innovation in Design for Additive Manufacturing : An Exploratory Case Study. In: *Journal of Mechanical Design* 137 (2015), S. 121701-1–8
- [4] Kumke, Martin; Watschke, Hagen; Vietor, Thomas: A new methodological framework for design for additive manufacturing. In: *Virtual and Physical Prototyping* 11 (2016), Nr. 1, S. 3–19
- [5] Adam, Guido A. O.; Zimmer, Detmar: Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 7 (2014), Nr. 1, S. 20–28
- [6] Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinie VDI 3405 Blatt 3: Additive Fertigungsverfahren – Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen, Berlin: Beuth, 2015
- [7] Bin Maidin, Shajahan; Campbell, Ian; Pei, Eujin: Development of a design feature database to support design for additive manufacturing. In: *Assembly Automation* 32 (2012), Nr. 3, S. 235–244
- [8] Kranz, Jannis; Herzog, Dirk; Emmelmann, Claus: Methodik für die fertigungsgerechte Konstruktion von laseradditiv gefertigten bionischen Leichtbaustrukturen aus TiAl6V4. In: *RapidTech, Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie*, Erfurt, 2014
- [9] Baldinger, Matthias; Leutenecker, Bastian; Rippel, Manuel: Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren. In: *Industrie Management* 29 (2013), Nr. 2, S. 11–14
- [10] Ziebart, Jan R.: Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration. München: Dr. Hut, 2012. – ISBN 978-3843905671

Empirische Untersuchungen zum visuellen Wahrnehmen beim Lesen und Verstehen technischer Zeichnungen

Ali Daryusi, Grit Köhler

Hochschule Offenburg, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Professur für Maschinenelemente und CAD/CAE

Badstraße 24, 77652 Offenburg

E-Mail: ali.daryusi@hs-offenburg.de

grit.koehler@hs-offenburg.de

Internet: <http://www.hs-offenburg.de/cax>

Inhalt: Es wurden 49 Einzelpersonen aus dem Studiengang „Maschinenbau“ der Hochschule Offenburg bei der Lösungssuche für eine zeichnerische Aufgabe mit Hilfe der Eyetracking-Technik beobachtet. Aus den Experimenten ergeben sich Aufschlüsse über das tatsächliche Vorgehen von Studierenden beim Lesen technischer Zeichnungen. Die Analyse der empirischen Untersuchungen legt die Vermutung nahe, dass die zunehmende Digitalisierung der Gesellschaft und der zunehmende Umgang mit elektronischen Kleinstgeräten verstärkt zu einem punktuellen und schnellen Wahrnehmungsverhalten führen. Ruhe und Gelassenheit im Umgang mit Informationen gehen verloren, ebenso das Denken im Kontext. Somit muss es Aufgabe der Lehre sein, wieder verstärkt ein ruhiges, strukturiertes und auf Zusammenhänge ausgerichtetes Vorgehen zu vermitteln und zu üben.

Abstract: 49 individuals of the degree course “Mechanical Engineering” at the University of applied sciences in Offenburg were observed while searching for a solution for a drawing task using the eye tracking technology. From the experiments we can derive conclusions about the actual approach of students in reading technical drawings. The analysis suggests that the increasing digitization of society and the increasing use of electronic micro devices increasingly lead to a punctual and quick perception behavior. Ease and calmness in dealing with information are increasingly lost, just thinking in context. Thus, it must be the task of teaching to instruct a calm, structured and interrelated approach and training again.

Stichwörter: Technische Darstellungen, praktische Kompetenzen, Eyetracking, Didaktik.

Keywords: technical illustration, practical skills, eye tracking, engineering education, didactics.

1 Motivation und Konzept

Die Komplexität heutiger Produkte wächst zunehmend. Gleichzeitig nehmen infolge globalisierter Arbeitsmärkte auch die Schnittstellen innerhalb ihres Fertigungsprozesses immer mehr zu [1]. Dabei werden komplexe konstruktive, bildliche und begriffliche Darstellungen zur Repräsentation der Produktdaten in Form von Freihandskizzen,

Zeichnungen, CAD- und FEM-Modellen angefertigt. Dies führt zu wachsenden Schwierigkeiten bei der Verarbeitung dieser grafisch dargestellten Informationen. Zur Bewältigung dieser wachsenden Anforderungen werden von den Unternehmen zunehmend qualifizierte Konstrukteure mit hohen praktischen Fähigkeiten beim Lesen, Verstehen und Interpretieren technischer Darstellungen gesucht [2, 3].

Die Beherrschung einer technisch-konstruktiven Sprache durch die jungen Konstrukteure ist ein ganz wesentlicher Teil ihrer Problemlösefähigkeit [4]. Deshalb sollen das räumliche Darstellungsvermögen und die Lese- und Verstehfähigkeit von technischen Zeichnungen beim zukünftigen Konstrukteur gefördert werden. In diesem Kontext wurden die Augenbewegungen mehrerer Probanden beim Lesen einer technischen Darstellung mittels Eyetracking-Technologie exemplarisch untersucht. Dabei fanden auch individuelle Personenmerkmale Berücksichtigung, weil zu vermuten war, dass sie einen Einfluss auf die Wahrnehmung und Verarbeitung der Informationen besitzen.

Etwa 80% der Informationen und Reize werden vom Menschen über den visuellen Sinneskanal aufgenommen [4, 5]. Informationen, die nachweislich nicht über das Auge aufgenommen werden, können also mit hoher Wahrscheinlichkeit auch nicht in den Denkprozess eingebunden werden. Deshalb erscheint der Einsatz der Eyetracking-Technologie zur Untersuchung der genannten Thematik besonders geeignet.

2 Probanden, Aufgabe, Testplanung und Vorgehensweise

In einer Laborstudie wurden 49 Versuchspersonen im Alter von 18 bis 28 Jahren bei der Bearbeitung einer zeichnerischen Aufgabe beobachtet und analysiert. Dabei handelte es sich um vier studentische Gruppen aus dem Studiengang „Maschinenbau“ an der Hochschule Offenburg.

- Gruppe 1 besteht aus 15 Probanden (2w+13m) aus dem ersten Semester. Diese haben als Vorwissen die Vorlesung „Technisches Zeichnen“ gehört. Ihnen sind somit die Darstellungsarten bekannt.
- Gruppe 2 besteht aus 6 Probanden (4w+2m) aus dem ersten Semester. Die Vorkenntnisse dieser Gruppe sind die gleichen wie in Gruppe 1. Den Probanden dieser Gruppe stand jedoch, anders als bei den Probanden der Gruppe 1, zusätzlich ein 3D-Druckmodell des Werkstücks als Hilfsmittel zur Verfügung.

- Gruppe 3 besteht aus 17 Versuchspersonen (3w+14m) aus dem zweiten Semester. Diese haben zu dem Wissen aus der Vorlesungsreihe „Technisches Zeichnen“ auch das Labor „CAD-Grundlagen“ absolviert. Sie haben somit zu dem theoretischen Wissen in 2D-Darstellung auch die Anwendung an einem CAD-System in 3D-Darstellung erlernt. Ihre räumliche Wahrnehmung sollte dadurch gefestigt sein.
- Gruppe 4 besteht aus 11 Versuchspersonen (0w+11m) aus dem zweiten Semester. Die Vorkenntnisse dieser Gruppe sind die gleichen wie in Gruppe 3. Den Probanden dieser Gruppe stand jedoch, anders als bei den Probanden der Gruppe 3, zusätzlich ein 3D-Druckmodell des Werkstücks als Hilfsmittel zur Verfügung.

Alle Gruppen wurden in gleicher Weise über die Aufgabe informiert.

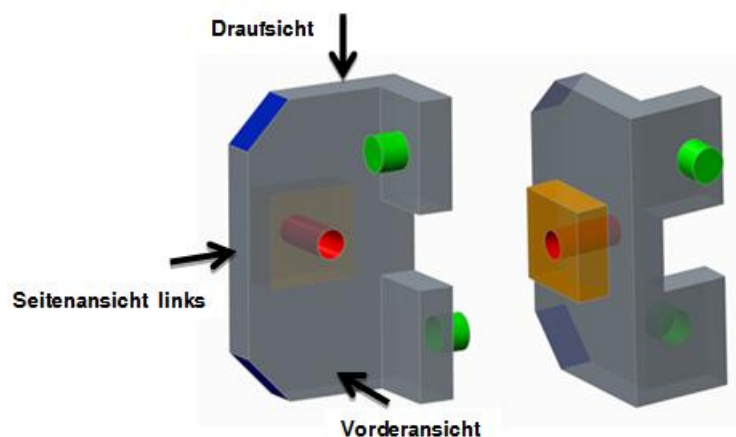


Bild 1: Untersuchungsgegenstand (Quelle: Eigene Darstellung)

Die zu lösende Aufgabe hatte einen geringen Schwierigkeitsgrad. Die zeichnerische Darstellung beinhaltet ein winkelförmiges Bauteil mit wenigen herausgehobenen Details aus dem Bereich des Maschinenbaus (Bild 1). Insbesondere wird das Bauteil durch die folgenden Elemente charakterisiert: ein rechteckiger Absatz mit durchgehender Bohrung, zwei entgegengesetzt orientierte zylindrische Absätze und zwei Fasen.

Von dem dargestellten Werkstück werden den Probanden zunächst Vorderansicht und Draufsicht vorgelegt. Anschließend sollen die Studierenden entscheiden, welche der vier vorgelegten Seitenansichten das dargestellte Werkstück gemäß den Regeln der zeichnerischen Darstellung korrekt abbildet. Die gestellte Aufgabe wurde deshalb so relativ einfach konzipiert, um den Blickvorgängen der Testpersonen folgen zu können.

Bild 2 erläutert die vorgeschlagene systematische Vorgehensweise und die dafür nötigen Blickpfade zur Ermittlung der richtigen Seitenansicht von links. In einem ersten Schritt sollte man sich einen Überblick über die gegebenen Ansichten verschaffen. Dazu gehört vor allem das Verstehen der dargestellten Geometrie im Raum. Erst dadurch ist man in der Lage, die normgerechte Seitenansicht auszuwählen. Minimal sind dafür 2 Blickpfade (gestrichelte und gepunktete Darstellung) zu verfolgen. Der durchgezogene untere Blickpfad ist optional (Kontrollschritt). Die gesuchte Ansicht ist die Seitenansicht Nr. 2.

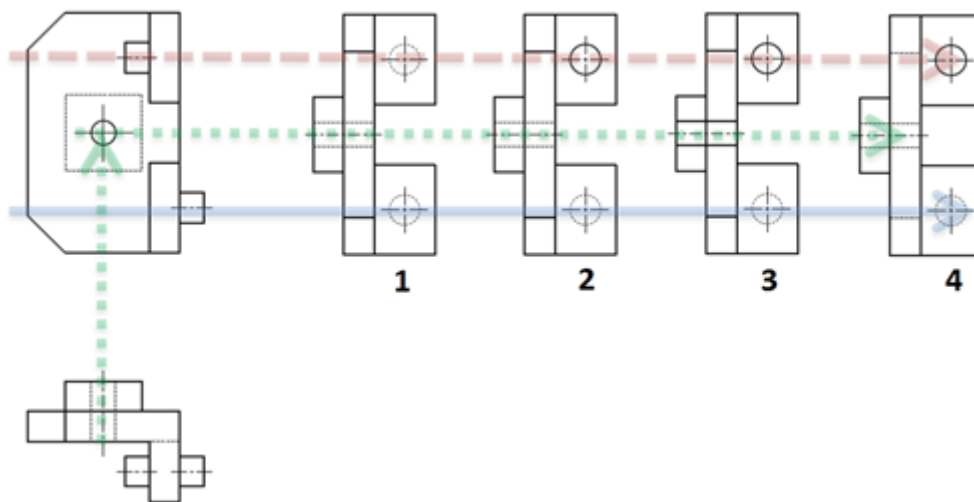


Bild 2: Mögliche Vorgehensweise und Darstellung von Vorderansicht und Draufsicht des Bauteils sowie der vier Seitenansichten von links zur Auswahl (Quelle: Eigene Darstellung)

An dieser Stelle soll explizit darauf hingewiesen werden, dass bei der Lösungsfindung lediglich zwei klare Regeln berücksichtigt werden müssen:

- Sichtbare Kanten sind mit einer durchgezogenen Linie zu kennzeichnen.
- Unsichtbare Kanten werden mit einer gestrichelten Linie dargestellt.

Es sind alle für die Lösungsfindung maßgeblichen Werkstückdetails als Areas of Interest (AOI) definiert worden (Bild 3). Das ermöglicht die Auswertung aller relevanten Messgrößen und Kennzahlen der Blickregistrierung (Fixationsdauer und -häufigkeit, Blickreihenfolge). Die Versuchszeit für die Lösung der Aufgabe betrug 60 Sekunden.

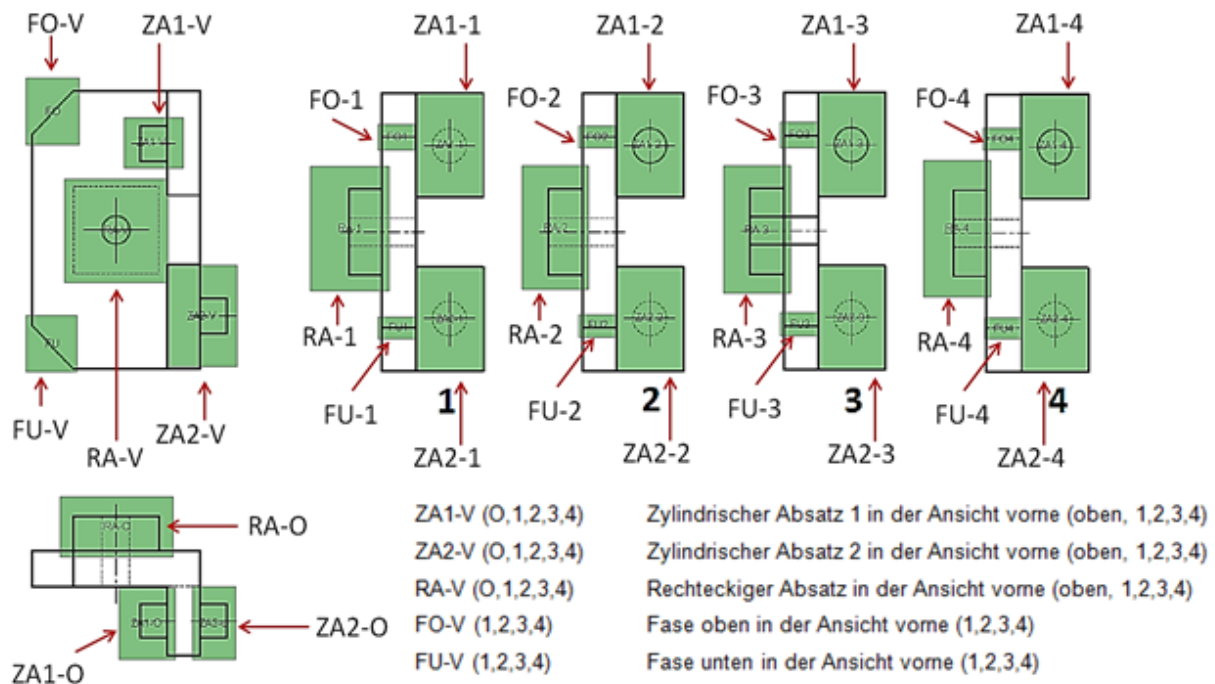


Bild 3: Areas of Interest, verschiedene Bauteilansichten

3 Empirische Untersuchungsergebnisse

Im Bild 4 ist das visuelle Verhalten bei der Lösungsfindung von einem Experten in Form einer Heatmap, bestehend aus Fixationen und Sakkaden, dokumentiert. Beim Experten nimmt man deutlich die Gelassenheit beim Betrachten aller Ansichten wahr. Alle entscheidenden Geometriedetails werden hinreichend lange und konzentriert betrachtet. Alle drei erwarteten Blickpfade sind vorhanden. Der Kontrollpfad ist stärker ausgeprägt als notwendig gewesen wäre. Die geplante Testdauer wurde optimal ausgeschöpft (Gesamtzeit: 53,72 s; innerhalb AOI: 36,55 s; außerhalb AOI: 17,17s).

Die Heatmaps aller Probanden wurden im Verlauf der Arbeit systematisch beurteilt. Die Ergebnisse dieser Analyse wurden umfassend dokumentiert.

Trotz der im Abschnitt „Erhoffte Vorgehensweise“ beschriebenen einfachen und klaren Regeln zur Lösungsfindung lag die Trefferquote über alle Probanden nur bei 46,9%. Von den Studierenden der Gruppen 1 und 2 wurde in 42,9% der Fälle die richtige Lösung gefunden. Bei den Studierenden der Gruppen 3 und 4 lag die Erfolgsquote bei 50,0%.

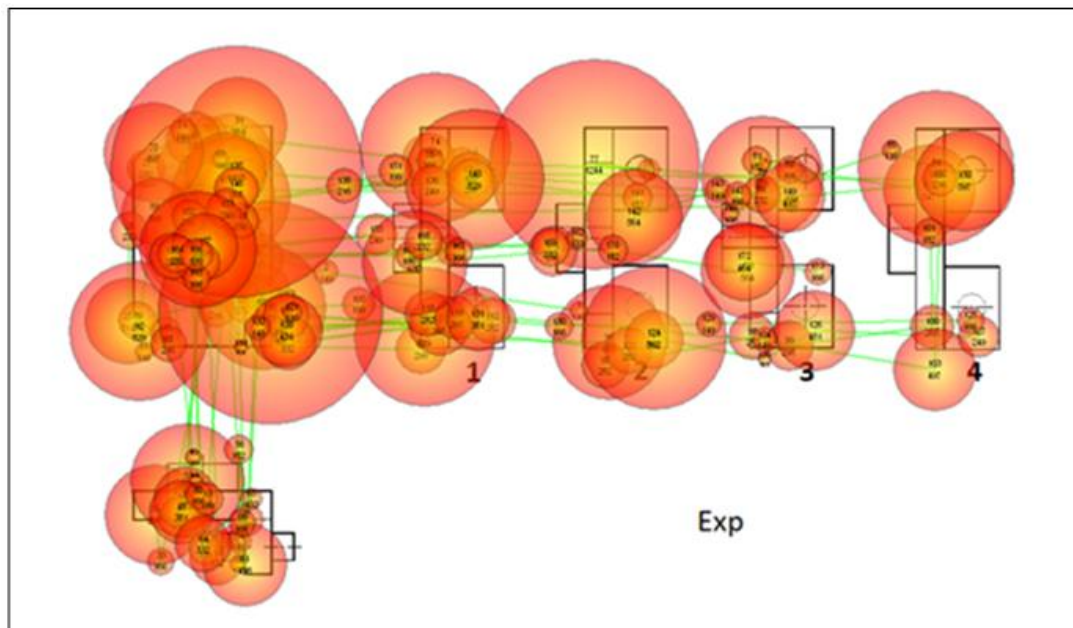


Bild 4: Heatmap eines Experten

Weil in allen Probandengruppen die beiden grundlegenden Regeln zur Lösungsfindung bekannt sein müssten, ist anzunehmen, dass andere fehlende Kompetenzen, wie z.B. fehlendes Raumvorstellungsvermögen, fehlende heuristische Kompetenz oder fehlendes Abstraktionsvermögen, die Hauptursachen für das insgesamt schlechte Ergebnis sind. Die Erfolgsquote in Gruppe 2 lag bei 16,7%. Dieses Ergebnis war völlig unerwartet. Hier konnte die Sichtbarkeit aller Kanten in der Seitenansicht ja direkt am 3D-Druckmodell wie bei der Gruppe 4 überprüft werden. Dass das Ergebnis trotzdem so extrem schlecht war, könnte folgende Ursachen haben:

- Die Regeln zur Darstellung sichtbarer/unsichtbarer Kanten wurden nicht angewendet.
- Die Transferleistung vom vorhandenen räumlichen Modell zur abstrakten Seitenansicht ist nicht gelungen (fehlendes Abstraktionsvermögen).
- Die Studierenden sind extrem verunsichert (hoher Frauenanteil/Anteil von Studierenden mit Migrationshintergrund in dieser Gruppe).

In Gruppe 4 fanden 45,5% der Studierenden die richtige Lösung. D.h. auch hier müssen weitere Ursachen als die fehlende räumliche Vorstellungskraft für den Misserfolg vermutet werden. Es stellt sich die Frage, ob es den Studierenden wirklich hinreichend gut gelingt, neues Wissen erfolgreich in bestehende Denkstrukturen einzubinden, oder ob der Fokus in der Grundlagenausbildung nicht viel stärker darauf liegen sollte, diese Denkstrukturen

erst einmal zu etablieren. Auch die Fähigkeit zur Abstraktion wird nach Ansicht der Autoren in der Ausbildung zu wenig gefördert und abverlangt.

Die Auswertung ergab, dass nur etwa ein Drittel der Studierenden sich Zeit für eine ruhige Betrachtung von Vorderansicht und Draufsicht nimmt. Während der Experte für die Auseinandersetzung mit Vorderansicht und Draufsicht ca. 42,6% der Gesamtzeit verwendet, werden von den Studierenden nur 19,0% (Gruppe 2), 19,7% (Gruppe 4), 23,4% (Gruppe 3) bzw. 27,8% (Gruppe 1) der Gesamtzeit hierfür genutzt.

Die Heatmap eines Probanden im Bild 5 (Proband 4-1, Gruppe 1, m, Deutschland, kein Abitur, richtige Lösung gefunden) zeigt die erhoffte ruhige und konzentrierte Betrachtung von Vorder- und Draufsicht als Voraussetzung für die Ermittlung der richtigen Lösung. (Gesamtzeit: 41,25 s; innerhalb AOI: 20,52 s; außerhalb AOI: 20,73 s)

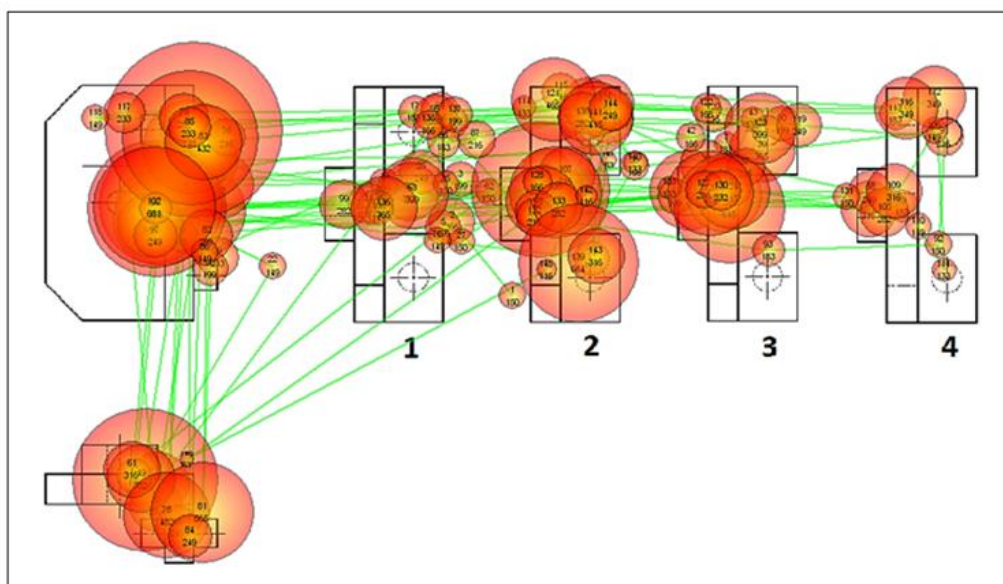


Bild 5: Heatmap des Probanden 4-1: Konzentrierte Betrachtung von Vorderansicht und Draufsicht

Etwa ein Drittel der Studierenden beginnt hingegen viel zu schnell mit der Lösungsfindung. Ein letztes Drittel hat die Entscheidungskriterien für die Lösungsfindung nicht erkannt. Deutliches Indiz hierfür ist eine sehr hohe Anzahl an kurzen Fixationen und/oder Blickpendelungen bei vielen Probanden.

Bild 6 zeigt beispielhaft die Heatmap einer Probandin (Proband 16-3, Gruppe 3, w, Deutschland, kein Abitur, richtige Lösung nicht gefunden), die offensichtlich keinerlei Erwartungshaltung hinsichtlich der richtigen Darstellung der maßgeblichen Werkstückdetails in der Seitenansicht hatte. Die Blickpfade wirken diffus. Die große

Anzahl an hin und her pendelnden Blickpfaden lässt eine größere Unsicherheit vermuten.
(Gesamtzeit: 60,0 s; innerhalb AOI: 23,38 s; außerhalb AOI: 36,62 s)

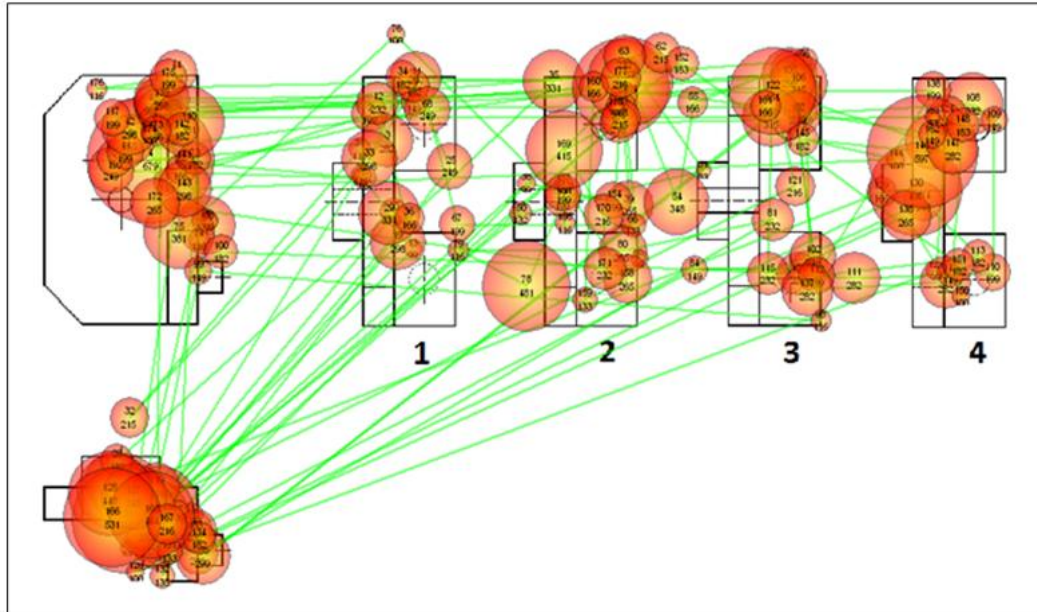


Bild 6: Heatmap der Probandin 16-3: Viele kurze Fixationen und diffuse Blickpfade

Anmerkungen

Grundsätzlich können nach Auswertung aller Heatmaps der Testpersonen folgende Anmerkungen getroffen werden:

- In allen Gruppen wurde zur Entwicklung der Raumvorstellung hauptsächlich die Vorderansicht genutzt.
- Für die Betrachtung der beiden zylindrischen Absätze wurde von allen Gruppen deutlich weniger Zeit verwendet als für die Betrachtung des rechteckigen Absatzes. Offensichtlich bereitete den Studierenden die Entwicklung einer räumlichen Vorstellung des rechteckigen Absatzes bzw. die Identifizierung seiner richtigen Seitendarstellung größere Schwierigkeiten. Offensichtlich haben die wenigsten erkannt, dass die Draufsicht schon die richtige Darstellung, wenn auch unter einem um 90° gedrehten Blickwinkel, enthält. Das könnte ein Indiz dafür sein, dass selbst die Probanden, die die korrekte Seitenansicht richtig benannt haben, nicht unbedingt eine gute räumliche Vorstellung von der Geometrie des Bauteils hatten.
- Das Vorhandensein eines 3D-Druckmodells unterstützte die räumliche Vorstellung der Studierenden. Das lässt sich aus der in diesen Fällen geringeren Betrachtungsdauer von Vorderansicht und Draufsicht ableiten.

- Ein Indikator für die fehlende korrekte räumliche Vorstellung von dem Werkstück ist die Verwendung der Draufsicht für die Ermittlung der richtigen Seitenansicht der zylindrischen Absätze. Die Draufsicht erlaubt keine Rückschlüsse auf die räumliche Anordnung dieser beiden Absätze. Wann immer Blickpfade von den AOI ZA1-O bzw. ZA2-O zu den Seitenansichten vorhanden sind, wurde (bis auf ganz wenige Ausnahmen) das richtige Ergebnis von den Probanden nicht gefunden.
- In mehreren Fällen wurde das Entscheidungskriterium „Darstellung der sichtbaren Fasenkante“ nicht berücksichtigt.
- Die Probanden, die zu einer richtigen Lösung gefunden haben, haben sich für die Betrachtung von Vorderansicht und Seitenansicht ausreichend Zeit genommen.
- Nur bei wenigen Studierenden sind die erwarteten Blickpfade, die den Autoren als Indikator für eine systematische Vorgehensweise bei der Lösungsfindung dienen, klar ausgeprägt. Bei den Studierenden überwiegt eine Mischung aus systematischem Vorgehen und Ausschlussverfahren für die falschen Seitenansichten.
- Nur etwa die Hälfte aller Studierenden überprüft in einem Kontrollschritt die aufgestellte Lösungshypothese.
- Eine klare Struktur in den Blickpfaden war andererseits kein ausreichendes Kriterium für eine korrekte Lösung. Nur in Verbindung mit einer klaren räumlichen Vorstellung vom Werkstück führt eine systematische Vorgehensweise auch zum Erfolg.
- Sehr viele hin und her pendelnde Blickpfade sind für die Autoren ein Indikator für Unsicherheiten und somit entweder für ein schlechteres Raumvorstellungs- oder/und Abstraktionsvermögen oder aber für fehlende Kenntnisse auf dem Gebiet der zeichnerischen Darstellung.

Im Bild 7 sind die durchschnittlichen Fixationsdauern für die vier Seitenansichten dargestellt. Der Lösungsstrategie A wurden alle diejenigen Probanden zugeordnet, bei denen die Betrachtungsdauer von Seitenansicht zu Seitenansicht immer mehr abnahm. Hier ist ein Lerneffekt deutlich zu erkennen; d.h. die Erwartungshaltung bezüglich der zu überprüfenden Kriterien wurde mit jedem Schritt klarer und die Sicherheit bezüglich der Lösungsfindung größer. Die Lösungsstrategie B spiegelt ebenfalls diese Lernkurve wider.

Dieser Kurve wird aber noch die erforderliche Zeit für die Überprüfung einer aufgestellten Lösungshypothese überlagert. Diese Lösungsstrategie B, Aufstellen und Überprüfen einer Lösungshypothese, erwies sich als diejenige mit der höchsten Trefferquote. Vorgehensweisen, die keinen deutlichen Lerneffekt erkennen ließen, waren bis auf wenige Ausnahmen nicht erfolgreich.

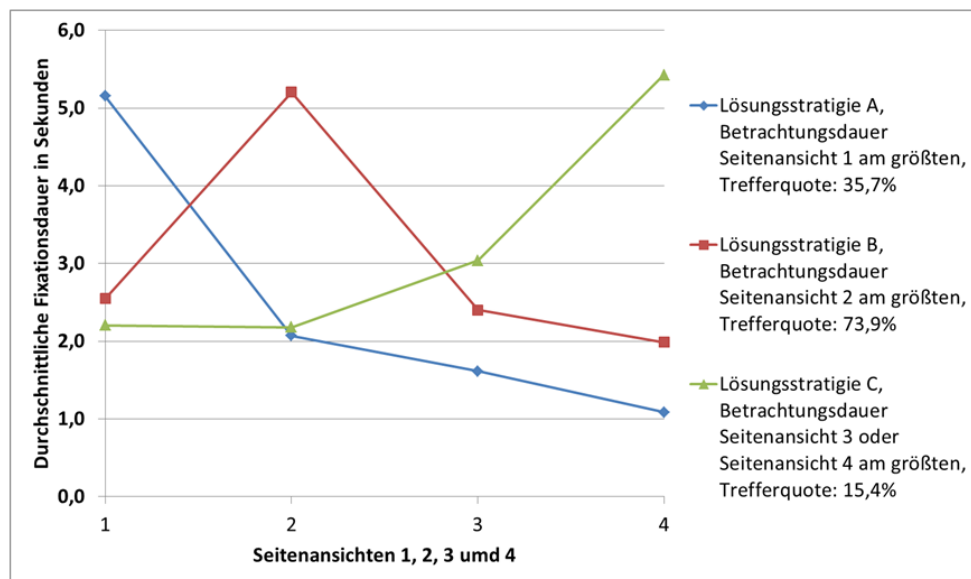


Bild 7: Durchschnittliche Fixationsdauern der vier Seitenansichten bei unterschiedlichen Vorgehensweisen

Personenbezogene Merkmale

Die Auswertung der personenbezogenen Daten ergab, dass ein möglicher vorhandener Technikbezug in der Familie auf die Lösungsfindung keinerlei Einfluss aufwies.

Über alle Gruppen lag die Trefferquote der Probandinnen (9) bei 11,1%, bei den Probanden (40) bei 55%. Von den Abiturienten (17m+5w) fanden 27,3% die richtige Lösung, von den Probanden ohne Abitur (23m+4w) waren es 63,0%. Von den Studierenden mit Migrationshintergrund (9m+4w) konnten 30,8% die korrekte Seitenansicht ermitteln, von den deutschen Studierenden (31m+5w) konnten das 52,8%.

Die Zusammensetzung jeder einzelnen Probandengruppe war in Bezug auf die Grundgesamtheit sicherlich nicht repräsentativ. So waren beispielsweise in Gruppe 2 sowohl die Probandinnen als auch die Abiturienten deutlich überrepräsentiert, in Gruppe 4 fehlten Probandinnen hingegen völlig. Die durchgeführten statistischen Betrachtungen untermauern jedoch die Aussage, dass wenigstens ein Drittel der Studierenden nach

Abschluss des Grundstudiums im Studiengang Maschinenbau nicht in der Lage ist, diese relativ einfache Aufgabe richtig zu lösen.

Bild 8 gestattet einen Vergleich der durchschnittlichen Werte der gesamten Versuchszeit, der Fixationsdauern für die Vorderansicht und die Draufsicht und der Betrachtungszeit der AOI des Experten und der einzelnen Gruppen.

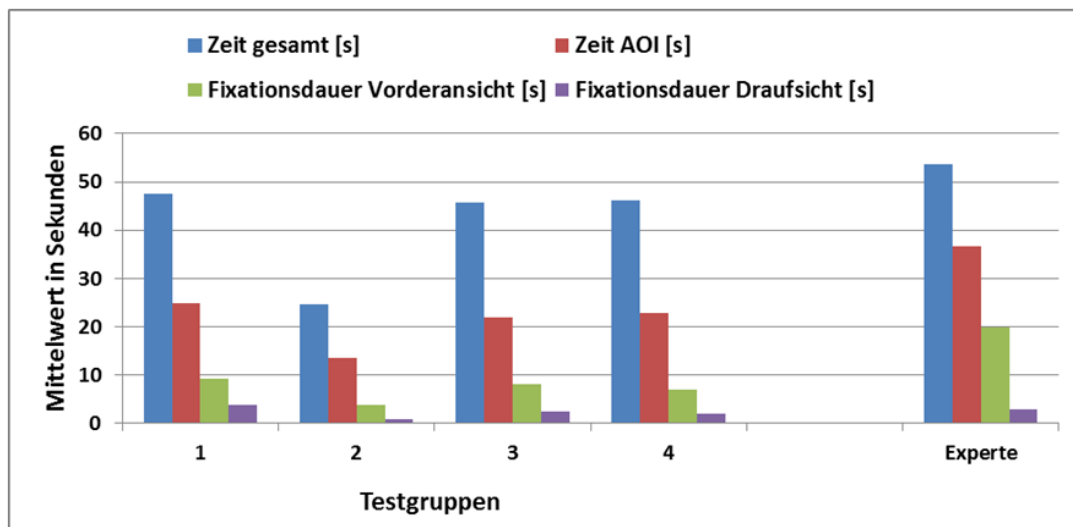


Bild 8: Durchschnittliche Versuchszeit, Fixationsdauern von Vorderansicht und Draufsicht sowie der AOI

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausbildung der Studierenden muss sich wieder stärker auf grundlegende Sachverhalte, Regeln und Zusammenhänge fokussieren. Diese müssen in Übungen verstärkt trainiert werden, damit sich bei den Studierenden hier Sicherheit einstellt.

Die zunehmende Digitalisierung der Gesellschaft und der zunehmende Umgang mit elektronischen Kleinstgeräten führen verstärkt zu einem punktuellen und schnellen Wahrnehmungsverhalten. Ruhe und Gelassenheit im Umgang mit Informationen gehen verloren, ebenso das Denken im Kontext. Somit muss es Aufgabe der Lehre sein, verstärkt ein ruhiges, strukturiertes und auf Zusammenhänge ausgerichtetes Vorgehen zu vermitteln und zu üben. Der ausschließliche Einsatz von CAD-Programmen scheint hierfür nicht geeignet zu sein. Vielmehr sollte wieder verstärkt die manuelle Darstellung mit Papier und Bleistift in die Ausbildung eingebunden werden. Sie ist geeignet, Prozesse zu verlangsamen und unterstützt gleichzeitig die Fokussierung auf Wesentliches.

Insbesondere bei Studentinnen (mit und ohne Migrationshintergrund), aber auch bei einigen Studenten ist zu beobachten, dass sie trotz einer systematischen Vorgehensweise und Berücksichtigung aller Entscheidungskriterien nicht zu einer richtigen Lösung finden. Extrem viele Fixationen und hin und her wandernde Blicke lassen hier eine größere Unsicherheit vermuten. Diese Studierende müssen in den Übungen direkt angesprochen und immer wieder ermutigt werden. Bei einigen Studierenden ist die Studienmotivation zu hinterfragen. Ohne die Bereitschaft, sich einzulassen und zu lernen, ist ein Studienerfolg nicht zu erreichen.

Die Rückmeldung der Studierenden zu den Eyetracking-Untersuchungen fiel sehr positiv aus. Bei der gemeinsamen Auswertung der Analysedaten gewannen diese einen tieferen Einblick in ihr eigenes visuelles Wahrnehmen und konnten so teilweise ihre Vorgehensweise selber interpretieren und sogar eigene Vorschläge zu einer besseren Analyse der technischen Zeichnung geben. Zukünftig soll der individuelle Lernfortschritt der Studierenden in regelmäßigen Abständen durch standardisierte Untersuchungen erfasst werden, um somit vorhandene Defizite bei der Interpretation von technischen Zeichnungen und bildlichen Darstellungen zu erkennen, was von den Studierenden besonders gewünscht wird.

Literatur

- [1] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2013. ISBN-978-3-446-43548-3
- [2] Daryusi, A.; Schröder, N.: *Neue Wege zur Stärkung der Präsentationskompetenz und Teamfähigkeit in der Technikausbildung*. In: lernen & lehren, 28. Jahrgang (2013), Heft 111 (3/2013), S. 127-132, ISSN 0940-7340
- [3] Daryusi, A.; Schröder, N.; Serrer, S.: *Micro-Präsentationen in der CAE-Ausbildung, Didaktische Konzeption einer Lernumgebung und erste Erfahrungen*. KT2013, Shaker Verlag Aachen 2013, Band 15, S. 271-282, ISBN 978-3-8440-2182-0
- [4] Rutz, A.: *Konstruieren als gedanklicher Prozess*. Diss. TU München, 1985
- [5] Poitschke, M.: *Blickbasierte Mensch-Maschine Interaktion im Automobil*. Diss. TU München, 2011

Wissensbasierte Unterstützung des Konstrukteurs an der Schnittstelle CAD-CAE

René Andrae, Peter Köhler

Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Lehrstuhl Rechnereinsatz in der Konstruktion

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Email: rene.andrae@uni-due.de; Internet: <http://www.uni-due.de/cae>

Inhalt: In diesem Beitrag wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, wie bei der CAD-Modellierung die Simulationsgerechtigkeit durch die Anwendung von modernen KBE-Methoden über eine engere, wissensbasierte Verknüpfung der jeweiligen Partialmodelle abgesichert werden kann. Vor der eigentlichen Implementierung in das CAD-System wird relevantes Wissen durch den Anwendungsentwickler mit SysML formalisiert. Dem Konstrukteur wird es auf diese Weise ermöglicht, auch komplexere Simulationen konstruktionsbegleitend durchzuführen. Als Anwendungsbeispiel dient eine integrierte Produktsimulation zum spritzgussgerechten Bauteilentwurf.

Abstract: This paper presents a methodological approach, which focuses how during the CAD modelling the design for simulation is safeguarded through the application of modern KBE-methods. This would be ensured about more closed connection between the respective partial models. Prior to the actual implementation in the CAD system relevant knowledge is formalized by SysML. The designer becomes this way the possibility to perform advanced simulations by himself. As practical example an integrated product simulation in the context of the injection molding part design is shown.

Stichwörter: CAD, CAE, SysML, spritzgussgerechter Bauteilentwurf

Keywords: CAD, CAE, SysML, Injection molding design

1 Einleitung

Eine vollständige Integration und Verknüpfung aller relevanten Teilprozesse der virtuellen Produktentwicklung erfordern qualifizierte Produktmodelle. Die Absicherung des rechnergestützten Konstruktionsprozess erfolgt im Allgemeinen durch analytische oder numerische Berechnungen. Immer mehr wird vom Konstrukteur gefordert, auch fortgeschrittene Simulationen selbstständig durchzuführen. In der Literatur sind verschiedene Richtlinien, wie die VDI-Richtlinie 2211 [1], verfügbar, welche eine methodische Vorgehensweise zur Anwendung von Berechnungsverfahren in Entwicklungs- und Konstruktionsprozessen durch den Konstrukteur beschreiben. Zumeist setzen diese aber schon fortgeschrittene Kenntnisse im Bereich der Berechnung und

Simulation voraus, welche aber oftmals noch nicht vorhanden sind. Ebenso bieten viele CAD-System Hersteller eine integrierte Simulationssoftware an, wobei eine Unterstützung des Konstrukteurs oftmals nur in geringen Maße vorhanden ist.

Numerische Berechnungsverfahren werden hauptsächlich eingesetzt, wenn aufgrund komplexerer Berechnungsmodelle keine mathematisch exakte Lösung gefunden werden kann. Diese erfordern allerdings einen höheren Anteil von Expertenwissen. Dementsprechend sind numerische Berechnungen schwieriger reproduzierbar und oftmals personengebunden. Kompensiert werden kann dies u. a. durch das Standardisieren von Pre- und Postprocessing Abläufen und die Integration von berechnungsrelevanten Wissen in die CAD-Umgebung des Konstrukteurs.

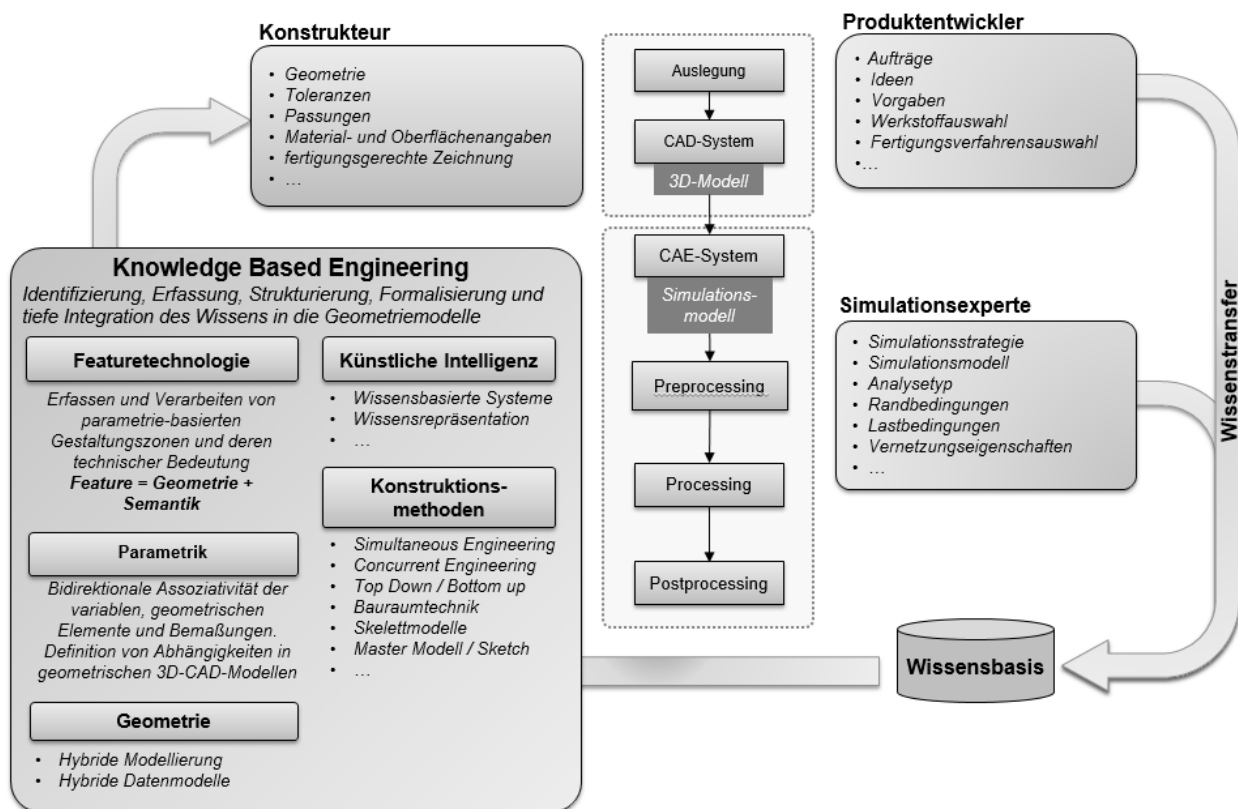


Bild 1: Wissenstransfer zum Konstrukteur

Nachfolgend wird gezeigt wie durch einen Wissenstransfer von Produktentwicklungs- und Simulationsexperten in eine Wissensbasis, der Konstrukteur mittels Knowledge Based Engineering (KBE) in fortgeschrittenen Auslegungs- und Berechnungsprozessen unterstützt werden kann (Bild 1). Dabei wird diese Vorgehensweise in drei Hauptpunkte, das Schaffen einer Wissensbasis, die Systementwicklung mittels SysML und die

Implementierung ins CAD-System unterteilt. Als Anwendungsbeispiel dient eine integrierte Produktsimulation eines spritzgussgerechten Bauteilentwurfs in Siemens PLM NX 10.0.

2 Stand der Technik

Eine Vielzahl von Forschungseinrichtungen beschäftigt sich mit neuen Lösungsansätzen zu einer tiefergehenden Verknüpfung der CAD-CAE-Prozesskette. Wichtige Teilthemen ergeben sich hierbei aus der sog. Schnittstellenproblematik und den fehlenden Möglichkeiten zur Abbildung der Parametrik in neutralen Datenformaten, was eine durchgängige Verknüpfung verhindert [2].

Ein erster Schritt zur Optimierung der CAD-CAE-Prozesskette ist die Verwendung von Mastermodellen, welche ein geometrisches Modell für das CAD und ein idealisiertes Modell für das CAE beinhalten. Damit wird z.B. eine automatisierte Dimensionsreduktion gewährleistet. [3, 4, 5]

Aktuelle Beiträge im Bereich der konstruktionsbegleitenden Simulation befassen sich mit dem Aufbau wissensbasierter FEA-Assistenzsysteme [6], wie auch Methoden zum wissensbasierten Aufbau simulationsorientierter Produktmodelle [7]. Durch diese sollen Konstrukteure bei der Durchführung und bei der Auswertung von Simulationen unterstützt werden.

Hinsichtlich der Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung im Bereich Spritzguss ist der Beitrag von Deng et. al [8] zu nennen. Er entwickelte ein System für eine integrierte spritzgussgerechte Bauteilauslegung. Dabei wurden im Rahmen der CAD-CAE-Kopplung die Softwaresysteme Solid Edge und Moldflow verknüpft. Hier wurden spritzgussgerechte Konstruktionsfeature entwickelt und eine Schnittstelle zwischen den beiden Systemen entwickelt.

3 Methodischer Ansatz

Der Stand der Technik zeigt, dass die Absicherung der Multidiziplinarität und der Händelbarkeit von fortgeschrittenen Simulationen durch den Konstrukteur mit Hilfe von wissensbasierten Unterstützungssystemen ein aktuelles Forschungsthema war und ist.

Allerdings fehlt ein allgemeingültiger Ansatz welcher eine Vorgehensweise zur Erstellung eines solchen Systems vorgibt und den Berechnungsexperten wie auch den Konstrukteur von vornherein mit einbezieht.

Der in diesem Beitrag präsentierte Ansatz zielt darauf ab, den Konstrukteur durch moderne KBE-Methoden an der Schnittstelle CAD-CAE zu unterstützen. Dazu wird eine dreistufige Vorgehensweise zur Entwicklung eines wissensbasierten Unterstützungssystems aufgezeigt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Systementwicklung. Diese wird zwischen den klassischen Meilensteinen der Entwicklung der Wissensbasis und der Implementierung in die CAD-CAE-Umgebung eingeordnet. Ausgangspunkt ist hier, dass der Konstrukteur seine Sicht auf das Modell, neben dem Berechnungsexperten, frühzeitig mit einfließen lässt und das später zu implementierende System gemeinsam entwickelt wird. Damit ist eine effiziente Verschmelzung beider Sichten gewährleistet. Dargestellt ist der Ansatz in Bild 2.

Der erste Punkt ist die Erstellung einer Wissensbasis. Die Wissensakquisition, die natürlich auch problemspezifische Besonderheiten berücksichtigen muss, ist eine Voraussetzung für die Qualifizierung des Modellbildungsprozesses. Allgemein liegt Wissen in zwei verschiedenen Formen vor. Das explizite Wissen, welches als geschriebenes Wissen verstanden wird, liegt in Richtlinien, Normen, Regelwerken, etc. vor. Enthält eine Richtlinie relevantes Wissen, kann dieses in formalisierter Form in einer Wissensbasis zusammengefasst werden. Als implizites Wissen wird Erfahrungswissen verstanden. In diesem Falle das Wissen des Berechnungsexperten. Um dieses in einer Wissensbasis zusammenzufassen muss dieses erst in explizites Wissen transformiert werden. Eine Möglichkeit dazu ist die Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Über diese können mögliche Fehlerquellen in der Modellbildung ermittelt und entsprechende Regeln zur Fehlervermeidung aufgestellt werden. Das Wissen wird über fehlerrelevante Zusammenhänge in FMEA-Formularen gesammelt. Dabei stellt eine FMEA oft die erste Explikation von impliziten Wissen dar. Zur Formalisierung des expliziten Wissens wird in diesem Beitrag die modellbasierte Systementwicklung angewendet. Genutzt wird dazu die Modellierungssprache SysML. Diese ist eine grafische Modellierungssprache, welche auf UML basiert und ihre Anwendung bei der Modellierung komplexer Systeme findet. Die Diagramme, welche in SysML definiert werden, teilen sich in Struktur-, Anforderungs-, und Verhaltensdiagramme auf. Für eine ausführliche Beschreibung wird auf existierende Literatur [9, 10] wie verweisen. Das Wissen, welches jetzt in explizierter und formalisierter Form vorliegt, kann nun in die CAD-Umgebung implementiert werden.

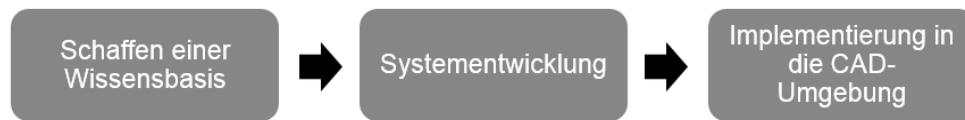


Bild 2: Ansatz zur Unterstützung

In Abhängigkeit der Integrationstiefe in das CAD-System können unterschiedliche Methoden genutzt werden. Wobei, ab einen gewissen Punkt, die Schnittstellenprogrammierung und der Aufbau wissensbasierter Systeme unumgänglich sind. Ebenso ist der Einsatz der Techniken anwendungsspezifisch und erfordert eine weitergehende Einteilung nach bestimmten Kriterien, wie die Integrationstiefe oder eine gewünschte Wissensrepräsentationsform. Die Möglichkeiten einer solchen Einteilung zur informationstechnischen Umsetzung als Unterstützungssystem im CAD-System ist in (EEE16 Andrae Köhler) dargestellt.

4 Umsetzung und Validierung des Ansatzes

Im Folgenden wird der dargestellte Ansatz an einer beispielhaften Umsetzung validiert. Dieses Beispiel ist in der fehlenden Unterstützung des Konstrukteurs im CAD-System beim spritzgussgerechten Bauteilentwurf begründet. Im Rahmen eines von der deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten Projektes (KO 160\15-1) wird eine Methode zur integrierten Produktsimulation entwickelt, vgl. Bild 3. Wesentliche Ziele sind die Ermöglichung einer wissensbasierten Beurteilung der Fertigungsmöglichkeiten und der Werkstoffvorauswahl für eine sichere und objektive Produktplanung. Ebenso soll eine Beschleunigung der Formteilgestaltung und –auslegung durch die Reduzierung erforderlicher Optimierungsschritte durch den Einsatz von wissensbasierten Systemen erreicht werden. Im Rahmen der Systementwicklung wird Visual Paradigm (Visual Paradigm International) verwendet. Für die spätere Implementierung findet ein Softwareverbund von Siemens NX 10 (Siemens), Sigmasoft (Sigma Engineering GmbH) und Matlab (MathWorks) Anwendung. In NX wird das Bauteil modelliert und ein Teil des Preprocessings durchgeführt. In Sigmasoft findet das eigentliche Processing statt. Matlab wird im Rahmen des Postprocessing verwendet. Dies ist begründet mit fortgeschrittenen Möglichkeiten der (wissensbasierten) Ergebnisauswertung und Ergebnistrückführung.

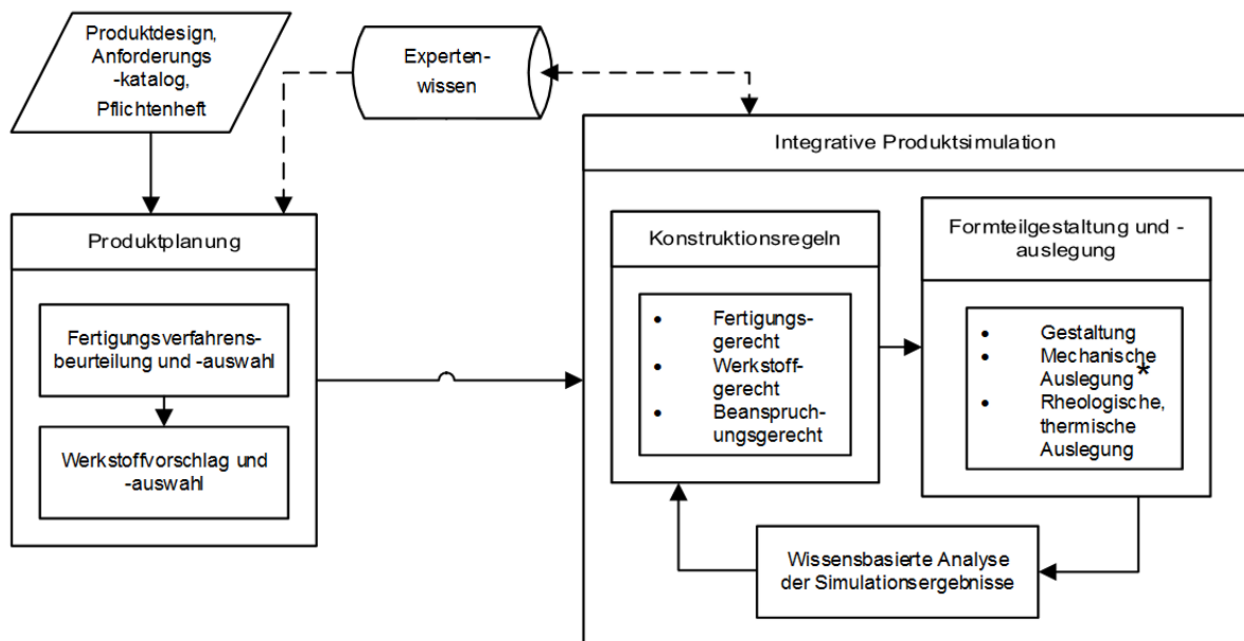


Bild 3: Integrative Produktsimulation

Das Projekt teilt sich auf drei Module auf, vgl. Bild 4. Das Modul 2 beinhaltet:

- die Unterstützung und der Formteilkonstruktion durch in die CAD-Umgebung implementierte spritzgusspezifische Konstruktionsfeature,
- die Überwachung der Fertigungsgerechtigkeit durch spritzgussgerechte Analysefeature,
- die Entwicklung neuer spritzgussgerechter Simulationsfeature und
- die Modifizierung bzw. Entwicklung von Analyse-Feature zur Qualitätssicherung.

Im Rahmen dieses Beitrags wird die Systementwicklung am Beispiel der spritzgussgerechten Konstruktions- und Simulationsfeature aufgezeigt. Alle Feature werden mittels NXOPEN in Siemens NX 10 implementiert. Zur Verdeutlichung sind die Abhängigkeiten der Konstruktions- und Simulationsfeature in Form eines SysML Anwendungsfalldiagramm in Bild 5 dargestellt. Die Konstruktionsfeature, welche der Geometrieerzeugung dienen, sind abhängig von Konstruktionsgrenzen, welche zuvor in der Wissensbasis zusammengefasst wurden.

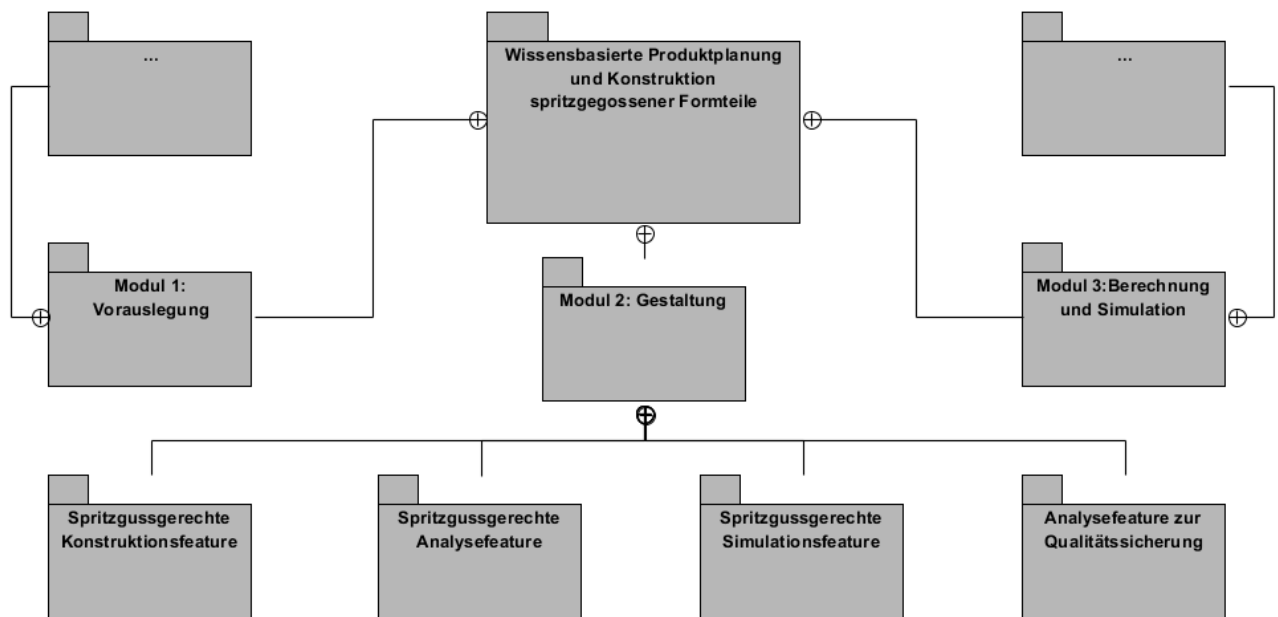


Bild 4: Aufbau des Projektes

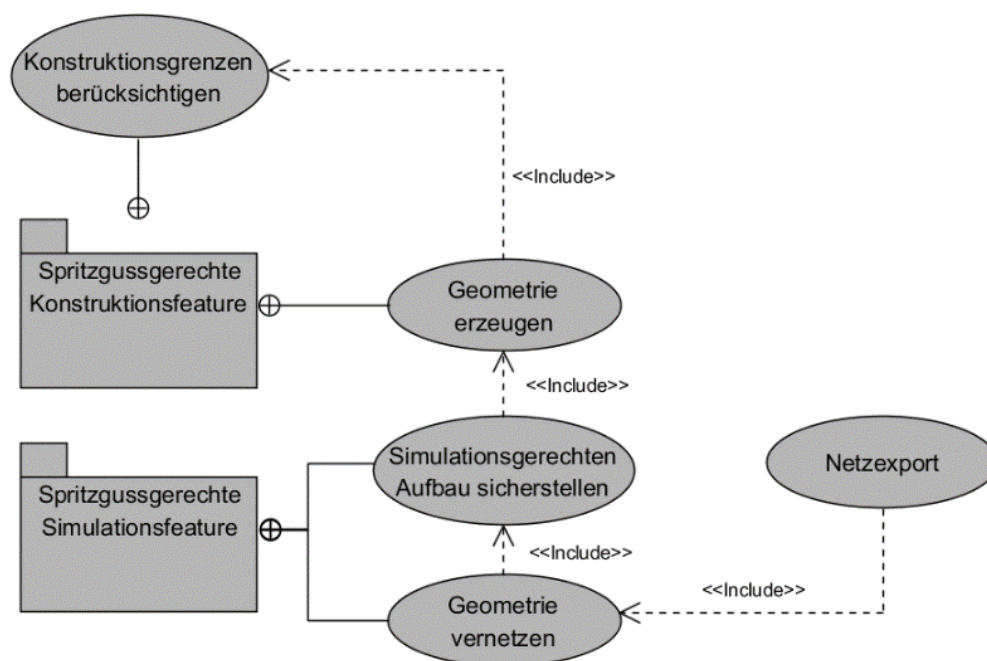


Bild 5: Abhängigkeiten spritzgussgerechte Konstruktions- und Simulationsfeature

Der simulationsgerechte Aufbau wird in Abhängigkeit von der Geometrie im Wesentlichen durch zwei Arten sichergestellt. Im ersten Fall werden Konstruktionsfeature eingesetzt, in denen schon semantische Informationen implementiert sind. Das heißt, dass z. B. in einem Rippfeature die Vernetzung schon integriert ist. Im zweiten Fall wird davon ausgegangen, dass die Vernetzungen erst nachträglich über selbst entwickelte

Vernetzungsfeature durchgeführt werden sollen. Es kann vorweg genommen werden, dass die gesamte Vernetzung des Bauteils später in Siemens NX 10 durchgeführt wird. Die Systementwicklung erfolgt durch die Sammlung der Anforderungen der einzelnen Module. Im Bereich der spritzgussgerechten Konstruktion lassen sich diese vor allen Dingen aus bekannten Gestaltungsrichtlinien ableiten. Die Abläufe der zu entwickelnden Konstruktionsfeature lassen sich am sinnvollsten in SysML als Aktivitätsdiagramme darstellen.

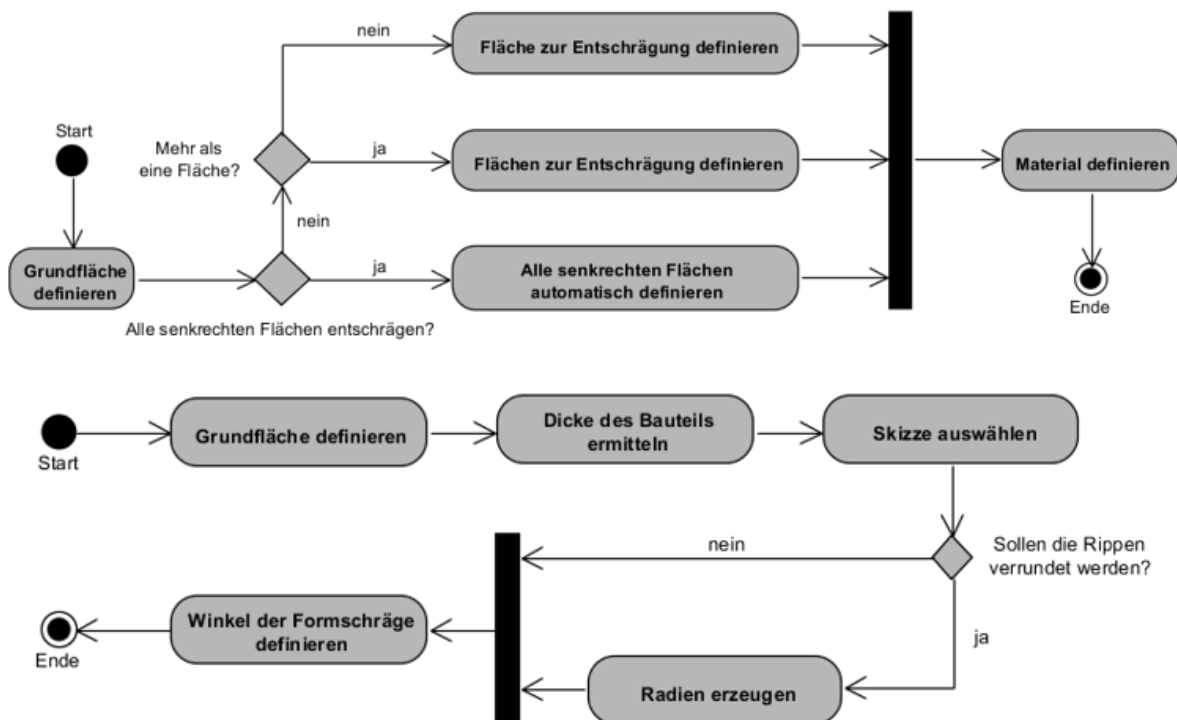


Bild 6: Rippenfeature (oben), Entformungsschrägenfeature (unten)

In Bild 6 ist dies vereinfacht für ein skizzenbasiertes Rippenfeature (Aktivitätsdiagramm oben) und ein Entformungsschrägenfeature (Aktivitätsdiagramm unten) dargestellt.

Im Bild 6 werden Möglichkeiten zur Verknüpfung einzelner Diagramme mittels SysML deutlich. Das Entformungsschrägenfeature ist abhängig vom Material, welches zuvor im Rahmen der Materialauswahl im Modul 1 definiert wurde. Der nächste Schritt bei den dargestellten Beispielen ist, die gezeigten Aktivitätsdiagramme im Weiteren auszufüllen. Dabei wurden zu meist Unterdiagramme definiert.

Ist die Modellbildung abgeschlossen wird das Modell in SIGMASOFT rheologisch simuliert. Eine vordefinierte Schnittstelle zwischen NX und SIGMASOFT ist nicht vorhanden und wurde dementsprechend entwickelt. Die Übertragung der

Netzinformationen erfolgt über eine modifizierte ANSYS-Datei (Knoten und Elemente). Dieser Schritt wurde gewählt, da sowohl NX als auch SIGMASOFT über eine ANSYS-Schnittstelle verfügen. Neben den geometrischen Informationen des Netzes werden weitere Simulationsdaten über eine Simulationsmetadaten-Datei im JSON Datenformat übertragen.

Ist die Simulation abgeschlossen sind verschiedene Szenarien, hinsichtlich eines ungleichmäßigen Füllens und einer festen Angussposition bedingt durch den Bauraum, möglich. Zum einen können Fließhilfen- und Barrieren automatisch erzeugt werden. Diese werden auf zurückgeführte Punkte definiert, welche bestimmte Kennwerte an der Fließfront erfüllen. Zum anderen ist das Spritzgussbauteil nicht nur parametrisch, sondern auch unter Beachtung bestimmter Konstruktionsgrenzen aufgebaut, welche bei einer Parameteroptimierung ein gewisses Spiel erlauben.

In Bild 7 ist die Implementierung in Siemens NX 10 dargestellt, welcher im Rahmen der Laufzeit des Projektes stetig erweitert wird.

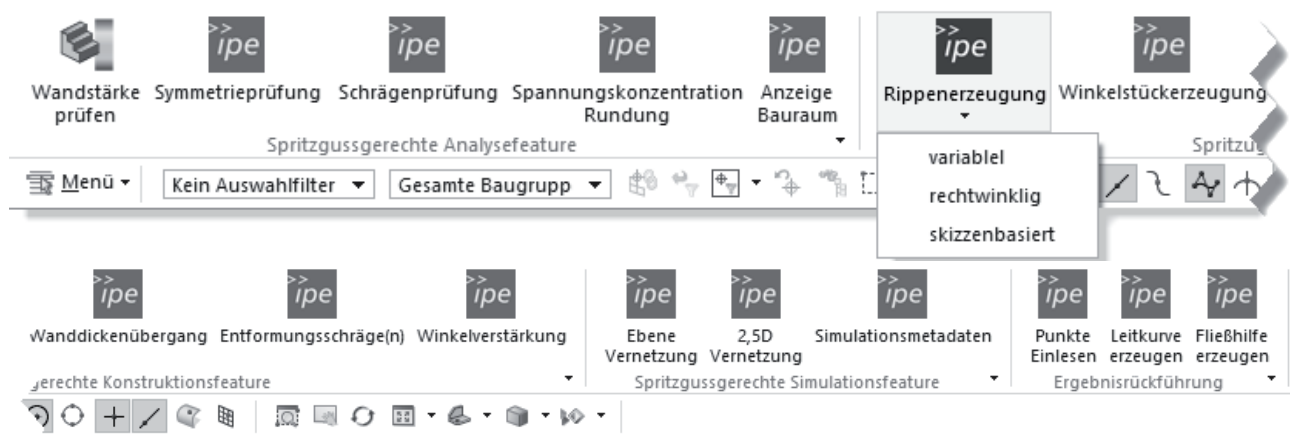


Bild 7: Ribbon Interface in Siemens NX 10

5 Fazit

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz vorgestellt, wie die Systementwicklung mittels SysML die Entwicklung wissensbasierter Unterstützungssysteme an der Schnittstelle CAD-CAE unterstützt. Der Fokus liegt hierbei auf konstruktionsbegleitende Simulationen. Validiert wurde der Ansatz anhand einer integrativen Produktsimulation im Rahmen des spritzgussgerechten Bauteilentwurfs.

6 Danksagung

Die in dieser Veröffentlichung dargestellte Forschung wird durch finanzielle Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ermöglicht, welcher hiermit besonderer Dank ausgesprochen wird. (KO 1620/15-1)

Literatur

- [1] VDI Richtlinie 2211 Blatt 2: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Berechnungen in der Konstruktion, VDI-Gesellschaft Produkt-und Prozessgestaltung, 2003.
- [2] Kesselmanns, Christoph: *Höherwertige Konstruktionsobjekte für CAD-Prozesse*. Dissertation Universität Duisburg-Essen. 2014. Göttingen: Cuvillier Verlag
- [3] Lee, S. H. 2005: A CAD–CAE integration approach using feature-based multi-resolution and multi-abstraction modelling techniques. In: *Computer-Aided Design*, 37 (2), S. 941–955
- [4] Andrae, René; Köhler, Peter: *Methoden zur Absicherung simulationsgerechter Produktmodelle*. Dresden, Tudpress Verlag der Wissenschaften GmbH, 2016, S. 403 -418, ISBN: 978-3-95908-062-0
- [5] Dungs, Sascha; Köhler, Peter; Lupa, Norman: *Das Mastermodell als Basis teilautomatisierter Simulationen*. ProduktDaten Journal, 1, 2006.
- [6] Kestel, Philipp; Wartzack, Sandro: *Wissensbasierter Aufbau konstruktions-begleitender Finite-Elemente-Analysen durch ein FEA-Assistenzsystem*. Dresden, Tudpress Verlag der Wissenschaften GmbH, 2016, S. 315 -329, ISBN: 978-3-95908-062-0
- [7] Klemme, Uwe: *Methoden zum wissensbasierten Aufbau simulationsorientierter Produktmodelle*. Dissertation Universität Duisburg-Essen. Göttingen: Cuvillier Verlag. 2015.
- [8] Deng, Y.-M.; Lam, Y.-C.; Tor, S. B.; Britton, G. A.: *A CAD-CAE Integrated Injection Molding Design System*. *Engineering with Computers*, 2002, Auflage 18, London, Springer Verlag. S. 80-92.
- [9] Alt, Oliver: *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML*, München, Carl Hanser Verlag. 2012.
- [10] Martha, Alexander: *Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung*. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2015.

Herleitung eines verallgemeinerten CE-Konformitätsbewertungsprozesses

**Dipl.-Ing. Joachim Langenbach, Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller,
Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel**

Technische Universität Clausthal, Institut für Maschinenwesen

Robert-Koch-Str. 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Email: langenbach@imw.tu-clausthal.de; Internet: <http://www.imw.tu-clausthal.de>

Inhalt: Die aktuell geltenden 25 CE-Richtlinien werden analysiert. Aus den Ergebnissen erfolgt die Ableitung eines allgemeinen CE-Konformitätsbewertungsprozesses

Abstract: The current 25 CE-directives will be analysed. The results are combined into a generalised process to develop CE compliant products

Stichwörter: Entwicklungsmethodik, CE, New Approach, Rechtskonformität

Keywords: Design Methods, CE, New Approach, Compliance

1 Einleitung

Eine Grundanforderung an neue Produkte ist deren Rechtskonformität. Um Änderungskosten so gering wie möglich zu halten, sollte im Entwicklungsprozess die Rechtskonformität kontinuierlich betrachtet werden. Jede Region oder jedes Land stellt hier jedoch eigene Systeme und Regelungen auf, so dass keine generelle Aussage, wie die Rechtskonformität eines Produktes sichergestellt werden kann, möglich ist. Der Artikel beschränkt sich daher darauf, einen generalisierten Prozess für die Rechtskonformität im Europäischen Binnenmarkt aufzuzeigen.

In der Europäischen Union wurde mit dem „New Approach“ eine einheitliche Regelung für das Inverkehrbringen von Produkten im gemeinsamen Binnenmarkt geschaffen. Den Kern der Regeln bilden CE-Richtlinien, die über Gesetze in nationales Recht übernommen werden (s. Bild 1). Fortlaufend veröffentlicht die EU in ihrem Amtsblatt eine Liste mit harmonisierten Normen, die für eine bestimmte Richtlinie eine Konformitätsvermutung auslösen. Die Konformitätsvermutung sagt aus, dass eine CE-Richtlinie eingehalten wird, wenn alle zutreffenden, harmonisierten Normen eingehalten werden. In der Regel werden die harmonisierten Normen auf europäischer Ebene erarbeitet und anschließend

zwangsläufig in die nationalen Normenwerke übernommen. Es können aber auch internationale Normen als harmonisierte Normen benannt werden.

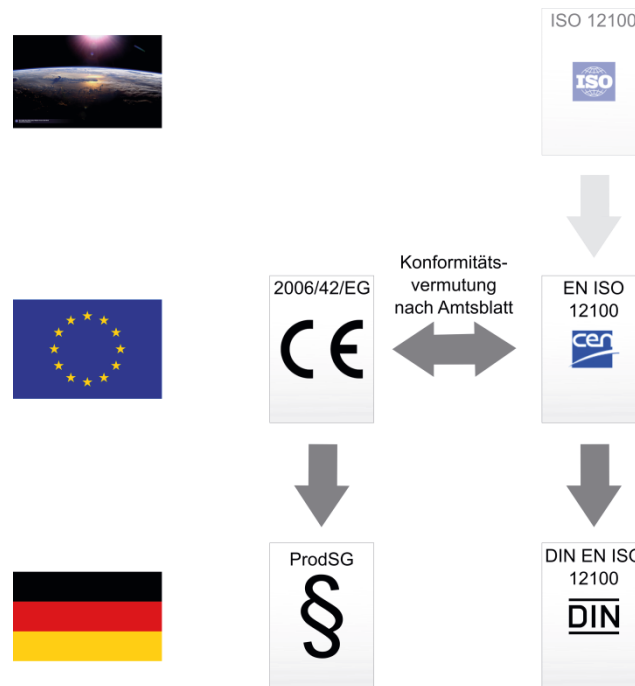


Bild 1: Zusammenhänge von CE-Richtlinien, nationalen Gesetzen und Normen im Rahmen des New Approach

Aktuell gibt es nach [1] 25 Richtlinien, die sich in die zwei Arten Querschnittsrichtlinien und Produktrichtlinien klassifizieren lassen. Querschnittsrichtlinien betreffen mehrere Produkte unterschiedlicher Kategorien. So ist zum Beispiel die Richtlinie zur Elektromagnetischen Verträglichkeit oder die Chemikalienregelung REACH unabhängig von spezifischen Produktarten. Produktrichtlinien nehmen hingegen eine Gruppe gleichartiger Produkte in den Fokus. So zum Beispiel die Spielzeugrichtlinie oder die Richtlinie für Warmwasserheizkessel. Der grundsätzliche Aufbau der Richtlinien ist dabei jedoch immer gleich. Jede Richtlinie hat die folgenden wichtigen Inhalte:

1. Gültigkeitsbereich (meist Artikel 1)
2. Erläuterung des Konformitätsbewertungsprozesses (mittels Modulen)
3. Einzuhaltende Mindestanforderungen (meist Anhang I)

Das Vorgehen zur Bewertung der Rechtskonformität wird durch standardisierte Module definiert. In Bild 2 ist aufgezeigt, welche Module durch die EU-Kommission definiert sind und welche Phase sie adressieren. Allerdings beinhaltet keines der Module detaillierte

Vorgehensweisen für die Designphase. Neben einer Baumusterprüfung durch eine benannte Stelle (Modul B) fordert Modul H beispielsweise lediglich, dass das Qualitätsmanagementsystem auch die Entwicklung mit einschließen muss. Ein Vorgehensmodell für die Sicherstellung der Rechtskonformität lässt sich so nicht ableiten.

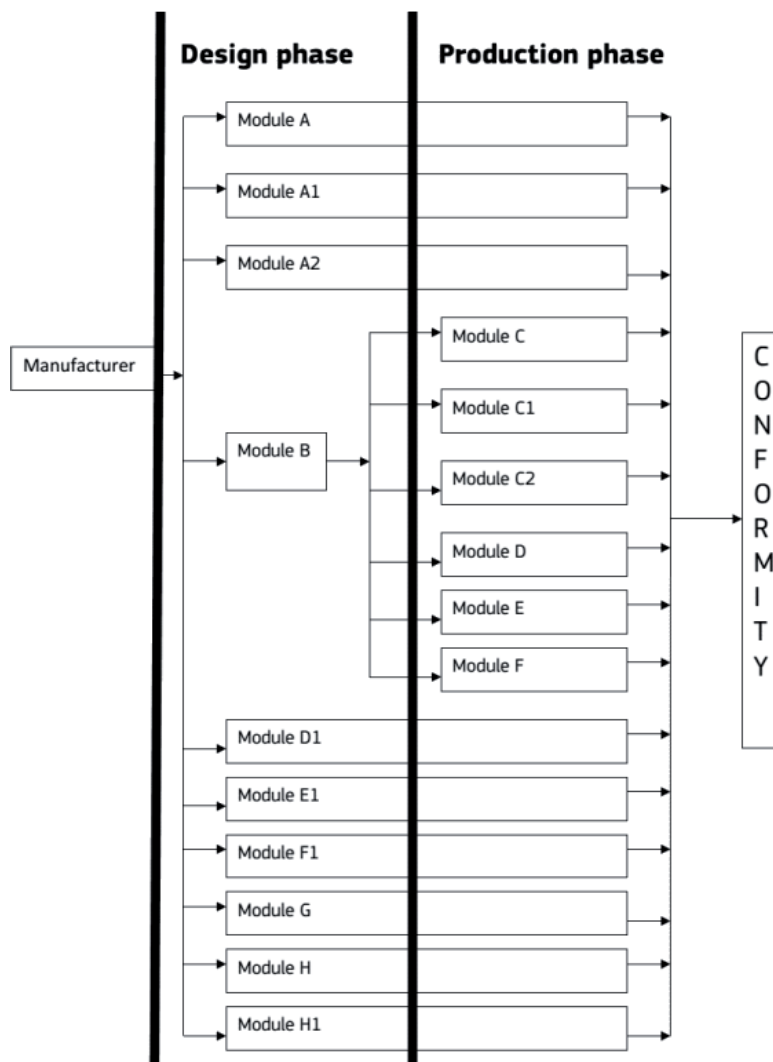


Bild 2: Einordnung der Konformitätsbewertungsmodule nach [2]

2 Herleitung eines generalisierten CE-Konformitätsbewertungsprozesses

Für die Herleitung eines allgemeingültigen CE-Konformitätsbewertungsprozesses, werden zunächst alle Richtlinien einzeln analysiert und daraus ein, für die jeweilige Richtlinie, spezifischer Prozess abgeleitet. Das Ziel besteht darin, aus den speziellen Prozessen schließlich einen allgemeinen Bewertungsprozess abzuleiten. Als alternatives Vorgehen, erfolgt die Auswertung der erforderlichen technischen Dokumentation, die in jeder

Richtlinie aufgeführt ist. Aus den erforderlichen Dokumenten können notwendige Arbeitsschritte zu deren Erstellung abgeleitet werden. Die Arbeitsschritte ergeben schließlich einen Prozess.

Analyse der Richtlinien und Ableitung eines verallgemeinerten Prozesses

Aus der Analyse jeder Richtlinie entsteht ein Prozess, wie ihn Bild 3 für die Richtlinie Persönliche Schutzausrüstung (PSA; Richtlinie 89/686/EWG) zeigt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, sind für PSA die Anforderungen in Anhang II sowie die Anforderungen aus harmonisierten Normen einzuhalten. Für die Konformitätsbewertung sind die technischen Unterlagen nach Anhang II zu erstellen, die Pläne, Berechnungen sowie eine Informationsbroschüre beinhalten. Anschließend ist nach verschiedenen Kriterien ein Bewertungsverfahren auszuwählen und nach Abschluss die CE-Kennzeichnung anzubringen.

Dieser Prozess ist jedoch gerade im Bereich der Entwicklung nicht ausreichend detailliert. Dies trifft auch auf die weiteren speziellen Prozesse zu, so dass aus den speziellen Prozessen kein verallgemeinerter Prozess mit ausreichender Aussagekraft für die Entwicklung abgeleitet werden kann.

Analyse der technischen Dokumentation und Ableitung eines verallgemeinerten Prozesses

Als Alternative erfolgt daher die Auswertung der vorgeschriebenen technischen Dokumentation der jeweiligen Richtlinie. Die notwendigen Arbeitsschritte zur Erstellung der Dokumente ergeben schließlich einen Prozess, der je nach Vorgabe angepasst werden kann. Wichtige Dokumente in den Richtlinien sind:

- Anforderungsliste
- Liste mit anzuwendenden und angewendeten Normen und Standards
- Bei Abweichungen von Normen, Beschreibungen der alternativen Lösungen
- Prüfungen, ob die Anforderungen eingehalten werden (z.B. Prototypen, Tests, Messungen, ...)
- Risikoanalyse
- Liste mit erforderlichen Maßnahmen zur Risikominimierung

Selbstverständlich ist eine, für den Anwender, leicht verständliche Bedienungsanleitung zu erstellen. Bild 4 zeigt, wie häufig Richtlinien die einzelnen Dokumente fordern.

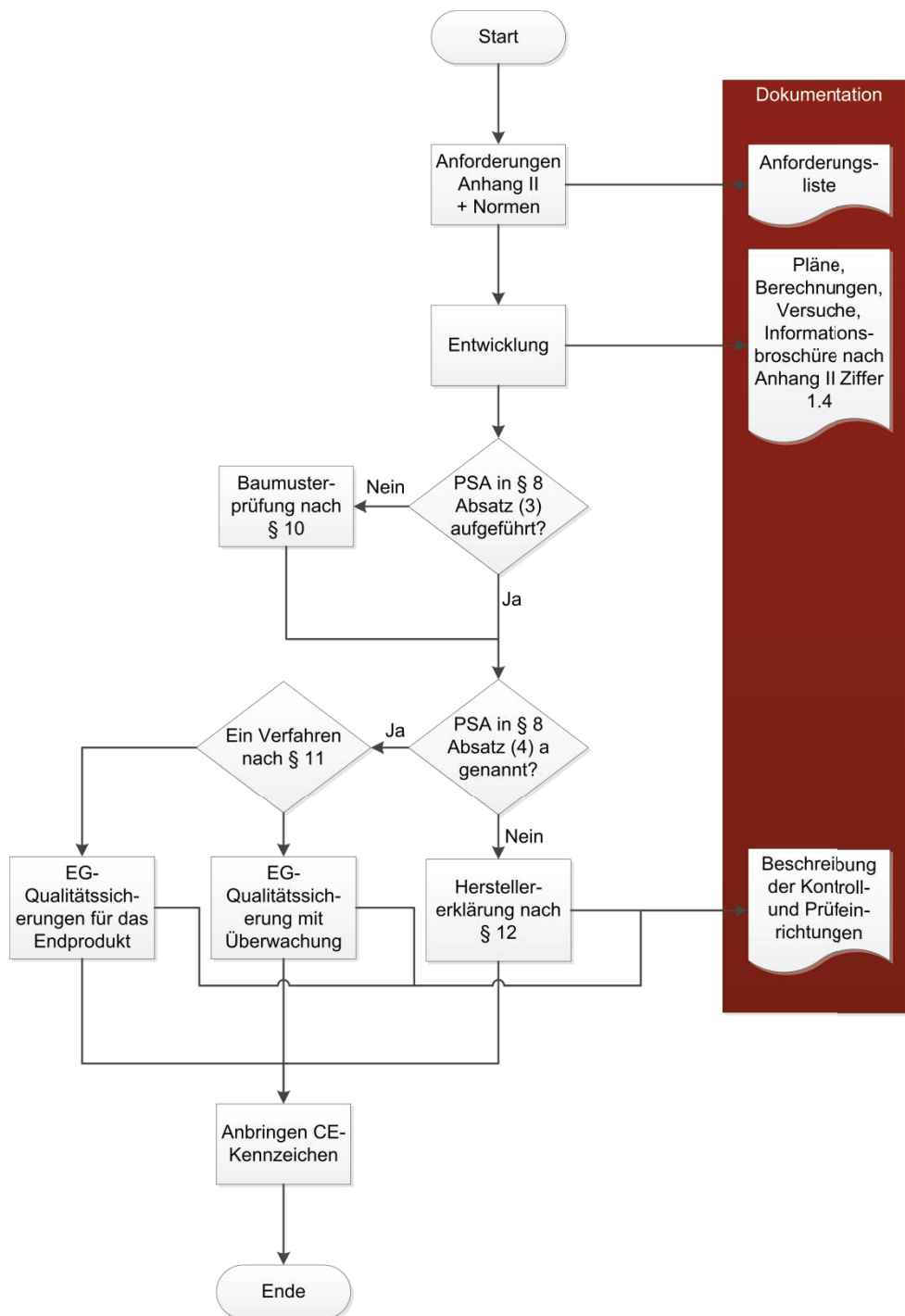


Bild 3: Beispiel eines speziellen Prozesses für die Richtlinie 89/686/EEG - Persönliche Schutzausrüstung

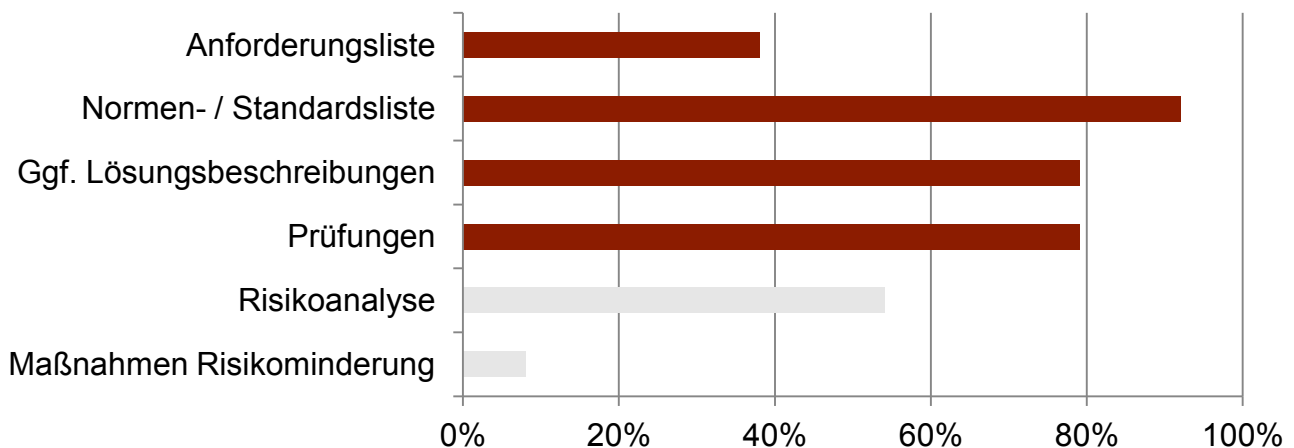


Bild 4: Häufigkeit der Nennung einzelner Dokumente in den analysierten Richtlinien

In Bild 5 sind die, mit den Dokumenten korrelierenden Arbeitsschritte, in einem Prozessmodell dargestellt. Anknüpfungspunkt an vorhandene Entwicklungsprozesse wie bspw. die VDI2221 ist die Anforderungsliste. Um diese zu vervollständigen sind die zutreffenden CE-Richtlinien zu recherchieren und zu pflegen, warum sie zutreffen oder nicht. Diese Informationen werden in der Richtlinien- und Normenübersicht abgelegt. Anschließend erfolgt die Suche nach zu diesen Richtlinien harmonisierten Normen, die ebenfalls mit Entscheidung (zutreffend, nicht zutreffend) und Begründung in die Richtlinien- und Normenübersicht aufgenommen werden. Die Anforderungen aus den anzuwendenden Richtlinien sind in der Anforderungsliste mit Quelle zu vermerken. Sollte im Verlaufe des Projektes von Normen abgewichen werden, sind diese Abweichungen mit den verwendeten Lösungen zu dokumentieren. Die bisher genannten Schritte bilden den oberen Regelkreis. Dieser wird hauptsächlich durch Änderungen in der Anforderungsliste oder an den Regelwerken (CE-Richtlinien, Normen, Gesetze, ...) selbst angestoßen. Nach Bild 4 ist zu empfehlen diese Schritte unabhängig von den angewendeten Richtlinien, immer auszuführen. Die Einhaltung der Anforderungen ist selbstverständlich mit geeigneten Mitteln zu prüfen. Dies wird im Modell nicht explizit dargestellt.

Wird zusätzlich eine Risikoanalyse gefordert, ist es auch empfehlenswert eine Liste mit Maßnahmen zur Risikominderung zu führen, auch wenn diese nicht explizit verlangt wird. In Bild 5 ist die Risikoanalyse in die Arbeitsschritte Risikoermittlung und Risikobeurteilung aufgeteilt. Die drei Arbeitsschritte bilden den unteren Regelkreis. Dieser wird hauptsächlich durch Änderungen am Produkt angestoßen, da nur mit Hilfe der konkreten

Gestaltung eine Beurteilung vorgenommen werden kann. Für welche Richtlinien der untere Regelkreis erforderlich ist, kann einer Matrix (s. Tabelle 1) entnommen werden.

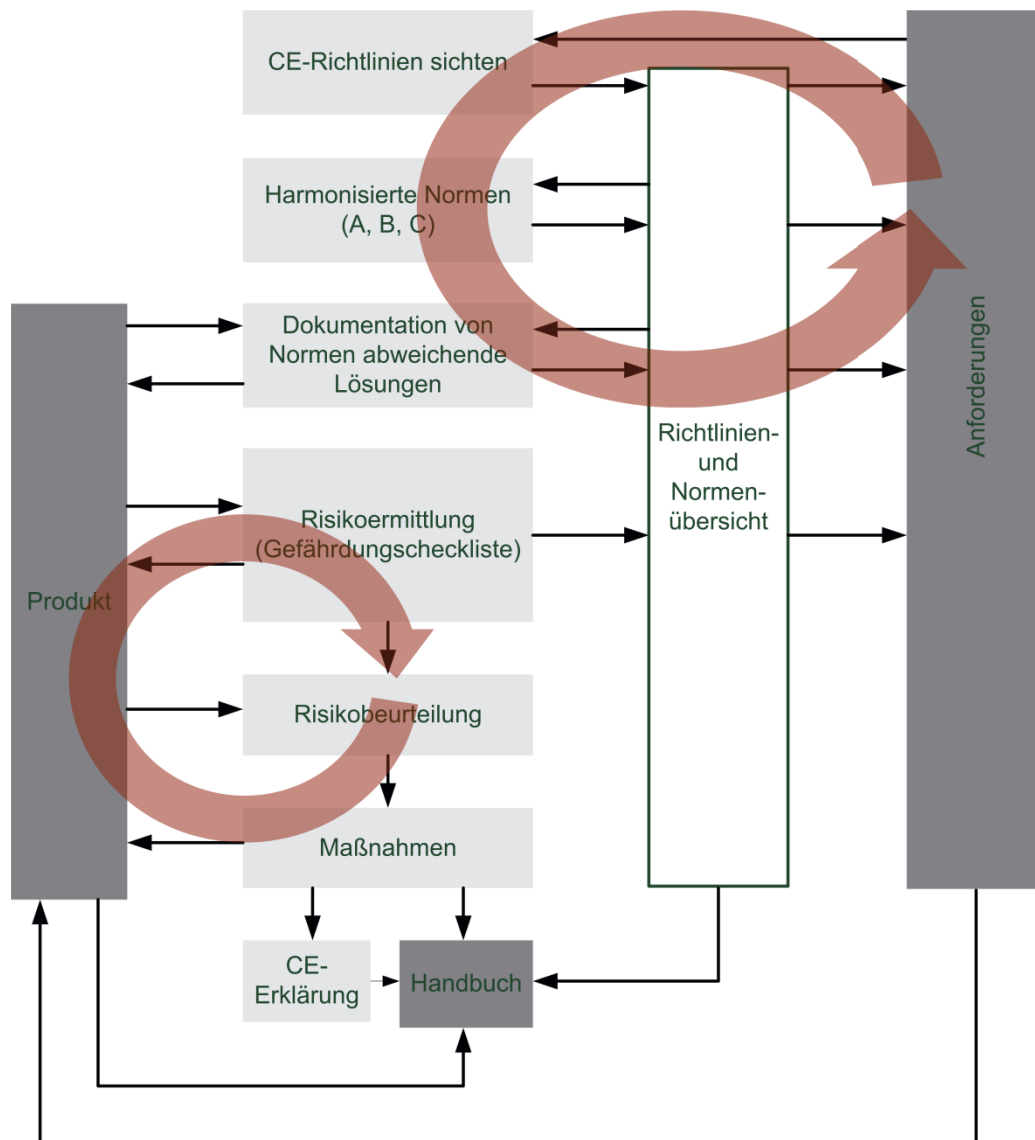


Bild 5: Generalisierter CE-Konformitätsbewertungsprozess

3 Zusammenfassung

Durch die Analyse der in CE-Richtlinien geforderten technischen Dokumente konnte ein allgemeiner Konformitätsbewertungsprozess abgeleitet werden. Ferner konnte aufgezeigt werden, dass immer eine Liste mit anzuwendenden Richtlinien- und Normen geführt werden sollte. Es ist zu empfehlen in dieser Liste auch die Begründungen für die Anwendung oder nicht Anwendung der Einträge zu pflegen. Zusammen mit der Dokumentation von Normen abweichender Lösungen ergibt sich der obere Regelkreis.

Durchläufe des oberen Regelkreises werden hauptsächlich durch Änderungen an den Anforderungen oder den Regelwerken ausgelöst.

Tabelle 1: Auswahlmatrix für notwendige Arbeitsschritte pro Richtlinie (* - Nur bei Sicherheitsbauteilen mit Modul B)

Richtlinie	89/686/EWG	90/385/EWG	92/42/EWG	93/15/EWG	93/42/EWG	2014/34/EU	2013/53/EU	2014/33/EU	2014/68/EU	98/79/EG	2014/53/EU	Ver. 2016/424	2000/14/EG	2014/32/EU	2014/30/EU	2006/42/EG	2014/35/EU	2013/29/EU	2014/31/EU	2009/48/EG	2009/105/EG	2009/125/EG	2009/142/EG	2011/65/EU
Anforderungsliste	x					x			x			x			x	x	x	x	x					
Standardsübersicht	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Ggf. Lösungsbeschr.		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x		x	x	x	
Risikoanalyse					x	x		*	x	x		x			x	x	x	x	x	x		x		
Schutzmaßnahmen					x											x								

Die Risikoanalyse, bestehend aus den Arbeitsschritten Risikoermittlung und Risikobeurteilung, ist hingegen nur in 50% der Richtlinien gefordert. Sollte jedoch eine Risikoanalyse gefordert sein, empfiehlt sich auch die Pflege einer Liste mit Maßnahmen zur Risikominderung. Diese drei Arbeitsschritte bilden den unteren Regelkreis. Dieser interagiert hauptsächlich mit der konkreten Gestaltung des Produktes. Änderungen an dem Produkt können daher neue Durchläufe erfordern. Gleichzeitig hat der Prozess Auswirkungen auf das Benutzerhandbuch, in dem mindestens die Schutzmaßnahmen erläutert werden müssen.

Literatur

- [1] Europäische Kommission: Richtlinien. http://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking/manufacturers/directives_de, zuletzt abgerufen am 18.07.2016
- [2] Europäische Kommission: The 'Blue Guide' on the implementation of EU product rules 2016. Brüssel, 05.04.2016.
<http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/16210/attachments/1/translations/en/renditions/native>

Methoden und Werkzeuge zur Nutzung von CT-Daten im CAE-Umfeld

Dirk Hofmann, Christine Schöne, Ralph Stelzer

Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD (KTC)

George-Bähr-Str. 3c, 01062 Dresden

Email: {Dirk.Hofmann, Christine.Schoene, Ralph.Stelzer}@tu-dresden.de

Inhalt: Im vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, wie CT-Daten in die Produktentwicklung integriert und durch geeignete Werkzeuge anwendungsorientiert genutzt werden können.

Abstract: The paper presents an approach for integrate CT data into product development processes and an application orientated use by suitable tools.

Stichwörter: industrielle Computertomographie (iCT), Produktentwicklung, CT-Daten, CAE-Anwendung

Keywords: x-ray computer tomography (XCT), product development, CT data, CAE application

1 Einleitung

Die steigende Komplexität von Produkten erfordert effiziente und rechnerunterstützte Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung. Dabei kommen verstärkt Daten und Informationen aus der Qualitätssicherung zur Anwendung. In diesem Zusammenhang geht der Trend hin zu automatisierten zerstörungsfreien Mess- und Erfassungsgeräten wie der industriellen Nutzung der Computertomographie (iCT). Mit dieser Technologie ist es möglich, 3D-Informationen von inneren Geometrien und Strukturen zu bestimmen und innerhalb der Produktentwicklung (CAE) gezielt für z.B. konstruktive (CAD) und numerische Fragestellungen (FEM, CFD etc.) anzuwenden. Die Geometrie und zusätzliche Informationen sollen im CAE-Umfeld verlustfrei und unmittelbar (z.B. für Simulationen) zur Verfügung stehen ohne aufwendige Bearbeitungsschritte durchführen zu müssen. Das Ziel ist eine handhabbare Datengröße und eine nutzbare Repräsentationsform. Ein Beispiel für die Nutzung von CT-Daten sind Anpassungs- und Änderungskonstruktionen an bereits vorhandenen CAD-Modellen oder an einem komplett mittels Reverse Engineering zurückgeführten Bauteil, um gezielt konstruktive Schwachstellen (z.B. Risse) oder Fertigungsfehler (z.B. Lunker) mit Hilfe der CT-Daten zu visualisieren und konstruktiv am CAD-Modell zu beheben.

2 Stand der Technik

Die bisherige Vorgehensweise zur Nutzung von CT-Daten im CAE-Umfeld umfasst mehrere iterative Bearbeitungsschritte. Ausgehend von einem Schichtbildstapel wird mit Hilfe bekannter Algorithmen (z. B. Marching Cubes) eine Oberflächenextraktion zur Erzeugung einer diskreten Modellbeschreibung durchgeführt [1]. Diese liegt in Form eines tesselierten Polygonmodells vor, das z.B. im STL-Format gespeichert wird. Um infolge von Tesselierungsfehlern [2] ein gleichmäßiges homogenes Netz zu erhalten, wird anschließend eine Polygonbearbeitung durchgeführt. Das Ergebnis dieses Prozessschrittes bildet die Basis für eine Flächenrückführung zur Erstellung einer kontinuierlichen Modellbeschreibung in einem neutralen 3D-Datenformat. Dieses bildet letztlich die Grundlage für weitere Bearbeitungen wie der Konstruktion oder Simulation (Bild 1) [3].

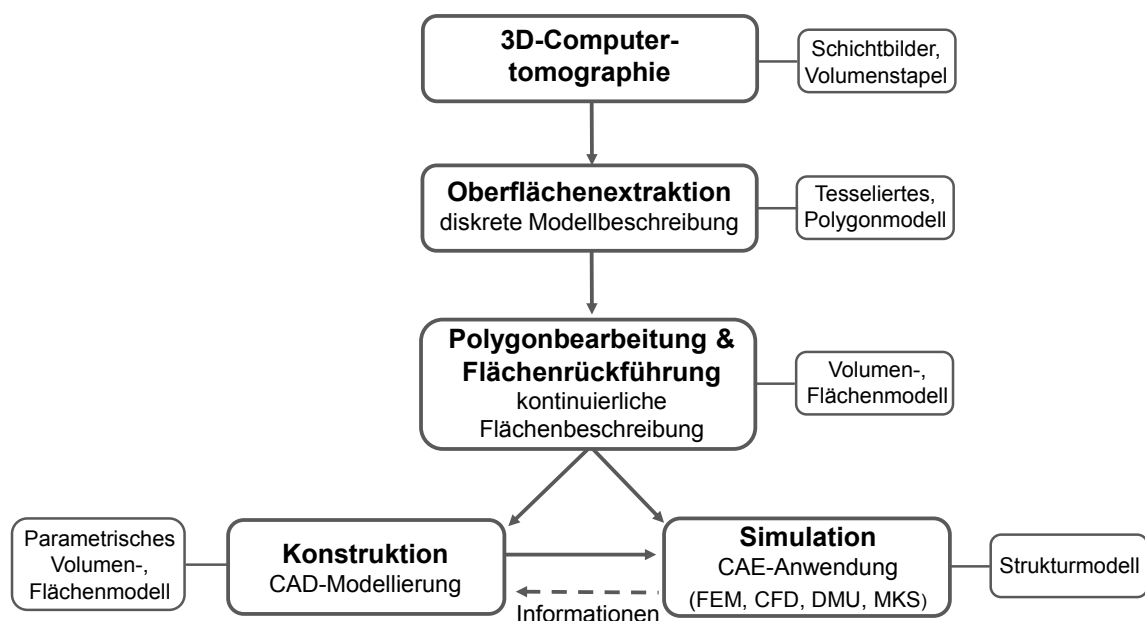


Bild 1: Prozesskette zur Erstellung von Konstruktions- und Simulationsmodellen aus CT-Daten

Der Nachteil dieser Vorgehensweise sind ein Informations- (z.B. bei der Oberflächenextraktion) und Genauigkeitsverlust (z.B. bei der Polygonbearbeitung) aufgrund mehrerer Datenreduktions- und Konvertierungsvorgänge. Hinzu kommt, dass je nach Objekt, Parameter und Anforderungen an die iCT-Erfassung eine enorme Datengröße entsteht, deren Handhabung sehr zeit- und ressourcenintensiv ist [4]. Weiterhin sind für die zweckmäßige Nutzung der Daten im konstruktiven Umfeld mehrere

Softwarewerkzeuge sowie ergänzende Informationen für deren Verarbeitbarkeit notwendig, wofür es keine einheitliche Grundlage gibt [3].

Verfügbare kommerzielle Anwendungen [5, 6] verfolgen bisher nur die etablierte Vorgehensweise (s. Abbildung 1) und sind vorwiegend für die Analyse von Bauteilen im Bereich der zerstörungsfreien Prüfungen geeignet [7].

Darüber hinaus zeigen aktuelle Forschungsbereiche wie die Untersuchung von generativ gefertigten Bauteilen einen konkreten Bedarf [8]. Der Vorteil dieser Verfahren besteht darin, innere Strukturen (z. B. Gitterstrukturen, Kühlkanäle) mit großer Komplexität und Gestaltungsfreiheit sowie auch integrierte Funktionsbauteile fertigen zu können. Erst in Verbindung mit der Nutzung von iCT können diese Bauteile zerstörungsfrei erfasst und auf ihre Funktion hin (z.B. durch Simulation) getestet werden. Die Voraussetzung dafür sind durchgängige Prozesse und entsprechend verfügbare Werkzeuge in der Konstruktionsumgebung.

Zusammenfassend lassen sich somit folgende Nachteile der bisherigen Prozesskette herausstellen:

- ein Genauigkeits- und Informationsverlust durch Konvertierungen in andere Repräsentationsformen,
- die Nutzung mehrerer Softwaresysteme,
- die Handhabung großer Datenmengen, die rechenintensiv und zeitaufwendig ist
- und fehlende Funktionen bei verfügbaren Systemen im Hinblick auf die Nutzung von CT-Daten in der CAE-Umgebung für die Produktentwicklung.

3 Erstellen eines systemübergreifenden Prozessmodells

Um die Potenziale der zerstörungsfreien Erfassung und Analyse zu nutzen, muss der Schwerpunkt des systemübergreifenden Modells sowohl auf einer anwendungsorientierten Vorgehensweise, d.h. im Sinne der Arbeitsweise des Konstrukteurs als auch auf unterstützenden Werkzeugen für die Nutzung und Einbindung in dessen Arbeitsumgebung liegen. Darüber hinaus müssen verfügbare Informationen, die zum einen mit der Anwendung von CT-Daten verbunden sind (z.B. Auflösung, Grauwertintensität) sowie produkt- oder prozessgebundene Informationen (z.B. Werkstoff, Prüflasten) zielgerichtet bereitgestellt werden.

Digitale Bild- und Volumendatenverarbeitung in der Produktentwicklung

Für die digitale Bildverarbeitung und Kommunikation ist im medizinischen Bereich der DICOM-Standard zur Speicherung und zum Austausch von Informationen für das Bilddatenmanagement etabliert. Mit dem DICONDE-Standard gibt es speziell für die Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) eine Erweiterung dazu [9]. Diese basiert auf der gleichen Struktur, wobei Patientendaten durch Komponentendaten ersetzt werden.

Um für die Produktentwicklung ein solches Konzept umzusetzen, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Das Datenmodell muss zum einen eine *einheitliche Struktur* besitzen, d.h. alle Einträge haben einen festgelegten Aufbau und eine definierte Gestalt. Im Weiteren muss ein *einheitliches Datenformat* zur Verfügung stehen, das alle Daten und Informationen, welche im Zuge der Be- und Verarbeitung entstehen, beinhaltet. Damit Datenformat und Datenstruktur sinnvoll genutzt werden können, müssen diese offen und beliebig erweiterbar vorliegen. Die Realisierung kann z.B. durch den Aufbau eines einheitlichen Bildheaders oder durch eine definierte XML-Struktur erfolgen. Für die Ablage der Daten im Bildheader ist am Lehrstuhl KTC ein Datenformat entwickelt worden, welches auf den Eigenschaften des DICOM Standards basiert, jedoch neben den Volumen- auch Bilddaten auf einer einheitlichen Basis verwalten kann.

Im Folgenden ist eine Auswahl von Daten und Informationen, die zusätzlich zu den bereits im DICOM-Standard definierten Metadaten (wie z.B. Pixelabstand, Schichtbildabstand etc.), hinterlegt werden können:

- Materialinformationen wie Werkstoffbezeichnung oder -dichte, vorhandene Grauwertintensitäten
- Rand- und Übergangsbedingungen wie z.B. Grenz- und/oder Prüflasten aus experimentellen Versuchen
- Angaben zur Qualitätssicherung wie z. B. Lunker, Einschlüsse, Defekte wie Risse o.ä.
- konstruktions- bzw. fertigungsrelevante Angaben wie Materialanhäufungen, Besonderheiten an inneren Strukturen wie z.B. Kühlkanäle (Durchmessergrößen)

Ein Beispiel für die systemübergreifende Nutzung von Daten zeigt Bild 2 anhand der Übergabe von Materialkennwerten die aus den CT-Daten gewonnen wurden.

Um eine benutzerorientierte Anwendung verschiedener Werkzeuge zu gewährleisten, müssen diese Informationen über rechnergestützte Assistenten (Wizard) dem Konstrukteur bereitgestellt werden.

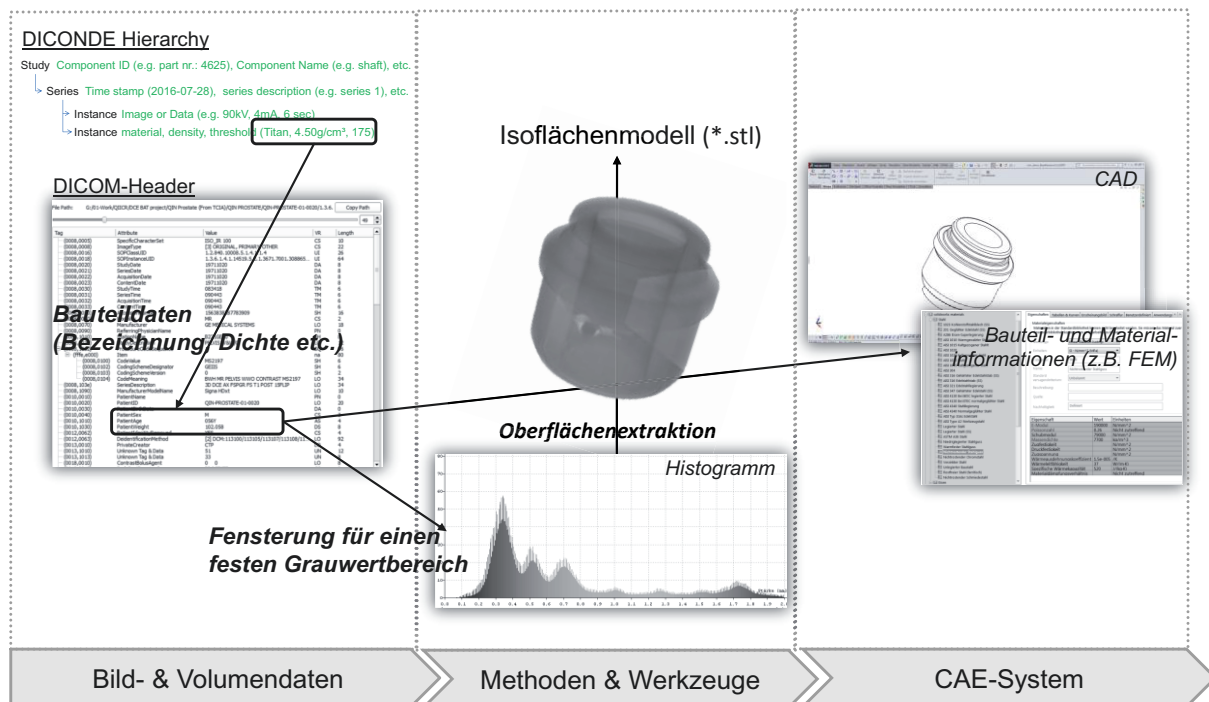


Bild 2: CAE-systemübergreifende Datennutzung am Beispiel von Materialkennwerten

CT-Daten in CAE-Anwendungen

Das Ergebnis dieser Anforderungen ist ein modular aufgebautes Prozessmodell. Dieses beinhaltet die notwendigen Werkzeuge zur Verarbeitung von Bild- und Volumendaten und kann in bestehende CAE-Systeme integriert werden. Für eine anwendungsorientierte Nutzung werden dabei nur die Daten und Informationen übergeben, welche die Anwendersysteme auch verarbeiten können (z.B. Geometrie-Features oder Materialkennwerte). Bild 3 zeigt das Prozessmodell mit den erforderlichen Modulen, die teilweise ineinander übergreifen.

Der Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass einzelne Module unabhängig erstellt und erweitert sowie systemübergreifend in andere CAE-Systeme eingebunden werden können. Es werden diverse Standardfunktionen wie z.B. bei CAD-Systemen die Erstellung von Hilfs- und Bezugselementen (z.B. Achsen, Ebenen) oder Import- und Exportfunktionen

genutzt. Somit befindet sich der Konstrukteur in seiner gewohnten Arbeitsumgebung. Um mit dem jeweiligen CAE-System zu interagieren (Kommunikation, Übergabe von Parametern) ist es notwendig, ausgewählte Funktionen des Anwendersystems über eine entsprechende Programmierschnittstelle (API) zu nutzen.

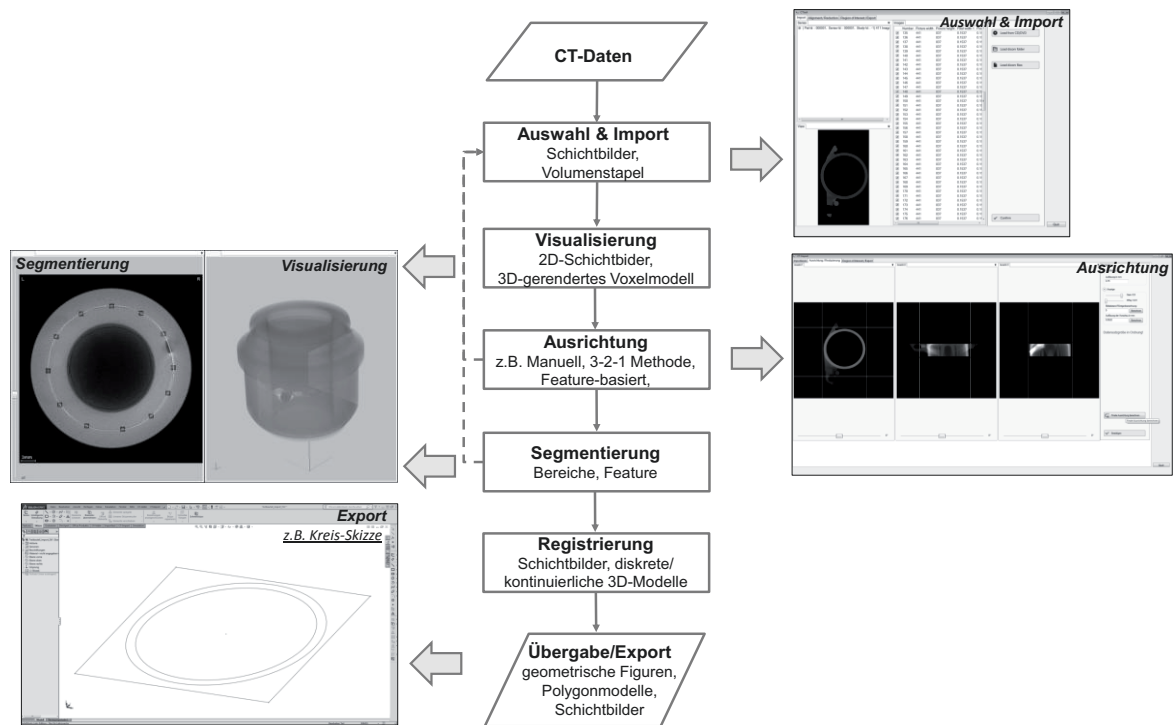


Bild 3: Exemplarische Übersicht des Prozessmodells mit den einzelnen Modulen

4 Prototypische Umsetzung im konstruktiven Umfeld

Im Folgenden wird das Vorgehen exemplarisch anhand der Konstruktion mit dem CAD-System SolidWorks erläutert (Bild 4).

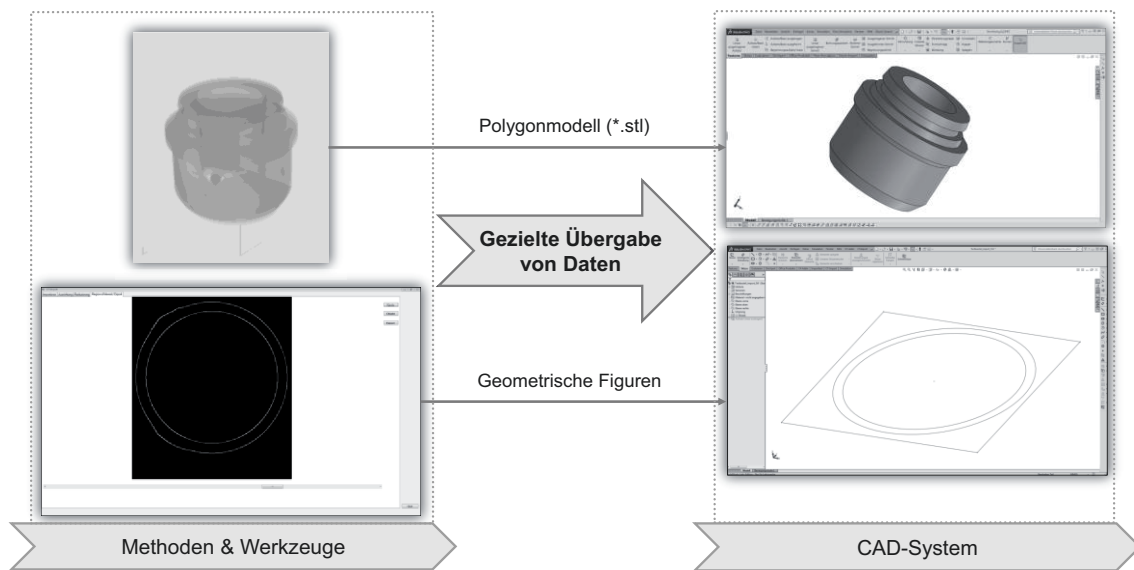


Bild 4: Umsetzung des Konzeptes für die Anwendung im CAD-Umfeld

Durch die Nutzung eines Add-Ins in SolidWorks kann die Anwendung durch eine Schaltfläche im Programm gestartet werden. Dazu werden die Schichtbilder aufgrund Ihrer Größe und der in den Bildern vorhandenen Informationen gezielt ausgewählt und anschließend auf unterschiedliche Arten visualisiert (2D über Schichtbilder, 3D über ein gerendertes Voxelmodell). Wichtig ist dabei, dass nur zusammenhängende Bereiche ausgewählt werden um die Homogenität des Datensatzes und letztlich des Bauteils zu gewährleisten. Oftmals wird nur ein kleiner Bereich des Messvolumens in Anspruch genommen, so dass die Reduzierung des Bildstapels sinnvoll erscheint. Um dafür einen geeigneten Zuschnitt zu gewährleisten, muss die Bauteillage im Datensatz auf Ihre Ausrichtung überprüft werden. Aufgrund von erfassungsbedingten Randbedingungen (geringe Strahlreduzierung bzw. Strahlablenkung) werden Bauteile in Bezug zur Bauraumanordnung oftmals nicht achsparallel tomographiert. Daher erfolgt für eine zu den kartesischen Hauptachsen korrespondierende Positionierung die Vorausrichtung des Datensatzes. Zusätzlich werden die Schichtdaten lediglich auf den Bauteilbereich begrenzt und somit wird der Datensatz in seiner Größe reduziert. Anschließend wird der für die konstruktive Bearbeitung interessierende Bereich, die sog. Region-of-Interest (ROI) bestimmt. Durch die Nutzung verschiedener Methoden und Werkzeuge aus der industriellen und medizinischen Bildverarbeitung wie z.B. Filtertechniken zur Segmentierung und Objekterkennung kann daraufhin eine Bestimmung der Bauteilkonturen, die z.B. durch eine Spline-Kurve als geometrische Figur abgebildet werden, erfolgen. Sind die detektierten Elemente erstellt, werden die Konturen zu

SolidWorks übergeben. Diese stehen anschließend z.B. in Form einer Skizze in definierter Lage zur Verfügung. Zudem können weitere Repräsentationsformen wie einzelne Schichtbilder des CT-Datensatzes zur Unterstützung des Konstrukteurs visualisiert werden. Um dabei eine exakte Übereinstimmung der Lage aller verwendeten Repräsentationsformen zu erhalten, besteht die Möglichkeit mit verfügbaren Werkzeugen eine Registrierung der Daten durchzuführen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Lösungsweg vorgestellt, wie CT-Daten effektiv und anwendungsorientiert in der Produktentwicklung integriert und durch neue Werkzeuge für gezielte Fragestellungen genutzt werden können. Dazu wurden ausgehend vom bestehenden Vorgehen Defizite in Bezug auf aktuelle Aufgabenstellungen herausgestellt und mithilfe eines systemübergreifenden Ansatzes ein Prozessmodell zur Lösung vorgestellt. An einem prototypischen Beispiel aus dem konstruktiven Bereich wurde exemplarisch verdeutlicht, wie Daten und Informationen aus CT-Daten über eine entwickelte Lösung in das CAD-System SolidWorks eingebunden und genutzt werden.

Zur kontinuierlichen Erweiterung und Verbesserung der bestehenden Anwendung werden derzeit einzelne Methoden und Algorithmen bzw. mögliche Kombinationen zur Erkennung und Überführung der Konturen aus den CT-Daten in konstruktionsrelevante Elemente sowie Verfahren zur Registrierung geprüft und bewertet. Außerdem wird eine definierte Struktur erarbeitet, um eine aufgaben- und somit funktionsorientierte Integration einzelner virtueller Assistenten (Wizard) zu realisieren.

Literatur

- [1] Lorensen, William E.; Cline, Harvey E.: *Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm*. Computer Graphics, Vol. 21, 1987, S. 163-169.
- [2] Schöne, C.: *Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik*, Habilitation, Verlag Dr. Hut, München, 2009, ISBN 978-3-86853-103-9.
- [3] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Holtzhausen, S.; Schöne, C.; Stelzer, R.: *Parametric Design in Reverse Engineering based on CT data*; 6th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT Conference 2016), Wels; Österreich, NDT.net Issue 2016-02, Vol.21 No.02 (Feb 2016), The e-Journal of Nondestructive Testing; ISSN 1435-4934.
- [4] Sembdner, P.; Holtzhausen, S.; Schöne, C.; Stelzer, R.: *Möglichkeiten der Bauteiluntersuchung mittels Computertomographie*, 15. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, 3D-NordOst 2012, Berlin, ISBN 978-3-942709-07-1.

- [5] <http://www.volumegraphics.com/de/>, abgerufen: 28.07.2016.
- [6] <https://www.fei.com/software/avizo3d/>, abgerufen: 28.07.2016.
- [7] <http://www.duwe-3d.de/de/Products/polyworks>, abgerufen: 28.07.2016.
- [8] Hofmann, D.; Schöne, C.; Stelzer, R.: Anwendung optischer und volumetomographischer Aufnahmeverfahren zur Analyse und Auswertung generativ gefertigter Bauteile am Beispiel metallpulverbasierter Verfahren, 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2015, Clausthal, ISBN 978-3-944722-30-6.
- [9] Koetz, A.; Clendening, S.: *The Value of DICONDE*, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.

Produktentwicklung in der Elektromobilität - Opportunismus im Zeichen der Konstruktionsmethodik

Tobias Stefaniak, Daniel Maiwald, Michael Eickhoff, Karl-Heinrich Grote

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Email: tobias.stefaniak@ovgu.de, daniel.maiwald@ovgu.de

Internet: <http://imk.-unimagdeburg.de/ikt/>

Inhalt: Die „VDI-Richtlinie 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ bietet eine umfangreiche Methodensammlung in allen Produktplanungsphasen. Bedingt durch die allgemeine Anwendbarkeit ist die Abfolge des Konstruktionsprozesses nur grob strukturiert, für eine Anwendung im Bereich der Elektromobilität. Die deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität-Version 3.0 fordert ein übergreifendes Systemdenken, um die bis dahin getrennt betrachteten Normen und Standards zur Elektrotechnik und Automobiltechnik zusammenzuführen und somit eine Bündelung der Informationen erfolgt. Darüber hinaus wird für die hohe Komplexität eines Elektrofahrzeuges mit dem erweiterten Energiemanagement und die immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten eine neue Vorgehensweise benötigt. Dieser Beitrag soll einen Grundstein für eine angepasste Konstruktionsmethodik legen, die speziell für die Elektromobilität Gültigkeit hat und dabei den industriellen Anforderungen entspricht.

Abstract: The German VDI directive 2221 „Systematic approach to the development and design of technical systems and products“ offers a comprehensive collection of methods in all phases of product planning. Contingent on the general applicability of the directive the sequence of the construction process for an electromobility application is only roughly structured. The German „Roadmap for Standardization in Electromobility Version 3.0“ demands an overarching system thinking to merge the so far individually considered norms and standards of electrical engineering and automotive engineering and hence achieve a concentration of information. Moreover, the high degree of complexity of an electric vehicle with enhanced energy management and ever-shorter developmental periods calls for a new approach. This paper is regarded as a cornerstone for an adapted methodology of construction, which has specific significance for electromobility thereby fulfilling industrial requirements.

Stichwörter: Elektromobilität, Produktentwicklung, Konstruktionsmethodik.

Keywords: electromobility, product development, construction methodology.

1 Einleitung

Im Juli 2011 entstand an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU) das Projekt „smarter als smart“, um die Elektromobilität und deren Akzeptanz zu erforschen. Im Zuge dieses Projekts rüsteten Mitarbeiter aus fünf Lehrstühlen der Fakultät für Maschinenbau in Kooperation mit einem externen Partner einen Smart der ersten Generation auf ein Elektrofahrzeug um. Im Ergebnis stand ein straßenzugelassener Prototyp namens „editha“.

Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse folgten in den Jahren weitere Erprobungsfahrzeuge, mit der Intention die spezifischen Randbedingungen der Elektromobilität ganzheitlich zu durchdringen und die Kernkompetenzen zu vertiefen. Durch das Verbundprojekt Competence in Mobility (CoMo) werden die Kompetenzen und Ressourcen an der OvGU gebündelt und in drei Projektbereiche aufgeteilt. Eines dieser Bereiche stellt das Projekt Gesamtfahrzeug dar (Bild 1). Diesem sind vier Institute zugeordnet, die sich mit diversen Forschungsschwerpunkten auseinandersetzen. Resultat ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit, zur Generierung alternativer Antriebskonzepte, die für die zukünftige Elektromobilität anwendbar sind.

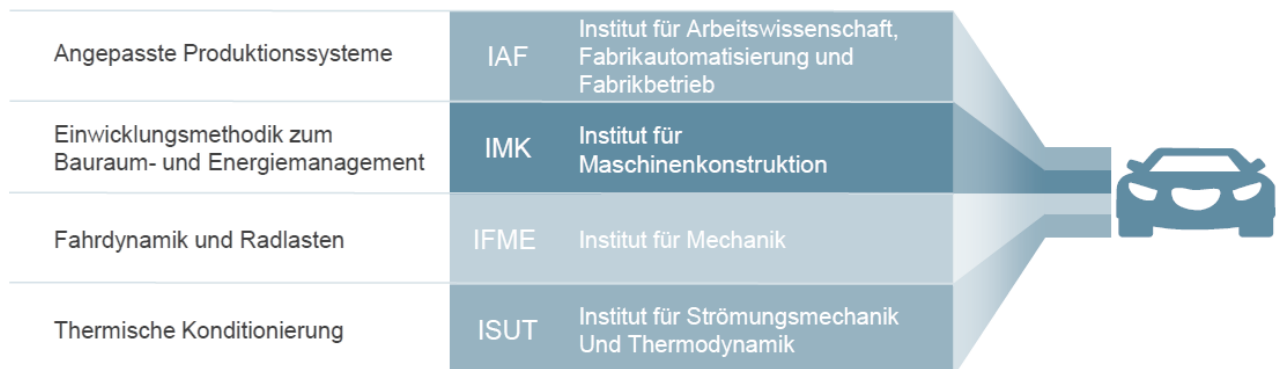


Bild 1: Forschungsschwerpunkte der involvierten Institute im Projekt Gesamtfahrzeug

Der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, dem Institut für Maschinenkonstruktion untergeordnet, forscht im Bereich Entwicklungsmethodik zum Bauraum- und Energiemanagement bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen. Begründet ist dies durch die hohe Komplexität der Fahrzeugstruktur, den immer weiter fortschreitenden Energiemanagement sowie die kürzer werdenden Entwicklungszeiten. Durch die intensive

Auseinandersetzung mit der Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 und die Anwendung dieser bei bereits umgesetzten Fahrzeugen, soll eine angepasste Entwicklungsmethodik entstehen, die den Produktentwicklungsprozess (PEP) an die Standards der Industrie adaptiert.

2 Stand der Technik

Produktentwicklungsprozess

Die „VDI-Richtlinie 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ stellt eine Methode zur Entwicklung von Produkten bereit. Dieses präskriptive Modell hat den Anspruch, für die Produktentwicklung branchenübergreifend anwendbar zu sein [1]. Die Folgerungen hieraus sind einerseits, dass dieses Modell zur Entwicklung von Produkten vielseitig anwendbar ist und dem Entwickler einen Leitfaden bereitstellt. Andererseits ist das Modell aufgrund seiner Verallgemeinerung abstrakt. Um der hohen Komplexität der Entwicklungsprozesse spezifischer, moderner Produkte in deren Umgebungen gerecht zu werden, ist deshalb eine detaillierte Anpassung und Erweiterung des Modells nötig; dieser Bedarf für die konkrete Anwendung des Entwicklers wird auch schon in [2] erkannt. Aus diesem Sachverhalt heraus wurden bereits in der vergangenen Zeit Erweiterungen und Anpassungen in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 vorgenommen [3,4].

Die VDI - Richtlinien 2222 - Blatt 1 - 2 (Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien - Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen) und 2223 (Methodisches Entwerfen) sind Ergänzungen zu den in VDI-Richtlinie 2221 beschriebenen Phasen des Produktentwicklungsprozesses [4, 5, 6]. Sie stellen eine Erweiterung der Methoden und Werkzeuge dar, die für eine Anpassung des PEP's an die spezifischen Produkte verwendet werden können.

Darüber hinaus liegt der Fokus der VDI-Richtlinie 2221 auf der Entwicklung von Neukonstruktionen. Nach den Kennzahlen der VDMA aus dem Jahr 2012 beträgt der Anteil von Neukonstruktionen 32,7 %. Die restlichen 67,3 % fallen auf Anpassungs- und Variantenkonstruktionen ab [7]. Insbesondere in der Automobilbranche ist es eine gängige Praxis, Produkte nicht von Grund auf neu zu konstruieren, sondern bereits bestehende

Produkte für Produktentwicklungen als Ausgangsbasis zu verwenden, sie anzupassen und gegebenenfalls Neuentwicklungsanteile zu integrieren.

Es wird deutlich, dass für die VDI-Richtlinie 2221 Anwendungsfälle zu erarbeiten sind, um einen konkreten Leitfaden für den Entwickler herzustellen. In Hinblick auf die Elektromobilität muss somit ein Modell gefunden werden, das die Entwicklung eines Automobils mit einem elektrifizierten Antriebsstrang abbilden kann. Weiterhin besteht in der Automobilbranche ein Bedarf bei der Methodenadaption für die Anpassungs- und Variantenkonstruktionen.

Produktentwicklung in der Elektromobilität

Die Bundesregierung hat die Elektromobilität innerhalb des Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität (NEP) zum konstitutiven Bestandteil der zukunftsfähigen Mobilität erklärt und somit zum Schlüssel der klimafreundlichen Umgestaltung. Innerhalb des NEP finden reine Elektrofahrzeuge, Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung und Plug-In-Hybridfahrzeuge Betrachtung. Um die ehrgeizigen Ziele dieses Plans umzusetzen, wurde 2010 das Beratungsgremium Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) gegründet. In ihrem Bericht „Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 3.0“ fordern sie für eine technologieentwicklungs- und wettbewerbsorientierte Elektromobilität, dass Entwicklungen frühzeitig und die dahinterliegenden Interessen zielbewusst weitergeführt und gebündelt werden müssen. Darüber hinaus soll für eine erfolgreiche Positionierung der deutschen Wirtschaft Normungen und Standardisierungen von Beginn an in den Entwicklungsprozess einbezogen werden, um das volle Potential auszuschöpfen [8, 9]

Ein Blick in die Industrie zeigt, dass Automobilfirmen in der Konzeption und Konstruktion von Elektrofahrzeugen zwei unterschiedliche Wege einschreiten. Einerseits wird beim „Conversion Design“ (Anpassungskonstruktion) der elektrische Antriebsstrang in ein herkömmliches Serienmodell integriert. Dazu dient eine vorhandene Plattform als Basis für den Entwicklungsansatz. Vertreter dieser Fahrzeuge sind unter anderem der Mini E von BMW und der Volkswagen e-Golf. Auf der anderen Seite steht das sogenannte „Purpose Design“ (Neukonstruktion). Hierbei wird um den elektrischen Antriebsstrang ein grundlegend neues Fahrzeug entwickelt. Exemplarisch hierzu sind der BMW i3 und der Mitsubishi MiEV zu nennen. [10,11]

In Bild 2 ist eine Zusammenstellung der Aspekte beider Entwicklungsansätze aufgeführt. Es zeigt sich, dass das Purpose Design im Gegensatz zum Conversion Design sich mit

der Veränderung im gesamten Pkw befasst und somit dem Konstrukteur ein Höchstmaß an gestalterischer Freiheit gewährleistet. So sind vollständig neue Anordnungen der spezifischen Komponenten möglich und schafft dadurch Packagevorteile. Nachteilig ist der teure Entwicklungspfad, der durch die Entwicklung neuer Konzepte und Technologien entsteht. [11]

Conversion Design	Purpose Design
<ul style="list-style-type: none"> – Änderung des Antriebstrangs – Keine zusätzlichen Funktionen – Keine Vorteile durch neues Package – Keine Vorteile durch neue Ergonomie – Keine „echten“ Innovationen 	<ul style="list-style-type: none"> – Veränderung im gesamten PKW – Neue Antriebskonzepte – Zusätzliche Funktionalitäten – Mögliche Packagevorteile nutzen – Neue Ergonomie und Bedienkonzepte – „Echte“ Innovationen
<ul style="list-style-type: none"> • Beibehalten bestehender Strukturen • Laufende Prozesse können aufrechterhalten werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibles Verhalten etablierter OEM • Neue Hersteller drängen auf den Markt • Etablierung neuer Kooperationen

Bild 2: Gegenüberstellung von Conversion- und Purpose Design, nach [11]

Im Vergleich zum Purpose Design stellt das Conversion Design die weniger aufwändigere und kostengünstigere Variante dar. Hierbei werden die bestehenden Bauräume eines Serienfahrzeuges, die durch das Nichtvorhandensein des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs entstehen, genutzt und der elektrische integriert. Nach [10] sind dadurch in der Herstellung entsprechende Synergien nutzbar, schränken jedoch die konstruktiven Freiheiten und folglich den Grad an Innovation ein. Positiv zu bewerten ist das Aufrechterhalten von laufenden Prozessen, sodass parallele Entwicklungen und Fertigungen möglich sind. Im Bereich der Plug-In-Hybride entsteht durch diese Methode ein großer Nutzen. [10, 11]

Unabhängig vom Entwicklungsansatz gelten für Elektrofahrzeuge die gleichen Anforderungen an die Bauweise und die Betriebssicherheit. Diese sind in der vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur in der ECE-Regelung Nr. 100 zusammengefasst [12]. Weiterhin findet in [8] eine partielle Bündelung von Normen und Standards statt, die bis dato nur domänenspezifisch betrachtet wurden, um die Schnittstellen gegenüber der Elektromobilität aufzuzeigen. Diese sind wichtige

Einflussgrößen und müssen von Beginn an in den Entwicklungsprozess mit integriert werden.

Einflüsse auf die Produktentwicklung in der Elektromobilität

Die Einflüsse auf den PEP können als Kontextfaktoren dargestellt werden [2]. Dieser Ansatz soll als Basis für die weiteren Betrachtungen dienen, um die Einflüsse zu identifizieren und zu strukturieren. In einem ersten Schritt werden die Kontextfaktoren in die zwei Gruppen Produkt und Produktumgebung unterteilt (siehe Bild 3). Über diese Unterteilung können die Einflüsse des Gesamtproduktes selbst und auch die Einflüsse der Umgebung auf dieses Gesamtprodukt differenziert dargestellt werden.

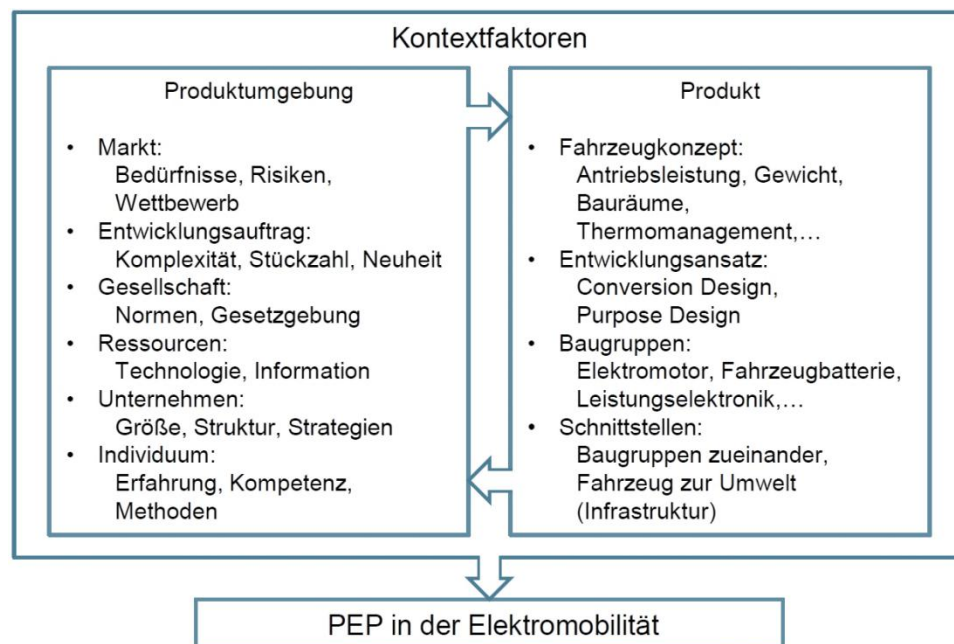


Bild 3: Einflüsse aus dem Kontext der Produktentwicklung auf die Elektromobilität, nach [2]

In der ersten Gruppe befinden sich Kontextfaktoren, die aus der Produktumgebung resultieren, in der das Produkt entwickelt wird. Unter Produktumgebung wird hier sowohl die Umgebung des Produktes als auch die Umgebung des Unternehmens, in dem das Produkt entwickelt wird, verstanden.

In der zweiten Gruppe befinden sich Kontextfaktoren, die vom zu entwickelnden Produkt selbst stammen. Diese Faktoren sollen zum einen die Wechselwirkungen der Baugruppen und Bauteile zueinander als auch physikalische Schnittstellen zur Infrastruktur darstellen. Zum anderen soll hier ebenfalls der Entwicklungsansatz Berücksichtigung finden.

Die Faktoren beider Gruppen stehen innerhalb der jeweiligen Gruppen sowie gruppenübergreifend in Wechselwirkung zueinander, wie im Folgenden erläutert wird.

Der Markt für Elektrofahrzeuge ist stetig wachsend. Es werden Marktanreize gesetzt, um das Wachstum weiter zu beschleunigen. Gleichzeitig sind mit dem Innovationsschub in der Elektromobilität hinsichtlich der Abnahme von Neuentwicklungen Risiken verbunden. Der Entwicklungsauftrag ist mit seinen Eigenschaften an das Unternehmen und ebenfalls an die Marktstrategie gekoppelt. So können zum Beispiel mit hohen Stückzahlen Skalierungseffekte erzielt werden, was strategischer Bestandteil einer Kostenführerschaft sein kann und somit mit dem Kontextfaktor des Marktes in Abhängigkeit steht [13]. Im Kontext der Gesellschaft liegt der Fokus derzeit auf einer konsistenten Normung im Bereich der Elektromobilität, insbesondere hinsichtlich deren Sicherheit und Schnittstellen zur Ladeinfrastruktur [6, 8, 9]. Das Individuum beschreibt den Anwender des Modells, mit dem es das Produkt entwickelt. Der Anwender hat individuelle Kompetenzen, Erfahrungen und bevorzugt bestimmte Methoden im Entwicklungsprozess. Weiterhin ist im Elektroauto eine Vielzahl von mechatronischen Komponenten verbaut. Dies erfordert interdisziplinäre Teams, um die domänenspezifischen Kompetenzen abzudecken.

Die Kontextfaktoren aus den Baugruppen resultieren unter anderem aus dem elektrifizierten Antriebsstrang, der aus den wesentlichen Komponenten Elektromotor, Fahrzeugbatterie und Leistungselektronik besteht [10].

So wirkt sich beispielsweise die Auslegung des Elektromotors direkt auf das Antriebsverhalten des Fahrzeugs aus. Die Fahrzeugbatterie stellt primär die Energie für den Antrieb bereit. Entscheidende Faktoren bei der Auslegung sind unter anderem Kapazität, Bauraum und Gewicht. Die Leistungselektronik ist das Bindeglied zwischen Fahrzeugbatterie und Elektromotor. Sie besitzt die Hauptaufgabe, den Gleichstrom im Hochvoltbereich der Fahrzeugbatterie in geeignete Spannungen für die Antriebsmotoren (Hochvoltbereich) und das Bordnetz (Niedervoltbereich) zu transformieren [10].

Die Schnittstellen können einerseits aus den Anforderungen der Baugruppen resultieren, andererseits aber auch durch vorgegebene Normen. Als Beispiel sind hier die Normungen für die Schnittstelle von der Ladestation zum Fahrzeug zu nennen [14]. Die Leistungsverteilung im Hochvoltbereich bildet die Schnittstelle zwischen den elektrifizierten Baugruppen und gewährleistet den zielgerichteten Transport des elektrischen Stroms. Besonders in Hinblick auf einen dezentralen Antrieb mit Elektro- bzw. Radnabenmotoren kommt dieser Komponente einer wachsenden Bedeutung zu. Weiterhin hat der

Entwicklungsansatz des Fahrzeugs einen wesentlichen Einfluss auf den PEP, wie im vorherigen Kapitel bereits erläutert wurde.

Die Einführung von Kontextfaktoren erlaubt eine differenzierte Darstellung der Einflüsse auf den PEP. Des Weiteren können über diese Faktoren Wechselwirkungen zwischen diesen dargestellt werden. Dies wurde in diesem Abschnitt anhand einiger Beispiele verdeutlicht. Für eine Anpassung des PEP's an die Elektromobilität stellt sich diese Betrachtungsweise deshalb als vorteilhaft heraus.

3 Anpassung des Produktentwicklungsprozesses an die Elektromobilität

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, ist der PEP in der Elektromobilität von verschiedensten Parametern beeinflusst. Aufgrund der regelmäßigen Sprunginnovationen in der Elektromobilität ist es sinnvoll den Ansatz des PEP's so zu gestalten, dass er auf dynamische und unvorhersehbare Ereignisse angepasst werden kann. Aus diesem Grund ist es sinnvoll die Hauptkomponenten der Elektromobilität in Modulen darzustellen.

Da im Zuge der stetigen Zunahme von Verbrauchern auf der HV-Ebene und der damit verbundenen Komplexität der Systemarchitektur, muss die HV-Leistungsverteilung ebenfalls im frühen PEP berücksichtigt werden. Bild 4 zeigt die vier Hauptmodule, die entscheidend für den Entwicklungsprozess in der Elektromobilität sind.

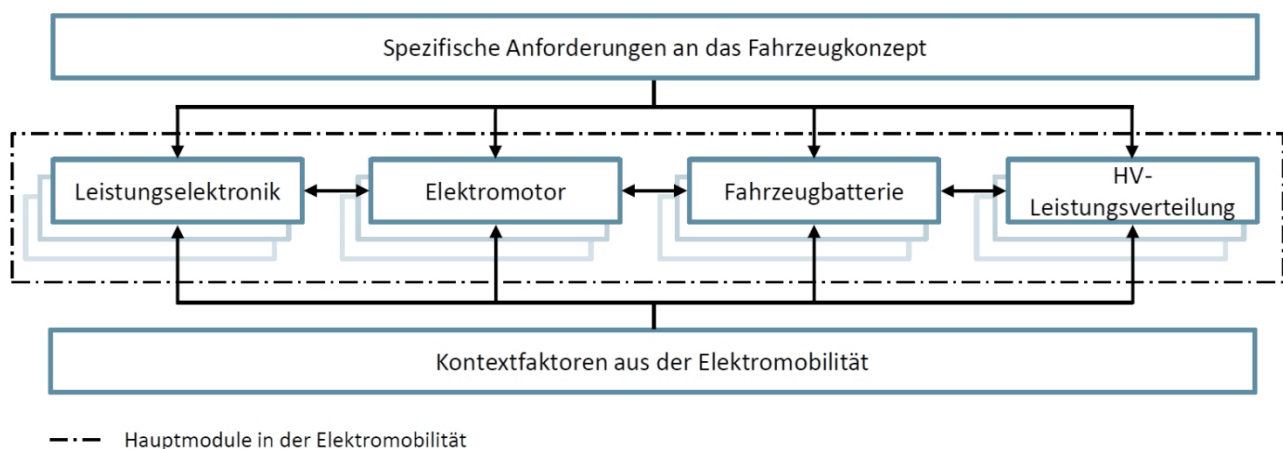


Bild 4: Hauptmodule der Elektromobilität und deren Einflussparameter

Hierbei dürfen diese Module nicht als alleinstehend betrachtet werden, da durch Normen und Richtlinien sie sich untereinander beeinflussen. Wie sich diese Schnittstellen auf den gestalterischen Prozess auswirken, ist aus den Normen, Richtlinien und der Literatur nur bedingt zu entnehmen, da sie meist nur die Produkthanforderungen abbilden. Darüber hinaus bestehen die in Bild 4 dargestellten Hauptmodule aus weiteren Untermodulen, die durch ihre Komplexität ebenfalls starken Einfluss auf den PEP nehmen. Bild 5 zeigt exemplarisch einige Untermodule der Fahrzeugbatterie.

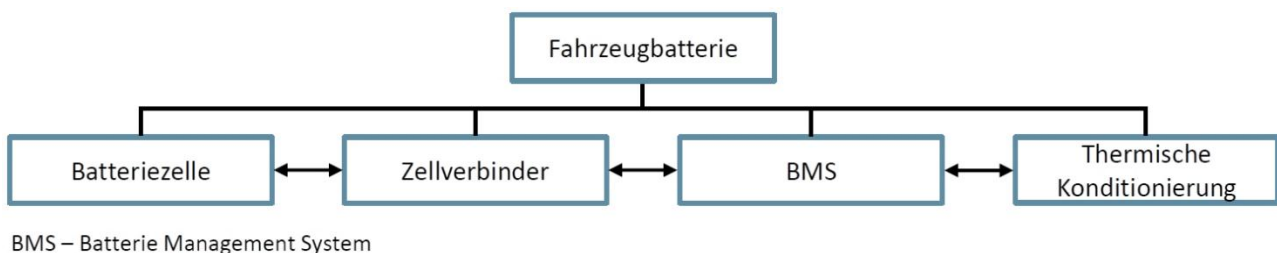


Bild 5: Untermodule der Fahrzeugbatterie

Um spätere Iterationsschleifen im PEP zu vermeiden ist es essentiell nicht nur die Anforderungen an das Fahrzeugkonzept allein zu berücksichtigen, sondern auch die spezifischen Eigenschaften der Haupt- / Untermodule. Diese müssen frühzeitig mit in den Entwicklungsprozess integriert werden, um unnötige Entwicklungszeiten und –kosten zu reduzieren.

4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein kurzer Einblick in gängige Entwicklungsansätze der Industrie gegeben. Aus dem Kontext der Elektromobilität zeigte sich, dass eine große Anzahl von Einflüssen existieren, die den PEP beeinflussen. Um diese zu kontrollieren und handhabbar zu gestalten, hat es sich der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik zur Aufgabe gemacht, eine angepasste Konstruktionsmethodik zum Bauraum- und Energiemanagement bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen zu entwickeln. Hierbei soll eine Adaption und Weiterentwicklung der VDI 2221 erfolgen. Innerhalb dieser Forschung soll ein Werkzeug für den Konstrukteur entwickelt werden, dass zur Unterstützung im PEP der Elektromobilität dient. Die Hilfsmittel sollen dabei Konstruktionskataloge sowie Datenbanken für die spezifischen Phasen und Baugruppen beinhalten. Dabei ist es wichtig, die bis dato domänenspezifischen Normen zu bündeln, transparent und

ganzheitlich darzustellen. Darüber hinaus soll die Modularität der vier Hauptkomponenten in allen Annahmen und Phasen Berücksichtigung finden.

Literatur

- [1] VDI - Richtlinie 2221, Mai 1993: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [2] Meißner, Moritz; Gericke, Kilian; et al.: *Eine adaptive Produktentwicklungsmethodik als Beitrag zur Prozessgestaltung in der Produktentwicklung*. Tagungsband 16. Symposium "Design for X", Neukirchen, 2005.
- [3] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Konstruktionslehre : Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer, 2013. - ISBN 978-3-642-29568-3.
- [4] VDI – Richtlinie 2223, Januar 2004: *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
- [5] VDI - Richtlinie 2222 - Blatt 1, Juni 1997: *Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [6] VDI - Richtlinie 2222 - Blatt 2, Juni 1987: *Konstruktionsmethodik - Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [7] Conrad, Klaus-Jörg: *Grundlagen der Konstruktionslehre – Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik*. 6., aktualisierte und erweiterte Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2013. - ISBN 978-3-446-43533-9.
- [8] Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (Hrsg.), Dezember 2014: *Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität - Version 3.0*, AG4 - Normung, Standardisierung und Zertifizierung
- [9] Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (Hrsg.), Dezember 2014: *Fortschrittsbericht 2014 - Bilanz der Marktvorbereitung*, Nationale Plattform Elektromobilität
- [10] Karle, Anton: *Elektromobilität – Grundlagen und Praxis*, Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2014. – ISBN 978-3-446-44339-6.
- [11] Freialdenhoven, Arndt; Wallentowitz, Henning: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges – Technologien, Märkte und Implikationen*. 2., überarb. Aufl. Berlin: Springer, 2011. - ISBN 978-3-8348-9910-1.
- [12] ECE - Regelung Nr. 100, Februar 2007: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an die Bauweise und die Betriebssicherheit*, BMVI, Verkehrs- und Wirtschafts- Verlag Borgmann GmbH & Co.KG
- [13] Becker, Jochen: *Marketing-Konzeption - Grundlagen des ziel-strategischen und operativen Marketing-Managements*. 10. Überarbeitete und erweiterte Aufl. München: Verlag Franz Vahlen, 2013. - ISBN 978-3-8006-4527-5
- [14] IEC 62196: *Plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets – Conductive charging of electric vehicles*. VDE Verlag GmbH, 2014. - ISBN 978-2-8322-1666-8

Modellbasierte Prinzip- und Gestaltvariation

Albert Albers, Georg Moeser

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Kaiserstraße 10, 76131 Karlsruhe

Email: georg.moeser@kit.edu; Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

Inhalt: Die modellbasierte Funktions-Gestalt-Synthese gemäß FAS4M-Ansatz wird im Kontext der Produktgenerationsentwicklung (PGE) analysiert. Es wird gezeigt, dass bei den möglichen Variationen (Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation) zahlreiche Modellinhalte produktgenerationsübergreifend in der Entwicklung genutzt werden können. Der zu leistende Aufwand für die Modellierung wird entscheidend gesenkt.

Abstract: The model-based Function-Embodiment-Synthesis according to the FAS4M-approach is analyzed in the context of the product generation engineering (PGE). It is shown, that during the development a lot of content can be reused cross-generational within the possible variations (variation in order to carry over, embodiment variation and principle variation). The effort for modeling thus can be reduced significantly.

Stichwörter: MBSE; PGE; Produktgenerationsentwicklung; Funktions-Gestalt-Synthese; SysML; FAS4M

Keywords: MBSE; PGE; product generation engineering; Function-Embodiment-Synthesis; SysML; FAS4M

1 Einleitung

Um den aktuellen und stetig wachsenden Anforderungen an die Produktentwicklung (u.a. bzgl. Zeit, Kosten, Qualität) gerecht zu werden, hat ein Wandel zum Model-based Systems Engineering (MBSE, s.u.) [1] begonnen. Dieser Beitrag fokussiert die Modellierung von Prinzip- und Gestalt im Rahmen von MBSE. Diese Modellierung wird im Kontext der Produktgenerationsentwicklung (**PGE**) [2] diskutiert. Es wird aufgezeigt, dass der von vielen Unternehmen befürchteten Aufwand in angemessenem Rahmen gehalten werden kann.

2 Stand der Forschung

Im Rahmen des Model-based Systems Engineering (MBSE) [3] werden alle Artefakte der Entwicklung (vgl. Objektsystem [4][5]) vernetzt in Modellen abgelegt [3]. Hierbei wird das Wissen der Beteiligten expliziert und vernetzt. Bei der Anwendung des MBSE ist die Beachtung des Modellierungstripples aus Sprache, Tool und Methode [6][7] entscheidend. Es muss zu jedem Aspekt eine, für das Entwicklungsziel geeignete, Auswahl getroffen werden, sodass die drei Aspekte zueinander passen bzw. sich ergänzen. Beispielsweise

muss das Tool die Modellierung mit der gewählten Sprache ermöglichen. Die Methode kann die Freiheitsgrade der Sprache begrenzen und damit dem Entwickler als konkrete Handlungsempfehlung dienen. Als Sprache hat sich der OMG Standard Systems Modeling Language (SysML)[8] etabliert[7]. Mit SysML können Anforderungen, Systemverhalten und Systemstrukturen sowie deren Zusammenhänge modelliert werden [8]. Der Einsatz von SysML-Modellen wurde bislang vorrangig für abstrakte Inhalte beobachtet (u.a. [9]). Bei detaillierteren Informationen hingegen werden spezialisierte Tools eingesetzt, wie z.B. CAD für die Modellierung der Gestalt. Für die Funktions-Gestalt-Synthese (FGS) [10][11] wurde im FAS4M Forschungsprojekt eine Methodik [12], die MechML (Mechanics Modeling Language, ein Sprachprofil der SysML) [13] und prototypisch ein Tool entwickelt. Diese ermöglichen die Modellierung mit durchgängiger Traceability von Anforderungen, Funktionen, Prinzipien und groben Aspekten der Gestalt in SysML/MechML in Verknüpfung mit den Gestaltmodellen des CAD [10][14][15].

Hierbei ist es möglich, die Entscheidungen während der Entwicklung beispielsweise anhand der ausgewählten Prinzipien, der hinterlegten, vorläufigen Gestaltmodelle (z.B. Handskizzen) oder den verknüpften Anforderungen nach zu vollziehen [14][15]. Generell ist das Entwickeln von technischen Systemen als **PGE** [2] zu betrachten, da viele Zusammenhänge zwischen Referenzmodellen (z.B. Produkte der Vorgängergeneration oder Wettbewerbsprodukten) und dem aktuell zu entwickelnden System vorliegen. Dies kann gezielt genutzt werden, um beispielsweise das Risiko einer Entwicklung durch Betrachtung der Anteile von Prinzipvariation (**PV**), Gestaltvariation (**GV**) oder Übernahmevariation (**ÜV**) abzuschätzen [2]. Bei der FGS gilt, wenn eine bereits in der vorigen Produktgeneration vorhandene Funktion wieder realisiert werden soll (ggf. mit anderer Qualität der Funktionserfüllung oder anderem Ressorceneinsatz): Die Funktion kann durch Beibehalten der vorigen Gestalt (**ÜV**), durch Optimierung der Gestalt (**GV**); z.B. Anpassung der Oberflächenqualität) oder durch Anwenden eines anderen Prinzips (**PV**) in der kommenden Produktgeneration realisiert werden [2].

3 Stand der Technik

Die Modellierung von Prinzip und Gestalt findet zunehmend softwarebasiert statt. Bei der initialen Definition und Diskussion von Lösungsideen ist aber die Skizze – egal ob analog oder digital erstellt – ein ganz entscheidendes Element, das insbesondere die Kreativität und die Assoziation entscheidend unterstützt [10][16]. Diese Inhalte werden dann früh in

Modelle spezifischer Tools (Tool im Sinne von Modellierungssoftware; vgl. Tool im Modellierungstriple) übertragen, dort weitergeführt, detailliert und letzten Endes final gespeichert. Hierbei ist zu beobachten, dass für die Modellierung von Prinzipien in der Praxis weniger spezifische Tools eingesetzt werden. Für die Modellierung von Gestalt sind CAD-Systeme der Stand der Technik.

Modellierung des Prinzips: Es gibt zahlreiche Werke, wie die Sammlungen der Prinziplösungen von KOLLER und KASTRUP [17] oder Konstruktionskataloge (z.B. [18] oder unternehmensinterne Sammlungen), die Prinzipien beschreiben oder diese (wie im Fall von Konstruktionskatalogen) direkt in den Kontext von Gestaltparametern setzen. Eine derartige Modellierung der Prinzipien findet in der Entwicklungspraxis allerdings selten statt. Wird die Informationen zu Prinzipien expliziert, so geschieht dies nach Erfahrung der Autoren meist nicht mit spezifischen Tools. Zum Einsatz kommen Office-Programme wie z.B. Powerpoint, Excel oder Word und immer noch sehr oft der Skizzenblock. Hierin können Prinzipien in Stichpunkten, in Prosa, mit Skizzen, mit am Computer erstellten Zeichnungen und auch unter Zuhilfenahme von Bilddaten (z.B. Fotos von Referenzprodukten oder digitalisierte Handskizzen zu mentalen Referenzmodellen) dokumentiert werden.

Modellierung der Gestalt: Die finale Gestalt wird in der Regel in CAD/CAX-Systemen modelliert. Es ist festzustellen, dass die Modelle die finale Gestalt mit allen Details darstellen, jedoch wenig Informationen zu zugrunde liegenden Prinzipien oder zu erfüllenden Funktionen beinhalten oder zu diesen verlinken. Welche Aspekte der konstruierten Gestalt für die Funktionserfüllung von besonderer Bedeutung sind, bleibt unklar. Ebenso wurde die Arbeitsweise von Konstrukteuren vom Groben (z.B. Handskizze) zum Feinen (z.B. CAD-Modell mit Details zu Oberflächenrauheiten) [19] bislang durch die Tools wenig unterstützt. Hierzu wurden vor kurzem Funktionalitäten von CAD-Systemen vorgestellt, die das Arbeiten des Entwicklers durchgängig unterstützen sollen wie z.B. *Creo Sketch* [20] mit der Möglichkeit Hand-/Stifteingaben (Skizzen) am Tablet zu erfassen, modifizieren, parametrisieren und an das CAD weiterzugeben. *NX 10 for Design* [21] bietet ähnliche Funktionalitäten. Mit *Catchbook* [22] bietet Siemens auch eine App. Der *SOLIDWORKS® Conceptual Designer (SWCD)* [23] bietet zudem, eine schnelle Überprüfung von Bewegungsabläufen der modellierten Mechanik an. *CATIA Natural Sketch* [24] unterstützt vor allem die Modellierung von Gestalt (Form und Anmutung) durch Designer. Es können Gestalt-Anforderungen in 3D an die Konstruktion weitergegeben werden.

Eine weitere Beobachtung am Markt ist, dass große Tool-Anbieter verschiedenste Tools aufkaufen und in ihren Product Lifecycle Management (PLM)-Systemen bündeln bzw. dort ankoppeln. Dazu zählen auch Akquisitionen von Modellierungstools für MBSE mit SysML wie bspw. das vormalige Atego Artisan Studio durch PTC (nun Integrity Modeler) [25].

4 Zwischenfazit

Das Arbeiten vom Groben ins Feine [19] wird zunehmend durch neue Tools leidlich abgedeckt. Jedoch fehlt die Verknüpfung der Modelle zu den Modellen des Zielsystems (vgl. [4][5]). Dies erschwert es insbesondere im Rahmen der Entwicklung einer neuen Produktgeneration die Tragweite von Variationen (**PV**, **GV** und/oder **ÜV**) abzuschätzen, weil die Ziele, Anforderungen und Randbedingungen die zu der Referenzgestalt geführt haben, nicht direkt zugänglich sind. Zudem ist unklar, ob diese in der aktuellen Entwicklung unverändert gelten, variiert wurden oder nicht mehr von Relevanz sind. Hier kommt insbesondere der Begründung der Feingestalt in den Wirkflächenpaaren und den Form- und Lagetoleranzen eine entscheidende Bedeutung zu, da diese den eigentlichen Kern der Funktionsqualität bestimmen, nicht das verwendete Prinzip.

Bei näherer Betrachtung der Integration von zahlreichen Tools in den PLM-Systemen wird deutlich, dass immer mehr Vernetzungen zwischen Informationen in unterschiedlichsten (Spezial-)Tools abgebildet werden können bzw. diese Tools auf einer gemeinsamen Datenbasis arbeiten können. Es scheint, als wollen die Tool-Anbieter alle erdenklichen Verknüpfungen auf Toolebene für MBSE in der Praxis bieten. Indirekt werden durch die zugrundeliegenden Datenmodelle die anwendbaren Sprachen (vgl. Modellierungstriple) festgelegt. Bezüglich der Methodik werden jedoch sehr wenig Hinweise geboten. Dies führt zu großer Verunsicherung und Zurückhaltung von Unternehmen bei der Einführung des MBSE [26][27]. Eine geeignete Methodik hat jedoch entscheidenden Einfluss auf die Effizienz & Effektivität des Entwickelns und die Qualität der Modelle, wodurch bei der Entwicklung der nächsten Produktgeneration wiederum die Effizienz & Effektivität beeinflusst wird. Durch den FAS4M-Ansatz wurde bereits eine Methodik vorgestellt, die diese Lücke auf der Methodenebene aufnimmt [12]. Deren Einfluss auf die Effizienz und Effektivität von Entwicklungen wird derzeit in Entwicklungsprojekten von Unternehmen, die durch das IPEK betreut und begleitet werden, nachgewiesen.

5 Betrachtung des Aufwands zur Modellierung bei Variationen

Anhand des FAS4M Ansatzes (s.o.) wird im Folgenden gezeigt, wie Modelle aus der Entwicklung der Vorgängergeneration genutzt und mit geringem Aufwand im Rahmen der aktuellen Entwicklung einer innovativen neuen Produktgeneration genutzt werden können. Der FAS4M Ansatz sieht eine Traceability über folgende Modellinhalte (Bild 1 v.r.n.l.) vor: 1) Gestalt im CAD, 2) Strukturmodellierung in der Komponenten-Sicht (synchronisiert mit dem Produktbaum des CAD), 3&4) logische Struktur (Modellierung der Konzepte und der zu Grunde liegenden Prinzipien), 5) der Funktionen in der funktionalen Sicht und 6) den weiteren Inhalten des Zielsystems. In Bild 1 ist eine Auswahl an Sprachelementen der SysML/MechML gezeigt (alle Elemente der MechML können den verschiedenen Veröffentlichungen des FAS4M-Konsortiums entnommen werden: u.a. [13][15]).

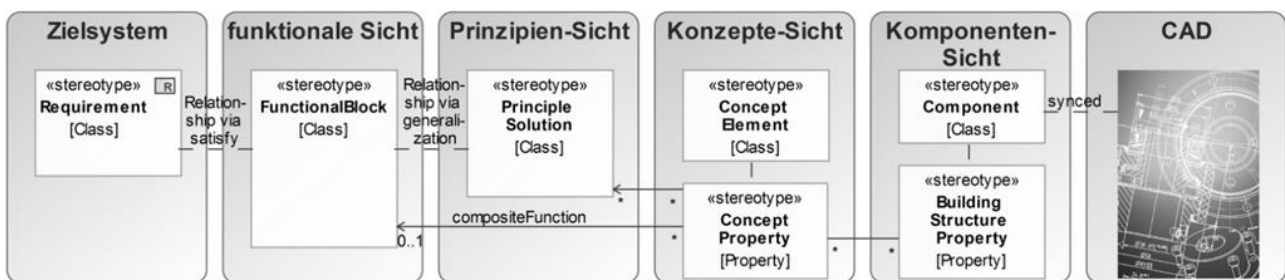


Bild 1: Auszug von Sprachelementen und deren Vernetzungen im FAS4M-Ansatz (Inhalte aus [27])

Liegt ein Modell nach dem FAS4M-Ansatz der vorigen Produktgeneration vor, so kann dies intensiv für die Neuentwicklung der Folgegeneration genutzt werden. In der Regel werden die Inhalte des neuen Produkt-Zielsystems bezogen auf die neu definierten Produktprofile (Marktbedürfnisse) angepasst. Die Inhalte des Modells der Vorgängergeneration können als Checkliste, Quelle für Formulierungen (z.B. wenn nur Zahlenwerte einer konkreten Anforderung variiert werden) und/oder zur Orientierung bei dem Aufbau der Modellstruktur dienen. Im Folgenden werden vier mögliche Fälle bei der Verwendung von Modellen der vorigen Produktgeneration vorgestellt (Vgl. jeweils Bild 2). Es wird jeweils von Teilsystemen gesprochen, da in der **PGE** entsprechend die Anteile an **ÜV**, **PV** und **GV** für verschiedene Teilsysteme unterschieden werden [2].

a) Zu den betrachteten Teilsystemen werden keine Änderungen im Zielsystem zur nächsten Produktgeneration vorgenommen. Es liegt nahe, eine **ÜV** durchzuführen. Es können alle zugehörigen Modellinhalte der verschiedenen Sichten und die CAD-Modelle übernommen werden. Diese Aspekte können zunächst als abgeschlossen betrachtet

werden. Die finale Definition der Anschlusswirkflächen (Variationen) kann später erfolgen.

b) Es werden Änderungen im Zielsystem vorgenommen und eine Analyse ergibt, dass die betrachteten Teilsysteme der vorigen Produktgeneration auch dem neuen Zielsystem genügen. Es wird eine **ÜV** durchgeführt. Es können die entsprechenden Modellinhalte der verschiedenen Sichten und die CAD-Modelle übernommen werden.

c) Es werden signifikante neue Ziele im Zielsystem aufgenommen, die bisher so nicht erfüllt werden konnten (Beispiel: höhere Leistung oder Drehmoment), woraufhin eine **GV** durchgeführt werden soll. Die Modellinhalte der funktionalen-, Prinzipien- und Konzepte-Sicht können übernommen werden. Die Inhalte der Komponenten-Sicht und des CAD werden bei der Entwicklung überarbeitet. Eine Synchronisierung dieser zwei Partialmodelle ([14][15]) mindert den Aufwand der Modellierung und reduziert das Entwicklungsrisiko.

d) Es werden Änderungen im Zielsystem für die neue Produktgeneration vorgenommen, woraufhin für ein Teilsystem eine **PV** durchgeführt werden muss um die neu definierten Ziele erfüllen zu können. Es müssen alle betreffenden Modellinhalte des zu variierenden Teilsystems überarbeitet werden. Die Modellierung der Funktion und deren Verknüpfungen zu den geänderten Anforderungen bleibt erhalten. Die Struktur des Modells unterstützt bei der Modellierung, da zu berücksichtigende Inhalte hierin identifiziert werden können.

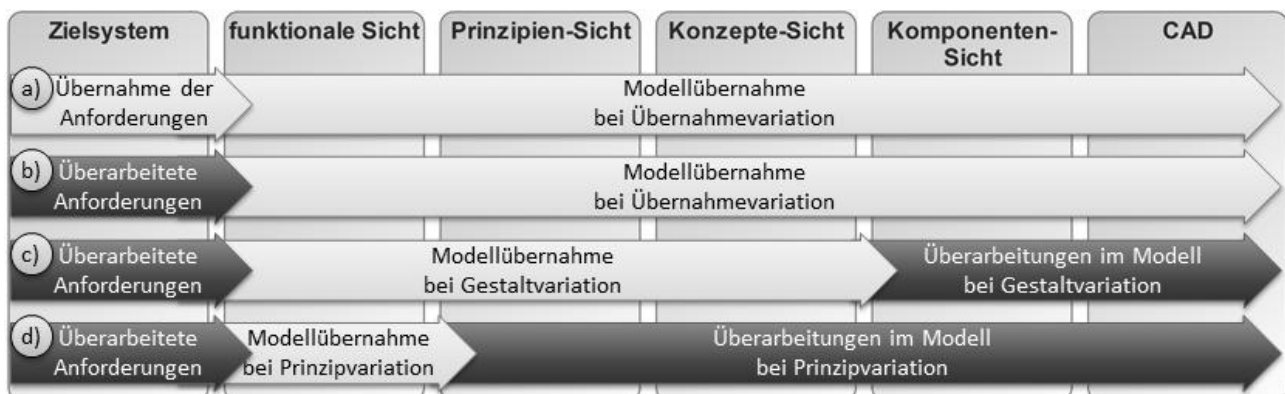


Bild 2: Verschiedene Variationsszenarien und die Überarbeitungsbedarfe (dunkel) in den Modellen

Generell können im Rahmen von Iterationen die zunächst als abgeschlossen betrachteten Inhalte auf Grund von Wechselwirkungen mit variierten oder neuen Teilsystemen weiteren Variationen unterliegen. Eben diese Wechselwirkungen können auf Grund der Verknüpfungen, die aus dem Modell der Vorgängergeneration übernommenen wurden, schnell identifiziert und ihre Tragweite analysiert werden.

Weiterhin ist es möglich, Inhalte aus Modellen von anderen Systemen weiter zu nutzen. Eine Voraussetzung ist hierfür, dass die Modelle jeweils dem gleichen Metamodell folgen [28]. Daher ist zur Erreichung einer hohen Effizienz und Effektivität des Produktentwicklungsprozesses im Unternehmen durchgängig die gleiche Modellierungslösung von entscheidender Bedeutung. Hieraus begründet sich der Wunsch nach Standardisierung der Modellierungssprachen wie auch der Methoden. Auch an die Tools gibt es Anforderungen bzgl. einer effiziente Weiternutzung und Anpassung von Modellen der Vorgängergeneration. Eine einfache Markierung aller Elemente und Beziehungen könnte dem Nutzer anzeigen, ob die Information bereits im Kontext der aktuellen Entwicklung auf Aktualität geprüft wurde. Geeignete Mechanismen für das Aktualisieren eines solchen Markers bei **ÜV**, **GV** und **PV** könnten die Übersicht in umfangreichen Modellen vereinfachen.

6 Fazit und Ausblick

MBSE ist ein vielversprechender Ansatz, um den Anforderungen an die Produktentwicklung Rechnung zu tragen. Effizienz- und Effektivitätssteigerungen in der Entwicklung sind möglich, wenn das Wissen aller beteiligten Entwickler von (komplexen) Systemen in konsistenten Modellen expliziert und vernetzt wird. Der oftmals kritisch betrachtete Aufwand für das Erstellen der Modelle, lässt sich insbesondere bei deren Wiederverwendung in folgenden Produktgenerationen stark relativieren. Zwingend ist dazu das Konzept der **PGE** – Produktgenerationsentwicklung konsequent als roten Faden im ganzen Unternehmen einzusetzen und zu leben. Hier ist ein methodisches Umdenken erforderlich, weg vom Denken der „White-Paper-Entwicklung“. Die Verfügbarkeit und Wiederverwendung von geeigneten Modellinhalten kann z.B. durch die Organisation von unternehmenseigenen Modelldatenbanken in der Praxis forciert werden. Dem Aufwand steht zudem der Nutzen durch die nicht personengebundene Verfügbarkeit der Informationen und die erkennbaren Zusammenhänge gegenüber. Die erwartete Steigerung des Systemverständnisses durch diese Modellbildung wird aktuell in einer Studie am IPEK untersucht. Da diese Mehrwerte dem einzelnen Entwickler im Arbeitsalltag nicht unmittelbar gegenwärtig sind, empfiehlt es sich, die Mitarbeiter durch geeignete Incentivierungskonzepte zu motivieren (z.B. als Teil Zielvereinbarung). Das kommunizierte und überprüfte Ziel muss es sein, sowohl herausragende Produkte zu entwickeln, als auch qualitativ hochwertige Modelle zu liefern um damit den Wissenspool des Unternehmens zukunftssicher zu machen.

Für die Praxis erscheint es zudem wichtig die angebotenen Tools am Markt zu beobachten. Es gibt in kurzen Zeitabständen die Ankündigungen von Neuerungen, die teilweise durch Akquisition und Integration in ein großes Tool-Portfolio beschleunigt werden. Bei Anwendung von neuen Tools und Sprachen, muss eine geeignete Methodik genutzt werden. Der hier zitierte FAS4M-Ansatz wird aktuell in Unternehmen erprobt und um Aspekte der mechatronischen Entwicklung erweitert. Hierbei spielt insbesondere die Ankopplung von Simulationssoftware mit Kopplung zu den SysML/MechML-Modellen eine große Rolle.

Literatur

- [1] Beihoff et.al: A World in Motion – Systems Engineering Vision 2025. 2014.
- [2] Albers, Bursac, Wintergerst: *Produktgenerationsentwicklung* in SSP 2015, Stuttgart, 2015.
- [3] Walden et.al: *Systems engineering handbook* Hoboken: Wiley, 2015
- [4] Ropohl: *Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik*, 2009.
- [5] Albers, Reiß, Bursac, Richter: iPeM – integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering in *Procedia CIRP Design* 2016, Stockholm, 2016.
- [6] Matthiesen, Schmidt, Moeser, Munker: *The Karlsruhe Sys-KIT Approach* in 24th CIRP Design Conference, Milano, 2014.
- [7] Delligatti, Steiner, Soley: *SysML distilled*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2014.
- [8] OMG, Ed.: *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) - Version 1.4*. Jun-2015.
- [9] "Fragebögen TdSE 2014 | Functional Architectures for Systems." : <http://fas-method.org/content/frageboegentdse2014/>. [11.07.2016].
- [10] Moeser, Albers, Kümpel: *Usage of Free Sketches in MBSE* in *Proceedings First IEEE International Symposium on Systems Engineering*, Rom, 2015.
- [11] Moeser, Albers, Klingler: *Modellbasierte Funktions-Gestalt-Synthese* in *Proceedings of the 26th Symposium Design For X*, Herrsching, 2015.
- [12] Moeser, *Kurzversion FAS4M Methodenguideline* 2016.
- [13] oose :eG, :em AG, IPEK - Institut für Produktentwicklung am KIT, Helmut-Schmidt-Universität: *Projektergebnisse | FAS4M.*: <http://fasform.de/content/ergebnisse/>. [06.07.2016].
- [14] Moeser et.al: *Fortschrittsbericht zur modellbasierten Unterstützung der Konstrukteurstätigkeit durch FAS4M* in *Tag des Systems Engineering* 2015, Ulm, 2015.
- [15] Moeser et.al: *Modellbasierter mechanischer Konzeptentwurf* in *Tag des Systems Engineering* 2016, Herzogenaurach - *Status: angenommen*, 2016.
- [16] VDI 2223, Düsseldorf: VDI, 2004.
- [17] Koller, Kastrup: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. Berlin: Springer, 1994.
- [18] Roth: *Kataloge*, 3. Aufl., mit wesentlichen Erg. Berlin: Springer, 2001.
- [19] VDI 2221, Düsseldorf: VDI, 1993.
- [20] "PTC Creo Sketch: Free 2D CAD Software | PTC." : <http://www.ptc.com/cad/creo/sketch>. [12.05.2016].

- [21] "NX 10 Software zur Produktkonstruktion beschleunigt die Entwicklung: Siemens PLM Software." : https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/10/. [12.05.2016].
- [22] "Catchbook: Siemens PLM Software." : https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/catchbook/. [11.07.2016].
- [23] "SOLIDWORKS Conceptual Designer | SOLIDWORKS." : <http://www.solidworks.com/sw/products/solidworks-conceptual-design.htm>. [12.05.2016].
- [24] "CATIA V6 R2013 - 3D CAD Software." : <http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/catia-v6/neuestes-release/>. [11.07.2016].
- [25] "PTC Completes Acquisition of Atego | PTC." : <http://www.ptc.com/news/2014/ptc-completes-acquisition-of-atego>. [12.07.2016].
- [26] Gausemeier et.al: Systems Engineering in der industriellen Praxis Paderborn, 2013.
- [27] Albers et.al: Model-Based Systems Engineering (MBSE) in der Karlsruher Schule: Fünf Jahre Forschung für die Anwendung Dev. Syst. Eng., no. 01 2016, pp. 38–41, 2016.
- [28] Albers et.al: *Abstraktionsgrade der Systemmodellierung* in Tag des Systems Engineering 2014, 2014

Reflexion der praktischen Umsetzung der Konstruktionsmethodik

Dipl.-Ing. Carsten Haugwitz

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Maschinenbau

Institut für Maschinenkonstruktion (IMK)

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Universitätsplatz 2

carsten.haugwitz@ovgu.de

Inhalt: *In der Konstruktionstheorie gibt es verschiedene Ansätze für ein methodisches und planvolles Vorgehen. Diese werden an den meisten Hochschulen und Universitäten ähnlich gelehrt und in Seminaren und Praktika vertieft. Im folgenden Artikel soll ein Überblick gegeben werden, welche Methoden besonders häufig genutzt werden und wie dies konkret Anwendung findet.*

Anschließend werden Änderungen und Abweichungen vom Standardvorgehen analysiert. Besonders bewährte Methoden und Vorgehen, die sich in der Praxis als geeignet erwiesen haben, werden vorgestellt.

Speziell für das Bestimmen der Gewichtung beim Bewerten von Lösungsvarianten wird ein neues Verfahren vorgestellt, das in Zusammenarbeit mit Studenten der Otto-von-Guericke-Universität entwickelt und getestet wurde.

Abstract: *There are different approaches for a methodical and planned practice in the design theory. They are taught similarly at most colleges and universities and deepened in seminars and trainings. The following article should give an overview, which methods are used and how the normal practice is.*

Then changes and deviations of standard procedures are analyzed. Particularly proven methods and procedures which have proven in practice will be presented.

Especially for determining the weight in evaluating alternative solutions, a new method is presented, which was developed and tested in cooperation with students of the Otto-von-Guericke-University.

Stichwörter: *Konstruktionslehre, Methodik*

Keywords: Engineering Design, Methodology

1 Einleitung

Die Entwicklung neuer technischer Systeme ist eine der Standardaufgaben für Ingenieure. Noch häufiger sind Anpassungs- und Variantenkonstruktionen. Bei diesen Aufgaben kann der Konstrukteur auf die VDI 2221 [3] zurückgreifen, die ein generelles Vorgehen beim Entwickeln von technischen Produkten definiert.

Darin wird das Vorgehen in 7 Arbeitsschritte strukturiert, die sequenziell abgearbeitet werden sollen. Diese Schritte sind in dem allgemein bekannten Schema in Bild 1 zusammengefasst.

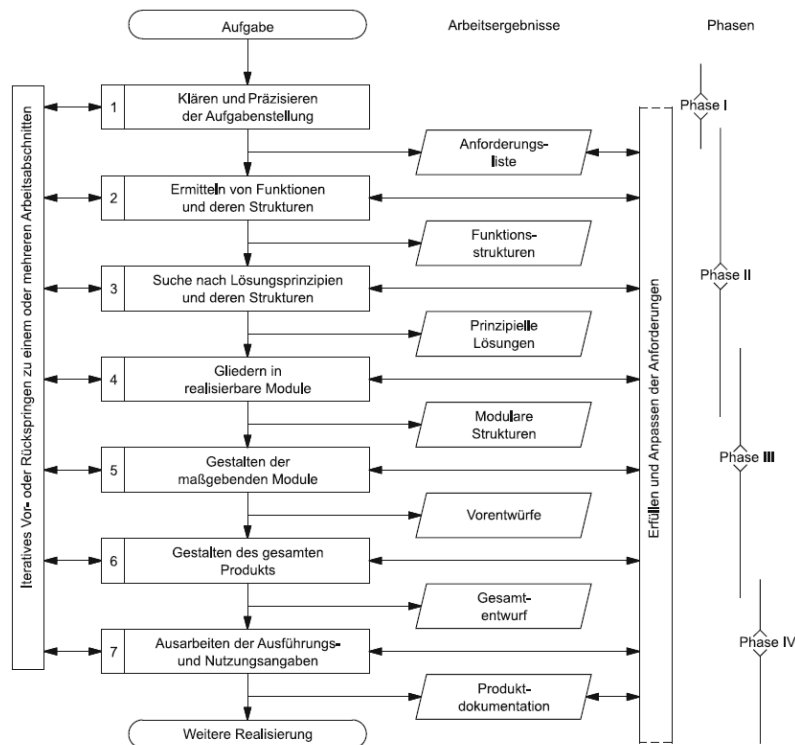


Bild 1: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [1]

2 Aufgabenpräzisierung

Der erste Schritt „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“ bereitet selbst unerfahren Konstrukteuren und Studierenden selten Probleme. Die Fragestellung „Um welches technische Problem handelt es sich?“ kann meist schnell und genau beantwortet werden. Schwierigkeiten entstehen oft dadurch, dass sich die Grundanforderungen noch im Konstruktionsprozess, als Projekt mit definierten Zeitrahmen zu verstehenden, verändern. Dies ist viel im außeruniversitären Bereich zu finden, wo Projekte unter großen Zeitdruck und bei sich rasch ändernden vernetzten Umgebungsparametern durchgeführt werden. Darum ist es sinnvoll die Gesamtaufgabe in konstruktive Teilaufgaben zu gliedern, für die zeitnah eine Lösung erarbeitet werden kann.

Weiterhin kann es vorkommen, dass die Entwicklung nicht frei ist und entweder der betreuende Ingenieur oder der/die Studierende schon eine Lösung im Sinn hat. Dadurch wird aber der gesamte PEP in eine vorbestimmte Richtung gelenkt und die Möglichkeit die beste Lösung zu finden zunichte gemacht.

Besonders Aussagen wie „Das haben wir schon immer so gemacht!“ sollten einen angehenden Ingenieur dazu anregen die bestehenden Methoden zu hinterfragen. Oft stellt sich heraus, dass solch Vorgehen auf langjährigen Erfahrungen basiert und bewährte Teillösungen beinhaltet. Dennoch sollte das Vorgehen immer auch offen für verbesserte Varianten sein und nicht oft eingesetzte Standards sollten ausgetauscht, verbessert oder manchmal auch gestrichen werden. Noch wichtiger ist aber die Abstraktion, die den Wesenskern des bestehenden Systems in Frage stellt und oft erst wirkliche Innovation ermöglicht

Typisch für die Anforderungsliste sollte sein, dass sie konstruktionsbegleitend weiterentwickelt wird. Da die Schritte 1 und 2 mit dem Ergebnis „Anforderungsliste und Funktionsstruktur“ dem Ziel dienen sich dem Thema gedanklich zu nähern, können in dieser frühen Phase noch nicht alle Anforderungen klar sein. Erst beim weiteren Bearbeiten und teils auch erst nach der Variantenfindung ergeben sich neue Anforderungen, die in die Anforderungsliste eingepflegt werden müssen.

3 Funktionsstruktur

Die Funktionsstruktur ist zu Beginn aufzustellen und hat nach der zweiten Phase deutlich weniger Einfluss auf den folgenden Konstruktionsprozess. Wenn die Funktionen ermittelt wurden und Wirkprinzipien gefunden wurden, muss die Funktionsstruktur nicht wie die Anforderungsliste konstruktionsbegleitend weitergepflegt werden.

Auch wenn die Unterteilung in Energiefluss, Signalfuss und Stofffluss den Studenten hilft, treten hier oft Schwierigkeiten bei der Abstraktion auf.

Ein Vorschlag, um an der Stelle zu vereinfachen ist das Aufstellen eine Funktionsliste. Die Struktur bereitet oft Schwierigkeiten und lenkt vom eigentlichen Finden der Funktionen ab. Fragen:

- Welche Funktion hat das Objekt?
- Welche Eigenschaften darf es nicht haben?
- Können diese aufgegliedert werden?

Um die Abstraktion zu erleichtern hat sich das **Prinzip der gedanklichen Subtraktion** bewährt. Diese ist besonders effektiv bei Anpassungs- oder Variantenkonstruktionen.

Neue Frage:

- Was passiert, wenn ein Objekt fehlt?

Gerade wenn ein konstruktiver Stand gegeben ist, kann das Prinzip sehr gut zur Abstraktion genutzt werden. Die oben erwähnte Frage kann hier in folgender Form gestellt werden:

- Wozu dient eine bestimmte geometrisch Ausprägung bei einem vorhandenen Objekt?
- Welche Funktion entfällt ohne dieses Objekt?

Aber auch wenn die Funktionen nur in einer Liste zusammengefasst werden, sollte trotzdem die Systemgrenze bewusst definiert werden, damit ersichtlich ist, was zum konstruktiven Umfang gehört und was nicht. Zur Abstraktion kann dann die Grobstruktur in Teilfunktionen unterteilt werden, die zum Finden erster Wirkprinzipien dienen.

Wichtig ist nach dem Aufstellen der Funktionsstruktur die Verallgemeinerung, um sich vom Verbessern der Teillösungen hin zu einer allgemeineren Form zu arbeiten und damit die Gesamtlösung in Frage zu stellen. Dadurch kann oft eine komplett andere Lösung gefunden werden, die das eigentliche Problem besser bedient.

In der Praxis werden hierdurch Teilprobleme herausgearbeitet, für die eine Lösung gefunden werden muss. Diese Teilprobleme werden mittels intuitiv betonter Ideenfindung weiter verfolgt und so verschiedene Wirkprinzipien erarbeitet.

4 Ideenfindung

Die Ideenfindung ist nicht immer interdisziplinär, da die Projektgruppe meist aus Studenten der gleichen Fachrichtung zusammengesetzt ist.

In der Regel ist ein wissenschaftlicher Mitarbeiter der Moderator. Da dieser über mehr Erfahrung verfügt, sollte er abschätzen, wie viele Lösungen ihm selbst spontan für ein Teilproblem einfallen. Dann fordert er die Projektgruppe auf, dass jeder für sich diese Anzahl plus eine Lösung auf eine Blatt Papier skizziert.

Im Beispiel „Ottomobil“ bestand die Aufgabe für ein Team aus 4 Studenten darin, ein Gefährt zu konzipieren, das 2 Personen und ein Transportgut mit 20 Glasbehältern

befördert. Dazu sollten min. 3 Räder in min. 2 Spuren angeordnet sein, um Standardlösungen wie z.B. ein Fahrrad zu vermeiden.

Die Anzahl der Räder und deren Anordnung sind hier zu variieren und jedes Teammitglied sollte min. 6 Lösungsansätze skizzieren.

Folgende Teillösungen wurden gefunden:

1) Dreirad → vorn zwei Räder – hinten eins	
2) Dreirad → vorn ein Rad – hinten zwei	
3) 3 Räder → Roller mit Seitenwagen	
4) 4 Räder → Quad-Auto	
5) 4 Räder → Roller mit Anhänger	
6) 4 Räder → Fahrrad mit Stützrädern	
7) 4 Räder → Dreirad <u>ungetrieben</u> - Antriebsrad in der Mitte	
8) 5 Räder → <u>Vierrad ungetrieben</u> - Antriebsrad in der Mitte	
9) 5 Räder → Dreirad mit Anhänger	

Bild 2: Varianten für ein Teilproblem

Genutzt wurde also eine vereinfachte Galeriemethode und die Lösungen wurden diskursiv aufgearbeitet. Es mussten einige Skizzen erklärt werden und viele Lösungen fanden sich bei vielen oder sogar allen Teilnehmern. Diese wurden dann zusammengefasst.

Diese Variantenfindung wird sehr gut aufgenommen, da jeder sofort einige Alternativen im Kopf hat. Erst durch die Anzahl plus eins beginnen die Teilnehmer gedanklich zu variieren und Lösungen zu kreieren, die nicht vordergründig sind.

5 Morphologischer Kasten

Diese verschiedenen Lösungen für die die Teilfunktionen werden in einem Ordnungsschema zusammengefasst. Hierbei bilden die Teilfunktionen die Zeilen und die Alternativen werden in die Spalten eingetragen. Das Einfügen der Prinzipskizzen aus der Ideenfindung mit einem kurzen Stichpunkt zur Erläuterung hat sich als praktikabel erwiesen. Werden die Lösungen jeder Zeile mit je einer Lösung der anderen Zeilen kombiniert, ist dies eine Ordnungsschema nach Zwicky oder wird oft auch morphologischer Kasten genannt.

Durch Auswahl einer Lösung pro Zeile ergibt sich eine Lösungswolke mit mehreren Varianten durch Kombination der Möglichkeiten. Es sind aber immer Lösungspfade zu finden, die miteinander unverträglich sind. Im oben angesprochenen Beispiel macht es meist keinen Sinn eine Lenkung mittels Achsschenkel mit einer Lösung, die nur ein gelenktes Rad vorsieht, zu kombinieren.

Die aus den Lösungspfaden entstandenen kombinierten Teillösungen ergeben die Lösungskonzepte. Diese sollte *ankonstruiert* werden. Dazu werden Konzeptskizzen erstellt. Diese werden von den Studenten oft mit der Hand gezeichnet und stellen den eigentlichen schöpferischen Akt dar. Hierbei müssen Dimensionen, Größenverhältnisse und die Anordnung im Bauraum festgelegt werden. Schon beim Zeichnen werden Probleme und Stärken der einzelnen Variante gut deutlich.

Häufig werden diese ersten Grobskizzen stufenweise verfeinert. Dabei wird nicht nur die zeichnerische Qualität erhöht, sondern immer mehr Details herausgearbeitet. Viele Studenten erstellen die endgültigen Skizzen direkt nach der ersten Ausarbeitung. Nur wenige durchlaufen hier mehrere iterative Schleifen, wobei festzustellen ist, dass weibliche Teilnehmer deutlich gründlicher und ordentlicher arbeiten.

6 Bewertung

Die Skizzen dienen auch als Grundlage für die anschließende Bewertung der Varianten. Für diese Bewertung müssen Kriterien ausgewählt werden. Alle Studenten benutzten die VDI 2225 oder die Nutzwertanalyse zur Bewertung der Lösungsvarianten, die Systemtechnik spielt also keine oder nur eine untergeordnete Rolle.

Die Nutzwertanalyse und die Bewertung nach VDI 2225 [2] haben beide ihre Berechtigung, unterscheiden sich aber in mehreren Punkten. Die Gegenüberstellung ist in „Konstruktionslehre“ von Pahl und Beitz [1] nachzulesen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, mit der Nutzwertanalyse werden Punkte von 0-10 vergeben und eine Gewichtung der Kriterien wird vorgenommen. Die VDI 2225 bewertet mit 0-4 Punkten und benötigt keine Gewichtung, da die Kriterien gleich stark gewählt werden.

Beim Finden der Kriterien für die Bewertung nach VDI 2225 kommt es oft zu Schwierigkeiten, da es nicht immer leicht ist, Kriterien der gleichen Stärke auszuwählen. Hierbei hat sich in der Praxis ein Vorgehen bewährt, das an einem kurzen Beispiel erklärt wird. Wenn z.B. die Kosten eine absolute Grenze nicht überschreiten dürfen und auch sonst einen dominierenden Einfluss haben, kann man eine Pseudo-Wichtung einführen,

indem das Kriterium aufgeteilt wird. In diesem Fall wurde zwischen Anschaffungskosten und Personalkosten unterschieden. Da beide Kriterien voll in die Wertung eingehen, führt dies faktisch zu einer doppelten Gewichtung.

7 Neue Methode zum Festlegen der Gewichtung

Die Nutzwertanalyse wird im Allgemeinen häufiger verwendet. Besonders bei den Gesamtkonzepten und bei wichtigen Entscheidungen wurde der Mehraufwand aufgrund der Gewichtsfindung mittels Zielsystem toleriert. Trotzdem wird dieser Teil der Nutzwertanalyse oft mangelhaft ausgeführt, da die Studenten den Umgang mit dem Zielsystem als zu kompliziert empfinden.

Deshalb habe ich eine Methode entwickelt, die einfacher zu handhaben ist und diese von Studentengruppen mit positivem Ergebnis testen lassen.

1. Die Tester sollten ungefähr 10 Kriterien, nach denen sie bewerten möchten, auflisten.
2. Da die Gesamtheit der Gewichtung 100% ergeben muss, werden die 100% durch die Anzahl der Kriterien geteilt (im Beispiel $100\% / 10 = 10\%$ pro Kriterium).
3. Nun werden die Normalgewichte (hier 10 %) um die Hälfte der Anzahl der Kriterien nach oben und unten variiert. (Bei 10 Kriterien +5% und -5%)
4. Damit ergeben sich Gewichte zwischen 5% und 15%. Das Normalgewicht muss herausgestrichen werden, da die Summe der Gewichte sonst nicht 100% ergibt.
5. Nun sollten die verschiedenen Gewichte den Kriterien zugeordnet werden.

Die Zuordnung ist vom gesamten Team vorzunehmen und sollte diskutiert werden. Da hier eine eindeutige Rangfolge ermittelt wird und der direkte Vergleich durch die Frage „Was ist wichtiger?“ differenzierter beantwortet werden kann, ist das Ergebnis bei allen Teams ähnlich und damit auch nachvollziehbar ausgefallen.

8 Weitere Bearbeitung

Die Bewertung nach VDI 2225 ist weniger zeitintensiv und eignet sich besonders für Entscheidungen über kleinere Teilprobleme. Hier gibt es bei unerfahrenen Teilnehmern Schwierigkeiten die Wertungen von 0-4 gedanklich einzuordnen. Dann kann es helfen mit einer Plus-Minus-Wertung zu arbeiten. Dabei werden folgen Bewertungen vergeben:

Tabelle 1: Plus-Minus-Liste

++	ideal	4
+	gut	3
o	neutral	2
-	nur bedingt geeignet	1
--	keine Eignung	0

Das Grobkonzept wird nach der Konstruktionsmethodik meist ordentlich erarbeitet. Danach ist es ein häufig auftretendes Problem, dass viele kleine, aber dennoch wichtige Entscheidungen ohne nachvollziehbare Grundlage getroffen werden.

Hier sollte das Aufstellen einer Liste mit Vor- und Nachteilen oder eine Plus-Minus-Tabelle eingefordert werden. Schon durch das bewusst machen von Stärken und Schwächen werden dabei bessere Ergebnisse in der Detailausarbeitung erzielt.

Literatur

- [1] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7
- [2] VDI 2225 Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren
- [3] VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte

Konzeptentwicklung für die Beschleunigung von Planungsprozessen durch die Konstruktion

Thivakar Manoharan, Peter Köhler

Universität Duisburg-Essen, Institut für Produkt Engineering

Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion

Lotharstr.1, 47057 Duisburg

Email: thivakar.manoharan@uni-due.de; Internet: <http://www.uni-due.de/cae>

Inhalt: Zu den Themenfeldern, die heute mit „Industrie 4.0“ verbunden werden, gehören informationstechnische Lösungsansätze zur Beschleunigung, Qualifizierung und Optimierung von Produkten und Engineering-Prozessen. Das Daten-, Informations- und Wissensmanagement hat daher einen besonderen Stellenwert. In der Prozesskette Konstruktion-Fertigung gibt es vielfältige, wechselseitige Abhängigkeiten, die zu beachten sind, wenn eine anforderungsgerechte und zugleich auch wirtschaftlich herstellbare Produktgestalt abzusichern ist. Die Qualifizierung der damit verbundenen Engineering-Prozesse erfordert anpassungsfähige digitale Produkt- und Prozessmodelle, die mit weiteren technologischen/ semantischen Informationen angereichert und wissensbasiert verknüpft werden können. Im Beitrag werden dazu entsprechende Möglichkeiten aufgezeigt. Dabei wird durch eine Anpassung der Arbeitsumgebung des Konstrukteurs und der damit möglichen Informationsanreicherung des CAD-Modells, die Klassifizierung der Produktdatenmodelle im PLM-System und der Informationsaustausch in der betrachteten Prozesskette verbessert.

Abstract: The fields, which are now associated with "Industry 4.0", includes information technology solutions to accelerate, qualify and optimize products and engineering processes. This indicates the special significance of data, information and knowledge management. In the process chain between design and manufacturing many mutual dependencies must be considered to ensure a product shape, which both meets the requirements and is economically producible. The qualification of the related engineering processes requires adaptable product and process models, which can be enriched with additional technological/ semantic information and can be linked knowledge based to each other. In this article a solution is presented, which improves the classification of product data models in the PLM system and the exchange of information in the considered process chain. This became possible by adapting the working environment of the designer and consequently the information enrichment of the CAD model.

Stichwörter: CAD, PLM, Modellbasierte Klassifikation, Prozesskette Konstruktion-Fertigung

Keywords: CAD, PLM, Model Based Classification, Process Chain Design and Manufacturing

1 Einleitung

Zwischen Konstruktion, Fertigungsplanung und Qualitätssicherung gibt es, wie auch in anderen Bereichen, eine Vielzahl von Informationsbrüchen, die einer durchgängigen Prozessunterstützung entgegenstehen, so dass sich ein Mehraufwand ergibt und erforderliche Verkürzungen von Durchlaufzeiten nicht erreicht werden können. [1]

Die im Rahmen eines Industrieprojektes durchgeführte Analyse der Planungsprozesse eines Einzelfertigers hat bestätigt, dass es durch unzureichende Aufbereitung und Verknüpfung der vorhandenen Daten zu Redundanzen kommt. Informationen aus der Konstruktion werden gar nicht oder nur unvollständig digital zur Verfügung gestellt und verknüpft. Der Arbeitsplaner muss daher diese Informationen unter Einbeziehung der ausgedruckten Produktdokumentation selbst zusammentragen. [2]

Ziel war es daher, Konzepte zu entwickeln, um das bei der Konstruktion entstandene Wissen ohne großen Mehraufwand in die Arbeitsplanung und CAM-Programmierung zu bringen. Vor allem die Möglichkeiten zur Anreicherung der CAD-Modelle mit weiteren relevanten Informationen werden noch unzureichend genutzt. Durch bedarfsgerechte Kennzeichnung der gestalteten Elemente während der Konstruktion könnten hier die nachgelagerten Schritte der Arbeitsplanerstellung und NC-Programmierung optimiert werden. Zu beachten ist allerdings, dass hier auch Wechselwirkungen mit PDM- und ERP-Systemen zu betrachten sind, da die Identifizierung kostenbestimmender Merkmale Grundlage für die weitere Beschleunigung und Qualifizierung von Planungsprozessen ist [4]. Daher sind zunächst die Informationsbrüche in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung in beiden Richtungen zu identifizieren, denn auch nach der Fertigungsplanung bzw. NC-Programmierung erfolgt häufig keine Rückmeldung der Anpassungen und schon gar nicht der resultierenden Bearbeitungszeiten bzw. Kosten einer Produktvariante.

CAM-Programmierungen erfolgen auf der Basis von system- und firmenspezifischen Vorlagen und dem CAD-Modell (im nativen oder neutralen Datenformat). Mittels Feature-Erkennung werden bestimmte Geometrien (z. B. Bohrungen oder Taschen) identifiziert. Das CAD-Modell selber enthält bisher neben der Geometrie aber keine weiteren verwertbaren Fertigungsinformationen, obwohl Möglichkeiten zur Anreicherung mit planungsrelevanten Daten bestehen. Hier hat zwar jedes CAD-System seine Eigenheiten, dennoch kann von einem Trend zur Verknüpfung von semantischen Informationen mit dem CAD-Modell ausgegangen werden, der über den bisherigen Featureansatz hinausgeht. Im CAD-System Creo sind das z.B. Anmerkungs-KE's, in Siemens NX

gewinnen PMI's (Product and Manufacturing Information) immer mehr an Bedeutung. Die Verbindung unterschiedlicher Wissensdomänen in Engineering-Prozessketten setzt aber auch ein ausbaufähiges PLM-Konzept und entsprechende Engineering-Informationssysteme voraus.

2 Anreicherung der Produktdatenmodelle

Die Informationstransformation zwischen CAD-Produktdaten und Daten der Arbeitsplanung erfordert erweiterte Feature-Methoden und neue Lösungsansätze hinsichtlich des Informations- und Wissensmanagements.

Teilaufgaben sind u.a.:

- Definition geeigneter Informationsschnittstellen zwischen den Softwarewerkzeugen der Konstruktion und Arbeitsplanung.
- Konzeptentwicklung zur Identifizierung von CAD-Modellkomponenten, die als Kosten-/Zeittreiber einzustufen sind. Zu klären ist dabei auch, welche Alternativen vorliegen und wie dem Konstrukteur ein Eindruck über die entstehenden Kosten gegeben werden kann.
- Absicherung von Concurrent-Engineering-Aspekten in der betrachteten Prozesskette unter Beachtung von Freigabeprozessen.
- Bidirektionale Verknüpfung von CAD-Produktdatenmodellen mit Daten der Arbeitsplanung.
- Abbildung unterschiedlicher Bearbeitungszustände im Produktdatenmodell (CAD/PDM/PLM).
- Integration von Prüfmaßen und Prüfprotokollen in die IT-Systemkopplungen (CAD/CAQ/PDM/CAM).
- Konzeptentwicklung für ein virtuelles Prototyping zur Qualitätssicherung.

Hierzu wurden modellbasierte problemspezifische Klassifizierungsdaten identifiziert, die im Konstruktionsprozess ausgelesen, automatisiert in das PLM-System übergeben und anschließend bei der Freigabe des Modells in das ERP-System übertragen werden können. Zusätzlich wurden Konzepte entwickelt, um die 3D-CAD-Modelle mit semantischen Informationen zu ergänzen und so über die Anmerkungen am 3D-CAD-Modell, für das spezielle Ansichtsoptionen bedarfsgerecht definiert werden, die

klassischen Fertigungszeichnungen zu ersetzen. Systemabhängig können in diesen 3D-Anmerkungen auf unterschiedliche Weise zusätzliche fertigungsrelevante Informationen abgelegt werden. In diesem Zusammenhang wurde auch Möglichkeiten der Informationsextraktion und der Informationsweitergabe über neutrale Datenformate diskutiert, um dem Anwender die Informationen aus dem CAD-Modell direkt im ERP-System zur Verfügung zu stellen. Voraussetzung hierfür ist die Festlegung von planungsrelevanten Merkmalen für alle Bauteile bzw. Arbeitsplanvorlagen. Bild 1 zeigt einen möglichen Ablauf zur modellbasierten Klassifizierung.

Ablauf - Model Based Classification

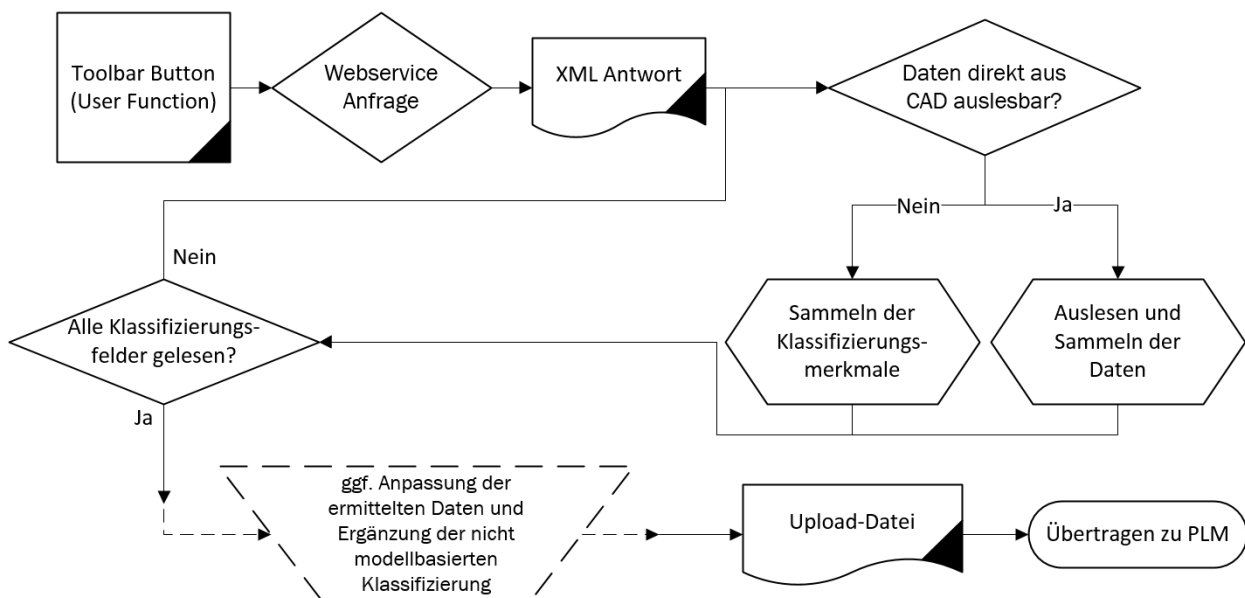


Bild 1: Ablaufdiagramm zur modellbasierten Klassifizierung

Der Prozess der modellbasierten Klassifizierung sollte immer durch einen expliziten Aufruf der Funktion gestartet werden, damit nicht bei jedem Schritt der CAD-Modellierung unnötige Benutzerdialoge eingebunden werden müssen. Bei dem produktiven Einsatz dieses Tools erfolgt die Klassifizierung bzw. Informationsanreicherung bei jedem Speichervorgang, damit die Klassifizierungsdaten immer mit den CAD-Modelldaten übereinstimmen.

Das System liest mit Hilfe eines Webservice die zu füllenden Klassifizierungsfelder der PLM-Klasse aus der PLM Datenbank. Die modellbasierten Klassifizierungsfelder sind in der Datenbank mit einem Tag gekennzeichnet. Abhängig von den in der XML-Antwort

vorhandenen Elementen werden die Klassifizierungsdaten aus dem CAD-System ausgelesen. Hierbei können verschiedene Typen vorkommen. Einige Daten können direkt zum Auslesen in Form von Eigenschaften oder Beziehungen vorliegen. Andere Klassifizierungsdaten sind erst aus der Kombination verschiedener Bedingungen mit verschiedenen Feature in Form von geometrischen Ausprägungen ersichtlich. Diese Daten können anhand einer Geometrieanalyse ermittelt werden. Andernfalls können komplizierte Daten, die jedoch für den Benutzer eindeutig visuell sichtbar sind, auch in Form einer manuellen Abfrage, ergänzt werden.

Alle diese Daten werden anschließend von der GUI in eine spezielle Upload-Datei geschrieben und zur Übertragung in andere Engineering-Informationssysteme bereitgestellt.

3 Umsetzung und Validierung

Das beschriebene Konzept wurde exemplarisch in NX und Teamcenter umgesetzt. Hierzu wurde ein Webservice erstellt, welcher auf die Teamcenter Datenbank zugreift, um Klasseninformationen zu erhalten. Die modellbasierten Klassifizierungsfelder werden in Teamcenter durch das Annotation-Feld gekennzeichnet. Der Inhalt dieses Feld gibt Aufschluss darüber, ob die notwendigen Informationen in den Part Attributes oder Expressions zu finden sind, über die Feature-Erkennung zu suchen sind oder manuell eingegeben werden müssen. Bild 2 zeigt die Klassifizierungsdaten in NX in Form von Part Attributes und Expressions.

Die Feature-Erkennung erfolgt in NX über das Feature Teaching und Feature Recognition. Hierbei sucht das System nach vordefinierten geometrischen und topologischen Zusammenhängen und erkennt somit gewisse geometrische Ausprägungen, unabhängig von der Modellaufbaustrategie. Diese Feature können dann direkt bei der CAM-Programmierung weitergenutzt werden.

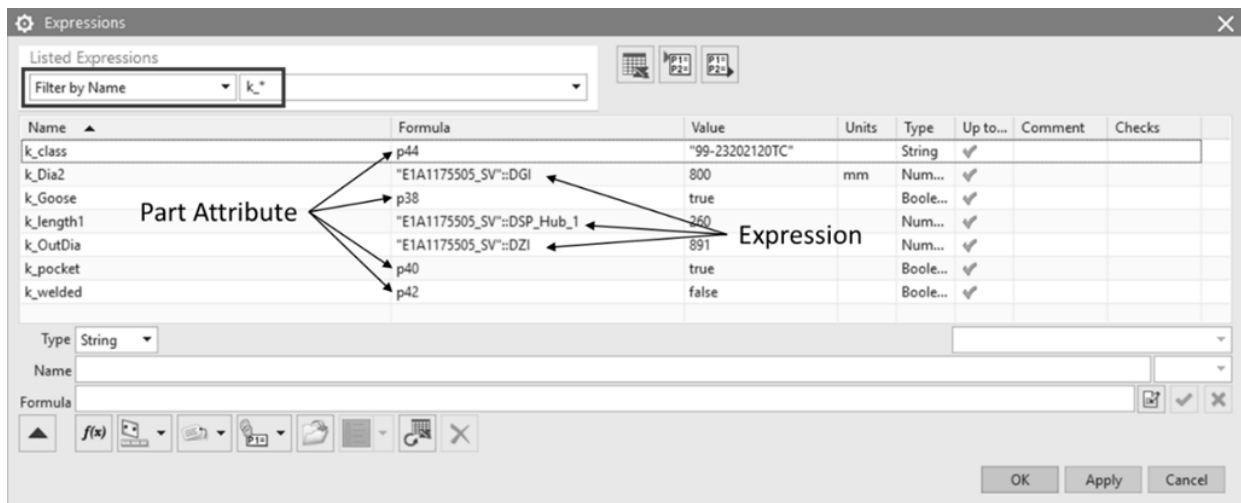


Bild 2: Modellbasierte Klassifizierungsdaten

Alle aus dem CAD-System ausgelesenen Daten werden zusammen mit den nicht modellbasierten Klassifizierungsfeldern dem Benutzer angezeigt, um ggf. die Klassifizierung anzupassen (Bild 3). Hierbei können die Klassifizierungsdaten entweder aus booleschen Ausdrücken, numerischen Werten oder Zeichenketten bestehen. Letztere beiden können in Teamcenter durch eine Auswahlliste eingeschränkt sein.

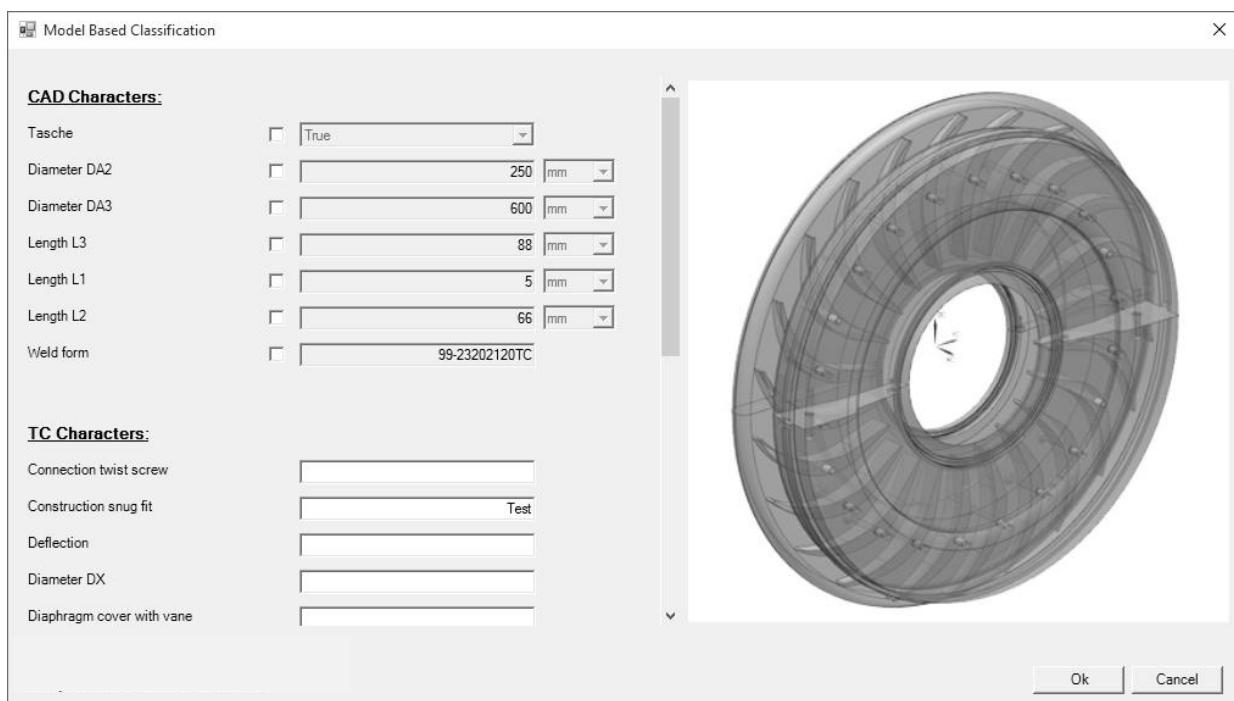


Bild 3: GUI zur Klassifizierung in NX

Abschließend werden die Daten nach Teamcenter über eine spezielle Uploaddatei übertragen. Bild 4 zeigt die übertragenen Daten von NX nach Teamcenter. Die Tags der

modellbasierten Klassifizierungsdaten werden hier vor den Werten dargestellt. Alle anderen Felder werden zunächst nicht modellbasiert klassifiziert. Dieser Prozess kann mehrfach wiederholt werden. Sobald das Modell den Status freigegeben erhält, wird die Klassifizierung gesperrt.

T-Guide baffle		
Vaned outlet diffuso		
goose neck		
Length L3	I3	88.0000
Length L3 (Unit)		mm
Length L1	I1	5.0000
Length L1 (Unit)		mm
Length L2	I2	66.0000
Length L2 (Unit)		mm
Weld form	wf	JA
Certification towards EN 10204		Dec. of compliance with order

Bild 4: Übertragung der Klassifizierungsdaten nach Teamcenter

Die Klassifizierungsdaten werden an das ERP System (hier SAP) übertragen. Mit Hilfe der modellbasierten Klassifizierungsdaten kann im ERP System eine (teil-)automatisierte Erstellung der Arbeitspläne erfolgen. Hierbei wird das mit weiteren Informationen angereicherte Produktmodell anstelle der bisher genutzten Fertigungszeichnungen herangezogen. Das 3D-Produktmodell wird in der Konstruktionsphase mit PMI's, geeigneten Ansichten und Schnitten ergänzt, so dass der Arbeitsplaner mit Hilfe eines JT-Viewers im ERP-System alle benötigten Informationen digital vorliegen hat.

Auch die anschließende NC-Programmierung kann durch die (teil-)automatisierte Wissensanreicherung der CAD-Modelle profitieren. Vom System erkannte Fertigungsfeature beinhalten vordefinierte Fertigungsinformationen, die gemeinsam mit den PMI's, Ansichten und Schnitten zur Festlegung der Fertigungsschritte genutzt werden können.

4 Fazit

Die im Rahmen eines Industrieprojektes durchgeführte „Ist-Analyse von Planungsprozessen zur Aufdeckung von Beschleunigungspotentialen“ hat ergeben, dass es durch unzureichende Aufbereitung der vorhandenen Daten zu einer redundanten Bearbeitung kommt. Eine Folge daraus ist auch die Entstehung längerer Bearbeitungszeiten.

Es konnte gezeigt werden, dass durch eine Anpassung der Arbeitsumgebung des Konstrukteurs, die Klassifizierung der CAD-Modelle im PLM-System verbessert wird. Hierdurch wurde eine durchgängige digitale Prozesskette Konstruktion-Arbeitsvorbereitung-Fertigung unter Einbindung der vorhandenen Infrastruktur realisiert. Die ermittelten modellbasierten Klassifizierungsdaten werden automatisiert aus den CAD-Modellen ausgelesen und an das PLM-System übertragen. Damit können dann diese planungsrelevanten Daten direkt im ERP-System zur Arbeitsplanerstellung genutzt werden. Zusätzlich werden auch nicht modellbasierte Klassifizierungsdaten in der CAD-Umgebung abgefragt, um eine erneute Klassifizierung im PLM-System zu vermeiden. Der methodische Ansatz, ausgehend von der Informationsanreicherung im CAD-Modell, das Daten- und Wissensmanagement in einer Applikation durchzuführen, welches auch auf Daten anderer IT-Systeme (PLM, ERP, Office, ...) zugreift, ist auch auf andere Problemstellungen übertragbar.

Literatur

- [1] Arnold, Volker; Dettmering, Hendrik; Engel, Tortsten; Karcher, Andreas: *Product Lifecycle Management beherrschen*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2011. – ISBN 978-3-642-21812-5
- [2] Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid: *Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin: Springer, 2011. – ISBN 978-3-540-88973-1
- [3] Hooshmand, Yousef: *Transparenzerhöhung bei der Entwicklung von individualisierten Produkten in der Einzelfertigung*. München: Verlag Dr. Hut, 2015. – ISBN 978-3-8439-2415-3

Methoden und Methodik zum Generieren von Produktideen der Generation Industrie, Home, Everyday Life 4.0

Henrik Schnegas

Hochschule Wismar, University of Applied Sciences: Technology, Business and Design

FB Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik, FG Konstruktionstechnik

Philipp-Müller-Str. 14, 23966 Wismar

Email: henrik.schnegas@hs-wismar.de

Inhalt: Industrie 4.0 ist seit der Hannover Messe 2011 zum Schlagwort für aktuelle Technologieentwicklung geworden. Gemeint ist die verstärkte Vernetzung von Produkten mit Maschinen, Maschinen mit anderen Maschinen und Maschinen und Menschen in der inner- und überbetrieblichen Wertschöpfungskette durch Nutzung Embedded Systems und Cyber-physikalischer Systeme im Internet der Dinge. Während große Unternehmen bereits erfolgreiche Projekte gestartet haben, gibt es beim Mittelstand und vor allem den KMU bisher kaum Aktivitäten, weshalb im Februar 2016 die Initiative Industrie4.0@Mittelstand initiiert wurde. Im vorliegenden Beitrag wird eine Methodik zur Vorgehensweise vorgestellt, wie in KMUs Produkte der Generation Industrie, Home oder Every Life 4.0 erdacht werden können. Vorgestellt werden Werkzeuge wie Bisoziatives Mind Map, SCAMMPERR oder die Osborn-Checkliste. Im Vordergrund stehen neue Produktideen. Der Umgang mit großen Datenmengen oder die kostenintensive Entwicklung neuer Software-, Sensoren- und Aktorensysteme wird nicht fokussiert, sondern den großen Hightech Konzernen überlassen.

Abstract: Industry 4.0 is one of the most popular keywords in the current technology development. The meaning is the networking of machine and product, machine to machine or machines to humans by using embedded systems, cyber-physical systems in the internet of things. Because there were any problems to start projects in small and middle enterprises, in february 2016 started the initiative Industrie4.0@Mittelstand. In this paper you learn something about methods to find products of generation Industry, Home or Everyday Life 4.0. Presented tools are Bisociative Mind Mapping, SCAMMPERR and the Osborne-Checklist. Not discussed are big data, software problems and the development of new sensors and actors.

Stichwörter: Cyber-Physische-Systeme, Embedded Systems, Home 4.0, Industrie 4.0, Internet der Dinge, KMU, Kreativitätsmethoden, Produktentwicklung

Keywords: Cyber-Physical Systems, Embedded Systems, Home 4.0, Industry 4.0, Internet of Things, SME, Creativity Methods, Product development

1 Einleitung

2011 wird auf der Hannover Messe erstmalig das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und das Bundesministerium für Forschung und Bildung initiierte Zukunftsprojekt Industrie 4.0 der Öffentlichkeit vorgestellt. Nach der Mechanisierung mittels Dampfmaschine beim Übergang vom 18. zum 19. Jahrhundert, der Fließbandfertigung nach Taylor und Ford zu Beginn des 20. Jahrhunderts und der anschließenden Automatisierungs-, Digitalisierungs- und Computersteuerungsphase seit den 60er Jahren ebenfalls des 20. Jahrhunderts, soll mit Industrie 4.0 die vierte Industrielle Revolution eingeleitet werden. Ziel ist die digitale Veredelung der Produktionsanlagen und der industriellen sowie alltäglichen Produkte unter Nutzung cyber-physischer Systeme (CPS) für die Nutzung im Internet der Dinge (IoT). Letztere sind Visionen, die bereits Anfang der 90er Jahre erdacht und im Rahmen der Entwicklung elektronischer Sensoren und der mit ihnen agierenden Akteure vorangetrieben worden sind. Nicht nur Mensch-Maschine, sondern Maschine-Maschine-Mensch im eigenen wie auch lokalen bzw. globalen Raum sollen miteinander kommunizieren und voneinander lernen und sich beeinflussen. Durch die Initiative beeinflusst, hat sich der Begriff Industrie 4.0 zum Leitthema der Industrie entwickelt und ist Bestandteil unzähliger Tagungen und Konferenzen geworden. Die Karikatur in Bild 1 aus dem Jahr 2014 zeigte jedoch, dass, wie so oft, viel zu viel diskutiert, kritisiert und zerredet wurde.



Bild 1: Karikatur Industrie 4.0 im Jahr 2014 [03]

Auf der CeBIT 2015 wurde im Auftrag des BMWi und BMBF eine Studie zur Anwendung von Industrie 4.0 veröffentlicht, in der eingeschätzt wurde, dass die Initiative Industrie 4.0 in erster Linie eine verbändegetriebene Plattform darstellt, in der besonders die mittelständischen Unternehmen kaum vertreten sind. Mit Stand Juli 2016 waren beim Ministerium für Forschung 245 geförderte Projekte registriert, ebenfalls ohne feststellbare Dominanz mittelständischer Unternehmen. Zusammen mit den bestehenden Ängsten, vor allem dem prognostizierten Wegfallen von ca. 18,3 Mio. Arbeitsplätzen, wurde im Februar 2016 eine Initiative Industrie4.0@Mittelstand gestartet, in der auch der Mensch wieder in das Zentrum technologischer Entwicklung gestellt wird und bisherige Mehr- oder Fehldeutungen zum Thema Generation 4.0 benannt und die eigentlichen Ziele präziser formuliert wurden. Für das Erreichen der Ziele:

- Speicherung von Daten und Informationen am Produkt und den Produktionsmitteln
- Vernetzung von Produkten und Produktionsmitteln
- Individuelle autarke Entscheidungsfindung der Produkte und Produktionsmittel
- Echtzeitnahe, ereignisorientierte Beeinflussung entlang der inner- und überbetrieblichen Wertschöpfungskette

ist es notwendig, gerade für technische und klassische maschinenbauliche Unternehmen computer-, internet- und datenbasiertes Wissen mit klassischem Vorgehen zu verknüpfen.

2 Methode zum Generieren von Produkten der Generation 4.0

Abbildung 1 zeigt den Arbeitsalgorithmus, der für das Generieren von Produkten der Generation 4.0 denkbar ist. Die angestrebten Produkte sind keine Produkte im Sinn einer Neukonstruktion. Sie sind die Verbesserung bzw. Weiterentwicklung bestehender Produkte, die auf das Technologie-Level Generation 4.0 gehoben werden sollen. In einer *WARM-UP-Phase* wird zunächst jeder Produktentwickler hinsichtlich des aktuellen Wissensstandes zum „Internet der Dinge“ befragt. Verwendet wird das Mind Map Verfahren. Jedes Teammitglied visualisiert und strukturiert das eigene Wissen zum Thema Internet, Computer, Vernetzung und Produktintelligenz. Eine bereits vorhandene, z.B. aus früheren Meetings stammende Mind Map wird ergänzend als Schulungsmaterial herangezogen. Da das Entwicklungstempo bei der IT-Entwicklung sehr rasant ist, kann so bei mehreren Teammitgliedern ein ständig sich aktualisierendes Wissen zusammengetragen und für

Folgeprojekte als sich entwickelnder Wissensspeicher bereitgestellt werden. Diese Schulungsphase ist die Basis für die erfolgreiche Anwendung der folgenden Arbeitsschritte.

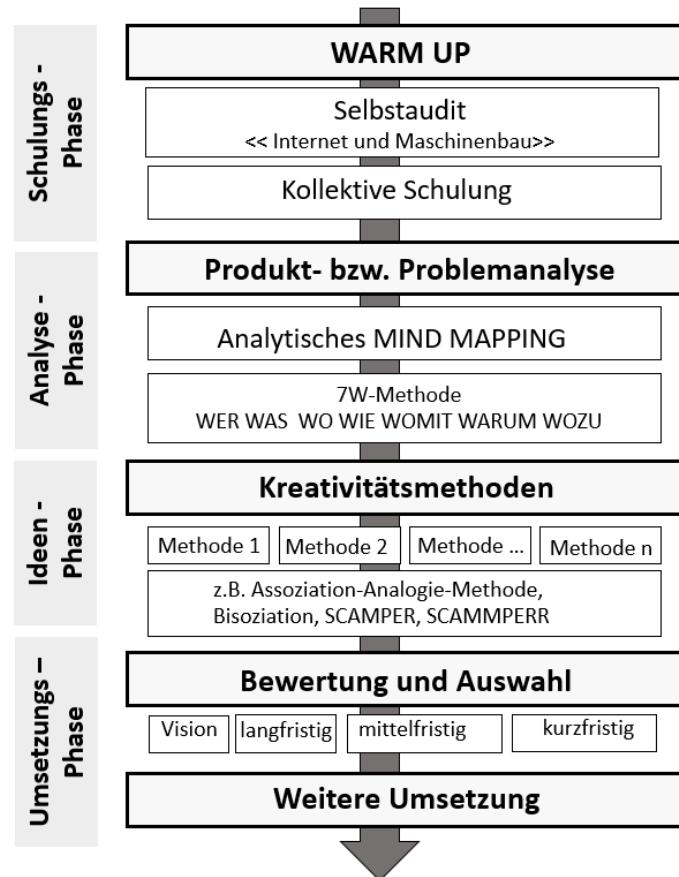


Bild 2: Methode zum Generieren von Produkten der Genration 4.0

In einem zweiten Arbeitsschritt wird ein zu qualifizierendes bestehendes Produkt strukturiert analysiert. Wer, was, wo, wie, womit, warum, wozu tut ist eine zu bevorzugende Fragetechnik. Am wichtigsten ist jedoch die strukturierte Darstellung vor allem der funktionsbezogenen verwendeten Komponenten ebenfalls in einer Mind Map. Im Bild 3 sind Mindmaps zum Thema Internet of Things (Schulungsphase) und zum Beispielprodukt Mülltonne (Analysephase) dargestellt. Im nachfolgendem Abschnitt werden 3 Verfahren vorgestellt, mit denen die zuvor analysierten Produktkomponenten mit den Schlagwörtern zum Internet der Dinge verknüpft und zu ganzheitlichen Produkten der Generation 4.0 weitergedacht werden können.

SCAMMPERR

SCAMMPERR ist ein Akronym für die in der Abbildung 4 dargestellten Begriffe. Die Begriffe sind Reizworte, die im Zusammenhang mit gezielten Fragen bzw. Anweisungen per Intuition neue Produktideen im Anwender erwecken sollen. Bezugsobjekt ist das bestehende Produkt, welches in die Generation 4.0 überführt werden soll.

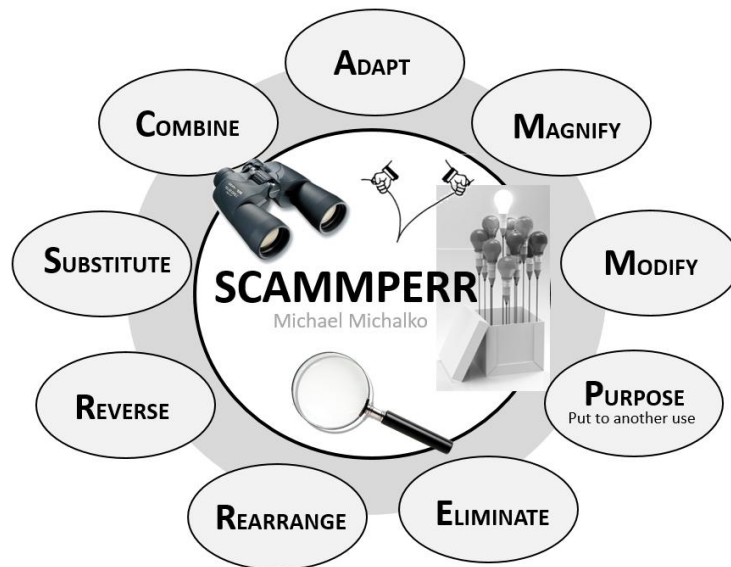


Bild 4: Visualisierung des Akronymes SCAMMPERR

Im Einzelnen steht das Akronym für:

S	Substitute	Ersetze Komponenten, Materialien, Personen. Tausche aus.
C	Combine	Kombiniere/vermische mit anderen Zusatzfunktionen; überschneide mit Service, integriere Funktionalität.
A	Adapt	Ändere ab, verändere Funktion, verwende ein Teil eines anderen Elements, einer Baugruppe, eines Aggregates.
M	Magnify	Vergrößere, mache es enorm größer oder kleiner; höher; übertreibe; füge große Funktionen oder Zusatznutzen hinzu.
M	Modify	Steigere oder vermindere Maßstab oder -stäblichkeit, verändere Gestalt, variiere Attribute (Farbe, Haptik, Akustik, ...)
P	Put/Purpose	Finde weitere Verwendung(en), finde anderen Zweck/Anwendungsbereich des Objektes bzw. Zusammenhang zur Nutzung.
E	Eliminate	Entferne Elemente, Komponenten, Funktionen, reduziere auf Kernfunktion, vereinfache.
R	Rearrange	Stelle um, verändere die Reihenfolge, vertausche Komponenten, variiere Geschwindigkeit oder Schema von Folgen
R	Reverse	Kehre um, stülpe das innere nach außen, stelle auf den Kopf, finde entgegengesetzte Nutzung

Osborne-Checkliste

Die Checkliste nach Osborne stellt in Analogie zum SCAMMPERR eine Ideengenerierung mittels Reizwort, in diesem Fall Reizsatz dar. Durch das Lesen der folgenden Komplexe können intuitiv neue Lösungen assoziiert werden. Je nach Situation entspricht x der Idee, dem Produkt oder dem Prozess

Anders verwenden! Wie könnte x (wo)anders eingesetzt werden?

Anpassen! Was ähnelt x? Was könnte übernommen werden?

Ändern! Welche Aspekte/Merkmale von x können verändert werden?

Vergrößern! Können wir x vergrößern/verstärken/erhöhen/verlängern/...?

Verkleinern! Können Sie x verkleinern/abschwächen/verkürzen/verfeinern/...?

Ersetzen! Was können Sie an x ersetzen/austauschen?

Umstellen! Können Sie Teile von x tauschen, die Reihenfolge ändern oder Ursache-Wirkung umdrehen?

Umkehren! Können Sie das Gegenteil von x machen? Wie sieht das Spiegelbild von x aus?

Kombinieren! Können Sie x mit anderen Ideen verbinden? Kann x Teil von etwas Größerem sein? Können Sie x in kleinere Teile aufspalten?

Transformieren! Können Sie x zusammenballen/ausdehnen/ komprimieren/ verflüssigen/...?

Sicherlich sind auch die unter 3.1 generierten Ideen mit SCAMMPERR oder Osborne ableitbar. Hinzu kommen vielleicht Ideen wie: dreckige Mülltonne ordert Reinigungsservice, bakteriell verkeimte Tonne meldet Krankheitsgefahren, Tonnen verändern individuell z.B. nach Geldbeutel ihr Aufnahmevermögen oder Mülltonnen verfahren automatisch am Abholtag zu definierten Abholpunkten. Wie bereits im Abstrakt berichtet, sind mit diesen Methoden abweichend von Standardverfahren Ideen erzeugbar, die eine umfangreiche Sensoren- und auch Aktorenentwicklung nach sich ziehen, aber reine Produkte der Generation 4.0 sind.

Literatur

- [1] Schnegas, Henrik: „Kreativitäts- und Innovationsmethoden / Entrepreneurship“, Skript 2015, Hochschule Wismar, Bereich Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik.
- [2] Agiplan, Fraunhofer, Zenit: „Erschließung der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0 im Mittelstand‘“, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Juli 2015.

Modellbasiertes Systems Engineering – methodische Unterstützung durch PLM

Dr.-Ing. Marc Glauche*, Prof. Dr.-Ing. Ute Dietrich

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Wirtschaftsingenieurwesen,
 Fachbereich 4 Informatik, Kommunikation und Wirtschaft
 Ostendstraße 1, 12459 Berlin
 Email: ute.dietrich@htw-berlin.de; Internet: <http://www.htw-berlin.de>

*Bundesdruckerei GmbH
 Kommandantenstr. 18, D-10969 Berlin
 Email: marc.glauche@bdr.de; Internet: <http://www.bundesdruckerei.de>

Inhalt: *Heutige Produkte sind zunehmend durch multi-disziplinäre Eigenschaften und divergierende Nutzungsmodelle gekennzeichnet. So ist der wertmäßige Anteil an Elektronik und Software in den letzten Jahren ständig gestiegen. Das „Internet in Dingen“ hält in vielen Bereichen Einzug und erlaubt zum einen die Generierung völlig neuer Geschäftsmodelle, erfordert zum anderen aber auch ein methodisches Umdenken in der Produktentstehung, der Planung und Steuerung von Prozessen, der IT-Lösungen und unterstützenden Organisationsformen. Der vorliegende Beitrag soll ein Konzept für ein modellbasiertes Systems Engineering basierend auf einem PLM-System vorstellen und wichtige offene Anforderungen an die Gestaltung zukünftiger Unterstützungsprozesse ableiten.*

Abstract: *Currently products are multidisciplinary and marked by different use cases. The part of electronic and software is increased constantly. In many areas the “internet in things” is presented which allows a totally new generation of business models. These trends requires new methods in product development, in planning and controlling of processes and adapted IT-Solutions. The following paper presents an advanced concept of model based Systems Engineering based on a PLM-Platform and addresses open requirements on the design of future supporting processes.*

Stichwörter: *Klassische und innovative Methoden der systematischen Produktentwicklung*

Keywords: *MBSE, innovative methods for product development*

1 Einleitung

Im Zuge von Industrie 4.0 werden Produkte nicht nur zunehmend komplexer, sie sollen auch schneller produziert werden. Um dies zu erreichen, müssen die Produktionssysteme diesem Wandel folgen. Die an sie gestellten Anforderungen gelten jedoch nicht nur für die Nutzungszeit eines Produktionssystems und den damit verbundenen Diensten, die in an

die Phase des Betriebs gekoppelt sind, sondern auch für dessen gesamten Lebenszyklus einschließlich der Entwurfs- und Herstellungsphase. In diesem Zeitraum arbeiten Experten unterschiedlicher Disziplinen zusammen um ein System zu schaffen, welches 1. In der Lage ist, die geplanten komplexen, individualisierten und zunehmend in kleinen Losgrößen geforderten Produkte kostengünstig zu fertigen und 2. das in immer kürzer werdenden Planzeiten erstellt und verändert bzw. gerüstet werden kann. Um der ersten Anforderung gerecht zu werden, müssen flexiblere und anpassungsfähigere Produktionssysteme mit Fähigkeit zur ad-hoc-Vernetzung entworfen werden. Dies erhöht die Komplexität der Produktionssysteme enorm. Ein vielversprechender Lösungsansatz ist hier das modellbasierte Systems Engineering Denken, begründet auf einer multidisziplinären Systembeschreibung sowie der mechatronischen Informationsobjektansatz zur Verlinkung der betroffenen Informationen. Zur Erreichung der zweiten Forderung müssen Produktionsanlagen in einer frühen Entwicklungsphase bereits auf Fehler getestet und virtuell in Betrieb genommen werden können.

2 automatisierungsgerechte Produktentwicklung mittels MBSE

Um mit der gestiegenen Komplexität von Produkt und Produktionssystem umgehen zu können, wurden neue Entwurfsmethoden entwickelt, die ein interdisziplinäres Zusammenwirken bereits in frühen Phasen der Systementwicklung unterstützen. Ein gebräuchlicher Ansatz ist hierbei der Systems Engineering (SE) -Ansatz. Hier werden alle Schritte, von der Definition der Anforderungen bis zum fertigen Produkt aber auch bis zur Vermarktung und den ergänzenden Services von Beginn an berücksichtigt und mitgeplant. Damit adressiert SE diese Problemstellung aus der Produktentwicklung zum einen durch die erwähnte interdisziplinäre Betrachtung des Produkts über den kompletten Produktlebenszyklus, zum anderen durch eine systemische Sichtweise, die auf eine nachhaltigkeitsorientierte Produktgestaltung fokussieren. Klassische Methoden des Systems Engineering sind überwiegend papier- und dokumentenbasiert. Modellbasiertes Systems Engineering (MBSE) erweitert diesen klassischen Ansatz durch die phasentypische digitale Modellbildung. Entwurf, Spezifikation und Verifikation erfolgen nunmehr modellzentriert und begleiten den gesamten Entwicklungsprozess von den Anforderungen bis hin zum Systemtest [1]. Der modellbasierte Ansatz fokussiert hierbei auf mehrere Problemstellungen. Eine wichtige bezieht sich auf eine einheitliche, domänenübergreifende Modellierung des vorliegenden Systems und die Überführung in unter-

schiedliche, disziplingebundene Modelle [1,2]. Diese Problemstellung wird mit systemübergreifenden Modellierungssprachen wie der SysML angegangen (Bild 1). Durch die Verwendung einer solchen Modellierungssprache kann die parallele Entwicklung von Mechanik, Elektronik und Software unterstützt und ein möglichst frühes Validieren auf einem gemeinsam beschriebenen und ergänzten Systemmodell erfolgen, in welchem die Korrelationen zwischen Systemanforderungen, Funktionen, Struktur und Verhalten definiert werden [3]. Ein solches Systemmodell muss maschinell auswertbar sein.

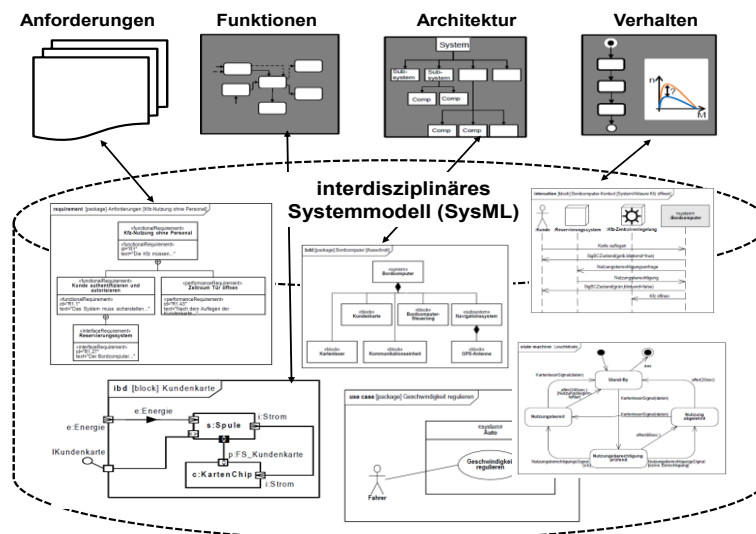


Bild 1: Ansatz: modellbasiertes Systems Engineering

Eine zweite wichtige Problemstellung ergibt sich somit aus dem durchgängigen Management dieser diversen, aber korrelierten (Daten-) Modelle sowie der erwähnten interdisziplinären mechatronischen Sichtweise. Ein Produktionssystem lässt sich so unter Verwendung mechatronischer Informationsobjekte wie Förderbändern, Robotern, Montageeinrichtungen, Motoren etc. modellieren. Diese Sichtweise erweitert das Modell der digitalen Fabrik um den Aspekt der ‚Automatisierungsgerechtigkeit‘. Automatisierungsgerechte Produktentwicklung fokussiert u.a. auf eine gemeinsame Verwaltung der aus den Verhaltensmodellen generierten Steuerungsinformationen, inklusive der signalbasierten Informationen von Sensoren und Aktoren sowie der zur späteren Nutzung zur Verfügung stehenden softwarebasierender Dienstkomponenten. Die während des Entwurfsprozesses erzeugten Informationen werden gemeinsam mit den mechatronischen Objekten verwaltet und bilden den ‚digitalen (Objekt-)Schatten‘ [4]. Spätestens zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme müssen aus den idealen, planerischen Objekten eineindeutig identifizierbare Instanzen gebildet werden, die sogenannten digitalen Zwillinge. Diese

erfassen alle auch zur Laufzeit anfallenden Informationen wie Maschinenzustände, Ressourcenverfügbarkeit oder Softwareupdates des realen (Produktions-)Zwillings, um daraus für jede Instanz beispielsweise spezifische Service- oder Rüstoperationen generieren zu können. Wird dieser Ansatz konsequent verfolgt ist es möglich, die Daten mit Fortschreiten im Entwicklungsprozess weiter anzureichern und für alle Beteiligten nutzbar zu machen. So kann das häufig noch anzutreffende ‚Silo‘-Denken zwischen Mechanik, Elektronik und Software überwunden und eine Parallelisierung im Entwicklungsprozess unterstützt werden. Modellbasiertes SE erlaubt durch eine konsistente Modellierung und Datenhaltung neben einer frühzeitigen Absicherung komplexer multidisziplinärer Systeme auch eine virtuelle Inbetriebnahme von Produktionssystemen, wie unter Punkt 3 noch näher ausgeführt.

3 PLM als Plattform

Zu den klassischen Aufgaben eines Product-Lifecycle-Management-Systems gehört bereits die komplette modellbasierte Abbildung des Produktlebenszyklus von der Konstruktion bis zum Recycling. Systemübergreifend Denken und Handeln können Unternehmen aber erst dann, wenn die gesamte Prozesskette im Fokus steht [5], inklusive der zugehörigen Fertigungsprozesse, Steuerungen und Dienste und vieler neuer Dienstleistungen, die sich aus der Entwicklung vom ‚Ding‘ zum ‚Ding mit Internet‘ entwickeln werden. Zusätzliche Nutzungs- und Geschäftsmodelle müssen eine digitale Repräsentanz erfahren. Immer häufiger erlangen Unternehmen ihre Gewinne nicht ausschließlich über die Produkte selbst, sondern erst über Services z.B. für Maschinenupdates und Wartung, aber auch Dienste, die über die Einbeziehung des sogenannten Eco-Systems generiert werden. Um hier eine durchgängige Unterstützung leisten zu können müssen PLM-Lösungen zum einen eine integrierte Lösung zur prozessübergreifenden Systemmodellbildung wie in Bild 1 dargestellt anbieten. Dieser Punkt erfährt in PLM-Systemen wie beispielsweise Teamcenter PLM der Firma Siemens bereits eine Teilbetrachtung. Zur systematischen Definition von Funktionalität und logischer Architektur wurden Werkzeuge wie Microsoft Visio und MATLAB in den TC Portal integriert. Anforderungen lassen sich über gegliederte Word- oder Excel-Dokumente in das Datenmodell übertragen und mit Funktionen, Subsystemen, Baugruppen und Bauteilen sowie Testfällen über sogenannte Trace links verknüpfen. Ein einheitliches Werkzeug für eine interdisziplinäre Systemmodellierung basierend auf SysML fehlt

allerdings, ebenso wie eine Möglichkeit des automatischen Modellupdates auf Diagrammebene. Zudem müssen Ingenieure gezielt zum Anwenden von systemischer Modellierung und den dazugehörigen Diagrammformen geschult werden. Die Anwendung der unterschiedlichen SysML-Diagramme ist heute noch häufig Aufgabe von System Architekten mit Informatikbezug. Systemarchitekten sind allerdings selten die typischen PLM-Nutzer, womit auch die Gefahr einer ‚Übermodellierung‘ steigt. Zudem sind Informationsmengen sowohl innerhalb der Gewerke als auch interdisziplinär stark verflochten und haben vielfältige Einflüsse und Abhängigkeiten untereinander. Sie entstehen im Laufe des Produktionsentwicklungszyklus an unterschiedlichen Stellen mit unterschiedlichen Reifegraden und durch unterschiedliche Personen. Neben der Modellierungsunterstützung muss ein PLM-System daher auch als offener Datenbackbone zur Abbildung und zum Management eines erweiterten mechatronischen Informationsobjektes dienen (Bild 2). Zu den Informationen gehören u.a. die:

- Mechanische Konstruktion als Repräsentant von 2D / 3D Geometrie, Kinematik und fertigungsrelevanten Informationen (PMI' s) einschließlich der Automatisierungsgeräte und ihrer relevanten Eigenschaften sowie die Anlagentopologie,
- Elektrische und kommunikationstechnische Verkabelung inklusive der Anbindung an Plattformen,
- Verhaltensbeschreibungen hinsichtlich der zu erwartenden Prozessaufgaben und Rüstvorgänge unter Einbezug der realen Steuerung, Möglichkeiten zur Simulation,
- Instanzbildung zur Generierung digitaler Zwillinge zur Aufnahme von Zustandsinformationen der spezifischen Maschine und zur Anbindung an fertigungsrelevante Systeme wie MES und SCADA, [in Anlehnung an 4].

Die letztgenannte Informationsmenge kennzeichnet eine Schnittstellenproblematik zum ERP und auch zum MES. Letztlich muss ein, wo auch immer als Master geführtes, einheitliches Teilenummernsystem abgebildet werden. Wird beispielsweise ein Ersatzteil benötigt, ist es Aufgabe der Plattform, die notwendigen Fragen zu beantworten [5]. Dazu muss die Komponente selbst validiert, die Verfügbarkeit geprüft und die potentielle Ersetzbarkeit sowie die zu erwartenden Kosten einbezogen werden. Gleichzeitig muss die Erfüllbarkeit der Anforderungen überwacht bleiben. Kommen Ersatzkomponenten zum Einsatz stellt sich automatisch die Frage nach den Einsatz- und Integrationsreifegraden und deren Validität. Die Voraussetzung, um solche Fragen beantworten zu können, ist zum einen die Vernetzung sämtlicher Informationen, die im Unternehmen und bei

Zulieferern und Kooperationspartnern vorgehalten werden [5], aber auch die frühe Einbeziehung dieser Fragestellung ins Engineering. Ersteres erreichen die Akteure nur über eine zentrale Plattform, die eine sukzessive Anreicherung, Verwaltung und Verlinkung des mechatronischen Informationsobjektes zulassen. Dabei müssen alle Informationsobjekte neben der eindeutigen Identifikation mit entsprechenden Versionen versehen werden - klassischen PLM-Aufgaben.

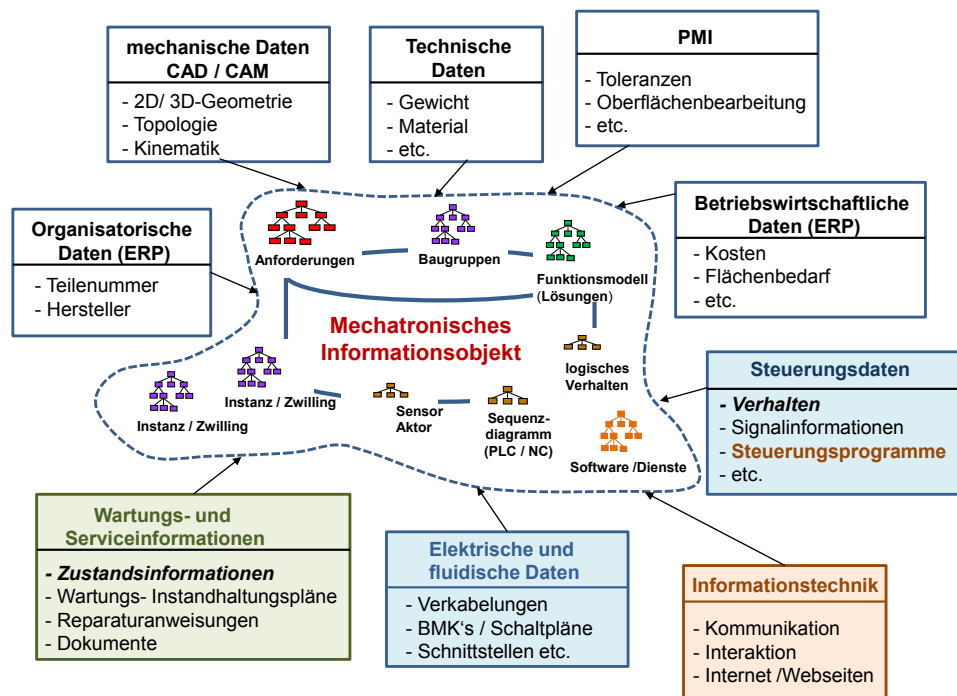


Bild 2: erweitertes mechatronisches Informationsobjekt [in Anlehnung an 3]

Um eine Repräsentation von Abhängigkeiten zwischen den Informationsobjekten zu erlauben, müssen bilaterale Rückverfolgungsstrategien eingesetzt werden. Auch hier können die bereits erwähnten Trace links Anwendung finden. Sollen die späteren Digitalisierungs- und Nutzungsmodelle wie gefordert bereits bei der Produktentwicklung einbezogen werden, müssen zu diesem Zeitpunkt bereits umfangreiche Kenntnisse dazu vorliegen und den an der Produktentwicklung Beteiligten zur Verfügung gestellt werden. Hier muss eine unvollständige, u.U. auch semistrukturierte oder auch unstrukturierte Informationsverarbeitung möglich sein, die zudem noch wiederverwendbar zur Entwicklung zukünftiger, dienstleistungszentrierter Produkte abrufbar ist. Klassische, in PLM-Systemen bereits vielfach unterstützte Klassifizierungsmöglichkeiten gehen von hierarchisch strukturierbaren oder bezogen auf die Eigenschaften verallgemeinerbaren Informationen aus. Zur Klassifizierung unstrukturierter Wissens sind diese nicht geeignet,

hier könnte sich der Methoden des Data Mining's o.ä. bedient werden. Zusätzlich sei noch auf die geforderte Fähigkeit von Produktionsressourcen zur ad-hoc-Vernetzung verwiesen. Auch diese Eigenschaft muss in der Phase der Entwicklung bereits berücksichtigt werden.

4 Virtuelle Inbetriebnahme

Um der in der Einleitung formulierten zweiten Anforderung nach einer Beschleunigung der Entwicklungszeit von Produktionsanlagen gerecht werden zu können, muss u.a. ein Parallelisieren von Entwicklungsaktivitäten Unterstützung finden. Aktuell erfolgen Entwurf und Inbetriebnahme von Produktionsanlagen häufig in sequentiellen Prozessen. Der mechanische Aufbau steht am Anfang des Entwicklungsprozesses, beeinflusst allerdings das dynamische Verhalten und die Möglichkeiten der Steuerung maßgeblich. Umgekehrt müssen die Möglichkeiten der Steuerung und das umzusetzende dynamische, zeitbasierte Verhalten beim mechanischen Aufbau geplant werden. Derzeit erfolgt die Entwicklung der Steuerung zum Schluss und leider größtenteils auf der Baustelle in unangenehmem Arbeitsumfeld [6]. Eine sequentielle Vorgehensweise führt zudem zu nicht abgestimmten und damit nicht optimalen mechatronischen Konzepten und damit auch zu langen Iterationszyklen bei einer späten Feststellung von Design- und Programmierfehlern. Lange Ramp-Up-Zeiten, die häufig beim Kunden anfallen, binden vor Ort unerwünscht viele Ressourcen, zudem sind unstrukturierte, in ineffizient langen Übergabegesprächen generierte Informationen selten wiederverwendbar. Mit Blick auf diese aktuellen Problemstellungen im Maschinen- und Anlagenbau muss jeder an der Produktentwicklung und seinen Diensten Beteiligte jederzeit den geforderten rollengesteuerten Zugriff auf die aktuellen Modellierungsstände erhalten (Bild 3). Im ersten Schritt erfolgt die Beschreibung der funktionalen Anforderungen. Diese werden entsprechend in ein funktionales Modell überführt, aus welchem sich dann jeweils das mechanische und elektronische Konzept ableiten, in welchem Bewegung und dynamischen Verhalten frühestmöglich simuliert und präsentiert werden können. Ändert sich beispielsweise die mechanische Konstruktion, können so die direkten Auswirkungen auf Steuerung und Softwarearchitektur berücksichtigt werden. Fokussiert wird hier zusätzlich auf die frühzeitige gemeinsame Entwicklung mechatronischer Konzepte durch die Einbeziehung der virtualisierten Steuerungssoftware -Software-In-The-Loop- sowie der realen Steuerung – Hardware-In-The-Loop. Die Methode der virtuellen Inbetriebnahme mit

Hilfe einer Hardware-In-The-Loop-Simulation erlaubt es, die Maschine am digitalen Zwilling zu simulieren und über das Bussystem an die reale Steuerung anzubinden.

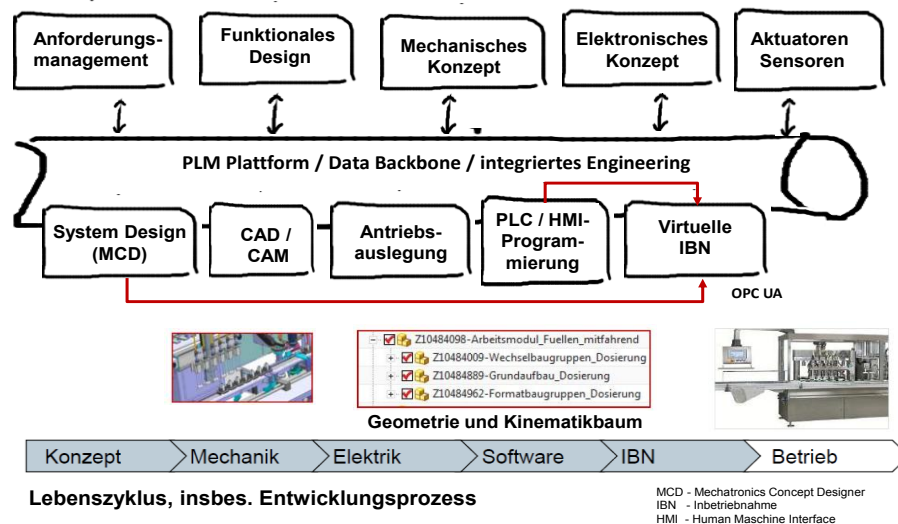


Bild 3: Entwicklungsprozess für Produktionssysteme mit IBN [6, modifiziert]

Werden diese Informationen in einem gemeinsamen Modell gehalten, so lassen sie sich zum einen über die Plattform zur späteren Bereitstellung von Dienste nutzen als auch zur Wiederverwendung der digitalen Zwillinge heranziehen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vision von Industrie 4.0 beschreibt eine neue Art hocheffizienter wirtschaftlicher Produktion und Arbeit durch eine stärkere innerbetriebliche Vernetzung verschiedener Domänen und zunehmende Optimierung und Automatisierung von Produktionsabläufen. Die Zeiten für die Planung, Entwicklung, Produktion und Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen reduzieren sich drastisch. Die IT-gestützte Bereitstellung dieser mit Informationen für die automatisierte Verarbeitung angereicherten Modelldaten wird zukünftig unverzichtbar sein. Nur so lässt sich die durchgängige Digitalisierung auf Basis digitaler Zwillinge erreichen. Als Konsequenz müssen die Entwurfsmethoden aller Disziplinen in einen integrierten, interdisziplinären Lösungsansatz überführt werden, der dann eine durchgängige Werkzeugunterstützung durch IT-PLM-Plattformen erfährt. Zudem müssen diese domänenübergreifenden Informationen aus Softwareengineering-Sicht verwaltbar sein, d.h. den Trend hin zum System- LifeCycle -Management inklusive der zu verwaltenden Anwendungssoftware unterstützen.

Literatur

- [1] Eigner, M; Sendler, Ulrich (Hrsg.): *Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung auf einer Plattform für System Lifecycle Management*; Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysML,Xpert.press, Springer Verlag Berlin 2013 – ISBN 978-3-642-36917-9
- [2] Weilkiens, Tim: *Systems Engineering mit SysML/UML*; 3. Überarbeitete Auflage, dpunkt.verlag GmbH, 2014. – ISBN 978-3-86490-091-4
- [3] Paetzold, Kristin; Platen, Erik, Njindam, Thierry Sop: *Modellbasiertes Systems Engineering zur frühzeitigen Absicherung komplexer multidisziplinärer Systeme*; Tag des Systems Engineering 2012, Hansa Verlag, Proceedings - ISBN 978-3-446-43436-6
- [4] Lüder, Arndt; Schmidt Nicole: *Herstellerunabhängiger Austausch von Entwurfsdaten für Steuerungssysteme mittels AutomationML*; Industrie 4.0 im internationalen Kontext; 1. Aufl., VDE Verlag GmbH Berlin 2016– ISBN 978-3-8007-3671-3
- [5] Kraft, Georg: *Product Lifecycle Management – Vom Bauchgefühl zur Simulation von Entscheidungen*; Industrie 4.0 im internationalen Kontext; 1. Aufl. VDE Verlag GmbH Berlin 2016 – ISBN 978-3-8007-3671-3
- [6] Menzel, Thomas; van Rossum, Martin: *Digitalisierung im Engineering – effizient und zielsicher vom Entwurf bis zur virtuellen Inbetriebnahme*; Siemens AG, 2015, http://www.vdc-fellbach.de/sib/_Resources/Persistent/040e9e89696aaa0a31b53c129ab840b4b5a92e44/10---Digitalisierung-im-Engineering---Menzel-van-Rossum-Siemens.pdf

Gestaltungsrichtlinien zum Leichtbau von komplexen Druckbehältern

Thomas Guthmann, Frank Engelmann, Karl-Heinrich Grote*

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen

Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

Email: thomas.guthmann@eah-jena.de; Internet: <http://www.wi-konstruktion.eah-jena.de/>

*Institut für Maschinenkonstruktion, OvGU Magdeburg

Universitätsplatz 2, 39016 Magdeburg

Email: karl.grote@ovgu.de; Internet: <http://lkt.mb.uni-magdeburg.de/>

Inhalt: *Im Rahmen des Projektes wird eine strukturierte Vorgehensweise zur Entwicklung von rechteckigen Druckgehäusen in Leichtbauweise aufgezeigt. In Verbindung mit den dargestellten Gestaltungsrichtlinien ermöglicht dies eine effiziente konstruktive Gestaltung von Druckgehäusen in Gussbauweise.*

Stichwörter: *Druckgehäuse, Gestaltung, Leichtbau*

Abstract: *Within this project a structured approach for the development of cubic pressure vessels in lightweight design will be shown. In combination with the displayed construction guidelines an efficient constructive design of pressure vessels to be fabricated by casting will be possible.*

Keywords: *pressure vessels, lightweight design*

1 Einleitung

Leichtbaukonstruktionen sind in zunehmendem Maße gefragt. Nicht nur in den klassischen Leichtbausparten, wie der Luft- und Raumfahrt, werden gewichtsoptimierte Bauteile zur Senkung der Fertigungs- und/oder Betriebskosten oder zur Steigerung des Nutzwertes eingesetzt.

Der Begriff Leichtbauweise ist allerdings nicht genau definiert und wird recht häufig aus Marketinggründen zur Beschreibung der Produkteigenschaften herangezogen, obwohl sich das Gewicht dieser Bauteile nicht wesentlich von dem Gewicht konventioneller Bauteile unterscheidet. Effiziente Leichtbaustrukturen sollten allerdings nur so viel Material aufweisen, wie für die sichere Funktionserfüllung benötigt wird.

Aus dieser grundlegenden Anforderung resultiert die Notwendigkeit einer möglichst genauen Dimensionierung der mechanisch belasteten Struktur, mit dem Ziel die zur Verfügung stehende Werkstofffestigkeit möglichst hoch auszunutzen. Für einfache Geometrien mit trivialen Spannungszuständen existieren oftmals analytische Lösungen, auf deren Basis sich die Bauteile dimensionieren lassen. Die mechanische Auslegung von Strukturen mit mehrachsigen Spannungszuständen stellt den Konstrukteur hingegen vor eine Herausforderung, da hierfür im Regelfall keine Lösungen existieren. Ein solches Beispiel stellen Druckbehälter mit rechteckigem Querschnitt in Gussbauweise dar.

Bei kugel- oder zylinderförmigen Druckbehältern ist der Spannungsverlauf im Bauteilquerschnitt gleichmäßig, wodurch sich die Dimensionierung recht einfach gestaltet, siehe [6]. Für Detaillösungen wie Behälterböden, Flansche oder Behälteröffnungen existieren zudem zahlreiche Gestaltungsrichtlinien (wie beispielsweise die AD-Merkblätter [1]), wodurch dem Konstrukteur eine Fülle von Hilfsmitteln zur effizienten Gestaltung derartiger Druckbehältnisse zur Verfügung steht.

Im Rahmen dieses Projektes sollen für Druckbehälter mit rechteckigen Querschnitten in Aluminium-Gussbauweise Konstruktionsrichtlinien und Auslegungshinweise erarbeitet werden, welche dem Konstrukteur beim Entwurf und der Entscheidungsfindung maßgeblich unterstützen. Vorrangig sollen diese für Druckbehälter Anwendung finden, welche nicht der Richtlinie über Druckgeräte 2014/68/EU unterliegen.

2 Vorgehen

Grundlage für die Lösung der skizzierten Problemstellung bildet eine umfassende Analyse bereits vorhandener Konstruktionen. Ein wesentlicher Punkt dieser Untersuchung war die Bestimmung der Bauteilfestigkeit vorhandener Gehäusekonstruktionen und die Analyse potenzieller Schwachstellen. Dies erfolgte sowohl durch praktische Berstdruckversuche, als auch durch numerische Untersuchungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM).

Anschließend wurde die Gesamtfunktion der Druckgehäuse in einzelne Module beziehungsweise Bauelemente gegliedert, welche voneinander abhängig sind. Zur Realisierung eines effizienten Entwicklungsprozesses, ist die Anzahl der zwangsläufig notwendigen Iterationsschleifen auf ein Minimum zu reduzieren. Dies erfolgt durch die Vorgabe eines genauen Entwicklungsplanes, welcher die optimierte Reihenfolge für die Entwicklung der einzelnen Bauelemente regelt. Weiterhin werden für die konstruktive Gestaltung wesentlicher Elemente bewährte Lösungen vorgestellt.

3 Ergebnisse

Analyse der vorhandenen Gehäuse

Die Analyse verfügbarer Druckgehäuse zeigte, dass aktuelle Konstruktionen mehrheitlich überdimensioniert sind. Der Berstdruck lag bei einzelnen Gehäusen um den Faktor drei über den Auslegungsdruck. Diese Überdimensionierung führt zwangsläufig zu einer Gewichtszunahme der Gehäuse, was dem Leichtbaugedanken widerspricht.

Ausfälle bei Belastungen unterhalb des Auslegungsdruckes ließen sich nicht beobachten. Schäden an dem Druckkörper traten vermehrt im Bereich von vorhandenen Gehäuseöffnungen auf. Diese Öffnungen dienen vorrangig zur Installation von Einbauten im Inneren des Druckbehälters oder in Form von Schauseiben zur visuellen Betrachtung des Gehäuseinneren. Weiterhin kann die druckfeste Struktur durch die Installation von Kabel- und Leitungseinführungen oder Betätigungselementen unterbrochen werden, siehe Bild 1.



Bild 1: Rechteckiges Druckgehäuse mit Schauscheibe (Gehäusefront), Betätigungselementen (rechte Seite) und Leitungseinführungen (Gehäuseunterseite) [2].

Neben den zwangsläufig vorhandenen Öffnungen im Druckkörper selbst, sind die Verschlüsse der Öffnungen kritisch. Meist werden die Gehäuseöffnungen durch großflächige Deckel verschlossen, welche im Randbereich mit dem Gehäuserumpf verschraubt sind, siehe Bild 2.



Bild 2: Gehäuserumpf mit Deckel, Scharnier und Deckelschrauben [3].

Die Schrauben stellen jedoch eine weitere Schwachstelle dar. Bei den untersuchten Gehäusen ließ sich teilweise bereits vor dem Erreichen des Auslegungsdruckes eine plastische Verformung der Schrauben beobachten.

Aufteilung der Konstruktion in einzelnen Module

Zur zielgerichteten Entwicklung von Produkten ist es sinnvoll, die Gesamtfunktion der Baugruppe in einzelne Teilfunktionen beziehungsweise Module aufzugliedern, siehe VDI 2221 [4].

Die Gesamtbaugruppe des Druckgehäuses lässt sich in folgende Module unterteilen:

- Druckfester Gehäusekörper (Gehäuserumpf und Gehäusedeckel)
- Dichtflansch zwischen Gehäuserumpf und Gehäusedeckel
- Gehäuseöffnungen für Kabel und Leitungen beziehungsweise Sichtscheiben
- Befestigungselemente (innere und äußere)

Konstruktive Gestaltung der einzelnen Module

Für die Realisierung der maßgeblichen Module ist zunächst die logische Reihenfolge der Entwicklungsschritte zu bestimmen. Hierbei werden zunächst die konstruktiven Details bestimmt, welche einen dominierenden Einfluss auf die Gesamtkonstruktion ausüben. Anschließend erfolgt die konstruktive Gestaltung der abhängigen Bauelemente.

Grundsätzlich sind zu Beginn der Entwicklung die wesentlichen Außen- und Innenmaße der Gehäuse zu ermitteln, auf deren Basis sich der Designraum des Gehäuses ableiten lässt. Als Designraum wird das Volumen im Wandbereich betrachtet, in dem die Anordnung des Konstruktionswerkstoffes beliebig erfolgen kann. Im Falle der Rechteckgehäuse sind somit folgende Maße festzulegen, siehe Bild 3:

- Außenmaße des Gehäuses ($B_{\max}/T_{\max}/H_{\max}$)
- Innenmaße des Gehäuses ($B_{\min}/T_{\min}/H_{\min}$)

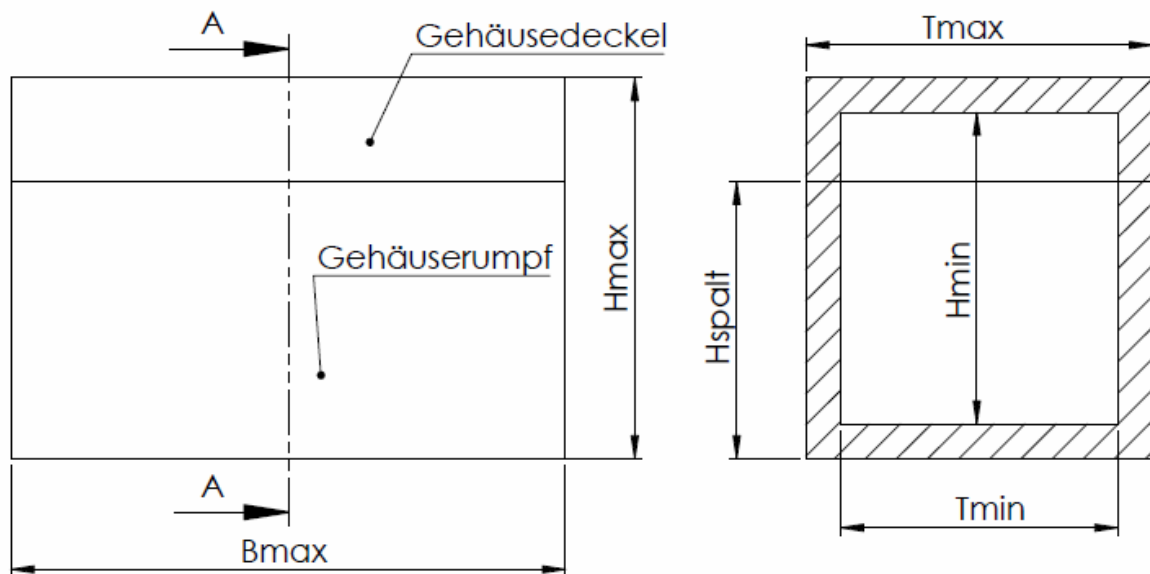


Bild 3: Festzulegende Gehäusemaße.

Auf Basis der genannten Maße lassen sich die maximal möglichen Wandstärken für die einzelnen Gehäusewände berechnen. Zudem ist eine minimale Wanddicke festzulegen. Sinnvollerweise ist die minimale Wandstärke so zu wählen, dass die Füllung der Gussform problemlos möglich ist und die Gehäusestruktur auch durch eine unsachgemäße Behandlung (beispielsweise durch Schläge auf Gehäusewand, Fallenlassen, falsches Abstellen der Gehäuse) nicht beschädigt wird. In Bereichen, in denen später Gehäuseöffnungen, Durchgangs- oder Gewindebohrungen eingebracht werden sollen, ist die minimale Wandstärke dementsprechend den Anforderungen anzupassen. Erfahrungswerte zeigen, dass die minimale Wandstärke bei Gusskonstruktionen 5 mm nicht unterschreiten sollte.

Im nächsten Schritt sind die Maße der Trennfuge zwischen Gehäuserumpf und -deckel festzulegen. Hierbei sind sowohl die Lage der Trennfuge (Hspalt in Bild 3), als auch deren Breite, beziehungsweise die Austragsrichtung (Dichtflansch innerhalb oder außerhalb des Gehäuses) zu bestimmen. Bei der konstruktiven Gestaltung der Trennfuge sind dessen geforderte Dichtheit über entsprechende Elemente sicherzustellen.

Mit den Maßen des Dichtflansches lässt sich die optimale Verteilung der Schrauben entlang des Deckelrandes ermitteln. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine äquidistante Verteilung der Schrauben entlang des Dichtspaltes aufgrund der ungleichmäßigen Lastverteilung nicht sinnvoll ist. Vielmehr ist die Position der Schrauben an die wirkende Last anzupassen.

Aufgrund der komplexen Wechselwirkung zwischen dem Gehäuseumpf, der Deckelstruktur und der Schraubenposition lassen sich die genauen Maße der optimalen Schraubenposition nicht analytisch berechnen. Grundsätzlich ist jedoch anzumerken, dass bei ebenen Deckeln im Eckbereich keine Schrauben notwendig sind, da an den Ecken die Reaktionskraft des Deckels in Richtung Dichtflansch wirkt. In der Mitte der Längskanten sind aufgrund der dort wirkenden Kräfte die Schraubenabstände enger zu wählen, siehe Tabelle 1. Die genaue Lage der Schrauben lässt sich mit Hilfe einer auf der Finite-Elemente-Methode basierenden Parameteroptimierung bestimmen.

Mit der Lage des Trennspaltes, der Position der Flanschschrauben und den maximalen, beziehungsweise minimalen Wandstärken, sind die wesentlichen Randbedingungen für die Dimensionierung des eigentlichen Druckkörpers (Gehäuserumpf und Gehäusedeckel) gegeben.

Innerhalb des gegebenen Designraums ist der Konstruktionswerkstoff derart anzuordnen, dass das Bauteilgewicht einem Minimum entgegenstrebt und die zur Verfügung stehende Werkstofffestigkeit möglichst voll ausgenutzt wird.

Aufgrund der komplexen Spannungsverläufe entlang der Druckkörperwände, lässt sich die ideale Materialverteilung analytisch nicht berechnen. Eine effiziente und zuverlässige Auslegung des Druckkörpers kann durch die Methode der Topologieoptimierung erfolgen, siehe [5]. Bei diesem Verfahren wird zunächst die Belastung der Struktur mit Hilfe der FEM berechnet. Anschließend wird die Materialverteilung im vorgegebenen Designraum in einem iterativen Verfahren an die Belastung angepasst, wobei fertigungstechnische Restriktionen berücksichtigt werden können.

Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist im Regelfall eine komplexe Geometrie mit einer Freiformfläche. Durch die Substitution der schwierig zu fertigenden Freiformflächen mit einfachen geometrischen Grundkörpern lässt sich der Fertigungsaufwand reduzieren, führt aber im Gegenzug zu einer Erhöhung der Bauteilmasse.

Im letzten Entwicklungsschritt sind die externen und internen Befestigungspunkte sowie die eventuell benötigten Scharniere konstruktiv zu entwickeln und die Struktur im Sinne einer einfachen Fertigung anzupassen.

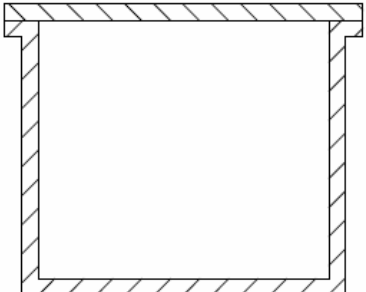
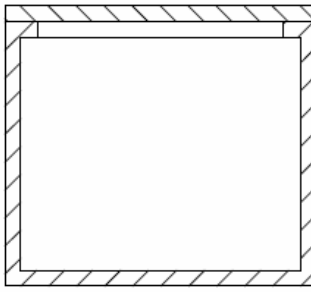
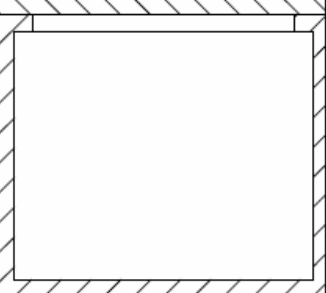
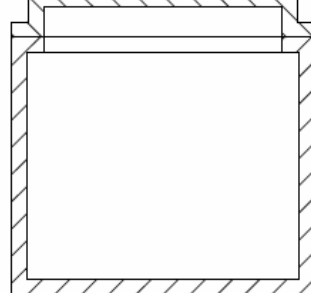
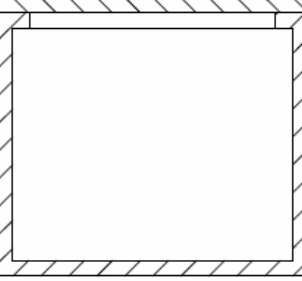
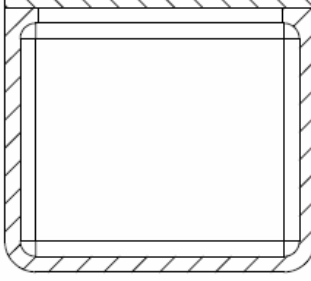
Obwohl sich die strukturierte Vorgehensweise nach dem vorgestellten Schema in der Praxis bewährt hat, müssen im Laufe des Entwicklungsprozesses teilweise Änderungen an den bereits definierten Elementen vorgenommen werden, wenn sich hierdurch im Gesamtprodukt Vorteile ergeben. Zur Reduzierung dieser Iterationsschleifen ist es sinnvoll

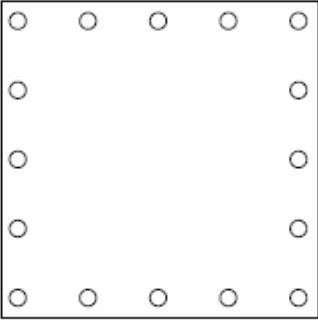
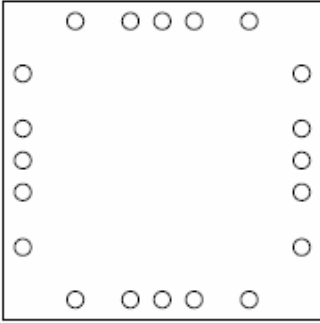
auf bewährte konstruktive Lösungen zurückzugreifen, wie sie im folgenden Kapitel dargestellt sind.

Abgeleitete Gestaltungsrichtlinien

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass bestimmte konstruktive Varianten hinsichtlich einer gewichtsoptimierten Gesamtkonstruktion Vorteile bieten. In Tabelle 1 sind Beispiele für eine günstige Gehäusegestaltung dargestellt.

Tabelle 1: Gestaltungsbeispiele für Druckgehäuse in rechteckiger Bauweise.

Ungünstig	Günstiger	Bemerkung
		Die mechanische Belastung des Druckkörpers und der Schrauben ist geringer, wenn der Dichtflansch nach innen geführt wird.
		Die höhere Steifigkeit des abgesetzten Deckels wirkt sich positiv auf die Spannungen im Bauteil aus. Zudem verkleinert sich die druckbelastete Fläche im Gehäuserumpf.
		Abgerundete Innen- und Außenecken vermeiden Spannungsspitzen im Eckbereich und wirken sich positiv auf den Gussprozess aus.

		<p>Die Schraubenposition entlang der Gehäusetrennfuge ist den wirkenden Kräften anzupassen.</p>
---	---	---

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung des vorgestellten Entwicklungsprozesses verkürzt die Anzahl der notwendigen Iterationsschritte deutlich, da durch die strukturierte Vorgehensweise die einzelnen Module entsprechend ihrer Dominanz, beziehungsweise ihrer Abhängigkeiten entwickelt werden.

Bei der konstruktiven Umsetzung lassen sich auf Basis der dargestellten Gestaltungsrichtlinien effiziente Lösungen für die einzelnen Problemstellungen ableiten. In weiteren Arbeiten ist zu untersuchen, inwieweit die Auslegung der druckbelasteten Struktur oder der Flanschverbindung durch analytische Hilfsmittel vereinfacht werden kann.

Literatur

- [1] Richtlinie AD 2000-Merkblätter 04.2015, Verband der TÜV e.V. Berlin; ISBN 978-3-410-25663-2
- [2] Directindustry; Manueller Trennschalter; http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/54123-2263239.jpg; Aufgerufen am 19.07.2016
- [3] Array Trading; Explosion Protected Material - Stainless Steel Enclosure; <http://www.array.gr/english/item.php?itid=30>; Aufgerufen am 19.07.2016
- [4] VDI-Richtlinie 2221 Mai 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte; VDI-Verlag, Düsseldorf
- [5] Guthmann, T.; Baudach, F.; Barz, I.; Engelmann, F.: Workflow zur Entwicklung effizienter Leichtbaustrukturen am Beispiel einer druckbelasteten Platte; In: Tagungsband des 12. gemeinsamen Kolloquiums Konstruktionstechnik. 16.-17. Oktober 2014. S.427-436.
- [6] Meier, M.; Ermanni, Paolo: Dimensionieren 1 Skript zur Vorlesung; Zürich, August 2012

FEDERN AUS FASER-KUNSTSTOFF-VERBUND

Gerhard Scharr

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Konstruktionstechnik / Leichtbau

Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Email: Gerhard.scharr@uni-rostock.de; Internet: <http://www.leichtbau.uni-rostock.de>

Inhalt: *Faser-Kunststoff-Verbunde sind aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften sehr gute Federmaterialien mit hohem Leichtbaupotenzial.*

Vor- und Nachteile werden gegenübergestellt und mit ausgewählten Darstellungen belegt.

Nachfolgend wird eine Rollfeder, eine Reibungs-/Ringfeder, eine querbelastete Schraubenfeder sowie eine Gasdruckfeder aus Faser-Kunststoff-Verbund dargestellt und kurz beschrieben.

Für eine weitere Marktdurchdringung sind geeignete Herstellungstechnologien notwendig.

Abstract: *Due to their mechanical behaviors fiber-reinforced plastics are very good spring materials with a high potential for lightweight.*

Advantages and disadvantages are compared and highlighted with selected presentations.

Then a constant force spring, a friction / ring spring, a transversely loaded helical spring and a gas spring made of fiber reinforced plastic are presented and briefly described.

For further market penetration manufacturing technologies are needed.

Stichwörter: *Elastische Federn, Faser-Kunststoff-Verbund, Leichtbau*

Keywords: *Elastic springs, fiber reinforced plastics, light weight construction*

1 Einleitung

Faser-Kunststoff-Verbunde (z.B. GFK oder CFK) sind aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften eine interessante Materialalternative für elastische Federn. Hohe Festigkeiten, gutes Ermüdungsverhalten, kaum Korrosionsprobleme und geringes Gewicht sind gegeben und häufig gefragte Kriterien. Nicht selten lassen sich mit FKV-Federn 60 - 70 % Gewichtseinsparung gegenüber Stahlfedern erzielen, sie sind somit erstklassige Leichtbaufedern.

Neben den mechanischen Eigenschaften sind bei potenziellen Anwendungen auch andere physikalische Eigenschaften, wie beispielsweise elektrische Isolation, nicht magnetisch und geringe Geräuschemission, von Interesse.

Zu den Herausforderungen für eine erfolgreiche Marktdurchdringung der Federn aus faserverstärkten Kunststoffen zählen u. a. geeignete Herstellungstechnologien für größere Stückzahlen, die Materialkosten und die Passfähigkeit für den vorgegebenen Bauraum.

Neuland wird jedoch nicht betreten, denn für erfolgreiche Einsätze von GFK-Fahrwerksfedern können beispielsweise die Blattfedern der Corvette (GM) und des Mercedes Sprinter sowie die relativ neue Schraubendruckfeder des Audi A6 angeführt werden.

2 Ausgewählte FKV-Eigenschaften

Die in eine Polymer-/Kunststoffmatrix eingebetteten Fasern (s. Bild 1) tragen u.a. zu einer Verstärkung und Versteifung des Kunststoffs bei. Daneben sind weitere Eigenschaften, wie beispielsweise die Ermüdungsfestigkeit und Wärmedehnung faserdominiert. Die Matrix hat insbesondere die Funktion der Krafteinleitung in die Faser sowie die dünnen



Bild 1: Querschnitt eines Faser-Kunststoff-Verbundes [Scharf]

Fasern zu stützen, und vor äußeren Einwirkungen zu schützen. Die Eigenschaften der FKV werden wesentlich durch die Faser-, Matrix- und Interface-Eigenschaften sowie vom Fasergehalt und der Faserorientierung bestimmt. In Bild 2 sind einige Vor- und Nachteile

dieser Verbundwerkstoffe angeführt. Die Eigenschaften der FKV sind ebenfalls bei den FKV-Federn gegeben.

+ Advantages

- high resilience
- low creep
- high specific strength
- high specific modulus
- good 'fail safe' behaviour
- good corrosion resistance
- low acoustic emission
- low thermal extention
- spring rate independent of temperature and frequency

- Disadvantages

- costs
- calculation
- industrial scale manufacture
- monitoring / testing
- recycling

Bild 2: Vor- und Nachteile von FKV-Federn [1]

Die zuvor angegebene Abhängigkeit der Eigenschaften von der Faserorientierung ist in Bild 3 für den E-Modul von unidirektionalem, bidirektionalem und isotropem CFK und GFK dargestellt. Zum Vergleich ist der E-Modul von Aluminium markiert.

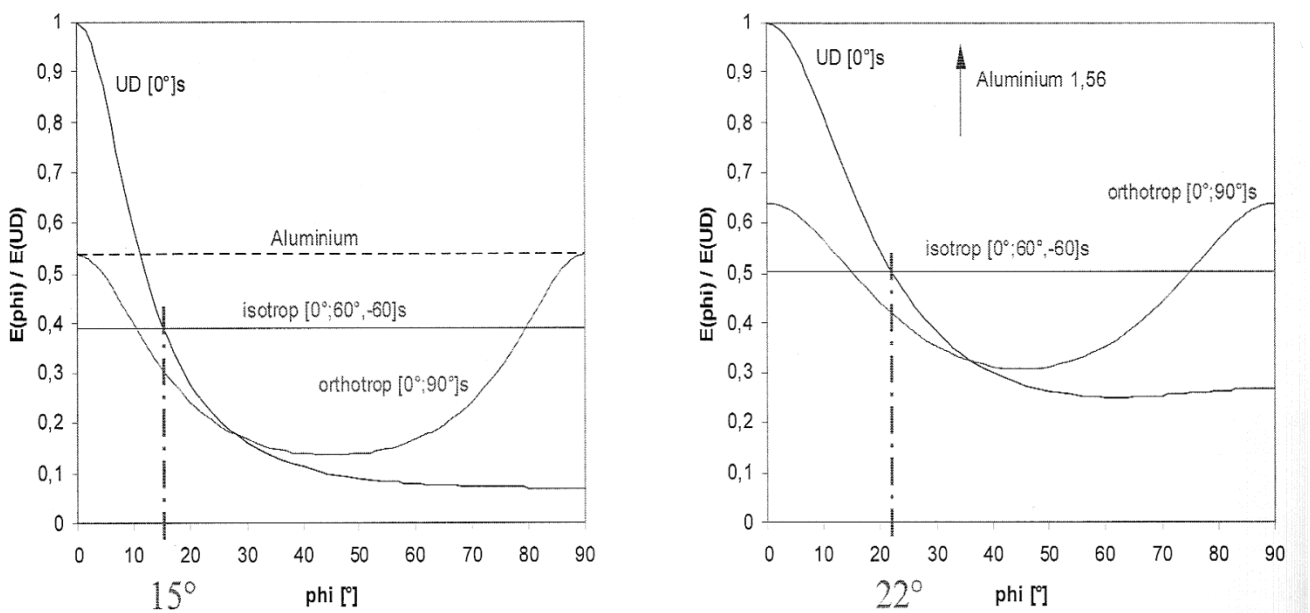


Bild 3: E-Modul-Verlauf von CFK und GFK in Abhängigkeit vom Faserwinkel [2]

Eine weitere positive Eigenschaft von CFK ist das gute Ermüdungsverhalten. Der oberste Verlauf (Type I) steht für hochsteifes und der 2. Graph (Type II) für hochfestes CFK (Bild 4). Glas- und aramidfaserverstärkte Kunststoffe besitzen im Vergleich zu CFK ein schlechteres Ermüdungsverhalten. Diese dynamischen Versuche [Mandel] wurden im Zugschwellbereich durchgeführt.

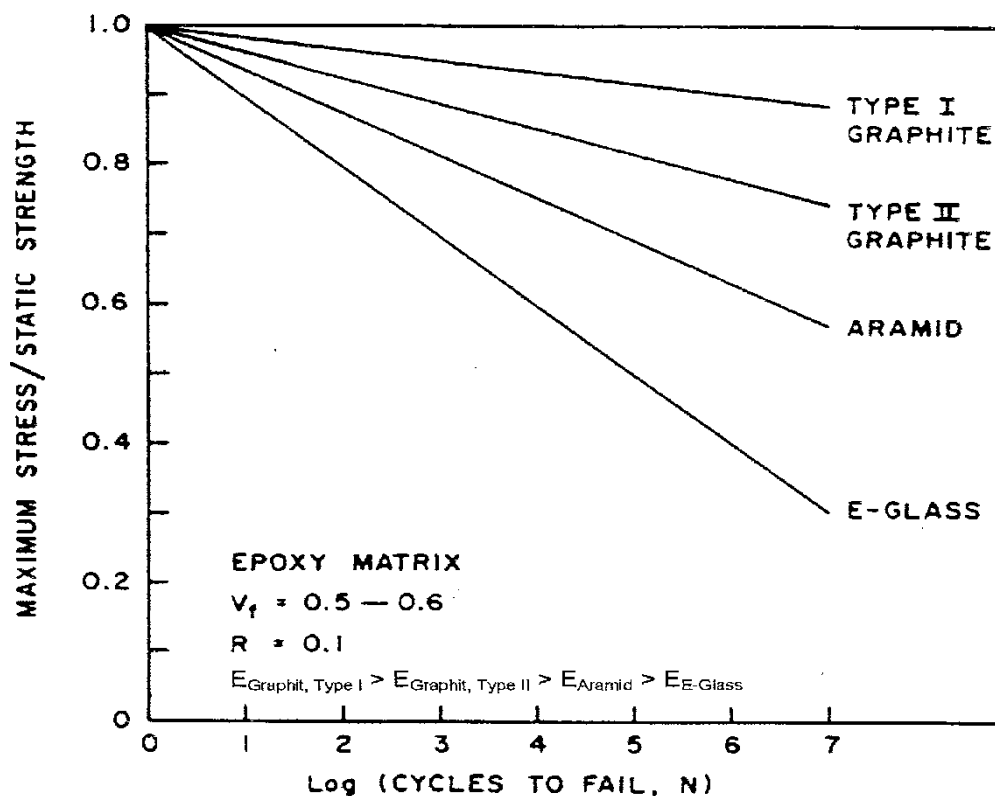


Bild 4: Ermüdungsverhalten von Faser-Kunststoff-Verbunden (UD) [Mandel]

GFK-Federn weisen gegenüber CFK-Federn ein etwas höheres elastisches Energiespeichervermögen auf.

Leichtbauwerkstoffe zeichnen sich durch hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeiten aus. Bild 5 zeigt die auf die Dichte bezogenen Zugfestigkeiten und Elastizitätsmoduln von zahlreichen Materialien. Sehr gut schneiden dabei die carbonfaserverstärkten Kunststoffe ab (rechts oben im Diagramm).

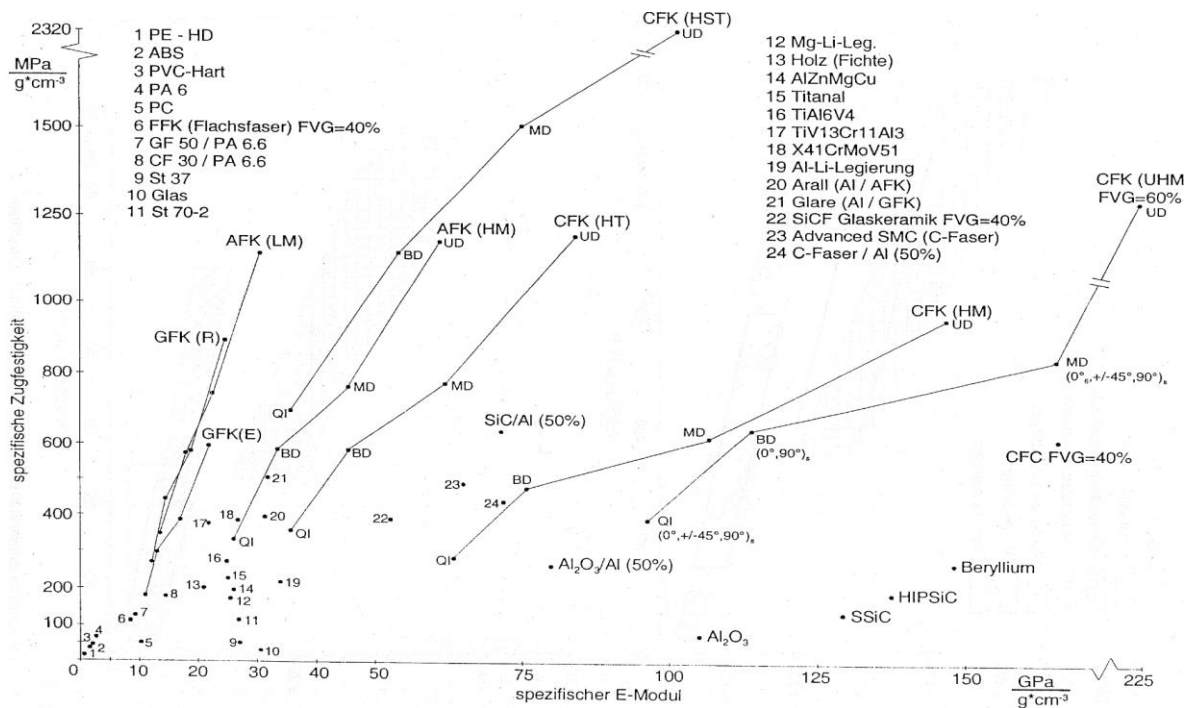


Bild 5: Spezifische Zugfestigkeit und spez. E-Modul von Materialien [3], [4]

3 Ausgewählte FKV-Federn

Bild 6 zeigt eine Auswahl von Federn aus CFK und GFK.

In diesem Kapitel werden vier ausgewählte FKV-Federn kurz vorgestellt.

Es handelt sich dabei um eigene (Vor-) Entwicklungen. Auf FKV-Federn, die an anderer Stelle entwickelt wurden, wird nicht eingegangen.



Bild 6: Ausgewählte FKV-Federn [Scharr]

Rollfeder (Bild 7)

Die abgebildete CFK-Rollfeder ist stellvertretend auch für andere gewickelte Federn, wie Spiral- oder Triebfedern angeführt. Bei der Federentwicklung wurden auch Ermüdungstests durchgeführt. Nach 1 Millionen Lastwechsel war keinerlei Schaden (Prüffrequenz: 1 Hz und Federweg: 50 mm) zu erkennen.

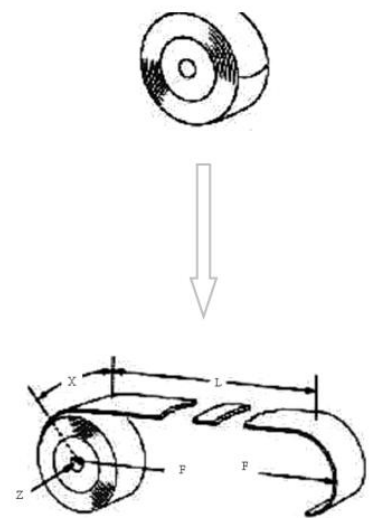
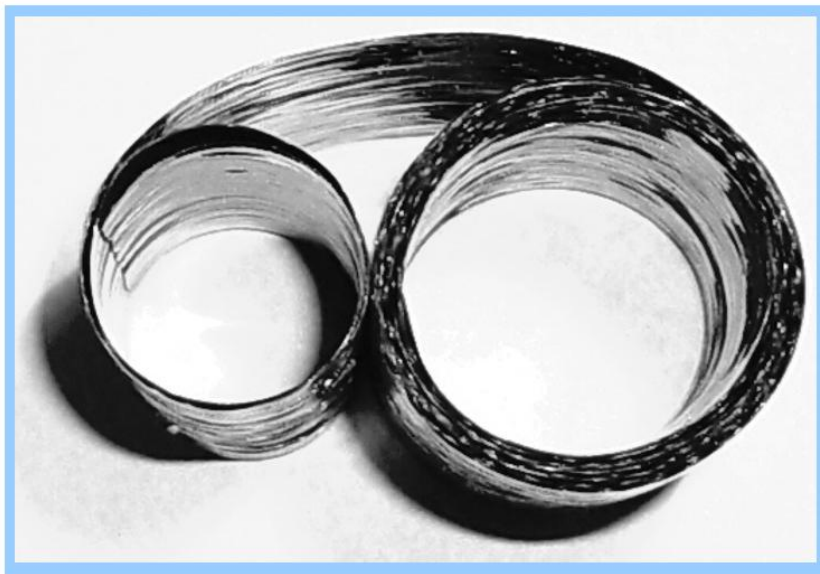


Bild 7: CFK-Roll-/Gleichkraftfeder [5], [6]

Reibungsfeder (Bild 8)

Die in Bild 8 dargestellte Reibungsfeder, auch als Ringfeder bekannt, ist eine Druckfeder bezüglich der äußeren Belastung. Der Nutzungsgrad ist aufgrund der relativ gleichmäßigen Ringspannungszustände sehr hoch. Es handelt sich bei der Ringfeder aus FKV um eine fasergerechte Beanspruchung. Dieser Federtyp kann hohe Druckkräfte aufnehmen und gibt deutlich geringere Druckkräfte wieder ab (z. B. 1/3 der max. Kraft). Die Dämpfung / Hysterese ist zwar bei dieser Feder sehr hoch, aber die Wärmeentwicklung war bei den Tests unkritisch. Abrieb konnte bei den Versuchen nicht festgestellt werden. Der Neigungswinkel der konischen Flächen darf wegen der Gefahr von Selbsthemmung nicht zu klein werden.

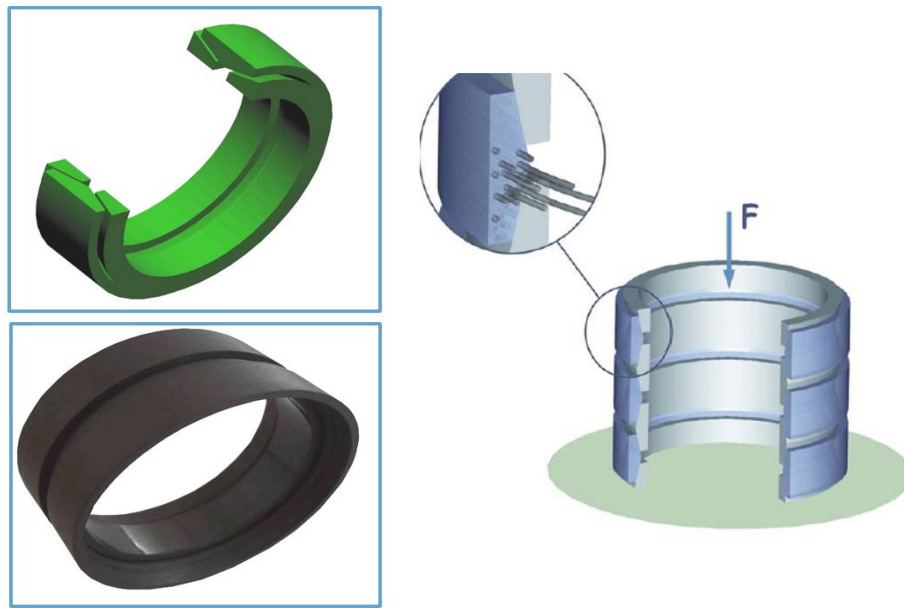


Bild 8: FKV-Reibungs-/Ringfeder [7], [8], [9]

Schraubenfeder (Bild 9)

Bei dem als Schraubenfeder bezeichneten FKV-Element in Bild 9 handelt es sich nicht um eine klassische Schraubendruckfeder. Diese Feder für einen druckluftlosen Reifen hat zwar eine schraubengängähnliche Geometrie, aber die Druckbelastung ist hier senkrecht zur Längsrichtung und nicht in Längsrichtung wie bei den klassischen Schraubenfedern. Alternative Feder-Elemente weisen eine Omega-Geometrie auf (ohne Abbildung).

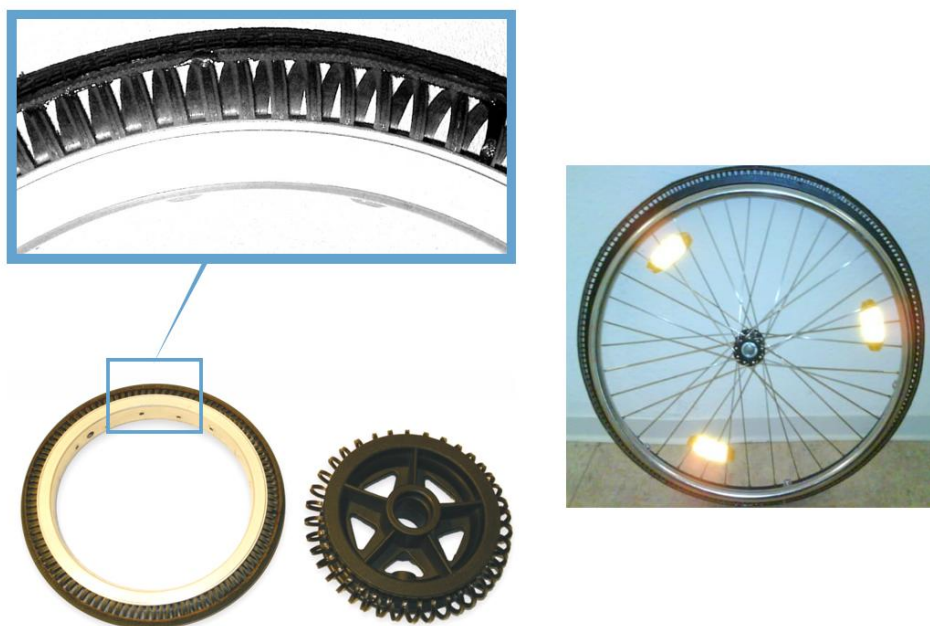


Abb. 9: Druckluftloser Reifen mit CFK-Schraubenfeder [10], [11]

Gasdruckfeder (Bild 10)

Die in Bild 10 abgebildete Gasdruckfeder besitzt einen CFK-Zylinder. Weiteres Leichtbaupotential bietet der Austausch der Stahlkolbenstange durch eine CFK-Stange. Eine besondere Herausforderung war die Verbindung vom Al-Kopfstück (Al-Hülse) mit dem CFK-Zylinder. Hohe Gasdrücke und Kolbenauszugskräfte sorgen für eine hohe Beanspruchung der Verbindung.



Bild 10: Gasdruckfeder mit CFK-Zylinder [12]

4 Schlussfolgerungen\ Ergebnisse\ Ausblick

Aufgrund ihrer teilweise sehr positiven Eigenschaften sind faserverstärkte Kunststoffe sehr gut geeignete Federwerkstoffe mit hohem Leichtbaupotenzial. Erfolgreiche Tests und Anwendungen belegen das. Für eine größere Marktdurchdringung werden geeignete Herstellungstechnologien für mittlere und große Stückzahlen benötigt. Die Material- und insbesondere die Fertigungskosten können und müssen weiter sinken.

Literatur

- [1] Scharr, G., Federn aus faserverstärkten Kunststoffen. MATERIALICA, München, 2010
- [2] Pospischil, L., Scharr, G. *Verbundwerkstoffe – Angebote für den Schiffbau*. Schiffbauforschung 3/4 (1998), S. 49-54
- [3] Scharr, G., Denzer, K.-P., *Leichtbau-Werkstoffe im Vergleich*. Werkstofftag 1994, VDI-Berichte Nr. 1080 (1994), S. 691-694
- [4] Scharr, G., *Federn aus faserverstärkten Kunststoffen für den Leichtbau*. VDI-Tagung „Federn - Unverzichtbare Bauteile der Technik, Fulda, VDI-Berichte Nr. 1972, 7./8.11.2006
- [5] Eingetragene Marke DE3020090262004: „*composite springs . federleicht*“, Inhaber: G. Scharr, 2009
- [6] Patent DE102005054313, *Federvorrichtung*, Erfinder G. Scharr, Anmelder Universität Rostock, 2005
- [7] Patent DE000019609938A1, *Reibungsfeder*, Erfinder L. Pospischil, G. Scharr, Anmelder G. Scharr, 1996

- [8] Pospischil, L., Scharr, G., *Spannungsanalysen an Reibungsfedern (Ringfedern) aus CFK/GFK*. GESA-Tagung, Experimentelle Spannungsanalyse 1999, Warnemünde, VDI-Berichte Nr. 1463, S. 339-344
- [9] Scharr, G., Pospischil, L., *Entwicklung einer Reibungs-/Ringfeder aus CFK/GFK*. Tagungshandbuch der Magdeburger Maschinenbau-Tage 9/1999
- [10] Patent DE102006023106, *Reifen*, Erfinder G. Scharr, Anmelder Universität Rostock, 2006
- [11] Patent DE010138410, *Notlaufstützkörper für luftbereiftes Fahrzeugrad*, Erfinder G. Scharr, Anmelder Continental Aktiengesellschaft, 2005
- [12] Scharr, G., *Tragfähigkeit von zylindrischen CFK/Al-Kleerverbindungen*, Fügetechniken im Vergleich, Baden-Baden, VDI-Berichte Nr. 883 (1991), S. 39-54

Festere Klebeverbindungen durch Flächenstrukturierung additiv gefertigter Teile

Walter Schmidt, Georg Jacobs, Yimin Yang, Manuel Löwer

RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus

Steinbachstr. 54 B, 52074 Aachen

Email: schmidt@ikt.rwth-aachen.de; Internet: <http://www.ikt.rwth-aachen.de>

Inhalt: Im Leichtbau werden häufig faserverstärkte Werkstoffe eingesetzt. Bei der Gestaltung von Baugruppen aus diesen Materialien spielt die Fügetechnik eine besondere Rolle. Weit verbreitet sind hierbei stoffschlüssige Verbindungen auf Basis von Epoxid-Harzen, die hohe Festigkeiten aufweisen und dabei spaltüberbrückend und dadurch toleranzausgleichend wirken. Im FLM-Verfahren additiv hergestellte Bauteile eignen sich aufgrund ihrer freien Formgebung und ihrer hohen Funktionsvielfalt sehr gut für einen Verbund mit faserverstärkten Werkstoffen. Die Integration thermoplastischer Kunststoffteile in Leichtbau-Anwendungen erfordert bisher jedoch eine aufwändige Vorbehandlung der Oberflächen für das Kleben mit Epoxid-Harz. Dabei ergeben sich durch die additive Fertigung neue Möglichkeiten für die Gestaltung kraftübertragender Wirkflächen von Klebeverbindungen.

Der Beitrag beschreibt, wie die Klebefläche eines gedruckten Bauteils strukturiert werden kann, um die Festigkeit der Verbindung durch Epoxid-Harz deutlich zu erhöhen. Dazu werden realisierbare Strukturen systematisch variiert und ausgesuchte Problemuster im FLM-Verfahren gedruckt. Die Festigkeit der geklebten Verbindungen wird anschließend auf einer Prüfmaschine getestet. Ein direkter Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit einem Referenzversuch schließt diesen Beitrag ab.

Abstract: Fiber-reinforced materials are widely used in lightweight design. Fixation strategies play a major role in designing assemblies utilizing these materials. Adhesive bonding with epoxy resin is commonly applied in this field, due to its strength and gap bridging properties which allow compensation of manufacturing tolerances. FLM - additive manufactured parts are very eligible for a usage in combination with fiber-reinforced materials due to their suitability for free formed surfaces and high functional versatility. However, for integration of thermoplastic parts in lightweight applications with epoxy resin complex preprocessing of the surfaces is inevitable. Additive manufacturing offers relief through specific surface geometries for improved force transfer in adhesive bonding.

This paper describes a method to achieve stronger epoxy resin bonding of printed parts through utilization of a structured bonding surface. The initial step is the systematic variation of feasible structures before selected samples are printed on a FLM-printer. The achievable strength of the adhesive bond is then evaluated through mechanical stress-testing. Finally, a direct comparison of the gained results and the results of a reference experiment is presented.

Stichwörter: Leichtbau, additive Fertigung, Klebetechnik

Keywords: *lightweight design, additive manufacturing, adhesive technology*

1. Einleitung

Additive Herstellungsverfahren ermöglichen neben optimierter Formgebung (bspw. auf bestimmte Lastfälle durch Topologieoptimierung) eine hohe Funktionsintegration in Bauteilen, da die bekannten Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren hier nicht gelten. Dadurch kann die Anzahl notwendiger Bauteile gesenkt werden bei gleicher Funktion der Baugruppe. Zusätzlich können Schnittstellen entfallen und ihr Gewicht eingespart werden. Typischerweise ist Leichtbau aufgrund des erhöhten Entwicklungsaufwandes vor allem in Spezialanwendungen zu finden. Hier ist die hohe Flexibilität der additiven Fertigungsverfahren in Bezug auf Adaption bestehender Geometrien und meist niedrige Stückzahlen besonders vorteilhaft [1]. Große aber dennoch leichte Strukturteile aus modernen faserverstärkten Werkstoffen können so durch Kombination mit additiv hergestellten, stark funktionsintegrierten Bauteilen effektiv ergänzt werden und ermöglichen neue Anwendungen.

1.1 Kleben

Das Kleben gehört zu den ältesten Fügeverfahren. In der technischen Anwendung hat es sich heute vor allem im Konsumgüterbereich sowie dem Transportwesen, insbesondere in der Luftfahrt, etabliert [2]. Die Bindungskraft wird durch den Klebstoff erzeugt und setzt sich aus der inneren Bindung des Klebstoffs (Kohäsionskraft) und der Haftung des Klebstoffs an der Fügeteiloberfläche (Adhäsionskraft) zusammen.

Die Kohäsionskraft wird durch die Anziehungskräfte (Haupt- sowie Nebenvalenzbindung) zwischen den Atomen und den Molekülen innerhalb des Stoffes aufgebaut [2]. Diese Kräfte wirken in allen festen und flüssigen Stoffen und bestimmen deren Formbeständigkeit [3]. Die Wechselwirkungen an der Grenzfläche zwischen unterschiedlichen Stoffen stellt die Adhäsionskraft dar (Bild1). Nach [2] wird heute hauptsächlich zwischen zwei Adhäsionsarten unterschieden: Die spezifische Adhäsion umfasst alle Adhäsionsprinzipien, die auf chemischen, physikalischen und thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten beruhen. Sie ist die Hauptursache für den Aufbau der Adhäsionskraft, jedoch ist eine allgemeine Beschreibung der spezifischen Adhäsion aufgrund der Vielzahl beteiligter Effekte nicht möglich. Die mechanische Adhäsion steht für die mechanische Verankerung der Klebeschicht mit den geometrischen Makrostrukturen der

Fügeteiloberfläche wie Poren, Kapillaren und Hinterschneidungen. Sie hängt also von der Struktur der Fügeteiloberfläche ab [2].

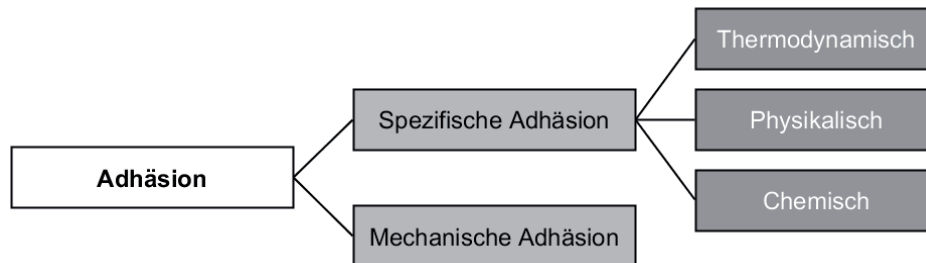


Bild 1: Adhäsion nach [2]

Neben der Festigkeit des Klebstoffs hängt die Festigkeit der Verbindung maßgeblich von der Art und der Beschaffenheit des Fügeteils ab. Geeignete Kombinationen werden vom Klebstoff-Hersteller in der Regel vorgeschlagen. Er liefert auch die Verarbeitungshinweise, die die zuvor genannten Bindungskräfte fördern. Ein geläufiges Beispiel dafür ist das Entfetten und/oder Anrauen der Klebeflächen vor dem Auftragen des Klebstoffs.

Fast alle der heute verwendeten Klebstoffe sind Kunststoffe, die auf Polymeren basieren. Polymere sind schwere Molekülketten, die durch Wiederholung der Grundmoleküle (Monomere) entstehen. Aufgrund der einfachen Modifizierbarkeit der Monomere ist heute eine breite Vielfalt von Klebstoffarten verfügbar [2].

1.2 Anwendungsbeispiel und Problemformulierung

Grundsätzlich ist für den Leichtbau die vollständige integrale Bauweise, also der Konzentration aller Funktionen in einem Bauteil, der richtige Weg, um das Minimalgewicht einer Struktur zu erreichen [4]. Die verwendeten Faserverbundwerkstoffe sind jedoch nicht für alle Funktionen geeignet, so dass nach wie vor spezielle Elemente wie beispielsweise mechanische oder elektrische Schnittstellen in die Struktur eingebracht werden müssen. Dies passiert aufgrund der Kombination unterschiedlicher Materialien bevorzugt durch Verkleben der Teile. Als Klebstoffe bieten sich Kunstharze durch die grundsätzliche Verfahrensnähe an, denn glasfaser- oder kohlefaserverstärkte Werkstoffe besitzen ebendiese Duomere auf Basis hoch-polymerer synthetischer Stoffe als Matrixwerkstoff [4]. Ein besonders wichtiger Vorteil dieses Klebstoffs ist jedoch seine spaltüberbrückende Wirkung. Die Bindungsstärke von Epoxidharz (EP) ist unempfindlich gegenüber Änderungen der Klebschichtdicke. Für die meisten Klebstoffe beträgt die empfohlene

Klebschichtdicke 0,2 mm [2], während mit EP-Klebstoff größere Spalte überbrückbar sind. Dadurch können Klebstellen zum effektiven Toleranzausgleich genutzt werden, was das präzise Fügen der Teile auf Vorrichtungen ermöglicht.

Ein weit verbreitetes additives Fertigungsverfahren ist das Fused Layer Manufacturing, kurz FLM (auch bekannt als Fused Deposition Modeling, kurz FDM) [5]. Verfahrensbedingt werden ausschließlich schmelzfähige Materialien also Thermoplaste verarbeitet. Diese sind chemisch verwandt mit den meisten Klebstoffen, was sich auch darin äußert, dass ihre Oberflächenenergie ähnliche Beträge aufweist [2]. Das hat zur Folge, dass die Benetzung der Klebefläche durch den Klebstoff unzureichend ist. Kunststoffe gelten allein aufgrund dieses Effekts als vergleichsweise schlecht klebbar im Gegensatz zu Metallen [2]. Durch Vorbehandlung der Kunststoffoberflächen kann die Benetzbarkeit verbessert werden, wobei dies immer mit Mehraufwand und damit mit erhöhten Prozesskosten verbunden und teilweise nur in industriellem Maßstab wirtschaftlich sinnvoll ist (bspw. Koronaentladung) [6].

2 Lösungsansatz

Die Oberflächenaktivierung verbessert in erster Linie Effekte der spezifischen Adhäsion. Die Summe der Bindekräfte zwischen Klebstoff und Teiloberfläche ergibt sich jedoch erst nach Einbezug der mechanischen Adhäsion, also auch der Verankerung der beiden Komponenten ineinander. Die gestalterischen Freiheiten der additiven Fertigung erlauben hierfür eine gezielte Strukturierung von Oberflächen durch Einbringung von Vertiefungen mit Hinterschnitten, die vom flüssigen Klebstoff gefüllt werden und nach dem Aushärten eine formschlüssige Verbindung erzeugen. Durch die Nutzung der additiven Fertigung ist der Aufwand für die Erzeugung der Strukturen sehr gering. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist demnach, dass weder der Fertigungsaufwand zunimmt noch ein zusätzlicher Schritt im Montageprozess notwendig ist. Vorausgesetzt zuvor wurde bei der Gestaltung der Oberfläche im CAD eine wirksame Struktur modelliert.

Für die Definition der Geometrie einer solchen Struktur müssen einige Restriktionen beachtet werden. So sind im FLM-Verfahren mit den meisten Werkstoffen Überhänge von 45° zur Druckrichtung ohne spezielle Parameter herstellbar. Die übliche Schichtauflösung in Druckrichtung beträgt 0,1 mm. Zwei Schichten müssen mindestens vorliegen, da andernfalls kein Überhang erzeugbar ist. Aus gestalterischer Sicht sollte eine Oberfläche noch als Funktionsfläche erkennbar sein. Die Tiefe der Struktur im Bauteil wird daher auf

maximal 0,6 mm begrenzt. Bild zeigt zwei solcher Strukturgeometrien. SG1 entspricht in seiner Gestalt einem Schwalbenschwanzprofil, während SG2 das er Ergebnis einer systematischen Weiterentwicklung darstellt.

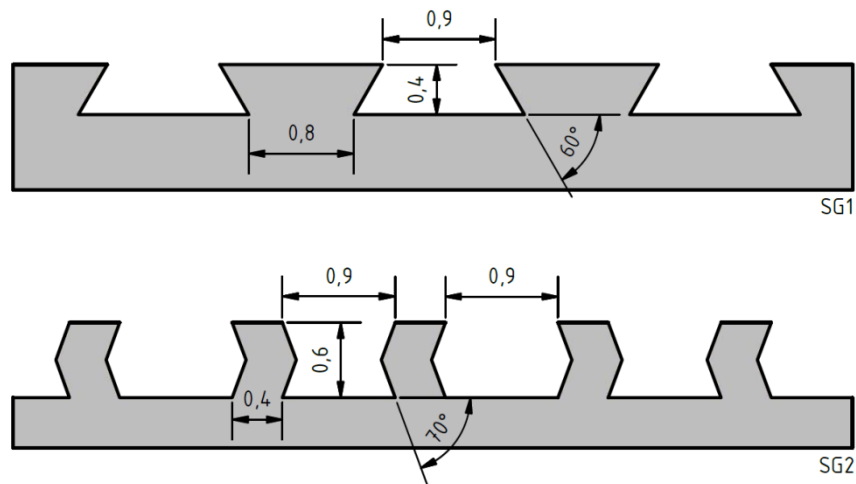


Bild 2: Strukturgeometrien SG1 und SG2 (Maße in Millimeter)

3 Versuchsplanung

Das vorgeschlagene Verfahren wird in einem Versuch auf seine Wirksamkeit getestet. Zum einen wird die Festigkeit einer strukturierten Verklebung mit einer unstrukturierten verglichen, zum anderen erfolgt eine Gegenüberstellung mit einem Versuch, bei dem Kunststoffteile über konventionelle Verfahren behandelt werden [7]. In der Vergleichs-Untersuchung werden Kunststoffproben aus Polyamid mit einer Niederdruck-Plasmabehandlung aktiviert und anschließend mit Epoxidharz verklebt. Die Festigkeit der Verklebung wird in Abhängigkeit der Behandlungsart (Sauerstoff- oder Argon-Plasma) und der Behandlungszeit der Proben in einem Biegeschälversuch nach DIN 54461 [8] ermittelt. Nach Habenicht ist die DIN 54461 für das Prüfen der Wirksamkeit unterschiedlicher Oberflächenbehandlungsmethoden bei einer Kunststoff-Klebung geeignet [2]. Bild stellt den grundsätzlichen Versuchsaufbau dar. Ziel des Versuchs ist das Versagen der Klebschicht, wobei die dafür notwendige Kraft und der Weg gemessen werden.

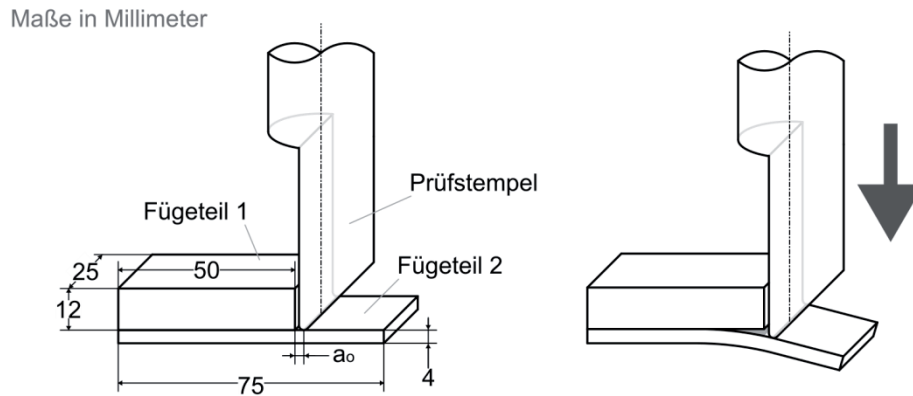


Bild 3: Versuchsaufbau nach DIN 54461, mit $a_0 = 2,5 \text{ mm}$

Die Auswertung des Prüfergebnisses erfolgt durch Ermittlung des Biegeschälwiderstands als Quotient aus Anrisskraft in Newton und der Breite der Probe in Millimetern. Die Anrisskraft kennzeichnet den Kraftwert, bei dem die Probe während des Versuchs beginnt zu versagen. Diese Stelle ist im Kraft-Weg-Diagramm durch ein lokales Kraftmaximum gekennzeichnet [8].

Um einen definierten Klebspalt zu erreichen, wird die Klebefläche mit Abstandhaltern von 0,5 mm Höhe zum Probenträger positioniert (Bild). Diese verhindern auch ein seitliches Austreten des flüssigen Harzes aus dem Klebspalt vor seiner vollständigen Aushärtung.

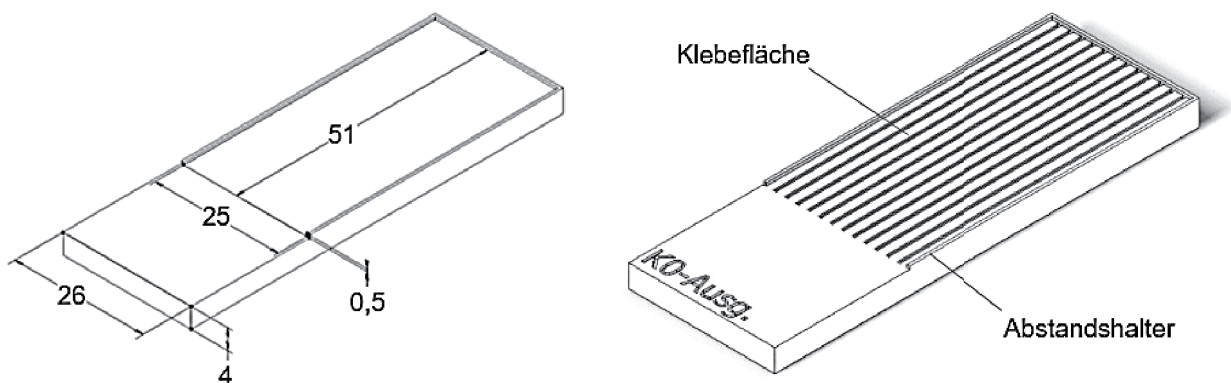


Bild 4: Probengeometrie und Abmessungen

Die Proben werden im FLM-Verfahren mit einem 3D-Drucker des Typs Ultimaker 2 hergestellt. Als Werkstoff kommt PLA zum Einsatz, welches mit den Standardeinstellungen laut Hersteller, jedoch mit 100 % Füllichte aufgebracht wird (50 MPa Zugfestigkeiten, 5 % Bruchdehnung [9]). Bei dem verwendeten Klebstoff handelt

es sich um ein 2-Komponenten-Epoxidharz mit einer Topfzeit von 40 Minuten (62 MPa Zugfestigkeit, 4,5 % Bruchdehnung). Seine volle Belastbarkeit erreicht die Klebung nach 24 Stunden [10].

4 Versuchsergebnisse

Alle Proben erreichen im Versuch ein erstes Kraftmaximum bei etwa 400 N. Dieses wird verursacht durch den Klebwulst in der Kehle zwischen Probenträger und Probe und zeichnet sich durch kohäsives Versagen der Klebeschicht aus. Dieser Kraftwert ist unabhängig vom weiteren Kraftverlauf und damit von der Strukturgeometrie. Da die strukturierte Klebefläche zu diesem Zeitpunkt noch intakt ist, wird dieser Wert nicht als Anrisskraft gewertet. Die unstrukturierte Probe SG0 erreicht unmittelbar nach diesem Kraftmaximum die gewertete Anrisskraft von 180 N. Der Riss breitet sich zügig über die volle Probenlänge aus und die Probe platzt vollständig vom Träger ab. Die Bindung versagt adhäsiv zwischen PLA und Klebeschicht (Bild 5).

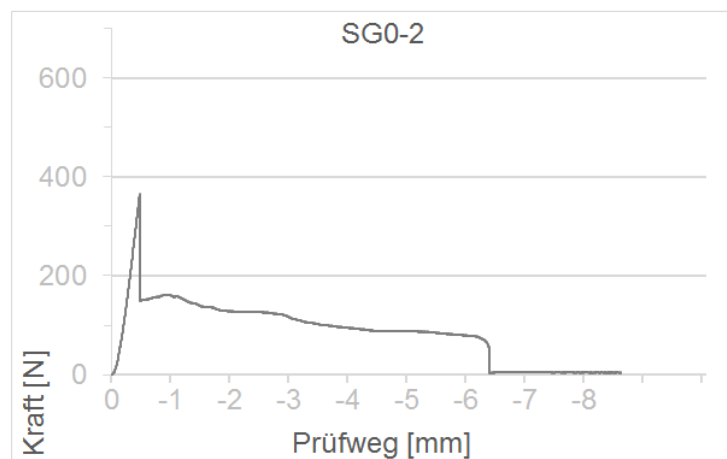


Bild 5: Exemplarisches Ergebnis einer unstrukturierten Probe SG0

Probe SG1 versagt neben dem Bruch in der Klebeschicht (Kohäsion) partiell auch durch Entformung der hinterschneidenden Formelemente. Dieser Prozess nimmt relativ viel Energie auf und hemmt das Risswachstum. Die Probe ist nach einem Prüfweg von 9 mm zwar deformiert, jedoch noch nicht vom Probenträger gelöst. Insgesamt wird im Vergleich zur unstrukturierten Probe SG0 ein deutlich höherer Schälwiderstand erreicht. Die Anrisskraft der Probe SG1 liegt bei rund 410 N (Bild 6).

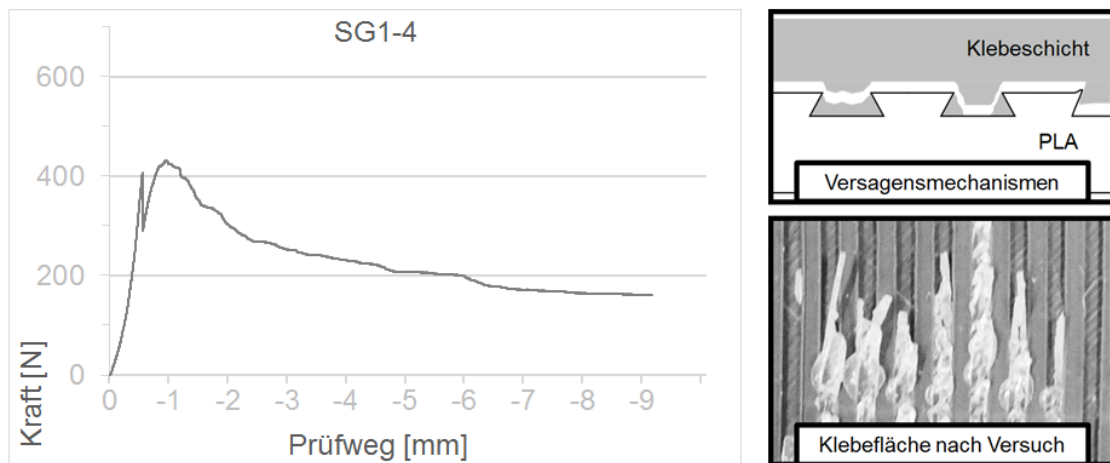


Bild 6: Exemplarisches Ergebnis einer Probe mit Strukturgeometrie SG1

Eine gezielte Optimierung der Strukturgeometrie im Hinblick auf Fertigungsparameter und die Auswertung der beobachteten Versagensmechanismen führen auf die Versuchsreihe SG2. Die Proben erreichen mit bis zu 640 N die größte Anrisskraft der gesamten Untersuchung. Bei allen Proben der SG2-Versuchsreihe liegt eine Mischform von Versagensmechanismen vor. Die PLA-Probe versagt hier hauptsächlich kohäsiv an der Wurzel der Formschlusselemente (Bild 7).

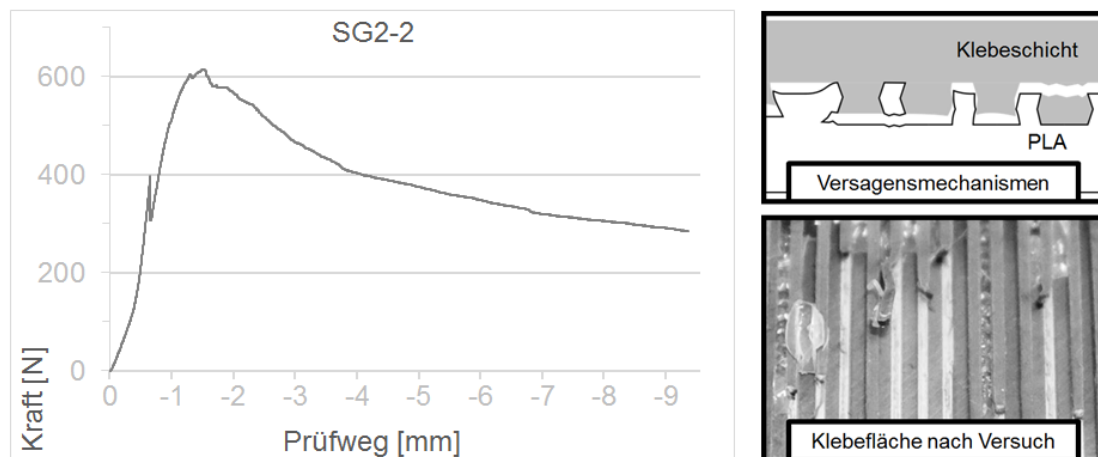


Bild 7: Exemplarisches Ergebnis einer Probe mit Strukturgeometrie SG2

Mit der Strukturgeometrie SG2 werden die Grenzen aller wirkenden Bindungsmechanismen bei annähernd gleichem Kraftwert erreicht. Dadurch liegt die Belastbarkeit der Verbindung über dem Dreifachen der unstrukturierten Probe SG0. Im Vergleich zur Referenz-Untersuchung mit plasmaaktivierten Polyamid-Proben erreicht die

Strukturgeometrie SG2 einen höheren Biegeschälwiderstand bei gleichzeitig geringerer Streuung (Bild 8).

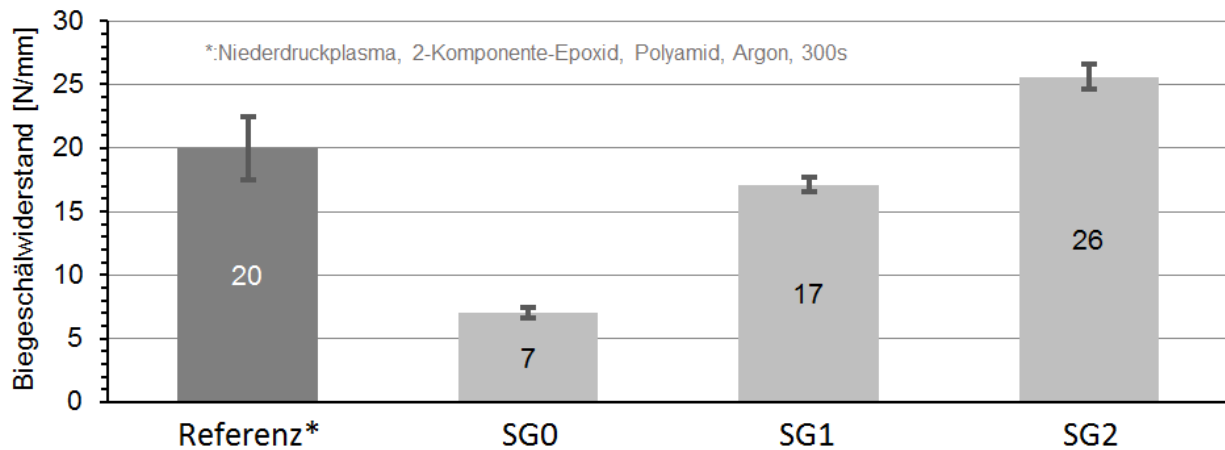


Bild 8: Vergleich der Werte für den Biegeschälwiderstand

5 Fazit und Ausblick

Die Strukturierung der Klebefläche von additiv gefertigten Teilen ermöglicht durch die Ausnutzung der Verankerungseffekte wesentlich festere Klebeverbinding. Ohne die sonst übliche, aufwändige Oberflächenaktivierung von Kunststoffteilen werden dadurch höhere Festigkeiten erreicht als durch das konventionelle Verfahren. Das Einbringen der Struktur hat keinen spürbaren Einfluss auf die Fertigungszeit der Teile, jedoch ist mit einmalig höherem Modellierungsaufwand im CAD zu rechnen.

Aufbauend auf den vorgestellten Ergebnissen muss die Richtungsabhängigkeit sowohl in Bezug auf die Belastung als auch auf die Fertigung der Struktur untersucht werden. Zudem ergeben sich durch die Verwendung anderer additiver Fertigungsverfahren eventuell weitere Potentiale für die stoffschlüssige Fügetechnik.

Literatur

- [1] Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-642-24324-0
- [2] Habenicht, Gerd: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6., aktualisierte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-85264-3
- [3] Habenicht, Gerd: *Kleben – erfolgreich und fehlerfrei*. 6., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. 2008. – ISBN 978-3-8348-1585-9

- [4] Klein, Bernd: *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-658-02271-6
- [5] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7
- [6] Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-642-38890-3
- [7] Anagreh, N.; Al-Salt (Jordan); Dorn, L.; Bilke-Krause, C.: *Niederdruckplasmavorbehandlung von Polyamidoberflächen (PA)*. KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe 56. Jahrgang, Nr. 12/2003
- [8] Norm DIN 54461. *Strukturklebstoffe – Prüfung von Klebverbindungen – Biegeschälversuch*
- [9] Siebrecht, Justus; Jacobs, Georg; Beckers, Alexander; Löwer, Manuel; Schmidt, Walter; Körber, Michael: *Einfluss von Parametern auf die Funktionserfüllung von Bauteilen beim Fused Deposition Modeling*: 27. DfX-Symposium 2016. (zur Veröffentlichung angenommen)
- [10] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Datenblatt Epoxydharz L + Härter L. http://www.r-g.de/w/images/archive/0/02/20100702094838!Td_de_100135.pdf. (Stand 01.08.2016)

Systematische Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen

Robin Kaiser, Michael Vielhaber*

Daimler AG

Mercedes-Benz Werk Sindelfingen, D-71059 Sindelfingen

Email: robin.kaiser@daimler.com; Internet: <http://www.daimler.com>

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität des Saarlandes

Campus, Geb. E2 9, 1. OG, D-66123 Saarbrücken

Email: vielhaber@lkt.uni-saarland.de; Internet: <http://www.lkt.uni-saarland.de/>

Inhalt: Eine häufig auftretende Problemstellung in der Fahrzeugentwicklung ist die transparente Abbildung möglichst vieler Szenarien in der frühen Phase der Entwicklung. Im Falle der lasttragenden Fahrzeugkarosserie führen diese ständigen Änderungen des Anforderungsprofils (Last und Bauraum) automatisch auch zu einer Unschärfe in der Materialauswahl, die bisher lediglich auf statische Anforderungsprofile und für Fahrzeugstrukturbauteile untypische Querschnitte ausgelegt war. Im Rahmen dieser Ausarbeitung soll ein Weg aufgezeigt werden um diese Lücken zu schließen.

Abstract: A common problem in vehicle development is the transparent representation of many scenarios in the early stage of development. In case of the load-bearing car body these permanent changes of the requirements profile (load and available space) lead to a blur within the material selection. This has only been configured for statical requirement profiles and untypical car body cross sections, until now. With this paperwork a solution will be demonstrated to close this gap.

Stichwörter: Materialauswahl, Fahrzeugstrukturbauteile, Produktentwicklung

Keywords: material selection, vehicle structure parts, product development

1. Einleitung – Materialauswahl von Strukturbauteilen bisher

Spricht man im allgemeinen Sprachgebrauch der Ingenieure von Strukturbauteilen, so sind damit zumeist jene Art von Komponenten betitelt, welche in ihrer primären Funktion ,während ihrer Nutzung, auftretenden Kräften und Momenten standhalten müssen [1]. Je nach Eintrittsrichtung der angreifenden Last und Lagerung des jeweiligen Bauteils sind daraus verschiedene Belastungsszenarien ableitbar. Diese können separat als Zug-, Druck- (Knicken als Sonderfall), Biege- oder Torsionsbelastung oder in Kombination auftreten [2]. Um die jeweils geforderte Funktion zu vertretbaren Kosten erfüllen zu können, bedarf es der Wahl eines geeigneten Werkstoffs sowie eine an die Belastung

angepasst geometrische Anordnung des selbigen. Aufgrund des hohen Anspannungsgrads bezüglich des zur Verfügung stehenden Bauraums in der Fahrzeugentwicklung, ist nicht nur die Last sondern das Verhältnis von Bauraum und Belastung hauptentscheidend für die Materialauswahl [1], [3], [5]. Die Dimensionierung der Bauteile findet dabei meist auf der Basis eines vorgegebenen Steifigkeits- oder Festigkeitsziels statt. Hierfür gibt es in der Literatur bereits Methoden, die solch ein Zusammenspiel von Last und Bauraumeinschränkung innerhalb der Materialauswahl berücksichtigen können (Bild 1).

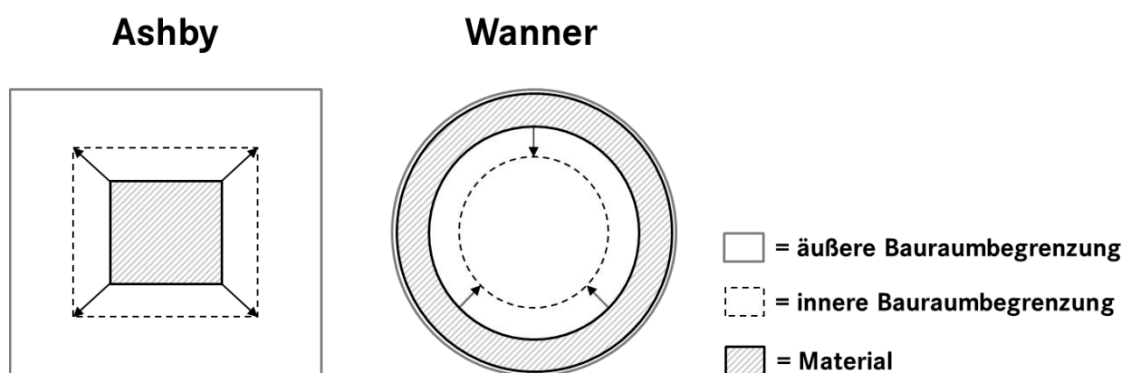


Bild 1: Vergleich verschiedener Ansätze zur Materialauswahl in begrenztem Bauraum

Der Hauptunterschied der beiden Ansätze stellt dabei die Richtung der Bauraumfüllung dar. Während Ashby eine Materialansammlung von innen nach außen vorsieht, lässt Wanner den verfügbaren Bauraum von außen nach innen füllen[1], [5]. Welche Vor- und Nachteile die verschiedenen Vorgehensweisen mit sich bringen und welche Gegebenheiten den aktuellen Einsatz dieser Methoden innerhalb der Fahrzeugstrukturbauteilentwicklung verhindern, soll im Folgenden geklärt werden.

2. Defizite und Handlungsbedarf

Trotz der gegenwärtigen Verfügbarkeit von systematischen Ansätzen zur Materialauswahl, konnte sich bisweilen keiner dieser Vorgehensweisen innerhalb der Entwicklung von Fahrzeugstrukturbauteilen etablieren. Es stellt sich daher die Frage welche speziellen Anforderungen den Einsatz bestehender Methoden verhindern?

Als Hauptverursacher gelten hierbei sicherlich die schwer zu fixierenden Anforderungen an die Fahrzeugstruktur, insbesondere in den frühen Entwicklungsphasen, aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten. Kombiniert mit den

angespannten Bauraumsituationen führt dies zu einem ständigen Wechsel der Anforderungsprofile, worauf die bisherigen Auswahlmethoden nicht ausgelegt sind. Zudem sind Fahrzeugstrukturbauteile in einer Vielzahl der Fälle Biege-, Torsions- oder Knickbelastungen (durch Druck) ausgesetzt. Geometrisch gesehen ist daher, nach dem Satz von Steiner [Verweis], eine Materialanordnung an den äußeren Grenzen des Bauraums besonders günstig. Der Ansatz von Ashby (vgl. Kapitel 1) lässt jedoch nur eine Bauraumfüllung von innen nach außen zu. Wanner (vgl. Kapitel 1) greift diesen Aspekt auf und setzt ihn anhand von runden Hohlprofilen in seiner Auswahlmethode um. Für die Anwendung zur Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen ist solch eine Rohrgeometrie jedoch zumeist ungeeignet. Grund hierfür sind beispielsweise notwendige Anlageflächen zum Toleranzausgleich für den Zusammenbau der Strukturkomponenten sowie die effizientere Bauraumausnutzung bzw. -aufteilung in einem angespannten Bauraumverhältnis und kann damit Fahrzeugstrukturen und Bauraumänderungen nicht realitätsgetreu abbilden.

3. Entwicklung von Transferfunktionen für rechteckige Hohlprofile - Herleitung am Beispiel des Lastfalls Knicken

Um eine möglichst realitätsnahe Bauteilabbildung in der frühen Entwicklungsphase für die Materialauswahl zu gewährleisten, werden Strukturbauteile in Form von rechteckigen Hohlprofilen modelliert. Durch die geschickte Wahl der geometrischen Variablen ist es möglich die eingehenden Anforderungsänderungen von Last und Bauraum mit einer entsprechenden Anpassung des Materials sowie der dazugehörigen Wandstärke t zu beantworten.

Die hierfür erforderlichen Schritte sollen in folgendem Beispiel ganz allgemein anhand eines auf Knicken beanspruchten rechteckigen Hohlprofils hergeleitet werden (Bild 2).

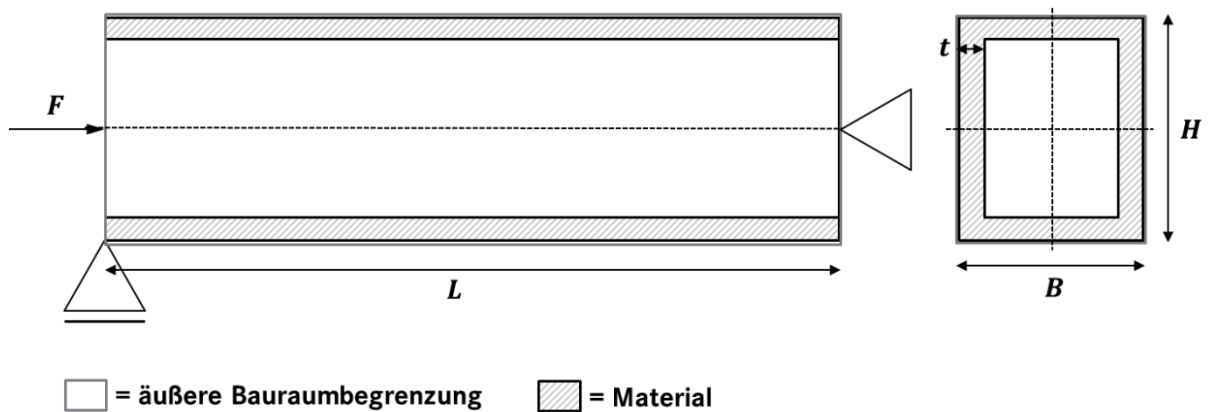


Bild 2: Auf Knicken beanspruchtes rechteckiges Hohlprofil

Die Höhe H und die Breite B repräsentieren hierbei die äußere Bauraumbegrenzung. Zudem wird die Länge des Bauteils mit L und die eintreffende Belastung mit F beschrieben. Anhand dieser Randbedingungen lassen sich die Masse m und das Flächenträgheitsmoment I wie folgt beschreiben:

$$m = (BH - (B - 2t)(H - 2t)) L \rho \quad (1)$$

$$I = \frac{BH^3}{12} - \frac{(B - 2t)(H - 2t)^3}{12}. \quad (2)$$

Zudem soll eine vorgegebene Knicklast F

$$F = \frac{\pi^2 EI}{\nu \beta^2 L^2} \quad (3)$$

ertragen werden. Der Faktor β beschreibt hierbei die Art der eintreffenden Knickbelastung (in diesem Fall $\beta=1$), ν den Sicherheitsbeiwert (bei Fahrzeugstrukturen $\nu=4$) und E den Elastizitätsmodul des gewählten Werkstoffs. Durch Einführung des Seitenverhältnisses

$$Q = \frac{B}{H} \quad \text{können die Gleichungen (1) und (2) zu den Beziehungen}$$

$$m = \left(2(Q+1) \frac{t}{H} - 4 \left(\frac{t}{H} \right)^2 \right) H^2 L \rho \quad (4)$$

und

$$I = \frac{QH^4}{12} \left(1 - \left(1 - \frac{2}{Q} \frac{t}{H} \right) \left(1 - 2 \frac{t}{H} \right)^3 \right) \quad (5)$$

umgeschrieben werden.

Um den notwendigen Wert des Elastizitätsmoduls E und somit das Material für eine bestimmte Wandstärke t ermitteln zu können, muss Gleichung (3) in (5) eingesetzt und nach

$$E(t) = E_0 \left(1 - \left(1 - \frac{2}{Q} \frac{t}{H}\right) \left(1 - 2 \frac{t}{H}\right)^3\right)^{-1} \quad (6)$$

umgestellt werden.

Einen realistischen Bereich in dem die Wandstärken variieren können, erhält man beispielsweise durch die Berücksichtigung fertigungstechnischer Randbedingungen der in Frage kommenden Werkstoffe. Dadurch lässt sich früh beurteilen ob ein Bauteil einer etwaigen Zuspitzung des Anforderungsprofils mit dem Anstieg der Wandstärke noch entgegen wirken kann, oder ob die Herstellbar- bzw. Wirtschaftlichkeit dann schon nicht mehr gegeben ist. Demnach ist die volle Bauraumausfüllung ($\frac{t}{H} = 0,5$ in Formel (6)) mit

$$E_0 = \frac{12S_b L^3}{CQH^4} \leq E \quad (7)$$

eher als theoretische Grenze anzusehen, da solche Lösungen in der Praxis nur in sehr seltenen Fällen zum Einsatz kommen.

Um die Werkstoffe nach ihrem Gewichteinsparpotential sortieren zu können, ist des Weiteren die Herleitung eines Materialindex notwendig. Die Komplexität der Terme (4) und (5) verhindern allerdings eine einfache Elimination der freien Variablen t durch umstellen und einsetzen. Die exakte Lösung kann jedoch unter Zuhilfenahme des numerischen Bisektionsverfahrens ermittelt werden. Hierfür werden beliebig viele Punkte zwischen den Grenzen E_0 (7) und E_{\max} (frei wählbar) sowie ρ_{\min} (frei wählbar) und ρ_{\max} (frei wählbar) erzeugt. Über die Residuumsfunktion

$$RES = E_0 \left(1 - \left(1 - \frac{2}{Q} \frac{t}{H}\right) \left(1 - 2 \frac{t}{H}\right)^3\right)^{-1} - E(t) \quad (8)$$

werden diese beliebig vielen Werte für E eingesetzt, um für jeden einzelnen die dazugehörige Wandstärke t zu bestimmen. Wird jeder dieser t -Werte wiederum in die Massengleichung (4) eingesetzt und für dieselbe Anzahl an ρ -Werte durchlaufen, so erhält man eine Lösungsfläche im 3D-Raum (Bild 3).

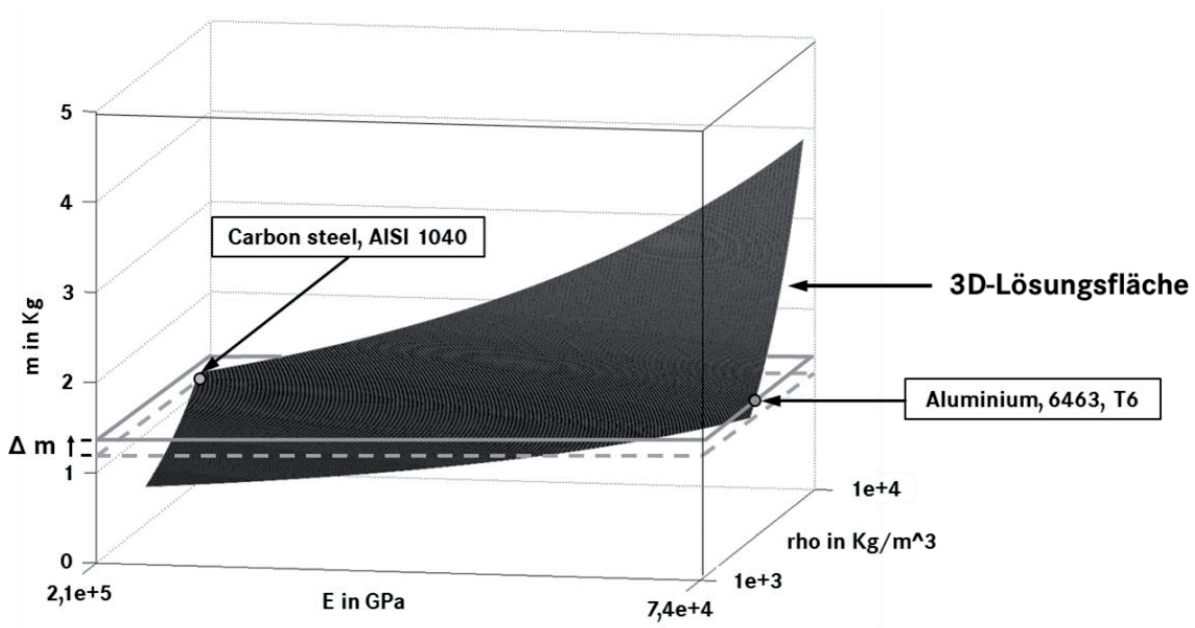


Bild 3: Lösungsfläche für den Lastfall Knicken auf Basis der Werte des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 4

Existente Materialien sind auf dieser Fläche entsprechend ihrer Materialeigenschaften verteilt. Die Werte der erstellten Fläche in Bild 3 basiert auf den Randbedingungen des Anwendungsbeispiels im folgenden Kapitel 4 und soll jedoch schon an dieser Stelle zur Veranschaulichung der Vorgehensweise dienen.

Um sich in den üblichen 2D-Werkstoffschaubildern Lösungen für rechteckige Hohlprofile mit gleicher Masse anzeigen lassen zu können, wird diese 3D-Fläche anschließend beliebig oft auf unterschiedlichen Massenniveaus geschnitten. Durch den Schnitt der Lösungsfläche mit einer Ebene auf einem bestimmten Massenniveau ergibt sich eine Kurve gleicher Masse innerhalb des Lösungsbereichs (Materialindex), der somit zur Auswahl eines geeigneten Werkstoffs dienen und innerhalb der bekannten Ashby-Diagrammen verwendet werden kann (vgl. Kapitel 4, Bild 5).

4. Anwendungsbeispiel

Anhand eines Bauraummodells wird in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung eine Topologieoptimierung mit den auslegungsrelevantesten Lastfällen durchgeführt. Aufgrund des vorgegebenen Designs und der festgelegten Packageinhalte bleibt der Fahrzeugstruktur nur noch ein begrenzter Bauraum zur Funktionserfüllung zur Verfügung in dem sich die Lastpfade fortpflanzen können. Entlang dieser Lastpfade werden im ersten Schritt rechteckige Hohlprofile angesetzt, um die Fahrzeugstruktur in erster Näherung abzubilden und diese dennoch schnell und flexibel variieren zu können. Die

einzelnen Bauteile erfahren dabei häufig unterschiedliche Beanspruchungsarten je nach Lastfall, so dass auf ein Bauteil in der Regel mehrere Lastfälle kommen. Aus diesen unterschiedlichen Lastfällen kann anhand derselben Vorgehensweise ermittelt werden welcher Lastfall der kritischste ist, um Werkstoff und Wandstärke des Bauteils danach auszulegen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit bei der Erläuterung der Vorgehensweise soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass der kritische Lastfall für das in Bild 4 markierte Bauteil bereits als Knicken bekannt ist.

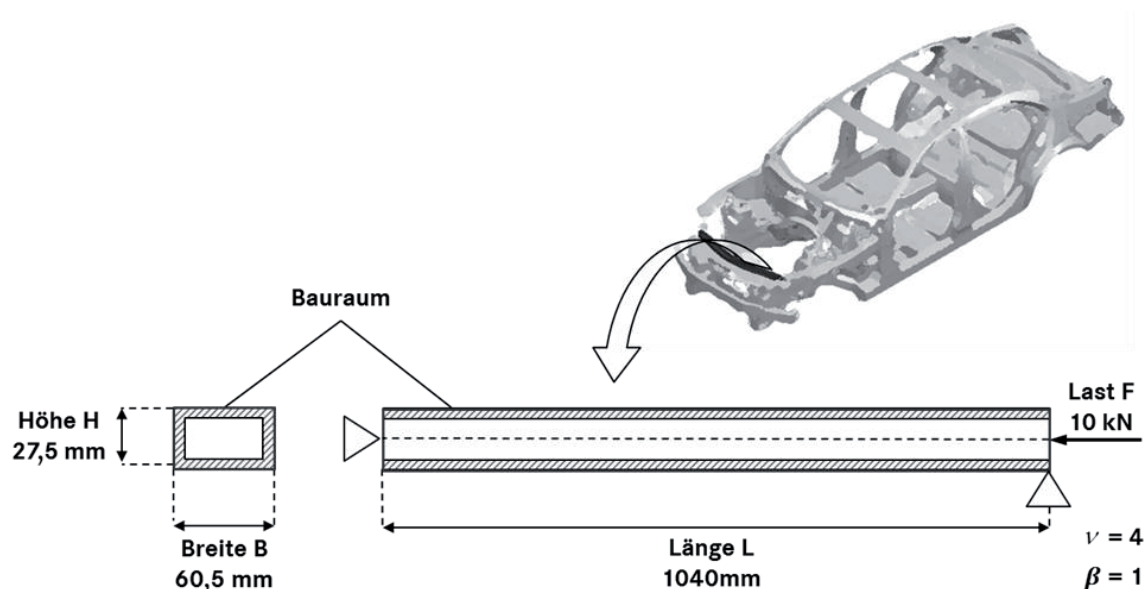


Bild 4: Belastung eines Karosseriebauteils - abstrahiert als alleiniger Lastfall

Grundsätzlich ist die Anwendbarkeit dieser Methode aber auch bei multiplen Belastungsanforderungen gegeben.

Entsprechend können die in Kapitel 3 hergeleiteten Gleichungen für das Screening und Ranking der Werkstoffe herangezogen werden und führen durch das somit zu folgendem Auswahlsschaubild (Bild 5).

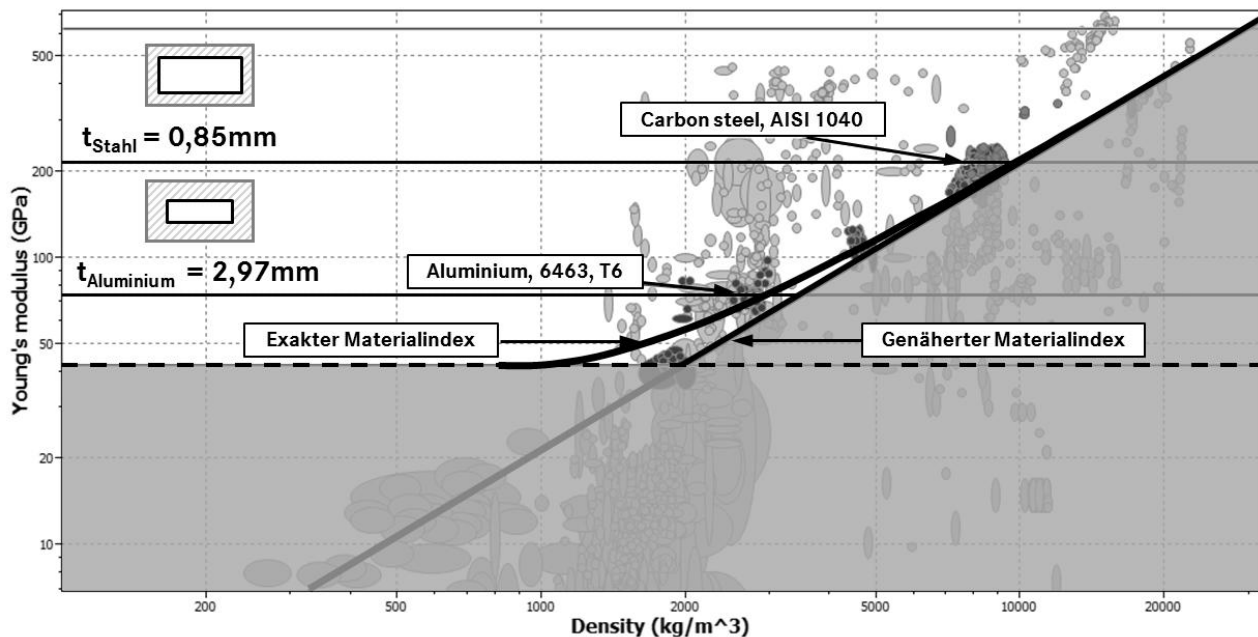


Bild 5: Auswahlschaubild in der Software CES-Selector in Kombination mit dem Isoplot gleicher Massen

Alle Werkstoffe unterhalb der gestrichelten Linie ($E_0 = 41,87$ GPa nach Formel (7)) sind demnach aufgrund des beschriebenen Last-Bauraum-Verhältnisses, selbst bei voller Ausfüllung des verfügbaren Bauraums nicht in der Lage der eintreffenden Last entgegen zu wirken. Aus diesem Grund wird ein Großteil der Kunststoffe direkt ausgeschlossen. Weitere statische Einschränkungen wie eine Mindestdehnung von 2% oder einem maximalen Werkstoffpreis von 100 €/Kg, reduzieren den Suchbereich um ein Weiteres. Die übrigen in Betracht kommenden Werkstoffe führen durch die Berücksichtigung des Materialindex aus dem Isoplot bzw. der daraus abgeleiteten Asymptote mit der Steigung 1, da der CES-Selector bisher noch keine Möglichkeit zur Eingabe komplexer Funktionen bietet, zu folgender Rankingliste (Tabelle 1). Dabei wird die Auswahlkurve solange parallel nach links verschoben, bis lediglich noch eine übersichtliche Anzahl möglicher Werkstoffe übrig bleibt.

Tabelle 1: Ranking der Werkstoffeignung

Werkstoffgruppe	Werkstoffbezeichnung	Wandstärke (mm)	Rang (L)	Leistungsindex (€*Kg)	Rang (G)	Gewicht (Kg)	Rang (M)	Materialkosten (€)
Stahl	Carbon steel, AISI 1040	0,85	1	0,751	2	1,196	1	0,628
Stahl	Low alloy steel, AISI 5140, annealed	0,84	2	0,757	1	1,190	2	0,636
Stahl	Low alloy steel, AISI 9255	0,85	3	0,785	4	1,202	3	0,653
Stahl	Low alloy steel, AISI 4140, normalized	0,85	4	0,829	2	1,196	4	0,693
Stahl	Low alloy steel, AISI 94B30	0,85	5	0,908	4	1,202	5	0,755
Stahl	Low alloy steel, AISI 8650	0,85	6	0,954	4	1,202	6	0,794
Stahl	Low alloy steel, AISI 9310	0,85	7	1,576	4	1,202	7	1,311
Aluminium	Aluminum, 6463, T6	2,97	8	3,935	12	1,362	8	2,888
Aluminium	Aluminum, 6463, T4	2,97	9	3,937	12	1,362	9	2,890
Aluminium	Aluminum, 359.0, cast, T6	2,98	10	4,129	10	1,361	10	3,034
Aluminium	Aluminum, A356.0, sand cast, F	3,02	11	4,199	14	1,381	11	3,039
Aluminium	Aluminium, 2024, T8510/T8511	2,87	12	4,260	8	1,358	12	3,137
Aluminium	Aluminium, 2024, T8510/T8511	2,87	12	4,260	8	1,358	12	3,137
Aluminium	Aluminum, D357.0, cast, T6	2,98	14	4,814	10	1,361	14	3,538

Alle in dieser Liste aufgeführten Materialien halten der eintreffenden Knicklast stand. Die hierfür benötigte Wandstärke für jeden Werkstoff kann dabei anhand der Gleichung (8) bestimmt werden und ist in der dritten Spalte der Tabelle 1 aufgetragen. Anhand der tatsächlich benötigten Wandstärke lässt sich nun für jede Werkstofflösung das für das Hohlprofil notwendige Gewichte und die Materialkosten sowohl ermitteln als auch ranken. Der Leistungsindex berechnet sich in diesem Beispiel anhand der Multiplikation von Materialkosten und Gewicht und stellt die dabei der besten Kombination aus beiden Zielgrößen dar. Bei abweichenden Entwicklungszielen in denen entweder die Kosten oder das Gewicht wichtiger sind, ist in diesem Schritt auch die zusätzliche Einführung eines Gewichtungsfaktors denkbar. In diesem Beispiel sollen doch beide Faktionen als gleich wichtig angesehen werden.

Die Entwicklung eines Stahlkonzeptes aus „Carbon steel, ALSI 1040“ scheint demnach am zielführendsten zu sein und als deutlicher Sieger hervorzugehen. Die am nächsten platzierte Lösung aus einer anderen Werkstoffgruppe scheint weit entfernt („Aluminium, 6463, T6“) und für einen etwaigen Konzeptwechsel nicht gefährdend.

Doch was geschieht wenn sich die Eingangsparameter verändern?

5. Variation der dynamischen Eingangsgrößen am Beispiel der Höhe H

Bereits in Kapitel 2 (Defizite und Handlungsbedarf) wurde darauf hingewiesen, das insbesondere in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung mit einer hohen Variation der Eingangsgrößen zu rechnen ist (Konzeptfindungsphase). Somit führen Design-, Package-, aber auch bauteilübergreifende Strukturabstimmungen eher zu einem Anforderungsbereich als zu einem einzelnen und fixen Wert. Aus diesem Grund muss eine

systematische Materialauswahl in der Lage sein mit diesen Anforderungsbereichen umgehen zu können. Fortfolgend soll daher anhand der Variation des Höhenparameters H exemplarisch dargestellt werden, wie die vorgestellte Methode wechselnde Anforderungsprofile berücksichtigen kann. Die Übertragbarkeit auf andere Eingangsgrößen wie beispielsweise Breite, Länge, Last usw. ist dabei ohne weiteres umsetzbar.

Verwendet man beispielsweise die beim Materialranking am besten abschneidenden Werkstoffe einer jeden Werkstoffgruppe (vgl. Kapitel 4, Tabelle 1) und lässt anhand deren Elastizitätsmodulen die, in Kapitel 3 aufgestellte, Residuumsfunktion (8) für eine variierenden Höhenbereich von 20-40mm berechnen, so erhält man die in Bild 6 dargestellten grafischen Auswertungen über den Gewicht-, Kosten- und Leistungsverlauf zu selbiger (in diesem Beispiel für die Werkstoffe „Carbon steel, ALSI 1040“ und „Aluminium, 6463, T6“).

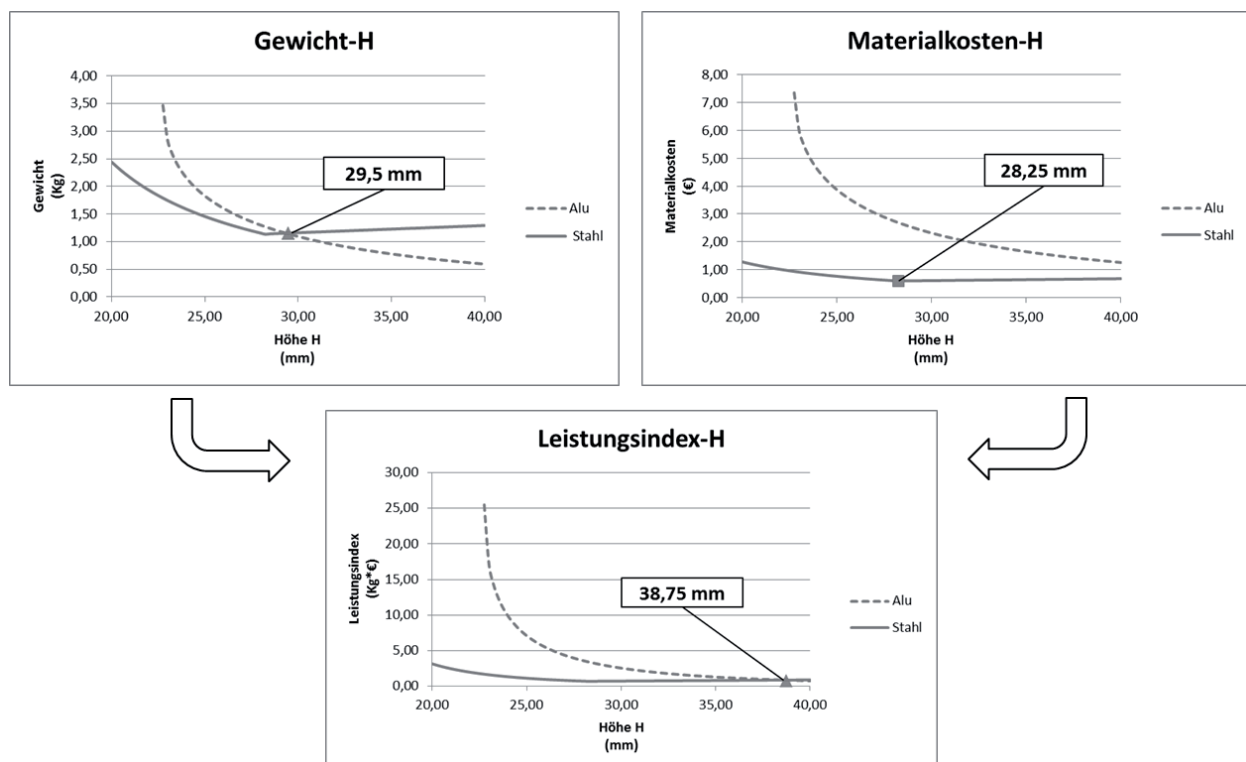


Bild 6: Veränderung der Werkstoffeignung bei Variation der Eingangsgröße H

Je nach Zielsetzung für die Komponente lassen sich aus diesen Darstellungen entsprechende Schlussfolgerungen ziehen. Werden beispielsweise hohe Leichtbauziele verfolgt, so sollte ab einer umsetzbaren Bauteilhöhe von 29,5mm eine Aluminiumlösung

bevorzugt werden, da diese ab diesem Zeitpunkt gewichtsseitige Vorteile bei gleicher Funktion bietet. Jedoch müssen hierfür auch entsprechende Mehrkosten in Kauf genommen werden.

Wird eine Ausführung der besten Kombination aus Gewicht und Kosten angestrebt, so sollte der Wechsel von einer Stahl- hin zu einer Aluminiumlösung erst aber einer umsetzbaren Höhe von 38,75mm erfolgen. Neben den reinen Materialeigenschaften und deren Reaktion auf die eintreffende Belastung lassen sich hierbei auch fertigungstechnisch bedingte Effekte darstellen. So wird beispielsweise ab einer Höhe von 28,25mm eine für die Herstellung notwendige Mindestmaterialstärke (in diesem Beispiel 0,8mm für Stahl) erreicht und ist in Bild 6 durch einen Knick in den Stahlkurven gekennzeichnet. Ab diesem Zeitpunkt kann bleibt die Wandstärke also konstant auch wenn bei einem weiteren Erhöhung des verfügbaren Bauraums funktionsseitig noch dünnere Wandstärken möglich wären.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorangegangenen Kapitel präsentieren eine Vorgehensweise zur systematischen Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen. Die Methode ist insbesondere auf die Bedürfnisse der frühen Entwicklungsphase ausgerichtet in denen die Fahrzeugkonzepte noch gar nicht genau feststehen und sich die Anforderungen an die einzelnen Strukturkomponenten daher ständig verändern. Durch die vereinfachte Abbildung der Bauteile als rechteckige Hohlprofile lassen sich sowohl über den Materialindex geeignete Werkstoffe separieren also auch deren notwendige Wandstärken, auf Basis der eintreffenden Lastanforderungen, bestimmen.

Im Rahmen des Anwendungsbeispiels bleibt jedoch festzuhalten das die Berücksichtigung der Kosten lediglich anhand der Materialkosten eines jeden Bauteils berücksichtigt wurden. Eine frühzeitige Abschätzung möglicher Herstellkosten anhand zusätzlicher Information wie Stückzahl, Abschreibungszeitraum usw., wie in vielen Unternehmen durch entsprechende Kostenplaner bereits umgesetzt, könnte zu einer noch höheren Aussagekräftigkeit führen. Ändert aber nichts am grundsätzlichen Vorgehen dieser Methode.

Erweiterungen dieser Vorgehensweise für komplexere bzw. beliebige Querschnitte in Abhängigkeit der Wandstärke t sowie eine damit verbundene Kopplung an das CAD-System sind möglich und für zukünftige Vorhaben angedacht.

Literatur

- [1] Ashby, M., "Materials Selection in Mechanical Design", Butterworth-Heinemann Oxford, 2005
- [2] Friedrich, H., "Leichtbau in der Fahrzeugtechnik", Springer Vieweg Wiesbaden, 2013
- [3] Pasini, D., "Shape transformers for material and shape selection of lightweight beams", *Materials and Design* 28, Elsevier Ltd., 2006, 2071–2079
- [4] Reuter, M., "Methodik der Werkstoffauswahl - Der systematische Weg zum richtigen Material", Carl Hanser Verlag München, 2007
- [5] Wanner, A., "Minimum-weight materials selection for limited available space", *Materials and Design* 31, Elsevier Ltd., 2010, 2834–2839

Komponentenübergreifende leichtbau- und werkstofforientierte Produktentwicklungsmethodik infolge anforderungsoptimierter Multi-Material-Strukturen

Jerome Kaspar*, Michael Vielhaber

Universität des Saarlandes

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Campus, Geb. E2 9, 1. OG, D-66123 Saarbrücken

Email: kaspar@lkt.uni-saarland.de; Internet: <http://www.lkt.uni-saarland.de>

Inhalt: *Immer komplexere Systeme benötigen angesichts einer bestmöglichen Ausnutzung jeweiliger Kosten-Nutzen-Relationen aber auch infolge der ständig steigenden Produkthanforderungen kraftfluss- und gewichtsoptimierte sowie multifunktionale Werkstoffstrukturen, insbesondere hinsichtlich der heutzutage geforderten Optimierung der Werkstoffeigenschaften, des Leichtbaupotentials und der entsprechenden Energie- und Ressourceneffizienz.*

Vor diesem Hintergrund und in Anbetracht, dass viele neue Technologien – bspw. die Multi-Material-Bauweise – in diversen Fachdisziplinen verstärkt Einzug erhalten, erweist sich die Notwendigkeit eines komponentenübergreifenden leichtbau- und werkstofforientierten Produktentstehungsprozesses unter gesonderter Betrachtung des Verbindungsstellen-Designs als unabdingbar.

Abstract: *More and more complex systems with enormous requirements and conditions necessitate load- as well as weight-optimized and equally function-integrated multi-material structures for the today's demand on the cost-benefit ratio of optimized material properties, innovative potentials in lightweight constructions as well as the corresponding energy and resource efficiency.*

Considering this matter as well as the continuously increased application of new technologies – for instance multi-material systems – and thus the also more challenging design freedom, a systematic methodology is indispensable, particularly in view of a cross-component lightweight and material-oriented design (LMOD) with special emphasis on the joint section design.

Stichwörter: *Leichtbau, Werkstoffauswahl, Komponentenübergreifende Methodik, Produktentstehungsprozess (PEP), Multi-Material-Design*

Keywords: *Lightweight Design, Material Selection, Cross-Component Methodology, Product Development Process, Multi-Material Design*

1 Einleitung

Leichtbau als Konstruktionsphilosophie, zusammengesetzt aus konstruktiven und werkstoffspezifischen Maßnahmen, wird heute oftmals noch immer eher als Optimierungsaufgabe anstelle eines wirklichen Entwicklungsziels angesehen. Trotz der teils vielseitigen, wissenschaftlichen Bemühungen zur individuellen Bereitstellung einer Entwicklungsmethodik hinsichtlich (konstruktiven) Leichtbaumaßnahmen oder einer anforderungsgerechten Werkstoffauswahl sowie deren Versuch zur Integration in den Produktentstehungsprozess, liegt bis dato noch immer „keine“ einheitlich durchgängige Kombination einer leichtbau- und werkstofforientierten Entwicklungsmethodik vor.

Zudem findet der wesentliche Leichtbau-Aspekt der funktionalen Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen, direkt benachbarten Systemkomponenten – und damit insbesondere dem Verbindungsstellen-Design – bislang nur unzureichend Beachtung.

Doch genau diese beiden Defizite innerhalb heutiger Entwicklungsprozesse komplexer Produktsysteme eröffnen gerade – auch angesichts einer angestrebten Multi-Material-Bauweise – erweiterte Leichtbaupotenziale, weshalb sich dieser Thematik nun nachfolgend angenommen wird.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Neben den – zum Teil bereits in weit zurückliegender Vergangenheit (1960er Jahre) – vielfältig wissenschaftlichen Bestrebungen einer konkreten Definition und Abgrenzung der Terminologie des „(konstruktiven) Leichtbaus“ [1, 2, 3], existieren bis zum heutigen Zeitpunkt in den jeweiligen Domänen (Leichtbau sowie systematische Werkstoffauswahl) zahlreiche individuelle Methoden bis hin zu ganzheitlichen Entwicklungsprozessen. Dem Anspruch einer integrierten Betrachtung von Produktdesign, Werkstoffauswahl und Produktionsprozess („Magisches Dreieck“ zukünftiger Leichtbaukonstruktionen [4]) zur komponentenübergreifenden systematischen Produktentwicklung komplexer Leichtbausysteme kommen aktuelle Produktentstehungsprozesse jedoch nicht bzw. nur unzureichend nach.

So orientiert sich beispielsweise Klein [5] am traditionellen, auf dem Problemlösungszyklus [6] basierten Produktentstehungsprozess „zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ nach VDI 2221 [7] und ordnet diesem entlang der einzelnen Konstruktionsphasen (Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten) ausschließlich

spezielle Aspekte bzw. Denkanstöße eines leichtbaugerechten Konstruierens zu. Einen ähnlichen, allerdings etwas detaillierteren Ansatz beschreibt ebenfalls Krause [8] und bezieht sich dabei insbesondere auf die Einführung computergestützter Instrumente zur Strukturoptimierung anhand jeweiliger Spannungszustände.

Verglichen mit beiden Vorgängern beschreiben Ellenrieder et al. [9] demgegenüber eine dreiphasige systematische Vorgehensweise (für Leichtaufbaukonzepte) unter differenzierter Betrachtung von System und Komponente. Beginnend mit der Untersuchung des Gesamtsystems hinsichtlich diverser Leichtbaustrategien (Konzept-, Bedingungs- sowie Fertigungs- und Formleichtbau) folgt nach der Festlegung erforderlicher sowie gewünschter Funktionen und der Wahl entsprechender Bauweisen die Optimierung auf Bauteilebene bis das vorher festgelegte Gewichtsziel erreicht ist. Zwar erfolgt hierbei sowohl eine Aufteilung in System und Einzelkomponenten als auch eine schrittweise und aufeinanderfolgende Einbeziehung aller Dreiecksaspekte (Design, Werkstoff und Produktion), eine echte Integration unter paralleler (zeitgleicher) Einflussnahme der jeweiligen Domänen – insbesondere maßgeblicher Konstruktions- und Produktionsauswirkungen auf bzw. durch eine (veränderte) Werkstoffauswahl [10] – bleibt jedoch weitestgehend unerfüllt.

Allerdings existieren diverse wissenschaftliche Bemühungen gerade auch hinsichtlich einer systematischen Werkstoffauswahl [11, 12], bei der Illgner [13] nicht nur einen konkreten Ablaufplan mit wichtigen Arbeitsschritten zur Erstellung eines Materialanforderungsprofils beschreibt, sondern außerdem eine besondere Berücksichtigung verschiedener Einflüsse, wie u.a. Formgebung und Herstellung, vornimmt. Als international anerkanntes Standardwerk in diesem Zusammenhang gilt heutzutage das Lehrbuch „Materials Selection in Mechanical Design“ von Ashby [14]. Zwar gibt dieser auch eine grundlegende Methodik zur geeigneten Werkstoffauswahl vor, d.h. das Zusammentragen werkstoffrelevanter Anforderungen, ein anschließendes Screening und Ranking bis zur letztendlichen Werkstoffauswahl, doch steht dort vorrangig eine detailliertere Vorgehensweise zur grundsätzlichen Vorauswahl der Werkstoffgruppe anhand sogenannter Eigenschafts-Schaubilder im Mittelpunkt. Mit Hilfe der entsprechenden computergestützten Werkstoffdatenbank (CES / Granta Design) lassen sich zudem detailliertere Werkstoffe innerhalb der zuvor in Frage kommenden Werkstoffgruppe und deren eingetragenen Materialanforderungsprofil bestimmen. Aufbauend auf diesen Ansätzen beschreibt Reuter [15] eine – in Anführungszeichen –

standardisierte Methodik eines systematischen Werkstoffauswahlprozesses, klassifiziert in vier Phasen unter Zuhilfenahme individueller Werkzeuge und Prozessdokumente.

Wenngleich Illgner [13] hierbei bereits eine direkte Kopplung von Design, Werkstoff und Produktion vorsieht, bleibt weiterhin insgesamt nicht nur eine konkrete Integration der Domänen unberührt, sondern auch der ebenfalls angesprochene komponentenübergreifende Aspekt in puncto Verbindungsstellen-Design. D.h., die konstruktive Gestaltung und technologische Prozessausswahl gewisser Anbindungsstellen bleiben, mit ansatzweiser Ausnahme von Esawi et al. [16], völlig unbeachtet. Infolgedessen und in Anbetracht dieses derzeit noch ungenutzten Leichtbaupotenzials erfolgt nachstehend eine ganzheitlich integrierte Betrachtung einer komponentenübergreifenden leichtbau- und werkstofforientierten Produktentwicklungsmethodik (LMOD) unter gesonderter Herausstellung des Verbindungsstellen-Designs.

3 Komponentenübergreifende leichtbau- und werkstofforientierte Produktentwicklungsmethodik

Allgemein bekannte Produktentstehungsprozesse zur Konstruktion diverser Leichtbausysteme unterstützen neben der gewöhnlichen Ausführung unterschiedlicher Leichtbaumaßnahmen (Strategien, Bauweisen und Prinzipien) nur eingeschränkt eine systematische Werkstoffauswahl, hier in Bezug auf Leichtbauwerkstoffe. Dementsprechend werden Multi-Material-Konzepte erforderlich, welche sich dem richtigen Leichtbau (Leichtmaßnahmen) an der richtigen Stelle unter Berücksichtigung optimaler Kosten, optimaler Nachhaltigkeit (Lebensdauer, Ökologie) sowie optimaler Qualität (robustes Produkt und Produktion) annehmen.

Angesichts des derzeit technologischen und konstruktiven Fortschritts im Bereich der Werkstoffwissenschaften, insbesondere hinsichtlich Hybrid- und/oder Multi-Material-Bauweisen, vereinen und erweitern die Autoren derzeit bestehende Leichtbau-Definitionen, u.a. seitens Henning et al. [17], in Bezug auf eine ganzheitlich ideale Lösung unter Kombination verschiedener (z.B. funktionaler) Aspekte zusätzlich zum ursprünglichen Fokus der Gewichtsreduktion. So kann „Leichtbau als ganzheitlich systematische Konstruktionsphilosophie, welche unter ständiger Gewährleistung der Zuverlässigkeit nicht nur auf eine lastpfadoptimierte Gewichtsreduktion bzw. -einsparung abzielt, sondern zudem weitere anwendungsspezifische sowie ökonomische und ökologische Nutzungsvorteile, Funktionsverbesserungen und -erweiterungen, wie z.B.

multifunktionale Werkstoffstrukturen und infolgedessen neue Designmöglichkeiten, hervorbringen kann“ [4] definiert werden.

All dies erfordert eine Entwicklungsmethodik (siehe Bild 1), welche neben der konventionellen Werkstoffauswahl basierend auf dem entwickelten Produktkonzept außerdem eine signifikant stärkere Integration der entsprechenden Produktionsprozesse – unter Hervorhebung komponentenübergreifender Aspekte und somit dem Verbindungsstellen-Design als Schlüsselfaktor – einbezieht.

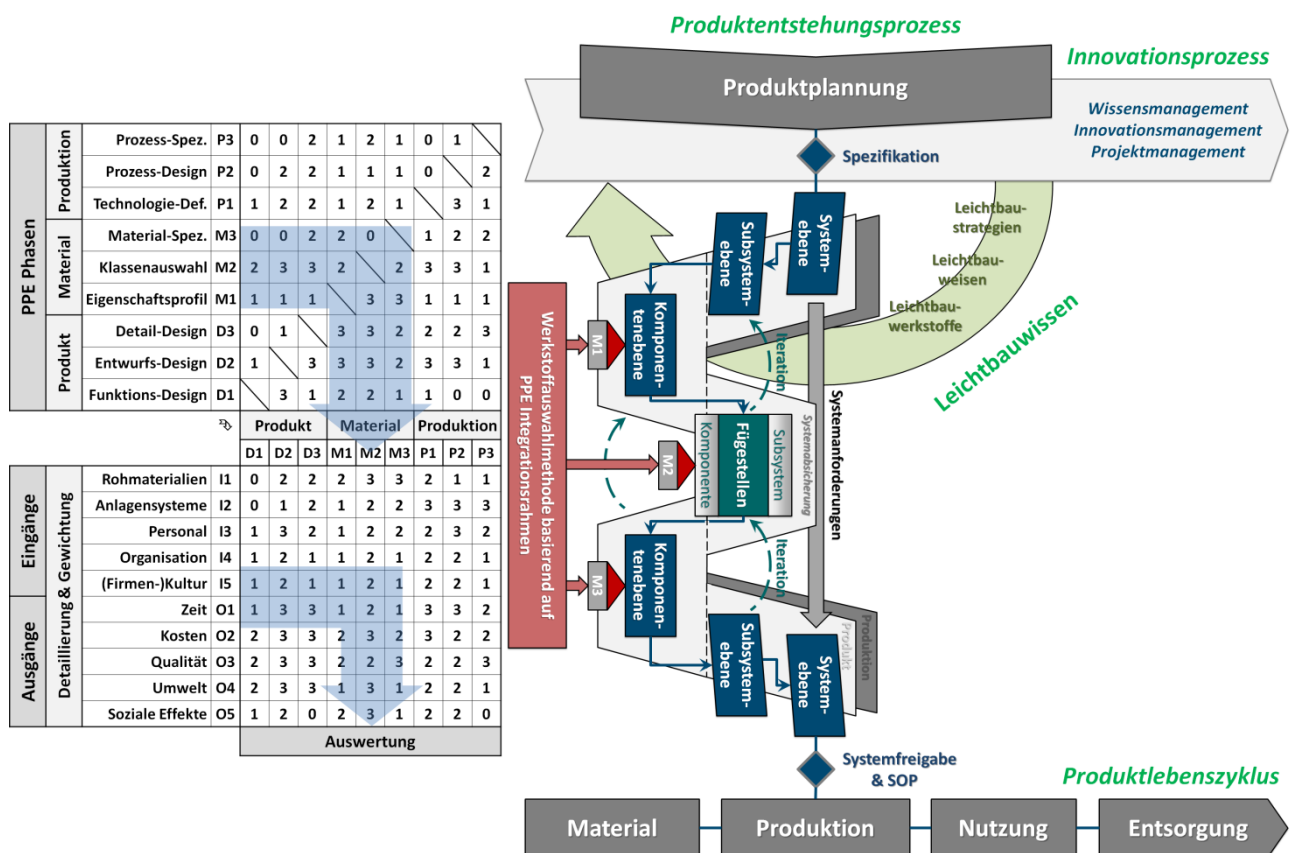


Bild 1: Produkt- und Produktions-Engineering (PPE) integriert in LMOD-Methodik [18, 19]

Hierbei folgt die Methodik neben dem traditionellen Designprozess nach VDI 2221 ebenfalls einer ganzheitlichen Sichtweise angelehnt an VDI 2206, d.h. dem schrittweise Durchlaufen einer (System-)Analyse-, Detaillierungs- und Integrations-Phase ausgehend von der System- bis hin zur Komponentenebene. Bild 2 stellt auf Basis des in [4] in erster Linie für den Produktprozess entwickelten Detailmodells ein grundlegendes Ablaufdiagramm dar.

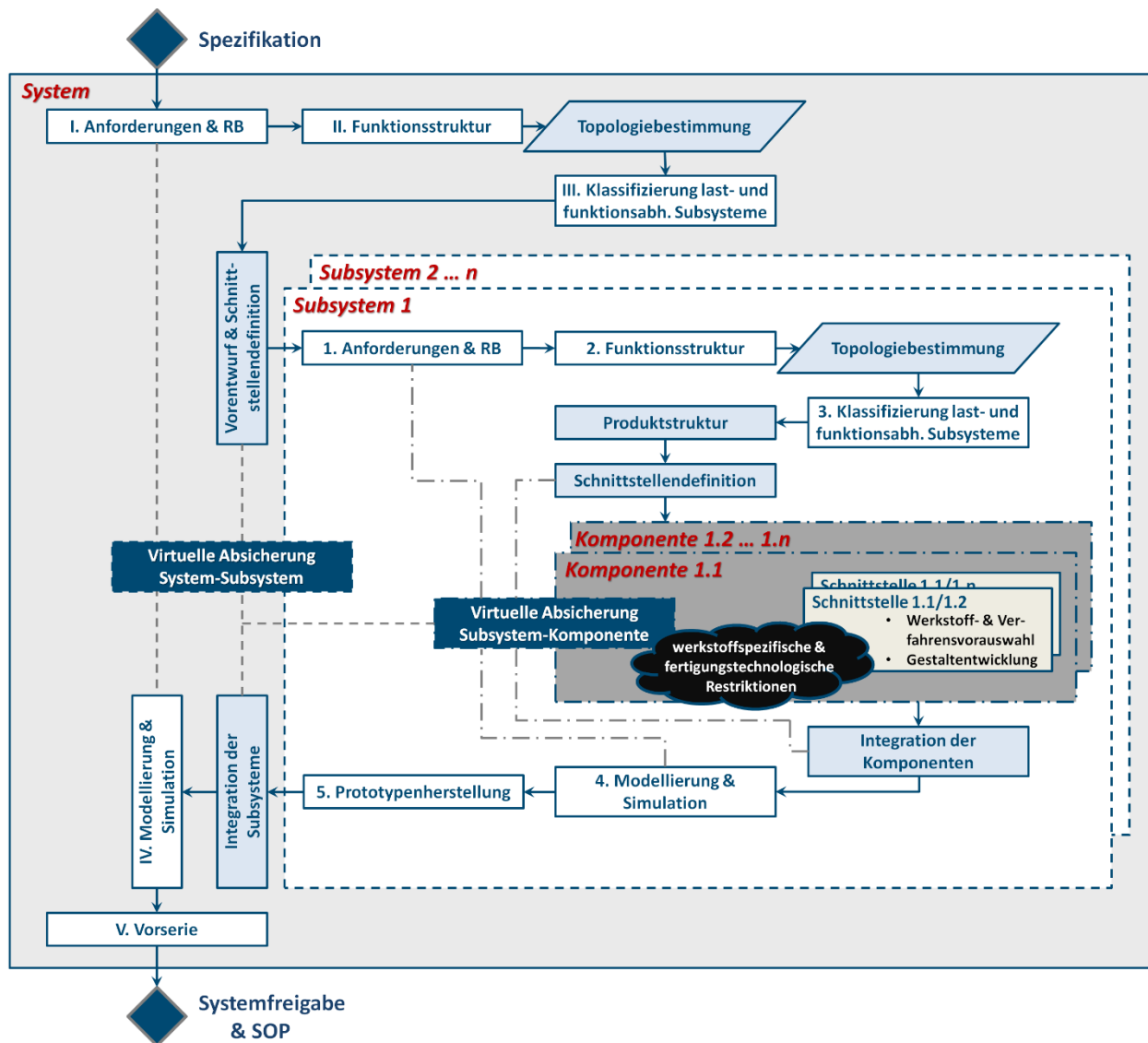


Bild 2: Grundlegendes Ablaufdiagramm des Produktdesign-Prozesses innerhalb der LMOD-Methodik

Zur weiteren und zugleich detaillierteren Herausstellung komponentenübergreifender Aspekte werden nähere Einblicke in Bezug auf das Verbindungsstellen-Design und damit gekoppelt auf Komponentenebene notwendig. Demzufolge wird bereits eine frühzeitige Berücksichtigung werkstoffspezifischer als auch fertigungstechnologischer Restriktionen mit den zu erfüllenden Funktionen, der Komponenten- bzw. Systemgestalt sowie der entsprechend notwendigen Fügetechnik angestrebt. Eine erste Möglichkeit zur Abstimmung und Anpassung dieser gegenseitigen Einflüsse zeigt Bild 3.

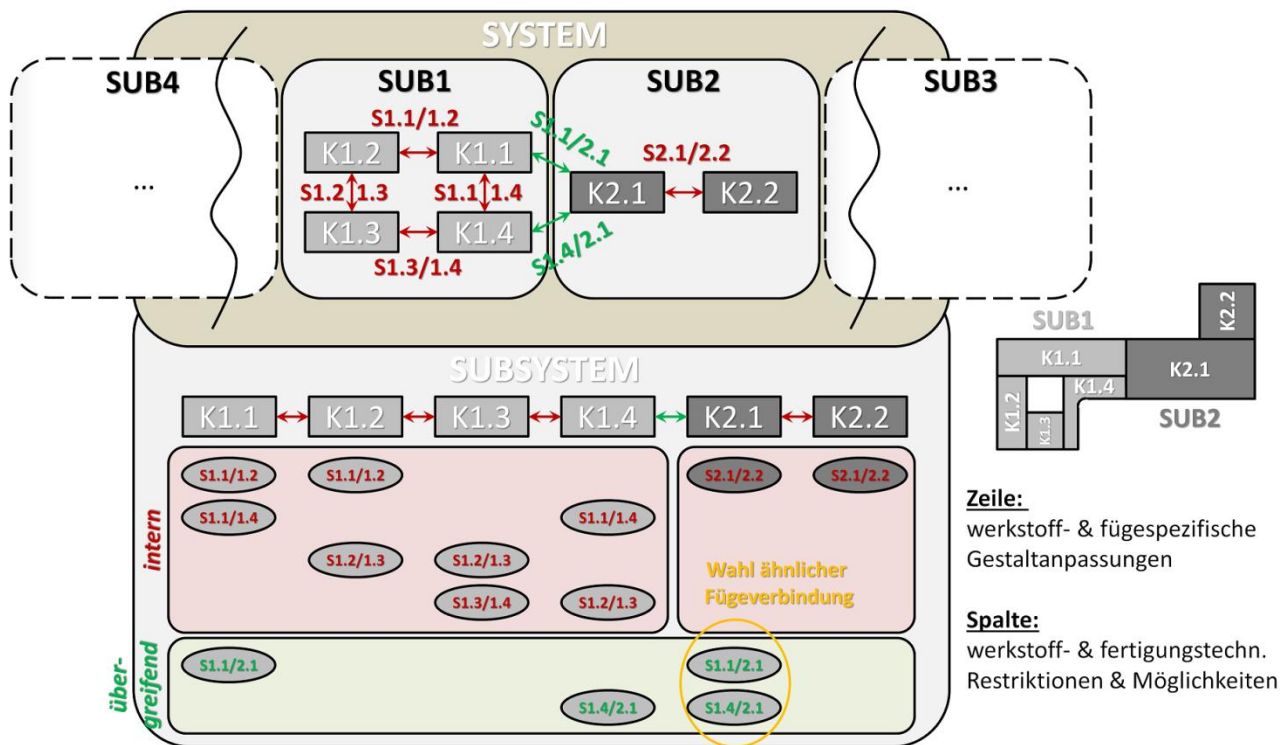


Bild 3: Werkstoffspezifische und fertigungstechnologische Einflüsse der Komponenten- bzw. Systemgestalt

4 Fazit und Ausblick

Im Vergleich zu derzeit existierenden Produktentstehungsprozessen zielt der hier beschriebene Ansatz neben einer integrierten Betrachtung von Produktdesign, Werkstoffauswahl sowie Produktionsprozess insbesondere auf eine Herausstellung des Verbindungsstellen-Designs und damit auf eine tiefere Durchdringung möglicher Leichtbaupotenziale ab. Zudem werden werkstoffspezifische sowie fertigungstechnologische Einflüsse des Verbindungsstellen-Designs auf die Komponenten- bzw. Systemgestalt grundlegend analysiert und exemplarisch herausgestellt.

In einem nächsten Schritt wird nun die detailliertere Ausführung des Ablaufdiagrammes auf Komponenten- sowie Schnittstellenebene – d.h. dem Herzstück der LMOD-Methodik – angestrebt. Dies soll den Konstrukteur systematisch bei allen Schritten von der Struktursimulation bis hin zur Konstruktion und Prozesssimulation unterstützen und ihm schrittweise eine Vorgehensweise zur Erzielung optimierter Leichtbausysteme liefern.

Eine Erweiterung der obigen Entwicklungsmethodik hinsichtlich aktueller Trendthemen, wie beispielweise Nachhaltigkeit [20] oder Industrie 4.0, sowie deren Beeinflussungen bzw. Auswirkungen auf Leichtbaulösungen werden zukünftig außerdem verfolgt.

Literatur

- [1] Schapitz, E.: *Festigkeitslehre für den Leichtbau*. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1963.
- [2] Hertel, H.: *Leichtbau: Bauelemente, Bemessungen und Konstruktionen von Flugzeugen und anderen Leichtbauwerken*. Reprint 1. Aufl. 1960. Berlin: Springer-Verlag, 1980.
- [3] Degischer, H.P.; Lüftl, S.: *Leichtbau: Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren*. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [4] Kaspar, J.; Vielhaber, M.: *Cross-Component Systematic Approach for Lightweight and Material-Oriented Design*. NordDesign 2016. Trondheim: 10.-12.08.2016.
- [5] Klein, Bernd: *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [6] Haberfellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, A.; von Massow, H.: *Systems Engineering: Methodik und Praxis*. 11. Aufl. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 2002.
- [7] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- [8] Krause, D.: *Leichtbau*. In F. Rieg et al.: *Handbuch Konstruktion*. München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [9] Ellenrieder, G.; Gänsicker, T.; Goede, M.; Herrmann, H.G.: *Die Leichtbaustrategien*. In H.E. Friedrich: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [10] Manzini, E.: *The Material of Invention*. Milan: Arcadia Edizioni, 1986.
- [11] Grosch, J.: *Werkstoffauswahl im Maschinenbau*. Sindelfingen: Expert Verlag, 1986.
- [12] Ehrlenspiel, K., & Kiewert, A.: *Die Werkstoffauswahl als Problem der Produktentwicklung im Maschinenbau*. In: VDI-Berichte 797. München: VDI-Verlag, 1990. S. 47-67.
- [13] Illgner, K.H.: *Werkstoffauswahl für den Konstrukteur*. In: VDI-Z 121 Nr. 10 (II), 1979. S. 1027-1030.
- [14] Ashby, M.F.: *Materials Selection in Mechanical Design*. 4. Aufl. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010.
- [15] Reuter, M.: *Methodik der Werkstoffauswahl – Der systematische Weg zum richtigen Material*. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [16] Esawi, A.M.K.; Ashby, M.F.: *Computer-based selection of joining processes: Methods, software and case studies*. *Materials and Design* 25. S. 555-564.
- [17] Henning, F.; Moeller, E.: *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [18] Stoffels, P.; Baehre, D.; Frey, G.; Vielhaber, M.: *Energy Efficiency Engineering – Towards an Integrated Method Framework for Energy-oriented Product and Production Development*. Cham (ZG): Springer International Publishing, 2015. S. 525-531.
- [19] Kaspar, J.; Baehre, D.; Vielhaber, M.: *Material Selection Based on a Product and Production Engineering Integration Framework*. 26th CIRP Design Conference. Stockholm: 15.-17.06.2016.
- [20] Kaspar, J.; Vielhaber, M.: *Sustainable Lightweight Design – Relevance and Impact on the Product Development & Lifecycle Process*. 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM). Stellenbosch: 03.-05.10.2016.

Vorgehen zur Optimierung der Entwicklungstätigkeiten im Prüffeldbetrieb

Marc Claus Schmitt*, Karl-Heinrich Grote

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg
Email: karl.grote@ovgu.de; Internet: <http://lkt.mb.uni-magdeburg.de>

* BMW Group
Knorrstr. 147, D-80788 München
Email: Marc-Claus.Schmitt@bmw.de; Internet: <http://www.bmwgroup.com/de>

Inhalt: Ein verstärkter Wettbewerb zwingt Automobilhersteller zu kürzeren, effizienteren Entwicklungszyklen mit hoher Qualität. Prüfstände ermöglichen die reproduzierbare, frühzeitige Absicherung kritischer Aufgaben. Hohe Investitions- und Personalkosten schränken eine Vergrößerung der Anzahl an Prüfständen jedoch ein. Daher ist eine Methodik erforderlich, um Potentiale zu erkennen und Prozesse zu verbessern. Ziel ist die Steigerung der Effektivität und Effizienz des Prüffeldbetriebs. Um hierfür eine Methodik zu entwickeln, werden die ablaufenden Prozesse der Produktentwicklung und des Prüffeldbetriebs betrachtet. Anschließend wird die Produktion und deren Methoden zur Prozessoptimierung als mögliches Vorbild betrachtet. Eine Übertragbarkeitsprüfung stellt sicher, dass Ansätze aus dem Produktionsbereich im Prüffeldbetrieb genutzt werden können. Anhand des Vorgehens der Variantenbewertung mittels Werteprofilen wird erläutert, wie die passende Methode der Prozessoptimierung ausgewählt und umgesetzt werden kann.

Abstract: Increased competition has forced automakers to shorter, more efficient development cycles with increased quality. Test beds enable a repeatable, early validation of critical parameters. However, high investment and personnel costs restrict an increase in the number of test beds. Therefore, methods are needed to identify potentialities and to improve processes to increase the effectiveness and efficiency of test fields. With the objective to develop a methodology for this purpose, the processes in product development and test bed operations are analysed. Subsequently, the methods of the production for process optimization are regarded as a possible paragon. The following check of applicability makes sure that it is possible to transfer the methods from the production area to the test field. Using the methodology of value profiles to compare different variants of process optimization, it is shown in which way appropriate methods can be selected.

Stichwörter: Prüffeld, Prüfstand, Produktion, Prozessoptimierung, Kennzahl, Systemtheorie, Übertragbarkeit

Keywords: *test field; test bed, production, process optimization; key performance indicator; systems theory, transferability*

1 Problemstellung

Wettbewerbsdruck und umkämpfte Märkte zwingen Automobilhersteller zur Entwicklung von mehr Derivaten in kürzeren, effizienteren Entwicklungszyklen bei gleichbleibend hoher Qualität. Prüfstände ermöglichen es dabei, kritische Umfänge eines Fahrzeugs in frühen Phasen reproduzierbar abzusichern. Hohe Investitions- und Personalkosten schränken eine Erhöhung der Anzahl an Prüfständen jedoch ein [1]. Aus diesem Grund ist es notwendig, Prüffelder möglichst optimal zu nutzen. Häufig wird die Leistungsfähigkeit eines Prüffeldes an der Auslastung gemessen, jedoch nicht daran, in welcher Qualität eine Entwicklungsaufgabe am Prüfstand realisiert wurde. Dadurch findet keine umfassende Erfassung und Optimierung des Wertschöpfungsbeitrags der Prüfstände statt. Folglich müssen neben der ausschließlichen zeitlichen Auslastung weitere qualitative Faktoren betrachtet werden, um die Nutzung der Prüfstände global zu optimieren. Gleichzeitig sind Methoden notwendig, um Potentiale zu erkennen und die ablaufenden Prozesse zu verbessern, um die Effektivität und Effizienz zu steigern. Zur näheren Betrachtung der Rahmenbedingungen werden im Folgenden die Produktentwicklung und der Prüffeldbetrieb erläutert.

2 Produktentwicklung und Prüffeldbetrieb

Die Entwicklung eines Produkts wird durch eine Vielzahl einzelner Schritte realisiert. Hierfür müssen Inhalte genau definiert und Schnittstellen festgelegt werden. Die resultierende Arbeitsfolge wird als Prozess bezeichnet. Um dieses Vorgehen zu strukturieren, sind zahlreiche Vorgehensmodelle entstanden. Eines der zentralen Konzepte und gleichzeitig Basis für die Definition im Rahmen der VDI 2221 ist der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nach Pahl und Beitz. Die Hauptarbeitsschritte dieser Prozessbeschreibung sind Planen und Klären der Aufgabe, Konzipieren, Entwerfen, sowie Ausarbeiten. Basierend auf einer vorgegebenen Aufgabenstellung wird eine Lösung generiert. Dieser Prozessablauf lässt sich auf einen klassischen Problemlösungsprozess zurückführen, dargestellt in Bild 1. Dieser unterteilt sich in die Klärung der Aufgabe, der Suche nach Lösungen und der Auswahl der passenden Lösung. [2, 3]

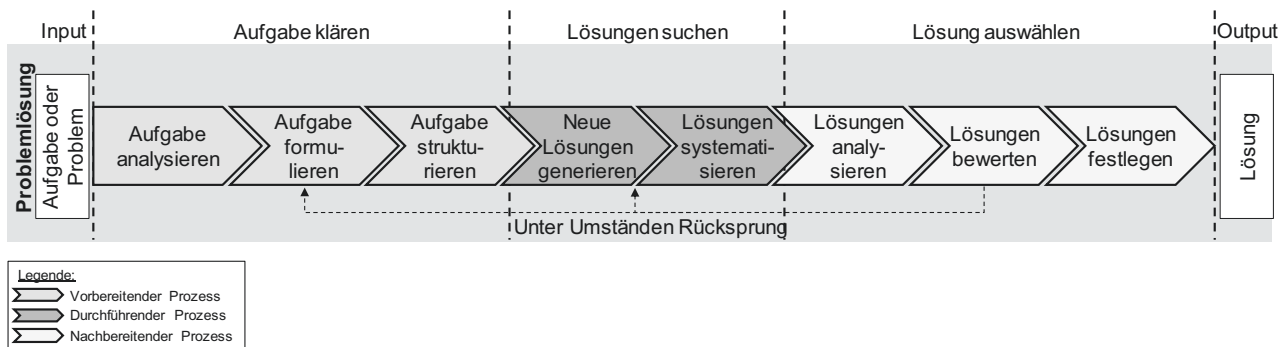


Bild 1: Prozessmodell für einen Problemlösungsprozess – anwendbar auf die Entwicklung

Ein Prüfstand ist eine technische Vorrichtung, die der Prüfung, Funktionsentwicklung und Homologation von Maschinen dient. Neben der Prüfstandshardware existiert eine Steuerung (Automatisierung) und Messtechnik, um den Prüfling (z.B. einen Motor) in einen gewünschten Zustand zu versetzen und Reaktionen aufzuzeichnen. Im Prüfstandsbetrieb wird die Entwicklungsaufgabe nach der Analyse in einzelne Testfälle heruntergebrochen. Daraus entsteht ein Versuchsplan, der festlegt, welche Umfänge wann bearbeitet werden. Anschließend wird der Prüfling auf dem Prüfstand aufgebaut. Die Versuchsdurchführung erfolgt manuell oder automatisiert. Nach Abschluss des Versuchs folgt die Datenanalyse, -auswertung und -auswahl.

Supportprozesse unterstützen, beispielsweise durch Bereitstellung der benötigten Teile, diesen Hauptprozess. Bild 2 zeigt die erläuterten Prozessschritte. Es lässt sich konstatieren, dass auch der Prozessablauf des Prüffeldbetriebs auf einen Problemlösungsprozess zurückgeführt werden kann. [4]

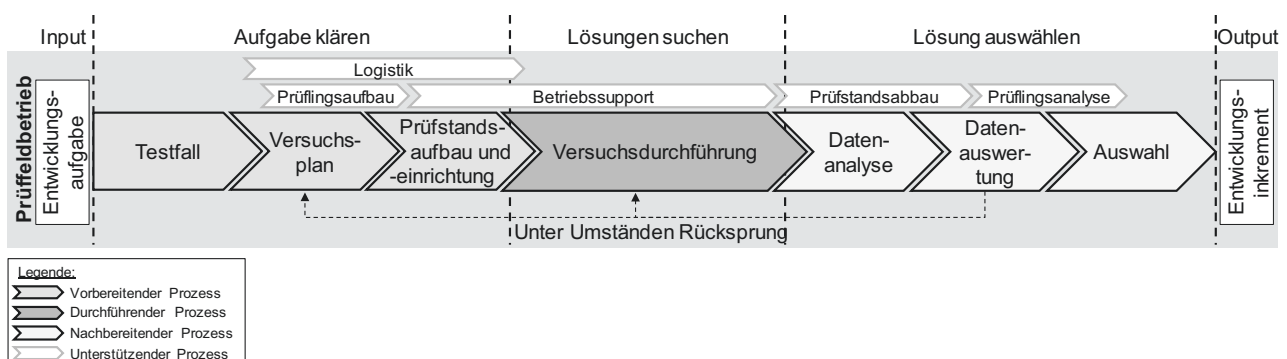


Bild 2: Prozessmodell für den Prüffeldbetrieb

Im Hinblick auf eine Optimierung dieses Ablaufs hat eine strukturierte Literaturrecherche ergeben, dass bestehende Vorgehensweisen zur Prozessoptimierung und zur Messung der Leistungsfähigkeit von Prüffeldern nur in geringem Umfang bestehen. Die

Anforderungen an eine umfassende Messung der Leistungsfähigkeit und strukturierte Prozessoptimierung werden nicht hinreichend erfüllt. Aus diesem Grund ist ein neues methodisches Konzept erforderlich, welches ein strukturiertes Vorgehen zur Prozessoptimierung enthält und die Leistungsfähigkeit eines Prüffeldes qualitativ misst. Als Reaktion auf hohe Anforderungen an Wettbewerbsfähigkeit und Kostensenkung verfügt der Bereich der Produktion über weit entwickelte Methoden zur Prozessverbesserungen, sowie umfassende Kennzahlen zur Messung der Entwicklungsqualität. Aus diesem Grund soll überprüft werden, ob ausgewählte Ansätze der Produktion auf den Prüffeldbetrieb übertragen werden können und welche Vorteile dies generieren kann. [1]

3 Optimierungsmethoden der Produktion

Die Produktion beinhaltet alle Aktivitäten zur Erzeugung von Sachgütern durch Kombination von Produktionsfaktoren. Alle zur Erzeugung verwendeten Güter und Dienste sind Produktionsfaktoren. Das Produktprogramm soll die vorhandenen Kapazitäten optimal auslasten. Die Termin- und Kapazitätsplanung legt hierfür die Abfolge der Fertigungsaufträge fest. Ist dies entschieden, wird die Maschine durch Rüsten für die Produktion vorbereitet. Anschließend folgt die Auftragsveranlassung und -überwachung. Ziel ist die Realisierung der von der Produktionsplanung vorgegebenen Aufgaben innerhalb eines bestimmten zeitlichen Rahmens.

Die Resultate der nachfolgenden Qualitätsprüfung finden direkt Eingang in die Qualitätslenkung. Werden die vorab definierten Ansprüche erfüllt, kann das gefertigte Produkt ausgeliefert werden. Das Ergebnis des gesamten beschriebenen Prozessablaufs ist das fertige Produkt. Sollte festgestellt werden, dass ein Produkt außerhalb der festgelegten Toleranzen liegt, so muss der operative Fertigungsprozess erneut durchlaufen oder nachgearbeitet werden. Auch in diesem Ablauf finden Supportprozesse wie die Personalorganisation, Materialbereitstellung, Anlagenwirtschaft, das Produktionscontrolling und die Qualitätsplanung statt. Bild 3 fasst den Produktionsprozess aus operativer Sicht inklusive Supportprozesse zusammen. Erneut zeigt sich die Analogie zum Problemlösungsprozess. [5]

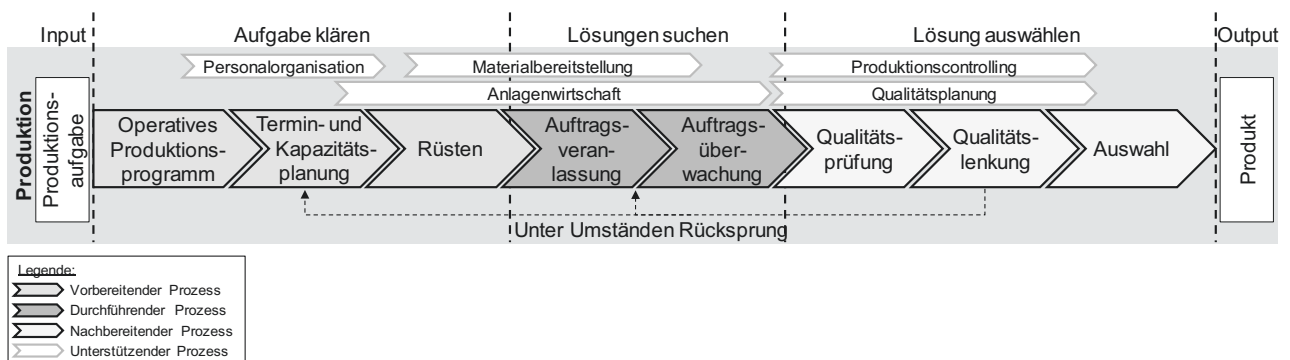


Bild 3: Prozessmodell für die Produktion

Die Aufgabe der Produktion ist die termingerechte Bereitstellung einer beauftragten Leistung in bestmöglicher Qualität. Eine ähnliche Themenstellung hat der Prüffeldbetrieb, in der die Entwicklungsabteilung ihr Ergebnis in einem zeitlich befristeten Rahmen und einer festgelegten Qualität erreichen muss. Gleichzeitig konnte eine Analogie in den Prozessabläufen beider Disziplinen festgestellt werden. Aus diesem Grund wird auf die Optimierungsmethoden der Produktion zur Übertragung in den Prüffeldbetrieb näher eingegangen. Bild 4 zeigt das Ergebnis einer Untersuchung aktueller Literatur mit den Ansätzen, die der jeweilige Autor behandelt. [6 bis 12]

Methoden zur Prozessoptimierung	Schmelzer Becker (2008)	Chiarini (2013)	Harmon Sesselmann (2013)	Andt (2014)	Koch (2015)	Binner (2015)	Anzahl Nennungen
Balanced Scorecard	-	-	-	-	-	-	1
Business Process Management	-	-	-	●	-	-	2
Kaizen	●	●	●	●	●	●	7
Lean Production	●	●	●	●	-	-	5
Process Reengineering	●	-	●	●	●	-	5
Six Sigma	-	●	●	●	-	●	5
Supply Chain Management	●	-	-	-	-	-	1
Theory of constraints	●	-	-	-	-	-	1
Total Cycle Time	-	-	-	●	-	●	2
Total Quality Management	-	-	-	-	-	●	2
Wertstromdesign	●	●	●	●	-	●	5

Legende:
 - Nicht betrachtet
 ● Betrachtet

Bild 4: Optimierungsmethoden in der Produktion

Auf Basis der Häufigkeit werden die Methoden Kaizen, Lean Production, Process Reengineering, Six Sigma und Wertstromdesign für eine potentielle Übertragung

ausgewählt. Process Reengineering ist eine Methode für substantielle Prozessänderungen in kritischen Unternehmenslagen. Six Sigma gilt als etablierte Methode mit Fokus auf eine hohe Prozessqualität und hohe Kundenzufriedenheit. Die Methoden der Lean Production, Kaizen und Wertstromdesign sind wichtige Teile des Toyota Produktionssystems, die insbesondere in der Automobilindustrie häufig Anwendung finden. Auch die Messung der Leistungsfähigkeit anhand von Kennzahlen – die den gesamten Prozess umfassen und qualitative Aspekte betrachten – ist im Produktionsbereich üblich, wird jedoch in dieser Veröffentlichung nicht näher betrachtet. [6, 8, 11, 13, 14]

4 Übertragbarkeitsprüfung

Zur Prüfung, ob es möglich ist, die Optimierungsmethoden und Kennzahlen der Produktion auf den Prüffeldbetrieb anzuwenden, dient der Ansatz der Systemtheorie. Diese Theorie betrachtet die Struktur, Verknüpfungen und das Verhalten von Systemen um formale Ähnlichkeiten zu identifizieren. Hierbei wird der funktionale, strukturelle und hierarchische Aufbau der Produktion und des Prüffeldbetriebs verglichen, dargestellt in Bild 5. [15]

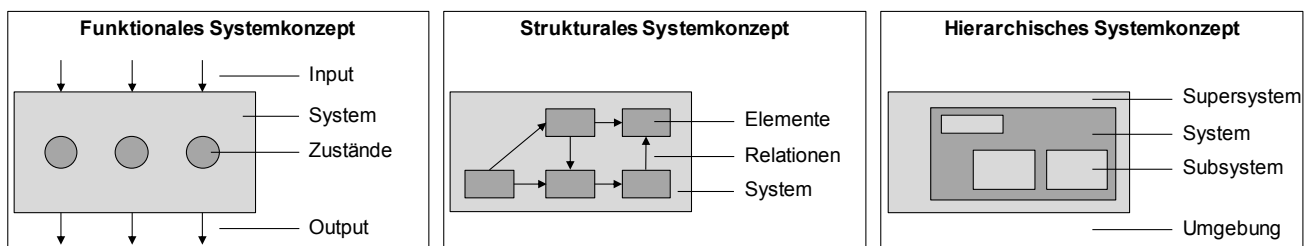


Bild 5: Systemkonzepte der Systemtheorie

In der funktionalen Systemsicht zeigt sich, dass der Input als Ergebnis einer strategischen Entscheidung sowohl in der Produktion als auch im Prüfbetrieb relativ ähnlich ist. Der Output hingegen unterscheidet sich als physisches Ergebnis in der Produktion im Gegensatz zu Daten, die eine Entwicklungsleistung beschreiben. Die Tatsache, dass die Vorgehensweise um das Ziel zu erreichen in der Entwicklung nicht von vornherein feststeht und der Lösungsweg somit flexibler ist, bleibt zu berücksichtigen. Demnach lässt sich feststellen, dass eine überwiegende Analogie in der funktionalen Systemsicht besteht. Die strukturelle Systemsicht zeigt, dass – wie bereits erläutert – beide Abläufe auf einen Problemlösungsprozess zurückzuführen sind. Sowohl in der Klärung der Aufgabe als auch in der Auswahl der Lösung sind die Strukturen vergleichbar. In der Lösungssuche lassen sich Analogien feststellen; lediglich der längere, komplexere und weniger definierte Ablauf

in der Lösungssuche der Produktentwicklung muss berücksichtigt werden. Insgesamt besteht aus strukturaler Sicht eine starke Analogie der beiden betrachteten Disziplinen.

Die hierarchische Systemsicht betrachtet die verschiedenen Ebenen eines Systems. Große Analogien können in der Grundstruktur zwischen Produktion und Prüffeldbetrieb erkannt werden. In beiden Fällen existiert ein Netzwerk (Supersystem) aus verschiedenen Standorten. Diese wiederum bestehen aus Segmenten, also den jeweils produzierten oder entwickelten Produktkategorien. In der Organisation der Teilsegmente – die Struktur zur Herstellung bzw. Entwicklung einzelner Produktkategorien – bestehen ebenfalls Ähnlichkeiten. Gesamt betrachtet lässt sich die Übertragbarkeitsprüfung positiv beantworten um Methoden und Kennzahlen zu übertragen.

5 Vorgehen zur Modellentwicklung

Nach dem Nachweis der Übertragbarkeit ist eine Methodik notwendig, um die Methoden der Produktion zu bewerten und ein passendes Konzept für den Prüffeldbetrieb zu erarbeiten. Ein Verfahren für eine Multikriterienanalyse ist die in der Produktentwicklung zum Variantenvergleich angewendete Nutzwertanalyse zur Erstellung eines Werteprofils. Hier dient sie zur Bewertung und Auswahl passender Optimierungsmethoden aus der Produktion, da verschiedene Faktoren differenziert gewichtet und grafisch dargestellt werden können. [16]

Im ersten Schritt werden aus den situationsrelevanten Zielen Bewertungskriterien erarbeitet, anschließend werden diese anhand der Relevanz gewichtet. Dann wird für jede Variante bezogen auf die Kriterien eine Werthöhe (Balkenlängen) geschätzt, abhängig davon inwieweit die Alternative zum Ziel beiträgt. Durch Multiplikation dieses Werts mit dem Gewichtungsfaktor (Balkenhöhen) errechnet sich der Nutzwert. Diese resultierende Fläche repräsentiert die gewichteten Teilwerte der Lösungsvariante, beispielhaft dargestellt in Bild 6. Es wird die Variante mit dem höchsten Nutzwert bzw. der größten durchschnittlichen Werthöhe ausgewählt. Auch eine Kombination mehrerer Varianten – wie z.B. Six Sigma für einzelne Verbesserungsprojekte mit Kaizen zur Etablierung einer kontinuierlichen Verbesserung – ist denkbar. [16]

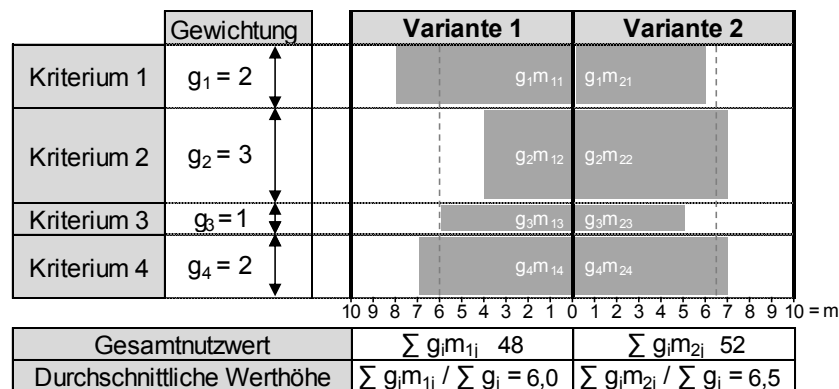


Bild 6: Beispielhaftes Werteprofil

Anschließend wird die ausgewählte Methode an die Rahmenbedingungen des Prüffeldbetriebs angepasst. Hieraus ergeben sich die Forschungsfragen, wie basierend auf der erläuterten Vorgehensweise das holistische Modell zur Prozessoptimierung, sowie ein Kennzahlensystem mit dem Fokus auf Entwicklungsqualität entwickelt werden kann. Dies soll zu einer weiteren Optimierung der Abläufe im Prüffeldbetrieb des Bereichs Entwicklung Antrieb der BMW Group beitragen. Mit dem Ziel einer permanenten Prozessverbesserung und -anpassung findet ein Pilotprojekt im verbrennungsmotorischen Prüffeld statt, welches die gewonnenen Erkenntnisse im operativen Betrieb erprobt und weiterentwickelt.

6 Fazit

Nachdem die Herausforderungen in der Entwicklung im Bereich des Prüfstandsbetriebs erläutert wurden, fand eine Herleitung der Vorgehensweisen der Produktentwicklung und des Prüffeldbetriebs statt. Es lässt sich feststellen, dass Handlungsfelder im Bereich der Optimierungsmethoden des Prüffeldbetriebs bestehen. Die Produktion wurde als Bereich identifiziert, aus dem weitentwickelte Methoden abgeleitet werden können. Die Prozessabläufe und wichtige Optimierungsmethoden der Produktion wurden beschrieben. Die darauf folgende Übertragbarkeitsprüfung konnte positiv beantwortet werden – es besteht eine ausreichende Analogie zwischen dem Prüffeldbetrieb und der Produktion. Eine Bewertung, welche Methoden sich am besten für die Nutzung im Prüffeldbetrieb eignen, kann anhand der Beurteilung durch Werteprofile erfolgen. Die Methodik wird anhand dieses Vorgehens ausgearbeitet und anschließend im Prüffeldbetrieb der BMW Group validiert.

Literatur

- [1] Osborne, Richard; Ciriello, Antonio; Graupner, Wilhelm: *Sieben Wege zur Prüffeld-Effektivität*. Automobiltechnische Zeitschrift extra 19 (2014) 1, S. 46-51
- [2] Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Der Produktentstehungsprozess (PEP)*. In: Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2013, S. 11-24 – ISBN 9783642295683
- [3] Ehrlenspiel, Klaus: *Integrierte Produktentwicklung*. 4., aktualisierte Aufl. München: Hanser, 2009. – ISBN 9783446420137
- [4] Paulweber, Michael; Lebert, Klaus: *Mess- und Prüfstandstechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. – ISBN 9783658044527
- [5] Grote, Karl-Heinrich; Engelmann, Frank; Beitz, Wolfgang; Syrbe, Max; Beyerer, Jürgen; Spur, Günter: *Das Ingenieurwissen: Entwicklung, Konstruktion und Produktion*. Berlin: Springer Vieweg, 2014. – ISBN 9783662443927
- [6] Becker, Torsten: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – ISBN 9783540775553
- [7] Chiarini, Andrea: *Lean organization*, Bd. 3. Milano: Springer, 2013. – ISBN 9788847025097
- [8] Schmelzer, Hermann; Sesselmann, Wolfgang: *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis*. 8., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2013. – ISBN 9783446434608
- [9] Harmon, Paul: *Business Process Change*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2014. – ISBN 9780128003879
- [10] Arndt, Holger: *Logistikmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. – ISBN 9783658072117
- [11] Koch, Susanne: *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen*. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2015. – ISBN 9783662444498
- [12] Binner, Hartmut F.: *Methoden-Baukasten für ganzheitliches Prozessmanagement*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2016. – ISBN 9783658084080
- [13] Alotaibi, Youseef: *Business process modelling challenges and solutions*. Journal of Intelligent Manufacturing 27 (2016) 4, S. 701-723
- [14] Peter, Kathrin; Lanza, Gisela: *Company-specific quantitative evaluation of lean production methods*. Production Engineering 5 (2011) 1, S. 81-87
- [15] Ropohl, Günter: *Allgemeine Systemtheorie*. Berlin: edition sigma, 2012. – ISBN 9783836035866
- [16] Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich; Nagarajah, Arun; Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Wartzack, Sandro: *Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses*. In: Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2013, S. 291-410 – ISBN 9783642295683

Methodische Konstruktion eines Radnabenmotors mit Radialfluss-Luftspaltwicklung für Kleinwagen

Andreas Zörnig, Ralf Hinzelmann, Roland Kasper

Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mechatronik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
Email: mtk@ovgu.de; Internet: <http://www.ims.ovgu.de>

Kurzfassung: Am Lehrstuhl für Mechatronik der OvGU wird ein Elektroantrieb mit eisenloser Luftspaltwicklung erforscht, der sich durch eine hohe Leistungsdichte und einen hohen Wirkungsgrad auszeichnet. Dieser permanenterregte elektrisch kommutierte Außenläufer stellt die Kernkomponente eines neuartigen Radnabenmotors dar, welcher mit Hilfe der Konstruktionsmethodik nach Pahl und Beitz konstruiert wurde. Zu Anfangs werden grundlegende Kenntnisse über Radnabenmotoren und über die Luftspaltwicklung vermittelt. Als Bestandteil der Hauptphasen des Konstruktionsprozesses werden Anforderungen genannt und eine Funktionsstruktur gezeigt. Es werden prinzipielle Lösungen zu Welle-Nabe-Verbindungen und Wasserkühlerbauarten aufgelistet. Wesentliche Anordnungskonzepte des Gesamtsystems werden präsentiert. Der Artikel endet mit der Erläuterung des Feinentwurfs, sowie Hinweisen zur Fertigung.

Stichwörter: Radnabenmotor, Luftspaltwicklung, Direktantrieb, Konstruktionsmethodik, Welle-Nabe-Verbindung

Abstract: At the chair of mechatronics of the Otto-von-Guericke-University Magdeburg an electric drive with ironless air gap winding is researched, that has got a high power density and a high efficiency. This permanent magnet electrically commutated external rotor motor is the core component of a new wheel hub drive, that was created by the use of the engineering design conform to Pahl and Beitz. At the beginning basic knowledge about wheel hub drives and the air gap winding is transferred. As an essential part of the main stages of the design process requirements are noticed and a functional interrelationship is shown. Principal solutions for shaft-hub connections and designs of watercoolers are listed. Relevant concepts for positioning of the whole system are presented. This article finishes with the explanation of the detailed design and furthermore hints for the manufacturing.

Keywords: wheel hub motor, air gap winding, direct drive, engineering design, shaft-hub connection

1 Einleitung

Aus der Motivation heraus, das elektrische Versuchsfahrzeug „BugEE“ des Lehrstuhls für Mechatronik mit vier leichten Radnabenmotoren auszustatten, wurde ein Direktantrieb konstruiert. Die Luftspaltwicklung stellt dabei die Basis für eine hohe Leistungsdichte und einen hohen Wirkungsgrad dar. Die Aufgabe des Konstrukteurs umfasst die ganzheitliche Erschaffung der Maschine, welche aus mechanischen, elektrischen, thermischen und hydraulischen Bestandteilen besteht. Bei der Neukonstruktion des Radnabenmotors wird die Konstruktionsmethodik nach Pahl und Beitz angewendet [1]. Ein Schwerpunkt ist die Auswahl und Kombination von Maschinenelementen.

2 Radnabenmotoren für Kraftfahrzeuge

Ein Radnabenmotor stellt die Integration eines Elektroantriebes in die Felge eines Fahrzeuges dar. Gegenüber einem zentralen Elektroantrieb ist eine verbesserte radindividuelle Kraftübertragung auf die Straße als wesentlicher Vorteil anzusehen [2]. Bei einem Radnabenmotor mit Direktantrieb ist der Elektroantrieb direkt mit der Felge verbunden. Eine angemessene Beschleunigung und Steigfähigkeit des Fahrzeugs wird durch ein hohes Drehmoment erzielt.

Durch den Wegfall von Gelenkwellen, Schalt-, Übersetzungs- und Differenzialgetrieben bei direktangetriebenen Radnabenmotoren gegenüber im fahrzeuginneren sitzenden zentralen Elektromotoren werden verlust-, massebehaftete und kostenverursachende Elemente ausgeschlossen. Als Herausforderung gilt das Erreichen einer hohen masse- und volumenbezogenen Drehmoment- und Leistungsdichte, denn das ungefederte Radmodul soll möglichst leicht sein und der Bauraum ist durch die Felge und die Radaufhängung begrenzt. Permanenterregte Elektroantriebe können diesen Forderungen gerecht werden.

Mit der durch Schmutz, Vibration und kinematischen Fahrwerksverschiebungen geprägten Lage entstehen hohe Ansprüche an den Radnabenmotor und seine Anschlussleitungen. Seit wenigen Jahren setzen sich vermehrt viele Forschungsinstitute [3], Universitäten [4] und Unternehmen [5, 6, 7, 8] mit Radnabenantrieben auseinander. Ihre überwiegende Gemeinsamkeit besteht in der Nutzung einer permanenterregten Synchronmaschine, einer zusätzlichen mechanischen Reibungsbremse, und einer Flüssigkeitskühlung. Eine Konzeptstudie über prinzipielle Lösungselemente sowie Anordnungsmöglichkeiten und

einen Entwurf eines Innenläufer-Radnabenmotors mit Kegelrollenlagern liefert Höfner [9]. Die Hochschule Bochum sowie die Hochschule Offenburg entwickelten Radnabenmotoren mit Luftspaltwicklung in Scheibenläuferbauart und Nebenlagerung zur Aufnahme der Bremsnebenkräfte einer Scheibenbremse [10, 11].

3 Die Luftspaltwicklung als Antriebsprinzip

Das Prinzip der eisenlosen Luftspaltwicklung wurde am Lehrstuhl für Mechatronik der OvGU in einer veränderten Bauart als Radialflussmaschine an die Erfordernisse eines Traktionsantriebs angepasst. Dazu applizieren Kasper et. al [12] die Wicklung direkt auf den Stator. Die ohmsche Verlustenergie kann direkt in das dünnwandige Eisenblechpaket und daraufhin in den Aluminiumstator geleitet werden. Sowohl Rotor als auch Stator haben einen ringförmigen Eisenrückschluss, um den magnetischen Kreis zu schließen [13, 14, 15]. Die Querschnittsgeometrie ist radial sehr flach und axial langgestreckt. Bei der konstruktiven Umsetzung muss auf einen minimalen Luftspalt von wenigen zehntel Millimetern geachtet werden, um die Leistungsparameter zu erreichen.

4 Anforderungen

Die Anforderungsliste ergibt sich aus verschiedenen Teilgebieten, wie der Fahrwerkstechnik von Kraftfahrzeugen und dem Elektromaschinenbau [16, 17].

Die technischen Zielwerte sind: Nenndrehzahl: 1500 U/min; Höchstgeschwindigkeit: 155 km/h; Nennspannung: 400 V; Nennstrom: 100 A; Überlast: 2,5-fach; Nenneingangsleistung: 40 kW; Nenndrehmoment: 300 Nm; minimale elektrische- sowie mechanische Reib- und Rohrströmungsverlustleistung; Ruhelast: 308 kg; Schutzklasse: IP67; Gewicht: 20 kg

5 Funktionen

Die Funktionsstruktur ist speziell auf das Konzept mit Hauptlagerung für die Radkräfte und Nebenlagerung zur Ableitung der Bremsnebenkräfte zugeschnitten (siehe Bild 1).

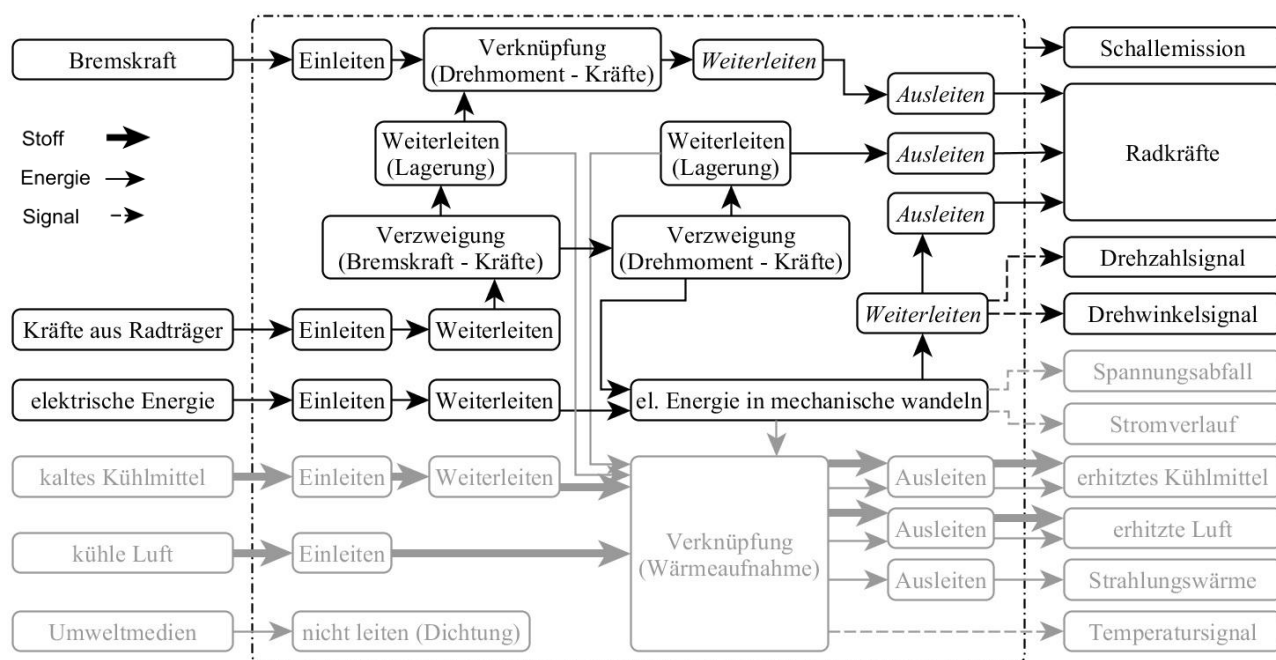


Bild 1: Funktionsstruktur

6 Wirkprinzipien

Die schematischen Darstellungen in Bild 2 zeigen lösbare Welle-Nabe-Verbindungen [18], die im Motor universell verwendet werden können. Die Pressverbindung kann mittels Lot, Klebstoff oder durch Rändeln in ihrer Leistung gesteigert werden.

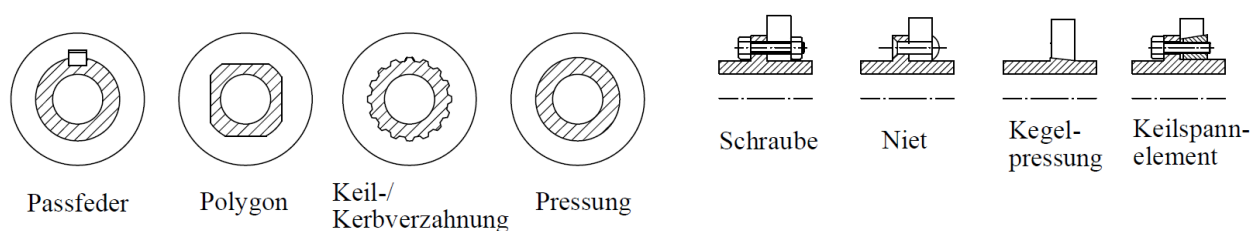


Bild 2: Welle-Nabe-Verbindungen

Die Hauptlagerung muss als Überträger der Radlasten in der Lage sein kombinierte Radial-, Axialkräfte und Kippmomente aufzunehmen. Zur Einhaltung eines kleinen Luftspalts, trotz maximaler lateraler Radlasten, muss eine hohe Verkippteifigkeit des Lagerungssystems erreicht werden. Die Luftspaltverringerung ist dabei abhängig von der Wellenverformung, der Nabenverformung und der Lagereinfederung [19, 20, 21].

Die elektrische Verlustwärmeleistung kann bedingt durch die Kapselung des innenliegenden Stators mit einer Wasserkühlung effektiv abgeführt werden (siehe Bild 3).

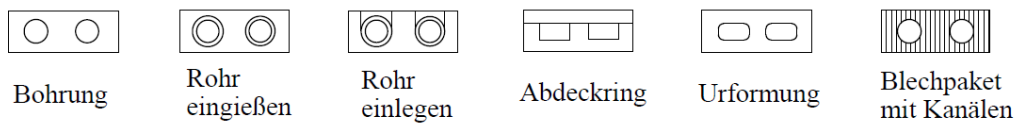


Bild 3: Bauarten der Kühlkanäle

7 Konzeptvarianten

Die Wahl des Außenläufers mit außenliegenden Permanentmagneten ist wegen des größeren Luftspaltdurchmessers und der einfachen Wicklungsaufbringung in den Konstruktionsprozess eingegangen.

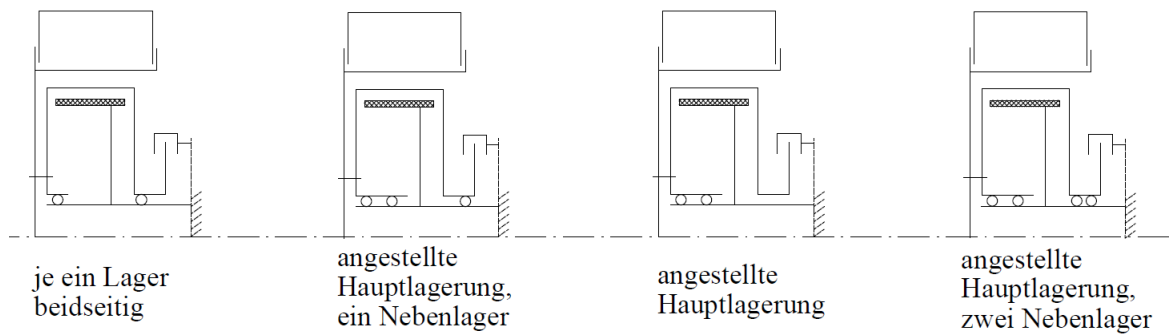


Bild 4: Lagerstellen

Das technische Konzept mit außenrotierender vorgespannter Hauptlagerung und Nebenlagerung mit zwei Wälzlager ist aufgrund der geringen Reibung und des schwach belasteten Rotors ausgewählt worden (siehe Bild 4). Die Auswahl der passenden Wälzlager und der Nebenfunktionen wurde in der Entwurfsphase durchgeführt.

8 Feinentwurf

In Bild 5 ist der letzte Feinentwurf zu erkennen. Die Wellenbaugruppe mit der Positionsnummer 2 beinhaltet zwei Kegelrollenlager mit einem Druckwinkel von ca. 15° und einer Stützweite von ca. 46 mm, wodurch eine hohe Verkippteifigkeit der Wälzlager entsteht. Sämtliche Kühl-, Strom- und Signalleitungen gelangen durch zwei Langlöcher aus der Welle nach außen. Diese liegen seitlich, damit bei lateraler Stoßlast auf das Rad mit einhergehendem Biegemoment in der Welle keine Spannungserhöhung in der maximal beanspruchten Zugfaser auftritt. Der Rotor ist dünnwandig ausgeführt, verschraubt und überträgt neben dem magnetischen Zug das Antriebsmoment und das Bremsmoment. Der gekröpfte Seitendeckel des Rotors wird über die Radbolzen zwischen der Felge und der

Radnabe eingeklemmt. Radnabe, Welle und Bremsscheibenhalter sind aus Stahl gefertigt, um eine hohe Dauerfestigkeit und Steifigkeit zu erreichen. Die Nebenlagerung besteht aus zwei Radialrillenkugellagern. Eines davon ist zur Verringerung der Verkipfung fast unterhalb der Bremsscheibe angeordnet. Dahinter befindet sich ein Radialwellendichtring als einzige rotierende Außendichtung. Der Stator soll mittels integrierter Kanäle gekühlt werden, die groß genug sind, um verlorene Kerne im Sandgussverfahren aufzunehmen. Der Motor wird mittels lösbarer Welle-Nabe-Verbindung am Radträger befestigt. Radialkräfte und Biegemomente werden dabei über eine gepresste Nabe eingeleitet und das Antriebsmoment wird durch einen Zahnring mit Evolventenverzahnung ausgeleitet. Ein Sicherungsring verhindert ein axiales Abrutschen.

Im Konstruktionsprozess fanden Berechnungen zur mechanischen und thermischen Beanspruchung der Bauteile statt, die hier nicht weiter differenziert werden.

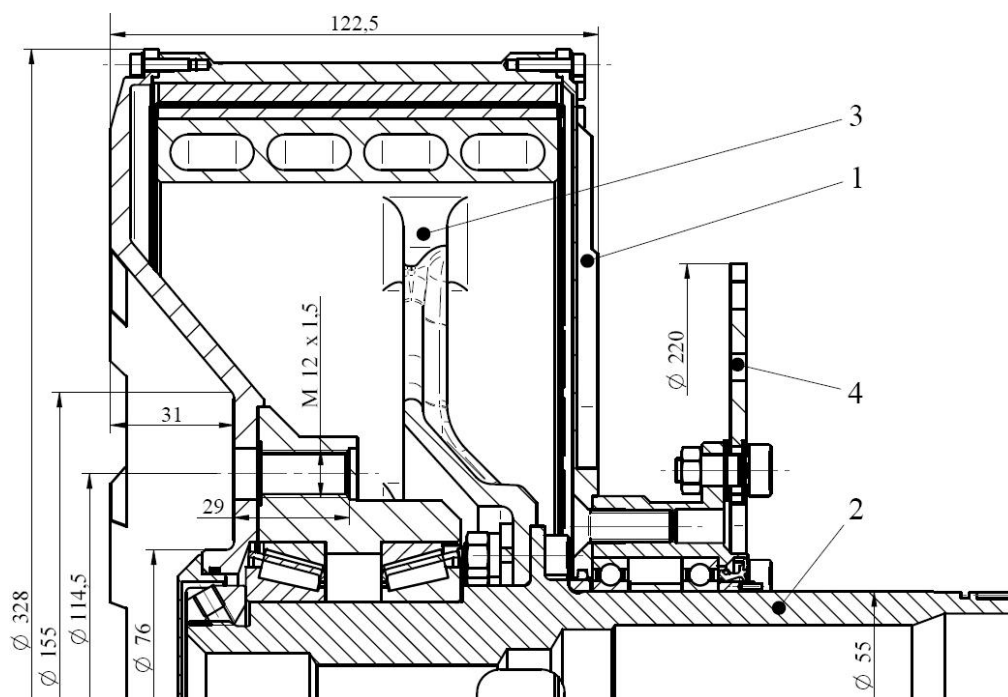


Bild 5: Entwurfszeichnung des Radnabenmotors

9 Fertigung

Aufgrund der schwierigen gießtechnischen Umsetzbarkeit wurde der Stator in gebauter Form mit Abdeckring hergestellt. Stator und Rotor mussten angesichts der magnetischen Zugkraft mit einer sehr steifen Rotormontagevorrichtung zusammengeführt werden.

10 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Konstruktionsmethodik wurde ein Prozess bereitgestellt, der zukünftige Entwicklungen von Radnabenmotoren vereinfacht. Die vorgestellten Wirkprinzipien und Anordnungskonzepte sind erweiterbar. Aufgrund einer abgestimmten Gestaltung und insbesondere durch die leichten Elektroantriebskomponenten konnte die Maschine in der Gesamtheit leicht und funktionell gebaut werden. Eine Erhöhung des Wellendurchmessers würde die Leitungsdurchführung vereinfachen und die Steifigkeit der Hauptlagerung wesentlich verbessern. In Kombination mit schlankeren Kegelrollenlagern oder Schrägkugellagern mit einem Druckwinkel von jeweils 40° könnte das Gewicht und die Reibung gesenkt werden. Der ungenügenden Ausnutzung des Motorinnenraums kann mit einer Integration der Reibungsbremse oder der Leistungselektronik begegnet werden. Zur Verringerung der Bremsnebenkräfte können symmetrische Bremssättel, eine Trommelbremse oder eine Vollscheibenbremse eingebaut werden.

11 Ausblick

Im Forschungsprojekt „Elisa“ konnte die Hauptstufe der Leistungselektronik integriert, sowie der Wirkungsgrad und die Lagerung verbessert werden [22]. Für den Rennwageneinsatz wurde ein Ringmotor entworfen, so dass wesentliche Masse an der Trag- und Lagerstruktur eingespart werden konnte [23]. Im Forschungsschwerpunkt Automotive der OvGU sollen Fahrzeuge mit Radnabenmotoren ausgestattet werden. Im Projekt „LEIRAMO“ soll durch Leichtbauwerkstoffe und veränderten elektrischen Aufbau die Leistungsdichte erhöht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 6. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2005
- [2] Schünemann, Martin; Kasper, Roland: An approach on traction control of 4WD electric vehicles based on direct control of wheel hub motors, European Automotive Congress 13, Valencia, 2011
- [3] Hanselka, H.; Hering, T.: *Energiewende und (Elektro-)Mobilität - neue Aufgaben für Leichtbau und Systemzuverlässigkeit*, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, 11. Magdeburger Maschinenbau-Tage, 2013

- [4] Pautzke, Friedbert: Radnabenantriebe, Studie zur Abschätzung der Verfügbarkeit, des Entwicklungsstandes und des Potentials von Radnabenantrieben in der Elektromobilität, Berichte aus der Fahrzeugtechnik, Shaker Verlag, Aachen, 2010
- [5] <http://medias.schaeffler.de/medias/de>, letzter Zugriff 27.12.2015
- [6] <http://www.in-wheel.com>, letzter Zugriff 26.06.2015
- [7] Krebs, Jörg-Hinrich; Baethge, Monique; Günther, Sebastian: *Innovativer Radnabenmotor*, 12. Magdeburger Maschinenbau-Tage, 2015
- [8] Fraser, A.: *In-Wheel Electric Motors, The Packaging and Integration Challenges*, Protean Electric Ltd, 10th International CTI Symposium, Berlin, 2011
- [9] Höfner, Benedikt: Integrations- und Systemanalyse elektrischer Radnabenantriebe für zukünftige Pkw-Elektrofahrzeuge, Dissertation, EAA – Forschungsberichte, Band 7, Aachen, Shaker Verlag, 2010
- [10] <http://www.hochschule-bochum.de>, letzter Zugriff 25.07.2016
- [11] <http://www.hs-offenburg.de>, letzter Zugriff 25.07.2016
- [12] Kasper, Roland; Heinemann, Wolfgang; Borchardt, Norman: *Elektromotor mit eisenloser Wicklung*. DE 10 2011 111 352 A1. Anmeldetag: 29.08.2011
- [13] Borchardt, Norman: Modellierung, elektromechanische Auslegung und Validierung eines Radnabenmotors mit nutenloser Luftspaltwicklung und hoher gravimetrischer Leistungsdichte, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2014
- [14] Borchardt, Norman; Penzlin, Bernhard; Zörnig Andreas; Heinemann, Wolfgang; Kasper, Roland: *Entwicklung und Validierung eines BLDC Radnabenmotors mit Luftspaltwicklung*, 11. Magdeburger Maschinenbau-Tage, 2013
- [15] Penzlin, Bernhard: *Inbetriebnahme und Test eines ultraleichten 40kW-Radnabenmotors*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl für Mechatronik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2012
- [16] Heiing, Bernd; Ersoy, Metin: *Fahrwerkhandbuch*, Vieweg Verlag, 2007
- [17] Müller, Germar; Ponick, Bernd: *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Wiley-VCH Verlag, 2005
- [18] Kollmann, Franz Gustav: *Welle-Nabe-Verbindungen*, Springer Verlag, 1984
- [19] Hinzelmann, Ralf: *Wälzlagerungen in Radnabenantrieben*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2013
- [20] Eschmann, Paul: *Das Leistungsvermögen der Wälzlager*, Springer Verlag, 1964
- [21] Zörnig, Andreas; Vittayaphadung, Nitipan; Kasper, Roland: *Deformation and Modes of a Wheel Hub Motor with Air Gap Winding*, 11. Magdeburger Maschinenbau-Tage, 2013
- [22] Zörnig, Andreas; Kasper, Roland: *Konstruktion elektrischer Radnabenmotoren mit Luftspaltwicklung für Kraftfahrzeuge*, Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Springer, VDI-Verlag, 6/2015
- [23] Zörnig, Andreas; Dinh, Duc Tran; Duc, Viet Nguen; Höllwarth, Sebastian; Kasper, Roland: Der Ringmotor mit Luftspaltwicklung als Direktantrieb für Fahrzeuge, 12. Magdeburger Maschinenbau-Tage, 2015

Entwicklung von konstruktiven Hilfsmitteln für den Produktentwicklungsprozess im nicht-elektrischen Explosionsschutz an ausgewählten Beispielen

Sabrina Herbst, Frank Engelmann, Karl-Heinrich Grote*

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

Email: sabrina.herbst@eah-jena.de; Internet: [http:// http://www.wi-konstruktion.eah-jena.de/home.html](http://http://www.wi-konstruktion.eah-jena.de/home.html)

*Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion,

Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Email: karl.grote@ovgu.de; Internet: <http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/>

Inhalt: Produkte, welche in einer explosionsfähigen Atmosphäre eingesetzt werden sollen, müssen besonders hohe Anforderungen erfüllen. Diese sind u. a. durch Normen und Richtlinien gekennzeichnet. Aktuell stehen dem Konstrukteur für die explosionsschutzgerechte Gestaltung von Produkten im nicht-elektrischen Explosionsschutz nur wenige Hilfsmittel zur Verfügung. Die vorhandenen Werkzeuge berücksichtigen jedoch nicht die spezifischen Anforderungen des Produktentwicklungsprozesses. Daher ist es erforderlich zum einen Hilfsmittel für die Erarbeitung von Wirkstrukturen und Festlegung der Zündschutzart zu entwickeln und zum anderen Hilfsmittel für die explosionsschutzgerechte Gestaltung und Dimensionierung zu schaffen.

Abstract: Products used in explosive atmospheres have to comply with high requirements. These requirements are characterized, among other things, by standards and directives. Currently, design engineers can make use of only a few tools to dimension non-electrical products for explosive atmospheres. These tools don't regard the specific requirements of the product development process. Therefore it is necessary to create new tools for the development of effective structures and the determination of the ignition protection method on the one hand, but also to do develop tools for the explosion protection - compatible design and dimensioning on the other hand.

Stichwörter: Produktentwicklung, Explosionsschutz, Konstruktionsmethodik

Keywords: product development, explosion protection, design methodology

1 Einleitung

Schlagzeilen wie „Bodies recovered in Georgia sugar refinery explosion“ [1], „Wieder Explosion in einem chinesischen Chemiewerk“ [2] oder „Staubexplosion führt zu Brand in Holzfabrik“ [3] sind leider regelmäßig in den Nachrichten und Zeitungen zu finden. In unserer heutigen sicherheitsbedachten Gesellschaft wird selbstverständlich die Frage gestellt, warum solche Unfälle und Katastrophen nicht verhindert werden können.

Durch die korrekte Anwendung des Explosionsschutzes wären einige der folgenschweren Ereignisse nicht eingetreten. Mit Hilfe des Explosionsschutzes wird u. a. die „plötzliche Oxidations- oder Zerfallsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beider gleichzeitig“ [4], eine Explosion, unterbunden. Dafür werden die erforderlichen Faktoren: brennbarer Stoff, Oxidationsmittel (Luftsauerstoff) und Zündquelle mit Hilfe von unterschiedlichsten Maßnahmen beeinflusst. Im Bereich des nicht-elektrischen Explosionsschutz wird dieses Ziel u. a. durch die Vermeidung von Zündquellen erreicht. Die Art und Weise des Schutzes muss bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess festgelegt werden, um alle Anforderungen hinsichtlich Gestaltung und Prüfung berücksichtigen zu können. Im Laufe des Entwicklungsprozesses kann sich diese Entscheidung jedoch als fehlerhaft, zu kostenintensiv oder nicht umsetzbar herauskristallisieren. Die aktuell zur Verfügung stehenden Hilfsmittel im nicht-elektrischen Explosionsschutz berücksichtigen dieses Risiko kaum.

2 Anforderungen des Explosionsschutzes

Der Entwicklungsprozess eines neuen Produktes wird durch die drei voneinander bedingten Parameter Zeit, Qualität und Kosten bestimmt [5]. Demzufolge ist der Erfolg einer Produktentwicklung von der Abstimmung dieser Ziele abhängig. Mit Hilfe von strukturierten Produktentwicklungsprozessen, wie dem Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 [6], lassen sich diese Faktoren transparent darstellen und abteilungs- bzw. aufgabenübergreifend kontrollieren.

Dieser Prozess wird im Explosionsschutz, ein Teilbereich der Sicherheitstechnik, jedoch durch hohe Anforderungen und Ansprüche der Sicherheit, der Produkte, der Unternehmen und der Branche extrem beeinflusst. Durch Richtlinien und Gesetze legt der Gesetzgeber die Gefährdungsfreiheit und Arbeitssicherheit fest. Dieses Vorhaben wird durch Normen und Zertifizierungen mit erforderlichen Prüfungen vor dem Markteintritt bei in den

Richtlinien benannten Prüfstellen sichergestellt [7]. Darüber hinaus stellt der Kunde hohe Anforderungen an das Produkt hinsichtlich Flexibilität, Produktlebenszyklus und Wartungsaufwand. Generell wird in der Branche ein hohes Maß an die Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen gestellt. Zusätzlich ist in diesem Nischenmarkt ein umfassendes Expertenwissen notwendig. Folglich kann ein Unternehmen durch kompetentes Personal, effiziente Methoden und umfangreiche Erfahrungen erfolgreich sein. [8]

3 Stand der Technik

Beispiel: Rührwerk

Der nicht-elektrische Explosionsschutz findet bei mechanischen Geräten, Komponenten und deren Zusammenbau Anwendung [9]. Soll beispielsweise ein konventionelles Rührwerk im explosionsgefährdeten Bereich integriert werden, kommt der nicht-elektrische Explosionsschutz zum Einsatz. Es gilt das Wirksamwerden von potentiellen Zündquellen zu vermeiden. Die potentiellen Zündquellen des Rührwerkes sind Bild 1 zu entnehmen. Elektrische Komponenten, wie der Motor, sind nur mit einer Zulassung in dem gefährdeten Bereich zu verwenden.



Eigene Aufnahme der Arbeitsgruppe INNOK

¹⁾ auch Fehlgebrauch (Installation, Bedienung, Wartung) berücksichtigen

Bild 1: Potentielle Zündquellen an einem Rührwerk

Zündschutzarten

In der für den nicht-elektrischen Explosionsschutz aktuell sehr bedeutsamen Normreihe DIN EN 13463 werden in den einzelnen Normen sogenannte Zündschutzarten dargestellt [10]. Als Zündschutzart sind laut DIN EN 13463-1 die Maßnahmen zu bezeichnen, welche durch einschlägige Normen definiert werden. In diesen sind jeweils Anforderungen und Hinweise zur zündschutzartgerechten Gestaltung enthalten. Im nicht-elektrischen Explosionsschutz existieren momentan sieben unterschiedliche Zündschutzarten, siehe Bild 2. Die Anwendung der unterschiedlichen Zündschutzarten richtet sich nach der Zielsetzung der einzusetzenden Maßnahmen. Im ersten Schritt sollte immer versucht werden, dass Entstehen einer Zündquelle durch die Konstruktive Sicherheit zu verhindern.

Verhindern des Entstehens der Zündquelle	Konstruktive Sicherheit „c“ – DIN EN 13463-5 (zukünftig - ISO 80079-37)
Verhindern des Wirksamwerdens einer Zündquelle	Zündquellenüberwachung „b“ – DIN EN 13463-6 (zukünftig - ISO 80079-37)
Verhindern des Eindringens von Ex-Atmosphäre bis zur Zündquelle	Flüssigkeitskapselung „k“ – DIN EN 13463-8 (zukünftig - ISO 80079-37)
	Überdruckkapselung „p“ – IEC 60079-2
	Schutz durch Gehäuse „t“ – IEC 60079-31
	Schwadenhemmende Kapselung „fr“ – DIN EN 13463-2
Reduzierung der Auswirkung einer Explosion	Druckfeste Kapselung „d“ – DIN EN 13463-3 (zukünftig - IEC 60079-1)

Bild 2: Zündschutzarten im nicht-elektrischen Explosionsschutz

Zündquellenbewertung

Neben den Zündschutzarten ist die Zündgefahrenbewertung nach DIN EN 13643 entscheidend für den nicht-elektrischen Explosionsschutz. Mit Hilfe dieser Methodik wird eine ausgearbeitete Konstruktion hinsichtlich ihrer Zündquellen analysiert und bewertet. [11, 12]

In einer Zündgefahrenbewertung müssen folgende fünf Schritte ausgeführt werden:

Vorgehensweise	Inhalt
1. Schritt	Identifizierung der Zündgefahren und deren Ursachen
2. Schritt	Erste Zündgefahrenabschätzung (hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens ohne Anwendung zusätzlicher Maßnahmen) und Bewertung
3. Schritt	Festlegung von Maßnahmen zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer Zündgefahr aus Schritt 2 (vorbeugende und/ oder Schutzmaßnahmen)
4. Schritt	Endgültige Zündgefahrenbewertung und Kategorisierung (Bewertung der Zündgefahren hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens einschließlich der in Schritt 3 festgelegten Maßnahmen)
5. Schritt	Festlegung der Gerätekategorie

Im Schritt 1 muss das entwickelte Rührwerk hinsichtlich aller möglichen Zündquellen, die generell existieren (siehe DIN EN 1127-1 [13]) untersucht werden. Das Ergebnis ist die Kenntnis über alle gerätbezogenen Zündquellen. Diese sind dann hinsichtlich der Zündfähigkeit zu analysieren, um die potentiellen Zündquellen festzustellen und zu bewerten (Schritt 2). Mit dem Schritt 3 muss durch den Einsatz von ausgewählten Maßnahmen das Wirksamwerden der potentiellen Zündquellen verhindert werden. Anschließend erfolgen die endgültige Zündgefahrenbewertung und die finale Festlegung der Gerätekategorie des Rührwerkes.

Konstruktive Sicherheit – Beispiel: Wälzlager

Im nicht-elektrischen Explosionsschutz ist die Anwendung der Zündschutzart „Konstruktive Sicherheit“ die primäre Maßnahme, um eine Konstruktion explosionsgeschützt auszulegen. Mit dieser Zündschutzart lässt sich eine Vielzahl von potentiellen Zündquellen, die wirksam werden könnten, kostengünstig und einfach vermeiden bzw. das Risiko auf ein vertretbares Maß beschränken.

Potenzielle Zündquellen bei Wälzlagern sind heiße Oberflächen, elektrostatische Aufladung und mechanische Funken. Diese entstehen häufig als Folge von Lagerschäden bzw. -ausfällen oder Sekundärstörungen durch Anschlusskonstruktionen und müssen daher bei der Gestaltung und Dimensionierung berücksichtigt werden.

Generell erfolgt die Dimensionierung, entsprechend den grundlegenden Anforderungen zur Reduzierung der Auswahlwahrscheinlichkeit, durch sorgfältige Auslegung der Lager nach dem Stand der Technik unter Beachtung aller Betriebs- und Umgebungsbedingungen sowie korrekte Herstellung und Montage. Für die explosionsgeschützte Auslegung sind jedoch die weiterführenden Anforderungen zu

berücksichtigen wie die Vermeidung von Stromdurchgängen (Funken) und elektrostatischer Aufladung. Für dieses Ziel wird beispielsweise die Erlebenswahrscheinlichkeit des Lagers von 90 % auf 99 % erhöht. Dadurch sinkt der Lebensdauerbeiwert bei der Lebensdauerberechnung von 1,00 auf 0,16 (DIN ISO 281 [14]). Folge der sicherheitsbedingten Anpassung ist eine extreme Erhöhung des Wartungsintervalls, welche die notwendige Sicherstellung der Schmierung und die Berücksichtigung der spezifischen Wartungsanweisungen zum sicheren Betrieb gewährleistet.

Wie das Beispiel des Wälzlagers zeigt, gestaltet sich die unstrittige und zweifelsfreie Anwendung dieser Zündschutzart als sehr schwierig. Es gibt die unterschiedlichsten Maschinenelemente und Konstruktionen, allerdings existieren keine eindeutigen Hinweise und Hilfsmittel für die explosionsgeschützte Dimensionierung und Auslegung.

4 Konstruktive Hilfsmittel

Erfordernis

Die Anwendung der Zündgefahrenbewertung und die Umsetzung einer Zündschutzart erfolgt erst nach der Fertigstellung der Konstruktion. Die Entscheidung für eine Zündschutzart ist dagegen zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Produktentwicklungsprozesses notwendig. Durch diese Festlegung werden die gesamten Kosten für die restliche Produktentwicklung definiert, da diese ein Resultat des spezifischen Prüf- und Zertifizierungsprozesses der Zündschutzart sind. Die Wahl der Zündschutzart ist jedoch keine Garantie für eine erfolgreiche Zulassung. Wenn das Produkt die vorgeschriebenen in der Regel sehr zeitintensiven Prüfungen nicht erfüllt, dauert es häufig mehr als ein Jahr bis durch Optimierungen am Produkt die erforderlichen Tests bestanden wurden. Des Weiteren kann es unerlässlich sein, das Zündschutzkonzept neu auszulegen. Folglich sind Projekteinstellungen aufgrund von stark verzögertem Markteintritt nicht unüblich.

Die Analyse der aktuell zur Verfügung stehenden Hilfsmittel zeigt, dass weitere Werkzeuge zwingend notwendig sind, um den Produktentwicklungsprozess sowie den Konstruktionsprozess im nicht-elektrischen Explosionsschutz effizienter und effektiver zu gestalten. Im Detail müssen konstruktive Hilfsmittel für zwei kritische Phasen in der Produktentwicklung geschaffen werden, siehe Bild 3.

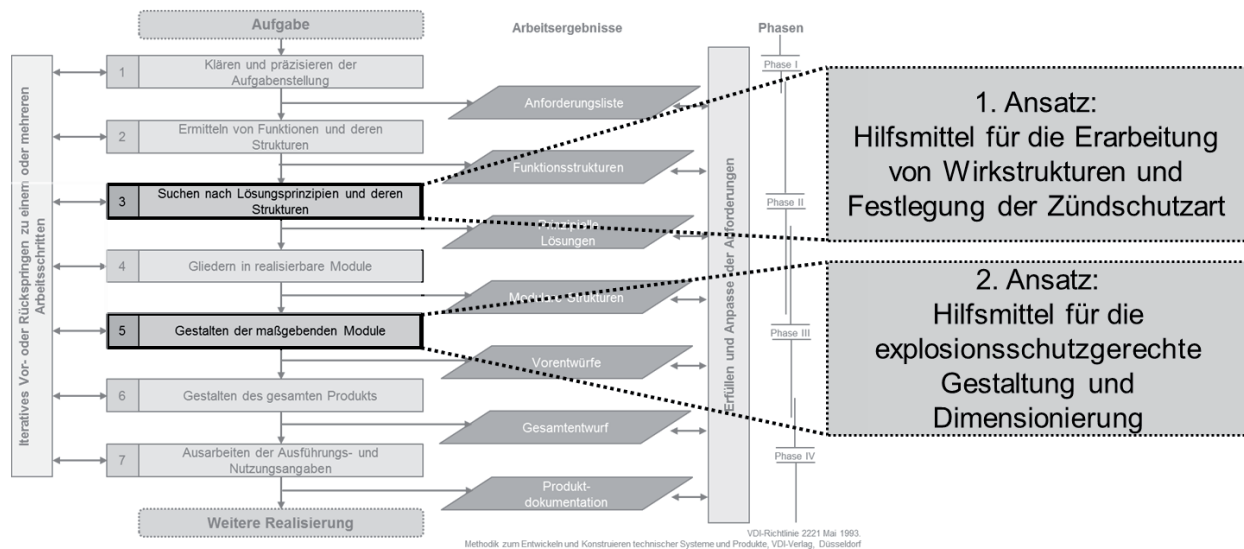


Bild 3: Erforderliche Hilfsmittel zur Optimierung der Produktentwicklung im nicht-elektrischen Explosionsschutz

Hilfsmittel zur Festlegung der Wirkstruktur und Zündschutzart

Bei jeder Entwicklung eines Produktes müssen Wirkzusammenhänge und -strukturen festgelegt werden. Im nicht-elektrischen Explosionsschutz geht mit diesem Schritt die Festlegung des Zündschutzkonzeptes und somit der Zündschutzart einher. Daher muss eine methodische und strukturierte Arbeitsweise sichergestellt werden. Dieses Ziel kann durch den Einsatz von speziellen Checklisten, die dem Konstrukteur als Leitfaden dienen soll, erreicht werden. Der Konstrukteur kann anhand ausgewählter Fragen und Punkte die für seine Produktidee technisch sinnvollste und wirtschaftlichste Zündschutzart auf Basis der aktuellen Normung feststellen. Beispielsweise wäre es beim Rührwerk möglich gewesen die Zündquellenüberwachung und die druckfeste Kapselung anzuwenden, jedoch wäre diese Entscheidung nicht wirtschaftlich gewesen.

Diese Checklisten werden durch die Analyse von abgewickelten Projekten in Zusammenarbeit mit benannten Prüfstellen erstellt. Somit sollen die bedeutsamsten Aspekte und Themen evaluiert werden.

Hilfsmittel zur explosionsschutzgerechten Gestaltung und Dimensionierung

Aktuell ist eine effiziente und effektive explosionsschutzgerechte Gestaltung und Dimensionierung, insbesondere mit der Zündschutzart „Konstruktive Sicherheit“, nur mit umfangreicher Erfahrung und signifikantem Wissen möglich. Dementsprechend sind

Hilfsmittel erforderlich, die jedem Konstrukteur in seiner Tätigkeit für den Explosionsschutz unterstützen. Generell kann der Ingenieur Bauteile unter der Berücksichtigung der Einsatzbedingungen und des Standes der Technik konstruieren. Bei der explosionsschutzgerechte Auslegung sollen nun die Hilfsmittel unterstützen, denn bei beiden Varianten sind Risiken und Störungen zu vermeiden. Im Bereich des nicht-elektrischen Explosionsschutzes muss jedoch die Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Gefährdung so minimal wie nur möglich sein. Durch den Einsatz von Konstruktionskatalogen und Beispielsammlungen inkl. Angaben zur Anwendung von Sicherheitsfaktoren kann diese Intention realisiert werden. Anhand des Beispiels der Wälzlager ist bereits deutlich zu erkennen, dass von der Anpassung der Sicherheitsfaktoren auch organisatorische und wirtschaftliche Faktoren abhängig sind. Für diese Hilfsmittel sind zum einen die Anforderungen der Normen transparent dazustellen. Zum anderen werden mit Hilfe von Versuchsaufbauten ausgewählte Maschinenelemente hinsichtlich ihrer Zündquellen im Produktlebenszyklus untersucht. Final werden die Ergebnisse in einer Datenbank zusammengefasst um den Anwendern eine zweckmäßige Nutzung zu ermöglichen.

5 Zusammenfassung

Im nicht-elektrischen Explosionsschutz sind zusätzliche Hilfsmittel im Produktentwicklungsprozess und der Konstruktionsmethodik unvermeidlich. Durch diese Optimierungsansätze können bei der Entwicklung von neuen Produkten Zeit und Kosten eingespart und die Produktqualität bestärkt werden. Des Weiteren wird eine Planungssicherheit für alle Projektbeteiligten geschaffen. Ggf. notwendige Maßnahmen bei Abweichungen können zielgerichtet eingesetzt werden und somit den Projekterfolg realisieren.

In der weiteren Bearbeitung der vorgestellten Themen werden auch die aktuellen Forschungs- und Innovationsansätze im Bereich des Explosionsschutzes berücksichtigt und eingebunden.

Das übergeordnete Ziel dieses Projektes, die Optimierung des Produktentwicklungsprozesses und der Konstruktionsmethodik im nicht-elektrischen Explosionsschutz, erlangt durch dieses Teilprojekt einen großen Fortschritt.

Literatur

- [1] *Bodies recovered in Georgia sugar refinery explosion.* The Associated Press [veröffentlicht am 08.02.2008, abgerufen am 20.07.2016]. Verfügbar unter: <http://www.nydailynews.com/news/world/bodies-recovered-georgia-sugar-refinery-explosion-article-1.308071>
- [2] *Wieder Explosion in einem chinesischen Chemiewerk.* Zeit online [veröffentlicht am 23.08.2015, abgerufen am 20.07.2016]. Verfügbar unter: <http://www.zeit.de/wirtschaft/2015-08/shandong-china-explosion-chemiefabrik-zibo-opfer>
- [3] Mandler, Britt: *Staubexplosion führte zu Brand in Holzfabrik.* Thüringer Allgemeine [veröffentlicht am 15.06.2016, abgerufen am 20.07.2016]. Verfügbar unter: <http://ilmenau.thueringer-allgemeine.de/web/lokal/leben/blaulicht/detail/-/specific/Staubexplosion-fuehrte-zu-Brand-in-Holzfabrik-1147322196>
- [4] ISO 8421 Part 1 1987. Fire protection; Vocabulary; Part 1 : General terms and phenomena of fire [Brandschutz; Begriffe; Teil 1: Allgemeine Benennungen und Branderscheinungen], S. 2
- [5] Burghardt, Manfred: *Einführung in Projektmanagement; Definition, Planung, Kontrolle, Abschluss.* 6. Auflage. Erlangen: Publicis Publishing, 2013. S.23 – ISBN: 978-3-89578-400-2
- [6] VDI-Richtlinie 2221 1993: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag
- [7] Nolan, Dennis P. 2014. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles [Handbuch des Brand- und Explosionsschutzes]. Kidlington/Waltham/San Diego: Elsevier, S. 43-46. – ISBN: 978-0-323-31301-8
- [8] Herbst, Sabrina; Engelmann, Frank; Grote, Karl-Heinrich: *Anforderungen des Nicht-Elektrischen Explosionsschutzes im Produktentwicklungsprozess.* In: Stelzer, Ralph (Hrsg.): EntwerfenEntwickelnErleben 2016. Dresden: w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel, 2016, S. 113-126 – ISBN:978-3-95908-062-0
- [9] DIN EN 13463-1 2009. Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen - Teil 1: Grundlagen und Anforderungen, S. 6
- [10] DIN EN 13463 (Normreihe). Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen
- [11] Beyer, Michael: On the Method of Ignition Hazard Assessment for Explosion Protected Non-Electrical. In: Ex-Magazine 31 (2005), S. 78-85 – ISSN 0176-0920
- [12] Hawksworth, Stuart; Rogers, Richard; Proust, Christoph; Beyer, Michael; Schenk, Sabina; Gummer, J.; Raveau, D.: *Ignition of explosive atmospheres by mechanical equipment.* In: Hazards XVIII: process safety - sharing best practice (Symposium series. Institution of Chemical Engineers: 150) (2004), S. 337-347 – ISBN: 0-85295-460-3
- [13] DIN EN 1127-1 2011. Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik
- [14] DIN ISO 281 2010. Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer, S. 29

Entwicklung eines Verfahrens zum Austausch von Taschenzellen bei industriell gefertigten Batteriemodulen

**Benedikt Seelhorst, Tobias Stefaniak, Robert Odenbach, Kevin Kuhlmann,
Karl-Heinrich Grote**

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Email: benedikt.seelhorst@st.ovgu.de, tobias.stefaniak@ovgu.de, robert.odenbach@ovgu.de,
kevin.kuhlmann@ovgu.de

Internet: <http://imk.-unimagdeburg.de/lkt/>

Inhalt: *Alternative Antriebskonzepte wie der Elektroantrieb gelten als langfristige Lösung der Problematik von steigenden Lärm- und Schadstoffemissionen und sind Grundlage für eine von fossilen Brennstoffen unabhängige Mobilität. Taschenzellen (pouch cells), die u.a. in Batteriemodulen für Elektrofahrzeuge eingesetzt werden, sind größtenteils mittels industrieller Fügeverfahren (Laserstrahlschweißen, Ultraschallschweißen) an ihren Polfahnen stoffschlüssig zu fest konfigurierten Batteriemodulen verbunden. Die stoffschlüssige Verbindung der Taschenzellen führt dazu, dass beim Versagen einer einzelnen Zelle das gesamte Modul ausgetauscht werden muss. Dies führt nicht nur zu einer hohen Kostenbelastung des Nutzers, sondern auch zu einer sinkenden Nutzerakzeptanz und Konkurrenzfähigkeit von Elektrofahrzeugen.*

In vorangegangenen Forschungsarbeiten entstand ein Methode zum Austausch von Taschenzellen aus industriell gefertigten Batteriemodulen (Hersteller: A123 Systems). Dieser Beitrag handelt von einem Verfahren zum Heraustrennen defekter Zellen, sowie der Lagerung der neuen Zellen und der Fixierung des Batteriemoduls. Zur Erfüllung der Schlüsselfunktion des Zellwechsellvorgangs und der Kontaktierung der Polfahnen wurden zwei modulare Verbindungen entwickelt (Klemmverbindung, Schweißverbindung). Die Klemmverbindung berücksichtigt die Kontaktierung von neuen sowie alten Batteriezellen im Modul und verzichtet auf spezielle Fertigungsverfahren. In der Schweißverbindung wird ein im Überlappverbund walzplattiertes Al-Cu-Blech aufgrund der guten elektrischen Leitfähigkeit als Leitblech eingesetzt. Eine definierte Schnittgeometrie im Blech dient der Polfahnenaufnahme und ermöglicht einen Kontaktierungsprozess im Laserstrahlschweißverfahren.

Abstract: *Alternative drive concepts such as the electric drive are said to be the long-term solution for the problem of rising noise and pollutant emissions and are the basis for mobility that is independent of fossil fuels. Pouch cells, used in battery modules for electric cars, are mostly joined to battery modules by connecting their battery tabs using industrial joining processes (laser welding, ultrasonic welding).*

The substance-to-substance bond of the pouch cells does not allow the replacement of single battery cells. Therefore, a defect of one of the battery cells requires the whole battery module to be replaced. This not only

makes it more expensive for the user but subsequently leads to a lower degree of user acceptance and makes electric cars less competitive.

Previous research work resulted in a process to replace batteries in industrially produced battery modules (A123 Systems). This article presents a procedure to remove defect battery cells and a process to mount new battery cells in the battery module are being presented. Special attention is paid to the battery tab connection, the key function for a battery replacement process. Two modular connection systems, a clamp connection and a weld connection, have been developed. The clamp connection allows the bonding of new as well as old battery cells in the module without the need of special production processes. Due to its good electrical conductivity, the weld connection uses a roll-bonded Al-Cu-sheet as a battery tab connection plate. A defined gap geometry in the plate allows the bonding of the battery tabs in a laser beam welding process.

Stichwörter: Elektromobilität, Batteriemodul, Taschenzellen (pouch cells), Zellverbindung, Laserstrahlschweißen, Ultraschallschweiße.

Keywords: Electric mobility, battery module, pouch cell, battery tab connection, laser beam welding, ultrasonic welding.

1 Einleitung

Ausgangssituation und Herausforderung

Mit einem weltweit steigenden Verkehrsaufkommen entstehen nicht nur Herausforderungen wie steigende Lärm- und Schadstoffemissionen, denen es zu begegnen gilt, sondern zwangsläufig steigt auch der Bedarf an fossilen Brennstoffen. Dem stetig steigenden Bedarf steht jedoch ein begrenztes Angebot gegenüber, woraus sich kurzfristig Preisschwankungen und letztendlich ein unüberbrückbarer Engpass ergibt. Alternative Antriebskonzepte wie der Elektroantrieb gelten als langfristige Lösung der beschriebenen Problematik. Mit dem Ziel, Deutschland zum Leitanbieter für Elektrofahrzeuge zu machen, schreibt die Regierung der Elektromobilität zudem eine zentrale Schlüsselrolle zu (Regierungsprogramm Batterie 2020). [1, 2, 3]

Die tatsächliche Konkurrenz- und Leistungsfähigkeit von Elektrofahrzeugen hängt dabei maßgeblich von dem eingesetzten Batteriesystem ab. Aufgrund der begrenzten Zyklenzahl einzelner Batteriezellen, Toleranzen in Fertigung und Montage sowie des anspruchsvollen Einsatzortes im Fahrzeug, bei dem das Batteriemodul thermischen sowie mechanischen Belastungen ausgesetzt ist, kann von einer Nutzungsdauer eines Batteriemoduls in einem Elektrofahrzeug von zehn Jahren ausgegangen werden. [3, 4]

Die Reihen- und Parallelschaltung der einzelnen Batteriezellen im Batteriemodul mittels industrieller Fügeverfahren (Laserstrahlschweißen, Ultraschallschweißen) führt dazu, dass

bei dem Versagen einer einzelnen Zelle das gesamte Modul noch vor dem Ende der geplanten Nutzungsdauer als defekt eingestuft wird. Die kosteneffiziente, industrielle Fertigung sieht jedoch keinen Austausch einzelner Batteriezellen aus den Batteriemodulen vor, weswegen im Schadensfall in der Regel das gesamte Modul ausgetauscht werden muss, obgleich nur ein kleiner Prozentsatz der enthaltenen Bauteile tatsächlich defekt ist. Dies führt nicht nur zu einer hohen Kostenbelastung des Nutzers, sondern die Nutzerakzeptanz und die Konkurrenzfähigkeit von Elektrofahrzeugen sinken.

Für die zukünftig zunehmende Anzahl an industriell hergestellten Batteriemodulen bedarf es eines Verfahrens, mit dem defekte Batteriezellen aus einem Batteriemodul durch neue ersetzt werden können, sodass die effektive Nutzungsdauer des Batteriemoduls steigt und damit die effektiven Kosten von Batteriemodulen sinken. Dieser Vorgang beschreibt ein Produktrecycling von Batteriemodulen auf Zellebene.

Elektrische Kontaktierung von Polfahnen am Beispiel von A123-Systems

Als Beispielm modul wird ein Batteriemodul der Fa. A123-Systems ausgewählt (vgl. Bild 1), da es typische Eigenschaften industriell hergestellter Batteriemodule wie den stoffschlüssigen Verbund der Polfahnen aufweist, die eine nachträgliche Konfigurationsänderung oder einen Austausch von defekten Zellen erschweren. Um die einzelnen Batteriezellen, deren Kathode aus Kupfer (Cu) und Anode aus Aluminium (Al) besteht, in dem Batteriemodul in einer gewünschten Konfiguration seriell oder parallel miteinander zu verbinden, werden die Batteriepole der Zellen über ein Leitblech (Detailvergrößerung) aus Al und Cu verbunden. Die Al-Cu-Mischverbindung wird dabei mittig mittels Ultraschallschweißung realisiert. Nach dem Einstecken der vorbereiteten Polfahnen in die Leitbleche verwendet der Hersteller das Laserstrahlschweißverfahren, um die Polfahnen mit dem Leitblech zu verbinden und so den elektrischen Kontakt dauerhaft herzustellen. Der besondere Vorteil des gewählten Verfahrens ist der geringe Wärmeeintrag in die Polfahnen der Batteriezelle sowie die gute Automatisierbarkeit des Vorgangs.

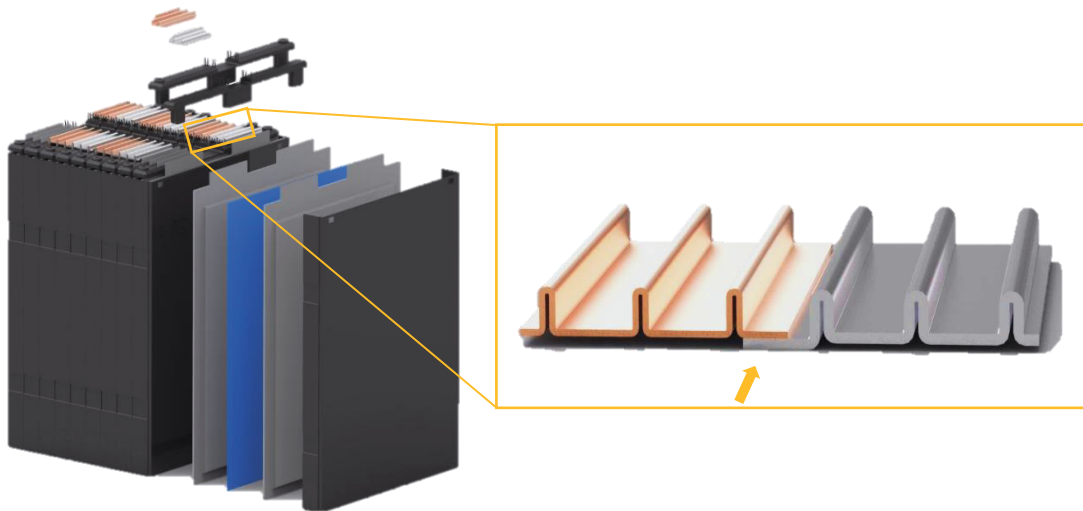


Bild 1: CAD-Modell A123-Batteriemodul; Detail: Al-Cu-Leitblech

2 Austauschvorgang von Batteriezellen

In Bild 2 ist eine Übersicht über den Austauschvorgang von einzelnen Zellen aus Batteriemodulen dargestellt.

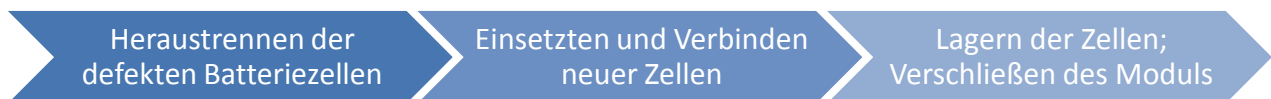


Bild 2: Übersicht zum Vorgehen beim Austausch

2.1 Heraustrennen der defekten Batteriezellen

Zum Heraustrennen der defekten Batteriezellen müssen zum einen die Polfahnen, die mittels Laserstrahlschweißen mit den Leitblechen verbunden sind, gelöst werden. Zum anderen müssen die Zellen, die durch die Klebeverbindungen mit den Wärmeleitblechen sowie den Schaumstoffkissen verbunden sind, herausgelöst werden. Das Ziel muss sein, nicht beschädigte Zellen durch einen Ausbauvorgang nicht in der Funktion zu beeinträchtigen. Bauteile wie Wärmeleitbleche oder Leitblechhalter müssen nach Möglichkeit nach einem Heraustrennen einzelner Zellen wieder einsetzbar sein.

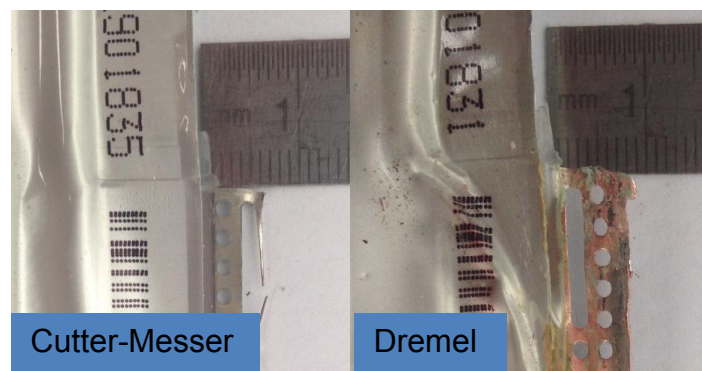


Bild 3: Vergleich Ausbaumethoden, links: Cutter-Messer; rechts: Dremel

Als ein für den Zellausbau vorteilhafter Prozess zeigt sich das Heraustrennen defekter Zellen mittels Cutter-Messer (Teppichmesser), da der Prozess einfach und schnell realisierbar ist. Um Batteriezellen mit einer möglichst großen verbleibenden Polfahnenhöhe zu erhalten (für Batteriezellen, die in dem Modul verbleiben sollen, jedoch von dem Leitblech getrennt werden müssen), wird eine Vorrichtung für den Zellausbau aufgebaut. In der Vorrichtung kann ein Rotationswerkzeug in einer Führungseinheit so über den Schweißnähten des Batteriemoduls positioniert werden, dass mittels Fräseinsatz die Schweißnähte von oben abgetrennt werden können.

In Bild 3 ist ein Vergleich von zwei Cu-Polfahnen nach dem jeweiligen Ausbaurvorgang dargestellt. Bei einem Ausbau der Zellen mittels Rotationswerkzeug (Dremel), bei dem die Schweißnähte von oben abgetrennt werden, hat die verbleibende Polfahne eine Höhe von ca. 8 mm. Bei einem Ausbau der Zellen mittels Cutter-Messer hat die verbleibende Polfahne eine Höhe von ca. 6 mm. Besonders bei der Cu-Polfahne, die durch die vorhandene Perforierung zu einem Ausreißen beim Schneidprozess neigt, ist daher ein Ausbau mittels Rotationswerkzeug empfehlenswert. Nach einem Ausbau der Zellen müssen die Polfahnen der Zellen, die erneut eingesetzt werden, gereinigt und von dem entstandenen Grat befreit werden.

2.2 Herstellen der Polfahnenverbindung

2.2.1 Klemmverbindung

Als das wichtigste Element bei dem Austausch einzelner Batteriezellen aus einem industriell hergestellten Batteriemodul zeigt sich die erneute elektrische Kontaktierung der Polfahnen [5]. Grundsätzlich gibt es zwei Verbindungsarten, die dazu eingesetzt werden

können: kraft- und formschlüssige Verbindungen sowie stoffschlüssige Verbindungen. In einer vorangegangenen Literatur- und Patentrecherche [5] wurde deutlich, dass beide Verfahren jeweils Vor- und Nachteile aufweisen, weswegen an dieser Stelle zwei Verfahren, eine Klemmverbindung sowie eine Schweißverbindung, die bei einem Zelltausch einsetzbar sind, vorgestellt und verglichen werden sollen.

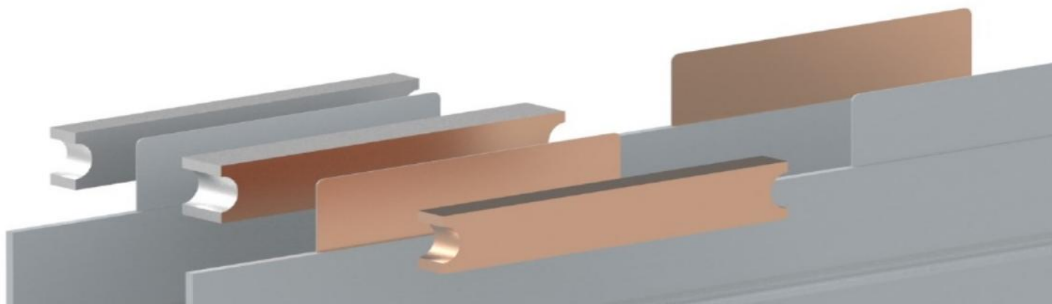


Bild 4: Leitblock aus kupferkaschiertem Aluminium

Für die zu entwickelnde Klemmverbindung der Polfahnen ergeben sich nach Taheri et al. [6] sowie der Platzrestriktion (die Außenabmessungen des Batteriemoduls sollen erhalten bleiben, damit eine uneingeschränkte Funktion am ursprünglichen Einsatzort gewährleistet ist) die folgenden drei grundlegenden Anforderungen:

1. Aufbringen eines möglichst hohen Anpressdrucks,
2. Zulassen einer möglichst geringen Unebenheit (Durchbiegung) der Oberflächen,
3. Einhalten des vorgegebenen Bauraums.

Um die Anforderung Nr. 1 und Nr. 2 bestmöglich zu realisieren, wird der Einsatz von Metallblöcken (vgl. Bild 4) ausgewählt. Nach einem Heraustrennen der defekten Zellen aus dem Batteriemodul sowie dem Abtrennen der alten Leitbleche haben die Polfahnen der im Modul verbleibenden Batteriezellen Abmessungen von $H \times B = 8 \times 45$ mm. Analog dazu ergibt sich die Polfahnenoberfläche der Kathoden aus Kupfer zu $H \times B = 8 \times 45$ mm. Aufgrund der Ausstanzungen der Polfahne, die der Hersteller als zusätzliche Zellsicherung anwendet, verringert sich die Oberfläche der Kathoden um die Summe der Größe der Ausstanzungen. Die entwickelten Leitblöcke sind so ausgeführt, dass die abgeschnittenen Polfahnen mit ihrer gesamten verbleibenden Oberfläche mit den Leitblöcken in Kontakt

stehen. Die Länge der Leitblöcke $L_{\text{Leitblock}} = 51 \text{ mm}$ berücksichtigt die volle Länge der Polfahnen, der Klemmmechanismus liegt außerhalb der der Polfahnenoberfläche.

Um ein direktes Aufeinandertreffen der zwei unterschiedlichen Batteriepol-Materialien (Al und Cu) zu vermeiden, wird das Prinzip von [7] angewendet. Dazu wird der Leitblock, der sowohl mit der Anode als auch mit der Kathode der in Serie geschalteten Batteriezellen in Kontakt steht, aus einem Profil von kupferkaschiertem Aluminium hergestellt. So kann das von [7] vorgestellte vorteilhafte Korrosionsverhalten sowie der niedrige elektrische Widerstand bei dem Stoffübergang der Bimetall-Verbindungen ausgenutzt werden.

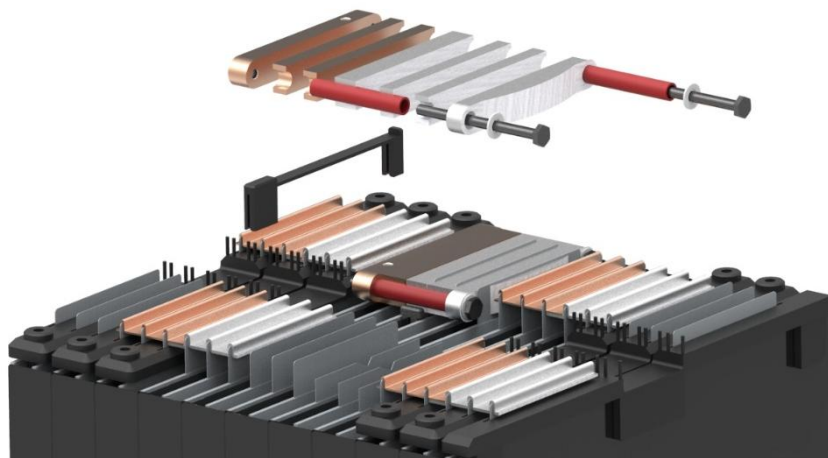


Bild 5: Klemmverbindung am Batteriemodul „7s3p“ bei drei ausgetauschten Batteriezellen

Die entwickelte Klemmverbindung kann, dank des modularen Blockaufbaus, durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Leitblöcke an die geforderte Konfiguration angepasst werden. Wird beispielsweise eine Xs2p-Konfiguration benötigt, entfallen je ein Kupfer- und ein Aluminium-Leitblock. Das Mittelstück, der kupferkaschierte Aluminium-Leitblock, bleibt, wie die Endplatten unverändert. Angepasst werden Schrauben- und Kunststoffrohrlänge.

2.2.2 Schweißverbindung

Da die Fa. A123 die Polfahnen mittels Laserstrahlschweißen in die Leitbleche einschweißt und die Al-Cu-Mischverbindung der Leitbleche mit einem zweiten Verfahren, dem Ultraschallschweißen, realisiert, werden zur Herstellung der Bleche beide Anlagen benötigt. Naheliegender ist daher die Realisierung der Aluminium-Kupfer-Mischverbindung in einem Laserstrahlschweißprozess, sodass die gleiche Anlage verwendet werden kann, was die Herstellungskosten verringert und den Prozess vereinfacht. Eine Problematik die bei der Herstellung von Al-Cu-Mischverbindungen auftreten, sind intermetallische Phasen.

Um eine Al-Cu-Mischverbindung im Laserstrahlschweißverfahren herzustellen bedarf es spezieller Geräte (hochfrequente Strahloszillation durch spezielle Spiegeloptik), um die spröden intermetallischen Phasen zu vermeiden. Bei einer geringen Stückzahl an zu fertigenden Blechen, ist es daher vorteilhaft ein anderes Verfahren zur Herstellung einer Al-Cu-Mischverbindung auszuwählen.

Als besonders Vorteilhaft erscheint der Einsatz eines walzplattierten Leitblechs. Neben den Vorteilen der guten elektrischen Leitfähigkeit [8, 9] und den frei wählbaren Breitenverhältnissen der Bleche bietet der Prozess gerade bei kleinen Stückzahlen, wie sie bei einem möglichen Zellaustausch benötigt würden, monetäre Vorteile. Je nach dem Bedarf kann so von einem im Coil vorrätigen Verbindungsblech die benötigte Menge angefordert und bedarfsgerecht eingesetzt werden.

Den Recherchen zur Folge ist die Fa. *Doduco GmbH* mit dem Produkt *AlCunnect* [9] in Deutschland bisher der einzige Hersteller einer benötigten Überlappverbindung, die zur Herstellung von Bimetall-Leitblechen eingesetzt werden kann.

Als ein deutlicher Vorteil der *AlCunnect*-Verbindung gegenüber der vom Hersteller eingesetzten Ultraschallverbindung kann die einfache Geometrie angeführt werden. Die weniger strukturierte Oberfläche der Verbindung lässt sich einfacher beschichten und bietet eine geringere Angriffsfläche für Korrosion. Der elektrische Widerstand ist in einer walzplattierten Verbindung zudem geringer, was gerade bei einem Einsatz in einem Batteriemodul von deutlichem Vorteil ist [8].

Wenn jeweils nur einzelne Zellen aus dem Batteriemodul ausgetauscht werden sollen, entfallen je nach Konfiguration die originalen Leitblechträger. Daraus folgt, dass die herzustellenden Leitbleche bei einer Kontaktierung von beispielsweise drei neuen Zellen mit drei alten Zellen auf der Seite der neuen Zellen auf den originalen Leitblechträgern gelagert werden können. Auf der Seite, auf der die alten Batteriezellen in das Leitblech eingeschweißt werden, muss das Leitblech ohne den originalen Leitblechträger eingesetzt werden, um die gekürzte Polfahne erneut mit dem Leitblech kontaktieren zu können (die gekürzten Polfahnen sind in der Abbildung 6 mit einer Ausbuchtung dargestellt). Daher muss das Leitblech für diesen Anwendungsfall abgekantet werden, was jedoch ohne ein speziell dafür hergestelltes Werkzeug möglich ist (vgl. Bild 6). Werden alle Batteriezellen aus einem Modul ausgetauscht, können die originalen Leitblechträger erneut eingesetzt werden und die Lagerung der neuen Leitbleche übernehmen, die in diesem Fall keine Stufe aufweisen müssen und deshalb nicht abgekantet werden.

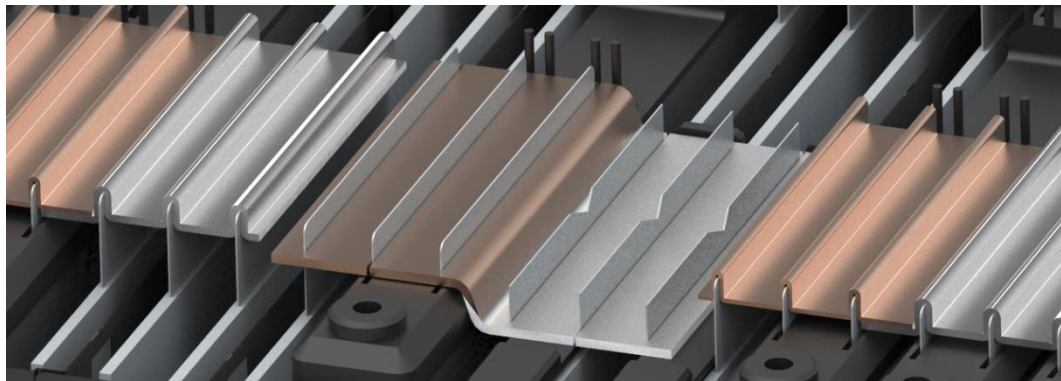


Bild 6: Batteriemodul mit AICunnect-Leitblechen

2.3 Lagerung der Zellen und Fixierung des Batteriemoduls

Da auf die Batteriezellen zum optimalen Leistungserhalt ein äußerer Druck wirken muss ($p_{Mittel} = 0,0827 \frac{N}{mm^2}$), muss eine Einrichtung diese Komprimierung sicherstellen [10]. Gleichzeitig dehnen und stauchen sich die Zellen abhängig von dem jeweiligen Ladungszustand. Der Hersteller gibt an, dass sich die Zellen um 1 % und gegen Ende der Lebensdauer um bis zu 5 % ausdehnen ($\Delta Exp_{ZelleMax} = 0,363 \text{ mm}$). Ein Modul mit einer 7s3p-Anordnung (21 Zellen) würde sich also um maximal $\Delta Exp_{7s3pMax} = 7,623 \text{ mm}$ ausdehnen. Daraus folgt, dass ein einfaches Verspannen der Zellen ohne eine Einrichtung, welche die Zellausdehnung ausgleicht, zu einem schwankenden Zelldruck führt, welcher eine Leistungsminderung (zu hoher Druck oder zu niedriger Druck) hervorrufen würde. Der Hersteller setzt Schaumstoffkissen aus dem Material PORON 4701-30-25 der Fa. *Rogers Corporation* zwischen den Zellen ein. Das Material ermöglicht das gleichmäßige Ausdehnen der Zellen und sorgt nach einem Verspannen laut Hersteller für einen gleichmäßigen Druck auf der Zelloberfläche (Ausgleich der Unebenheiten der Oberfläche). Die bei einem Zellausbau zerstörten Schaumstoffkissen müssen bei einem Zellwechsellvorgang ersetzt werden.

Um den geforderten Anpressdruck auf der Zelloberfläche zu erreichen, muss eine Kraft von $F_{Optimal} \approx 2456 \text{ N}$ aufgebracht werden. Dazu können Metall-Spannbänder eingesetzt werden. Bei einem Einsatz von zwei Spannbändern muss jedes Band eine Kraft von $F_{SpannMin} \approx 1229 \text{ N}$ aufnehmen. Dazu wird ein Spannband (Endlosband und Verschlusssystem) der Fa. *HS-Befestigungssysteme GmbH* eingesetzt (Spannband: 560

8553 013; Verschluss: Typ D: 560 8550 013). Das ausgewählte Spannband hat eine Breite von 13 mm und kann eine Zugkraft von $F_{SpannIST} = 7100 \text{ N}$ aufnehmen, womit es für den Anwendungsfall unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors geeignet ist. Das modulare Spannsystem lässt sich an jede beliebige Modullänge anpassen. Spannband und Verschluss sind nach dem Vorbild des Herstellers aus rostfreiem Edelstahl W4 gefertigt und damit für den Einsatz in der Batteriewanne geeignet.

3 Zusammenfassung

Zusammenfassend werden die beiden entwickelten Varianten zur elektrischen Kontaktierung der Polfahnen hinsichtlich der Anforderungen *Leichtbau*, *Produktion* und *Funktion* verglichen (vgl. Tabelle 1).

Leichtbau: Mit einer Schweißverbindung der Polfahnen reduziert sich das Gewicht des Batteriemoduls gegenüber dem Einsatz einer Klemmverbindung um 148 g, was eine Gewichtsersparnis im Verbindungselement von ca. 80 % zur Folge hat. Eine Klemmverbindung benötigt ca. 165 % des Bauraums einer Schweißverbindung.

Tabelle1: Bewertung der Verbindungsarten

	Klemmverbindung	Schweißverbindung
Leichtbau		
Gewicht des Verbindungselements	188 g/6 Zellen	40 g/6 Zellen
Benötigter Bauraum	ca. 165 %	ca. 100 %
Produktion		
Montagezeit Kontaktierung von 6 Zellen	ca. 20 min	ca. 6 min
Fertigungsart	händisch	berührungslos
Funktion		
Lösbarkeit der Verbindung	Ja	Nein
Verbindungswiderstand (Vergleich)	-	+

Produktion: Die Montagezeit für das Herstellen der Polfahnenverbindung kann bei einer Schweißverbindung in 6 min (30 s/Schweißnaht) realisiert werden. Das Anbringen einer Klemmverbindung würde ca. 20 min (10 min/6 Polfahnen) in Anspruch nehmen. Bei der Realisierung mittels Schweißverbindung findet der Kontaktierungs-Prozess berührungslos statt. Bei einem Anbringen einer Klemmverbindung müssen mittels Schraubenschlüssel händisch beide Schrauben angezogen werden, wobei aufgrund der Kurzschlussgefahr isoliertes Werkzeug eingesetzt werden muss.

Funktion: Eine Klemmverbindung kann bei Bedarf wieder gelöst werden. Dadurch entsteht jedoch auch die Gefahr eines ungewollten LöSENS der Verbindung. Gleichzeitig sind die Kontaktflächen nur schwer vor Umwelteinflüssen und folgender Korrosion zu schützen, woraus ein potenzielles Funktionsversagen der Verbindung resultiert.

Das vorgestellte Verfahren wurde speziell für das Batteriemodul der Fa. A123 ausgelegt. Teilfunktionen der gewählten Lösungen müssen für eine allgemeine Anwendbarkeit abgeändert und angepasst werden. Die Herangehensweise und die theoretischen Hintergründe zu Polfahnenverbindungen sowie die Lösungsprinzipien sind allgemeingültig und können für die Entwicklung vergleichbarer Verfahren für andere Batteriemodule herangezogen werden.

4 Literatur

- [1] Trueb, L. F.; Rüetschi, P.: Batterien und Akkumulatoren. Mobile Energiequellen für heute und morgen. Springer: Berlin, 1998
- [2] Hoyer, C.: Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland. Gabler: Wiesbaden, 2015
- [3] Schroth, P.: Batteriematerialien für zukünftige Elektromobile und stationäre Anwendungen. Batterie 2020. Verfügbar unter: <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.php?B=1146> (Datum des Zugriffs: 20.02.2016)
- [4] Konietzko, S.; Gernuks, M.: Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen. Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt. Verfügbar unter: <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/> (Datum des Zugriffs: 23.02.2016)
- [5] Seelhorst, B.: Entwicklung eines Verfahrens zum Austausch von Taschenzellen bei industriell gefertigten Batteriemodulen. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Maschinenbau, Masterarbeit, 2016
- [6] Taheri, P.; Hsieh, S.; Bahrami, M.: Investigating electrical contact resistance losses in lithium-ion battery assemblies for hybrid and electric vehicles. In: Journal of Power Sources 196 (2011) 15, S. 6525–33
- [7] Odenbach, R.: Innovative thermische Konditionierung einer Traktionsbatterie: Konzeption, Konstruktion und Aufbau eines Prototypen, Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Maschinenbau, Masterarbeit, 2015
- [8] Schmidt, P. A.: Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen. Herbert Utz Verlag: München, 2015
- [9] DoDuco: AlCunnect. Aluminum Copper Clad Metal. Verfügbar unter: PDF Dokument auf Anfrage
- [10] A123 Energy Solutions: Battery Pack Design, Validation, and Assembly Guide using A123 Systems AMP20 M1 HD-A Nanophosphate® Cells. User Documentation. Verfügbar unter: <https://www.buya123products.com/uploads/vipcase/b24d4f5b63934c59d43e93b3bb4db60a.pdf> (Datum des Zugriffs: 02.01.2016)

Parametrisches Konstruktionswerkzeug für die Gestaltung von elektrischen Maschinen mit Luftspaltwicklung

Ralf Hinzelmann, Andreas Zörnig*, Norman Borchardt, Roland Kasper

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau
 Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mechatronik,
 Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
 Email: mtk@ovgu.de; Internet: <http://www.ims.ovgu.de>

*Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH
 Otto-von-Guericke-Allee 12, 39179 Barleben / Deutschland
 Email: info@emb-online.de; Internet: <http://www.emb-online.net>

Inhalt: In der Produktentwicklung besteht eine Herausforderung darin, dass in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses die Anforderungen an die Eigenschaften des Produktes nicht genau definiert werden können. Außerdem bestehen meist komplexe Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Eigenschaften des Produktes. Deshalb muss bei der Detaillierung, Modellierung und Berechnung des Produktes iterativ vorgegangen werden. Dies ist ein sehr zeitintensiver Prozess. Insbesondere bei der Konstruktion von elektrischen Maschinen sind die Zusammenhänge zwischen den mechanischen, thermischen, elektrischen und kinematischen Größen zu beachten. Die Qualität der Lösung wird von dem Grad der Abstimmung all dieser Größen aufeinander bestimmt. Deshalb wurde ein vollständig parametrisches Konstruktionswerkzeug entwickelt, welches dieser Anforderung gerecht wird, indem es einen schnellen Austausch von Parametern zwischen den jeweiligen domänenspezifischen Berechnungswerkzeugen realisiert. Zur thermischen Analyse wird MATLAB Simulink verwendet, zur mechanischen Analyse wird Autodesk Inventor verwendet und zur Wälzlagerberechnung wird „BEARINX-online Easy Friction“ genutzt. Die Parameter werden in Microsoft Excel verwaltet und visualisiert. Die Anwendung des entwickelten parametrischen Konstruktionswerkzeuges erfolgt beispielhaft für einen Generator mit Luftspaltwicklung.

Stichwörter: Parametrische Konstruktion, Thermische Simulation, Luftkühlung, Produktentwicklung, elektrische Maschinen, Generator, Luftspaltwicklung.

Abstract: A challenge in product development processes is that in an early phase the characteristics of the final product can't be defined precise. Furthermore the different characteristic properties of a product are linked complexly. This is why the detailing, modeling and calculation of a product is an iterative process. This makes the product development time-consuming. Especially at the final design engineering of electrical machines the relationships between thermal, mechanical, electric and kinematic properties need to be taken into account. The quality of the final solution is based on the match of all those properties. Therefore a complete parametric design tool was developed which can handle this challenge by realizing a fast

exchange of a large parameter set between different calculation tools. For thermal analysis MATLAB Simulink is used. For mechanical analysis Autodesk Inventor is used and for the roller bearing calculation „BEARINX-online Easy Friction“ is used. The parameters set is preprocessed, handled and display in Microsoft Excel. The application of the tool is shown exemplarily for an alternator with air gap winding.

Keywords: *Parametric design, thermal simulation, air cooling, product development, electrical machines, alternator, air gap winding.*

1 Einleitung

In der Produktentwicklung besteht eine Herausforderung darin, dass in einer frühen Phase die Anforderungen an die Eigenschaften des Produktes nicht genau definiert sind. Es ist außerdem häufig der Fall, dass Anforderungen vom Kunden geändert oder hinzugefügt werden [1, 2]. Insbesondere wenn das Produkt für eine Gruppe von Endnutzern gedacht ist, müssen die Eigenschaften in bestimmten Intervallen anpassbar sein. Eine Lösung ist bei der Gestaltung des Produktes modular vorzugehen (Baukastensystem, Baureihen), sodass durch Anpassen einzelner Module den Änderungen Rechnung getragen werden kann. So kann das zeitaufwändige Anpassen der gesamten Struktur vermieden werden. Eine andere Lösung ist das parametrische Gestalten von Produkten [10, 13]. Besonders bei der Entwicklung von elektrischen Maschinen sind die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften der Maschine zu berücksichtigen. Deshalb ist bei der Auslegung und Konstruktion iterativ vorzugehen wodurch häufige Anpassungen am Entwurf notwendig sind [1,15]. Insbesondere ist die Wechselwirkung zwischen der mechanischen Struktur und dem thermischen Verhalten der Maschine von Bedeutung. Wird die Maschine auf einen bestimmten Nennbetriebspunkt (Strom, Spannung, Drehzahl, Drehmoment) ausgelegt, so darf der thermische Beharrungszustand nie oberhalb der maximal zu ertragenden Temperatur der Wicklung liegen [17]. Kann die entworfene mechanische Struktur die Wärme nicht ausreichend ableiten, muss die Nennleistung reduziert oder die mechanische Struktur angepasst werden. Dies kann durch eine zusätzliche Verrippung des Stators der Maschine geschehen. Eine Verrippung stellt eine Versteifung des Systems dar, deshalb kann der Stator bei gleicher Steifigkeit leichter ausgeführt werden. Um diese und andere positive Wechselwirkungen nutzen zu können, ist es außerdem sinnvoll die Auslegung und Konstruktion der Maschine parameterbasiert vorzunehmen. Die Anwendung des Konstruktionswerkzeugs geschieht hier für einen Generator der in den Anlagen des Fluss-Strom-Netzwerks zum Einsatz kommen soll. Der

Generator soll dabei direkt (ohne Getriebe) an einer Wasserkraftturbine verbaut werden. Die Nennleistung beträgt 5 kW bei 60 U/min.

2 Aufbau des Konstruktionswerkzeuges

Alle Parameter werden in einem Parametersatz an einem Ort gesammelt und stehen somit konsistent für alle Berechnungen und für die CAD-Modellierung zur Verfügung [2]. Dies ist wichtig, da verschiedene Programme zur Auslegung und Konstruktion notwendig sind. Fehler bei der manuellen Übergabe von Parametern entfallen. Als Programm für das Sammeln der Daten und Ergebnisse wurde Microsoft Excel verwendet. Die Modellierung geschieht in Autodesk Inventor. Inventor besitzt bereits eine Schnittstelle für das Einlesen von Variablen aus Excel. Die Lagerberechnung geschieht analytisch in Excel [3-6] und wird später mit „BEARINX-online® Easy Friction“, einem Berechnungstool der Schäffler-AG nachgerechnet. „Easy Friction“ ist browserbasiert und kann deshalb nicht auf den Parametersatz zugreifen. Für die thermische Analyse wird hier ein 1-D-Widerstandsmodell mit Quellen, Senken und Massen in MATLAB Simulink verwendet [11]. Es wurden fünf Parameterklassen definiert. Dabei wurde zwischen elektrischen, geometrischen, kinematischen, thermischen Parametern und Steuerungsparametern unterschieden. Für die jeweiligen Parameterklassen wurde je eine Eingabemaske erzeugt. Auf dem ersten Tabellenblatt (Spreadsheet) werden alle Übergabeparameter abgelegt. Dieses Blatt ist ausgeblendet, da es für den Benutzer keine Bedeutung hat. Aus diesem Tabellenblatt werden die Parameter von Autodesk Inventor abgerufen, sodass die gesamte Modellierung parametrisch vorgenommen werden kann.

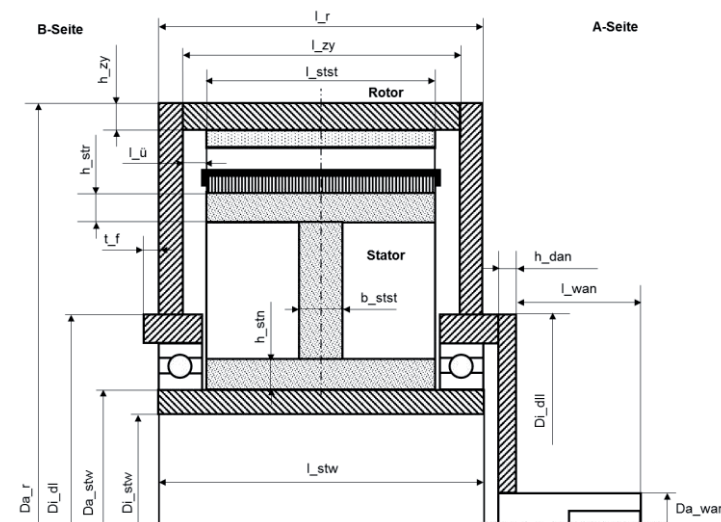


Bild 1: Generatorentwurf und vereinfachte geometrische Parametrierung

Als Basis der Parametrierung wurde ein vereinfachter Grundentwurf gewählt welcher für den Anwendungsfall die einfachste Lösung darstellt und am weitesten verbreitet ist (Bild 1) [5, 6, 2]. Dies entspricht dem Grundprinzip der Konstruktionstechnik einfache, eindeutige und sichere Lösungen zu favorisieren [1]. Die hier betrachtete Maschine ist als Außenläufer ausgeführt. Dies erschwert die Kühlung der Statorwicklung deutlich. Aufgrund der Anwendung als Wasserkraftgenerator, muss ein geschlossenes IP55-Gehäuse verwendet werden [18]. Deshalb kann nur eine indirekte Luftkühlung oder eine Wasserkühlung des Stators realisiert werden. Die Verwendung einer Wasserkühlung wurde von den Anlagenbetreiber aufgrund des Zusatzaufwandes ausgeschlossen. Deshalb muss der Wärmeaustausch über Kühlrippen, also über Konvektion und Wärmedurchgang geschehen [11,19]. Die mechanischen und thermischen Parameter sind direkt gekoppelt und werden in einer Maske dargestellt. Da eine luftgekühlte Motorausführung betrachtet wird, beeinflussen die geometrische Form des Motors und die verwendeten Werkstoffe maßgeblich die Wärmeabfuhr aus dem System und somit die sich an den Bauteilen einstellende Temperatur. Um den thermischen Beharrungszustand für den S1-Betrieb [17] zu bestimmen, werden die Parameter in MATLAB Simulink eingelesen und im 1-D-Widerstandsmodell die Wärmeflüsse durch die jeweiligen Bauteile berechnet [11]. Das Model wurde durch Erwärmungsmessungen an Mustergeneratoren validiert [12]. Außerdem werden Steuerungsparameter verwendet. Diese ermöglichen es die thermische Berechnung aus der Excel-Bedienoberfläche heraus zu steuern. Die Temperaturen werden dann wieder nach Excel exportiert. Jeder Eingabemaske ist ein VBA-Skript

zugeordnet, welches bei Änderungen in den Masken automatisch ausgeführt wird. In den Skripten wird die Geometrie analytisch ausgewertet. Außerdem werden automatisch Normen berücksichtigt, die die thermische Isolierstoffklasse der Wicklung und den Querschnitt der Zuleitungskabel betreffen [21, 22, 24]. Dabei wird von den Skripten auf ein ausgeblendetes Tabellenblatt zugegriffen, in welchem alle relevanten Tabellen abgelegt sind. Der Querschnitt und die Anzahl der Zuleitungskabel legen die Minimalgröße der Zuleitungsbohrung in der Stator-Hohlwelle auf der B-Seite des Generators fest (Di_{stw}). Die Passfedern an der Antriebs- und Befestigungswelle und die Größe der Wellenenden werden automatisch ausgelegt [23,25]. Außerdem werden viele Berechnungsergebnisse direkt ausgegeben, die bei der Detaillierung der Konstruktion im CAD-System notwendig sind (Bild2). Wichtige Größen sind bei dem Anwendungsfall einer elektrischen Maschine mit Luftspaltwicklung:

- Minimale Luftspalte (wichtig für Tolerierung und Auswahl der Zukaufteile)
- Füllfaktor der Wicklung
- Masse der aktiven Motorteile
- Verlustleistung und deren Verteilung auf die Komponenten

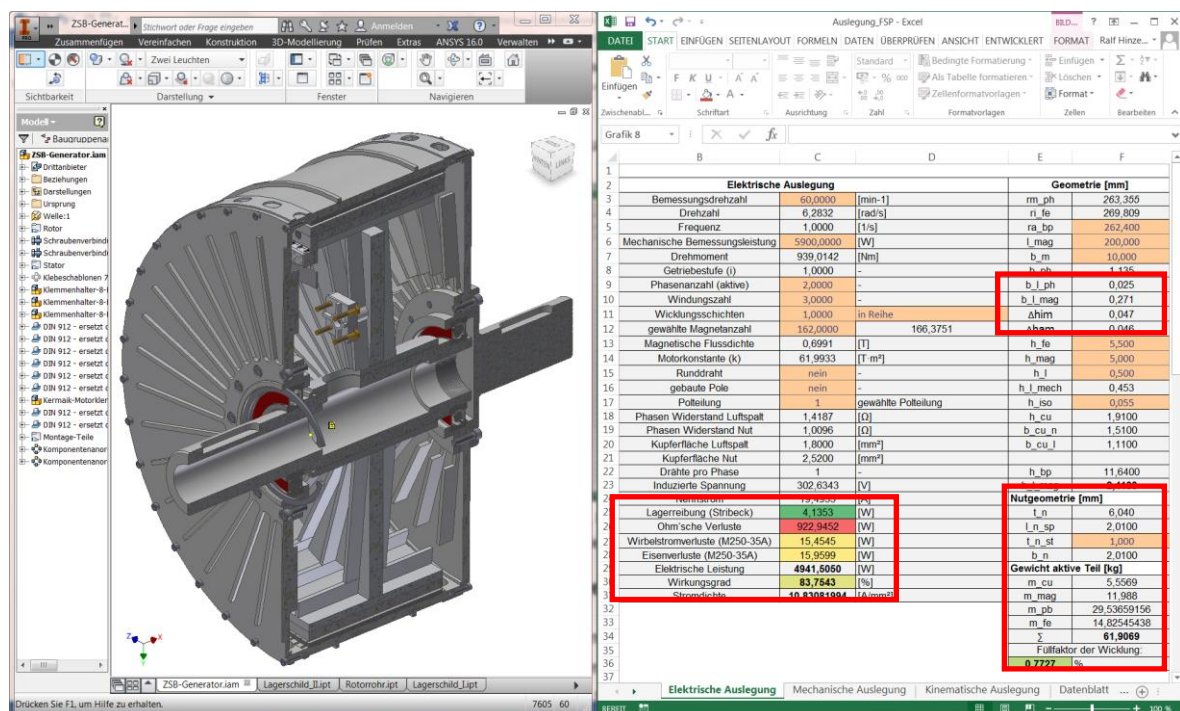


Bild 2: Autodesk Inventor Generatormodell (links), Benutzeroberfläche des Berechnungswerkzeuges (rechts, Tabelle 1 - Elektrische Auslegung)

3 Anwendung des Konstruktionswerkzeuges

Die Anpassungen im Berechnungswerkzeug müssen immer konform mit den Anforderungen des Kunden sein. Diese sind in einer Anforderungsliste dokumentiert. Als Startpunkt der Auslegung dient zusätzlich die Simulation des magnetischen Kreises [7,8]. Hier wird eine ideale Geometrie der aktiven Maschinenkomponente im Nennbetriebspunkt beschrieben. Diese wird dann in eine realisierbare Konstruktion übersetzt, indem konstruktive Rahmenbedingungen wie Fertigungstoleranzen (h_{lph}) und Klebe- und Isolationsschichtdicken (h_{kleb} , h_{iso}) berücksichtigt werden. Die Fertigungstoleranz wird von der verwendeten Wickeltechnologie limitiert [9]. Konkrete Wickeldraht- und Magnetgeometrie und Magnettoleranz werden ausgewählt. Die Art der elektrischen Verschaltung kann bestimmt werden. Dann wird der Nennbetriebspunkt nachgerechnet. Über den integrierten Solver ist es möglich die Drahtgeometrie (h_{cu}) bezüglich des Wirkungsgrades zu optimieren. Jetzt können die Materialstärken so voreingestellt werden, dass bei der groben Masseschätzung das angestrebte Gewicht nicht überschritten wird. In Autodesk Inventor werden alle Bauteile parametrisch erstellt, indem sie mit dem Tool verbunden werden [10,14]. Die Beziehungen in Generatorbaugruppe können ohne Parameter erstellt werden, da die Abhängigkeiten schon im Parametersatz berücksichtigt sind. Maschinenelemente wie Schraubenverbindungen werden mit dem Konstruktions-Assistenten in Autodesk Inventor ausgelegt. Bei der Feingestaltung werden die benötigten Maße mit Faktoren aus den Designparametern berechnet. Wenn das gesamte Modell erstellt ist kann die genaue Gesamtmasse durch Inventor berechnet werden. Ist diese zu hoch, müssen im Tool die Wandstärken angepasst werden. Das Modell wird im FEM-Modul von Autodesk Inventor analysiert. Wird eine ausreichende Stabilität erzielt, können die Designparameter in MATLAB eingelesen werden. Stellt sich der thermische Beharrungszustand unterhalb der maximal zu ertragenden Temperatur der Isolierstoffklasse ein, ist eine ausreichende Wärmeabfuhr gewährleistet. Falls nicht müssen Rippen verwendet werden und die Berechnung muss wiederholt werden. Die Lager werden zum Schluss nachgerechnet. Zum Austausch der Daten mit externen Firmen oder Projektpartnern wurde ein automatisches Datenblatt erstellt [16]. Auf dem Datenblatt sind die wichtigsten externen Generatorparameter abgelegt. Außerdem sind wichtige Eigenheiten einer Maschine mit Luftspaltwicklung vermerkt.

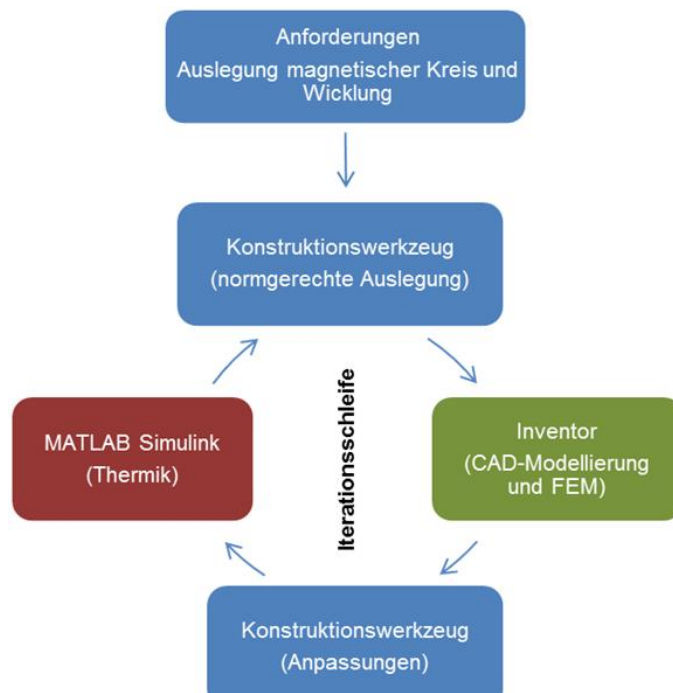


Bild 3: Ablaufschema der Generatorgestaltung unter Nutzung des Konstruktionswerkzeugs

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Berechnungs-, Auslegungs- und Gestaltungswerkzeug vorgestellt, welches die Konstruktion und Entwicklung von elektrischen Maschinen mit Luftkühlung und Luftspaltwicklung erleichtert und beschleunigt. Es dient außerdem der Kommunikation zwischen den Projektpartnern im Entwicklungsprojekt, indem es die Möglichkeit bietet jederzeit ein Datenblatt vom aktuellen Entwicklungsstand abzulegen. Das iterative Vorgehen im Entwicklungsprozess wird stark beschleunigt und Fehler können vermieden werden. Verschiedene Berechnungsprogramme können auf einen Datensatz zugreifen und so können die domänenspezifischen Berechnungsaufgaben optimal bearbeitet werden. Verbesserungspotential besteht im Datenhandling. Das Werkzeug sollte in eine relationale Datenbankstruktur überführt werden. Es könnte zum Beispiel Microsoft Access verwendet werden um für die Auslegungsverfahren SQL-Befehle nutzen zu können. Das Berechnungswerkzeug könnte in Zukunft um eine wirtschaftliche Ebene erweitert werden. Zum Beispiel könnten Halbzeug-Tabellen hinterlegt werden um das Zerspanungsvolumen zu minimieren. Materialkosten könnten berücksichtigt und optimiert werden.

Literatur

- [1] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007, ISBN 978-3-540-34060-7
- [2] Vajna, Sandor; Integrated Design Engineering, Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Springer Vieweg, 2014, ISBN 978-3-642-41103-8
- [3] Wittel, Herbert; Muhs, Dieter; Jannasch, Dieter; Voßiek, Joachim: *Roloff / Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. 20 Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, ISBN 978-3-8348-1454-8
- [4] Brändlein, Eschmann, Hasbargen, Wiegand: *Die Wälzlagerpraxis: Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen*. korrig. 3. Auflage, Vereinigte Fachverlage, 1998 Taschenbuch – 1. Januar 1995, ISBN-10: 3783002907
- [5] SKF-Publikation: Hauptkatalog, Das Wälzlagerhandbuch für Studenten. Ausgabe 2006
- [6] FAG-Publikation: *Wälzlager in Elektromaschinen*. (Handbuch) Publ.-Nr. WL 01200 DA
- [7] Kasper, Roland; Heinemann, Wolfgang; Borchardt, Norman: *Elektromotor mit eisenloser Wicklung*. DE 10 2011 111 352 A1. Anmeldetag: 29.08.2011
- [8] Borchardt, Norman: Modellierung, elektromechanische Auslegung und Validierung eines Radnabenmotors mit nutenloser Luftspaltwicklung und hoher gravimetrischer Leistungsdichte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2014
- [9] Borchardt, Norman; Hinzelmann, Ralf; Kasper, Roland: "Winding Machine for Automated Production of an Innovative Air-Gap Winding for Lightweight Electric Machines," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no. 3, pp. 1509-1517, June 2016. doi: 10.1109/TMECH.2016.2532964
- [10] Yamasaki, Yuko: *Konstruktionshilfsmittel für die parametrische Konstruktion*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, RWTH Aachen, 2007
- [11] Wilkens, Stefan: *Thermodynamisches Verhalten eines Achsgenerators mit Luftspaltwicklung*. unveröffentlichte Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2016
- [12] Hinzelmann, Ralf: Generator mit eisenloser Wicklung für Kleinwindenergieanlagen. MMT-Tagung 2015, Magdeburg
- [13] Vajna, Sandor, Schabacker, M., Schmidt, R.: Methodisches Parametrisieren in der Produktmodellierung, in: Konstruktionstechnik - Motor künftiger Innovationen. 22. Kolloquium Konstruktionstechnik 1999
- [14] Richtlinie VDI 2218, Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Feature-technologie
- [15] Richtlinie VDI 2221 1993-05, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte
- [16] Richtlinie 2006/42/EG, Maschinenrichtlinie europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung)

- [17] Norm DIN EN 60034-1:2011-02; VDE 0530-1:2011-02, Drehende elektrische Maschinen - Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (IEC 60034-1:2010, modifiziert). Deutsche Fassung EN 60034-1:2010 + Cor.:2010
- [18] Norm DIN EN 60034-5:2007-09; VDE 0530-5:2007-09, Drehende elektrische Maschinen - Teil 5: Schutzarten aufgrund der Gesamtkonstruktion von drehenden elektrischen Maschinen (IP-Code) - Einteilung (IEC 60034-5:2000 + Corrigendum 2001 + A1:2006). Deutsche Fassung EN 60034-5:2001 + A1:2007
- [19] Norm DIN EN 60034-6:1996-08; VDE 0530-6:1996-08; Drehende elektrische Maschinen - Teil 6: Einteilung der Kühlverfahren (IC-Code) (IEC 60034-6:1991). Deutsche Fassung EN 60034-6:1993
- [20] Norm DIN EN 60034-7:2001-12; VDE 0530-7:2001-12, Drehende elektrische Maschinen - Teil 7: Klassifizierung für Bauarten, der Aufstellungsarten und der Klemmkasten-Lage (IM-Code) (IEC 60034-7:1992 + A1:2000). Deutsche Fassung EN 60034-7:1993 + A1:2001
- [21] Norm DIN EN 60034-11:2005-04; VDE 0530-11:2005-04, *Drehende elektrische Maschinen - Teil 11: Thermischer Schutz (IEC 60034-11:2004)*. Deutsche Fassung EN 60034-11:2004
- [22] Norm DIN EN 60085:2008-08; VDE 0301-1:2008-08; *Elektrische Isolierung - Thermische Bewertung und Bezeichnung (IEC 60085:2007)*. Deutsche Fassung EN 60085:2008
- [23] Norm DIN 6885-1:1968-08, Mitnehmersverbindungen ohne Anzug; Paßfedern, Nuten, hohe Form.
- [24] Norm VDE 0298-4 VDE 0298-4:2013-06, Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen.
- [25] Norm DIN 748 Teil 1 1970-01, *Zylindrische Wellenenden; Abmessungen, Nenndrehmomente*.

Systematik zur Bewertung von Baukästen am Beispiel eines Werkzeugmaschinenherstellers

Clemens Birk, Albert Albers, Sabine Muschik*, Nikola Bursac

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

Kaiserstr. 10, D-76131 Karlsruhe

E-Mail: Clemens.Birk@partner.kit.edu, Albert.Albers@kit.edu, Nikola.Bursac@kit.edu;

Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

*TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG

Johann-Maus-Str. 2, D-71254 Ditzingen

E-Mail: Sabine.Muschik@de.trumpf.com; Internet: <http://www.trumpf.com>

Inhalt: Der marktseitig geforderten Variantenvielfalt versuchen Unternehmen zunehmend mit der Einführung von Baukastensystematiken zu begegnen, um einerseits die externe Vielfalt zu ermöglichen und andererseits die interne Vielfalt und die damit einhergehende Komplexität in einem handhabbaren Rahmen zu halten. Neben organisatorischen Anpassungen müssen etablierte Prozesse und Strukturen modifiziert und neue Methoden sowie ein gemeinsames Baukastenverständnis etabliert werden. Hierfür sind Bewertungssystematiken für Steuerungs- und Controlling-Aufgaben notwendig, welche die Besonderheiten eines Baukastens berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Bewertungssystematik abgeleitet und praxisnah evaluiert, die den genannten Anforderungen gerecht werden kann. Dabei orientiert sich diese an der Systemtheorie und ermöglicht so eine Bewertung sowohl auf Baukastenebene als auch auf Modulebene. Der thematische Fokus der Bewertung lässt sich durch Anpassung der berücksichtigten Datengrundlage variieren. Bei der Datenerhebung folgt die Bewertungssystematik dem Ansatz, bevorzugt auf bereits etablierte Datenerhebungsprozesse zurückzugreifen. Dieses Vorgehen hat zum Ziel, den zusätzlichen Aufwand gering zu halten und vor allem bereits gewonnene Akzeptanz und Erfahrungswissen bezüglich der erhobenen Daten nutzbar zu machen. Durch eine übersichtliche Darstellung der Daten und einer datenspezifischen Bewertungslogik lässt sich die entwickelte Systematik „Status Board x“ sowohl im Sinne der kontinuierlichen Validierung als auch in Entscheidungssituationen auf Managementebene nutzen.

Abstract: In order to address market expectations to offer a varied product portfolio, more and more companies introduce a modular design to provide the required external diversity and keep the internal diversity as well as the overall complexity within manageable boundaries. Besides organizational adjustments, established processes and structures need to be adapted and new methods have to be introduced. To do so, controlling needs evaluation systematics that respect the particularities of construction kits. Therefore this study introduces a rating methodology which acknowledges these requirements. With respect to system theory the systematic allows to review the overall construction kit as well as individual

modules. By adjusting the considered data basis the thematic focus of the evaluation can be shifted. Data collection is preferably based on already established processes in order to minimize additional efforts and to keep obtained acceptance and empirical knowledge available regarding the data collected. Due to a clear presentation of data and data specific validation system, the rating methodology "Status Board x" can be used for continuous validation as well as in decision-making situations at management-level.

Stichwörter: Baukasten, Bewertungssystematik, Werkzeugmaschinenhersteller

Keywords: Construction kit, evaluation systematic, machine tool manufacturer

1 Einführung

Bedingt durch den Wandel der allgemeinen Marktsituation von einem Verkäufer- hin zu einem Käufermarkt stehen Unternehmen vor der Herausforderung, den individuellen und teilweise speziellen Kundenwünschen Rechnung zu tragen. Als Konsequenz ergibt sich aus dem strategischen Anspruch, den Anforderungen zu entsprechen, ein umfangreiches Produktportfolio, das neben Standardlösungen eine Vielzahl von Produktvarianten und Sonderkonstruktionen beinhaltet, und damit zwangsläufig zur Steigerung der Komplexität im Unternehmen beiträgt. In der Absicht, diesem Trend entgegenzuwirken, setzen Unternehmen zunehmend auf die Einführung von Standardisierungsmethoden wie der Baukastensystematik, um einerseits die externe Vielfalt zu ermöglichen, andererseits jedoch die interne Vielfalt und die damit einhergehende Komplexität in einem handhabbaren Rahmen zu halten. So zeigen jüngere Studien, dass insbesondere bei komplexen Produkten die Baukastenentwicklung als eine kontinuierliche Aktivität im Produktentstehungsprozess verstanden werden muss [1]. Als dieser vorgelagert ist die Aktivität der Modularisierung zu sehen [2]. Hierfür bedarf es spezifischer Methoden und Prozesse, welche die Baukastenentwicklung im Kontext der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung unterstützen [3]. Für die erfolgreiche Implementierung eines Baukastens sind - wie auch bei anderen Entwicklungsprojekten - insbesondere Bewertungssystematiken für Steuerungs- und Controlling-Aufgaben von entscheidender Bedeutung [4]. Bisher wurde jedoch nur bedingt untersucht, wie die Ansätze etablierter Bewertungssystematiken dazu beitragen könnten, die Baukastenentwicklung als kontinuierliche Aktivität zu unterstützen [5]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird hierzu ein Ansatz vorgestellt, der den speziellen Anforderungen eines Baukastens entsprechen kann.

2 Stand der Forschung

Die Einführung einer Baukastensystematik hat vielfältige Auswirkungen auf unterschiedliche Bereiche - sowohl unternehmensinterne als auch externe. Eine der zentralen Herausforderungen ist es, aus der Vielzahl an in der Literatur vorhandenen Definitionen [5] ein gemeinsames Verständnis der Baukastensystematik zu etablieren, um eine Zusammenarbeit zu ermöglichen. Daher werden zunächst die dieser Arbeit zugrundeliegenden Definitionen im Kontext der Systemtheorie [6] angeführt. Zur Beschreibung der Baukastenentwicklung als kontinuierlicher Aktivität wird im Anschluss das Modell der Produktgenerationsentwicklung vorgestellt. Der Baukasten kann als abstraktes Konstrukt beschrieben werden, das alle Subsysteme beinhaltet, aus denen sich verschiedene Systeme konfigurieren lassen [1]. Ein Baukasten kann somit als Zusammenstellung von Subsystemen verstanden werden, die einem Regelwerk folgen und sich dementsprechend zu Systemen und damit zu Produkten kombinieren lassen. Dabei ist der Baukasten keineswegs ein gebrauchsfertiges Produkt, sondern umfasst lediglich die Komponenten, aus denen technische Systeme konfiguriert werden können (vgl. emergente Systeme) [3,6]. Die einzelnen Systeme können darüber hinaus im Sinne des fraktalen Charakters [7] auf unterschiedlichen Systemebenen unabhängig voneinander verschiedenen Gestaltungsformen - wie die der modularen Bauweise, der Plattformbauweise und der Baureihenbauweise - annehmen. [1,3] Mit dem Ansatz der Produktgenerationsentwicklung lässt sich die Baukastenentwicklung als kontinuierliche Aktivität im Produktentstehungsprozess nicht nur verstehen, sondern auch beschreiben. Entsprechend kann die Entwicklung einer neuen Produktvariante eines Baukastens wie folgt beschrieben werden: Beispielsweise wird ein Teil der bereits vorhandenen Module direkt übernommen (Übernahmevariation), während der andere Teil sich durch Gestalt- oder Prinzipvariation (Aktivität Gestaltvariation und Aktivität Prinzipvariation) vor der Integration in eine neue Produktvariante verändern lässt [8]. Dass mit dem Abschluss der Konstruktion Herstell-, Betriebs- und Entsorgungskosten weitgehend fixiert sind – obwohl diese erst später im Produktlebenszyklus anfallen – zeigt die Bedeutung des Controllings in der Entwicklung. Hierfür steht dem Anwender eine Vielzahl an Methoden und Prozessen zur Bewertung zur Verfügung. Eine Übersicht findet sich dabei in der Fachliteratur [4,9]. Im Kontext der Bewertung eines Produktes hinsichtlich der Rentabilität haben sich unter anderem die Deckungsbeitragsrechnung und Prozesskostenrechnung etabliert, die ebenfalls in der Fachliteratur detailliert beschreiben werden [4,10].

3 Methodik

Das Vorgehen wird von der „DRM – Design Research Methodology“ abgeleitet [11]. Die Methodik stellt dabei ein „Framework“, bestehend aus vier Aktivitäten, zur Verfügung mit dem Ziel, eine systematische und wissenschaftliche Ausarbeitung zu fördern. In Phase 1 „Klärung des Forschungsbedarfs“ liegt der Fokus auf der Analyse der Ist-Situation und der gleichzeitigen Präzisierung des angestrebten Untersuchungsziels. In Phase 2 „Deskriptive Studie I“ wird die Fragestellung durch eine praxisbezogene Studie konkretisiert. In Phase 3 „Präskriptive Studie“ werden die bisherigen Erkenntnisse konzentriert, um daraus mögliche Szenarien und Untersuchungsergebnisse abzuleiten, anhand derer die Untersuchungsziele erreicht werden können. Diese werden in Phase 4, „Deskriptive Studie II“ evaluiert - in dieser Arbeit mit der Methode „Soundingboard“. Dabei präsentiert ein unabhängiger Moderator zunächst die zu evaluierenden Untersuchungsergebnisse einzeln vor einem Expertengremium. Diese dürfen hierzu Verständnisfragen stellen, Diskussionen sind jedoch zunächst nicht erlaubt. Im zweiten Schritt bewerten die Experten die Aussagen einzeln, wobei grüne (Zustimmung), gelbe (teilweise Zustimmung) und rote (keine Zustimmung) Klebpunkte zur Verfügung stehen. Nach Abschluss der Bewertung können die Teilnehmer dann in einem kurzen Statement zur jeweiligen Aussage ihre Meinung äußern. Abschließend wird in einer offenen Diskussionsrunde allgemein über die zu evaluierenden Aussagen und Ergebnisse diskutiert.

4 Untersuchung und Ergebnisse

4.1 Klärung des Forschungsbedarfs

Insgesamt betrachtet folgt die Entwicklung und Einführung einer Baukastensystematik für Unternehmen keinem Selbstzweck, sondern dient vielmehr dazu, eine rentable Produktentwicklung zu ermöglichen und ein gleichfalls rentables Produktportfolio anbieten zu können. Ziel ist die interne Variantenvielfalt innerhalb eines Unternehmens zu reduzieren und die externe Vielfalt zu erhalten. Um die Wirtschaftlichkeit eines Baukastens entsprechend seiner Besonderheit – Baukastenentwicklung statt Einzelproduktentwicklung – bewerten zu können, ist daher eine Methodik notwendig, die eben diese ausreichend berücksichtigt. Im Folgenden wird daher bei der Erarbeitung der Systematik insbesondere die „Rentabilitätsbewertung“ beispielhaft betrachtet, wobei sich die Systematik thematisch je nach Fragestellungen anpassen lässt.

4.2 Deskriptive Studie I: Analyse der Ist-Situation

Bei der analytischen Betrachtung der Einführung einer Baukastensystematik beim Werkzeugmaschinenhersteller TRUMPF konnten vielschichtige Herausforderungen identifiziert werden. Eine der zentralen Erkenntnisse ist, dass – insbesondere im Kontext der Betrachtung von Rentabilität – bisher etablierte Strukturen und Prozesse nur bedingt an die Besonderheiten der Baukastenentwicklung angepasst werden können. Dies resultiert vorrangig aus vorhandenen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systemen und Systemebenen innerhalb einer oder mehrerer Produktgenerationen, sowie der damit einhergehenden Komplexität. Der vergleichsweise lange Generationslebenszyklus eines Baukastens führt darüber hinaus dazu, dass die Planungen zur Ausgestaltung und zum Umfang des Baukastens von hoher Unsicherheit geprägt sind. Nicht zuletzt ist dabei der zu betrachtende Zeitraum nur unzureichend definiert. Diese Eigenschaften bringen bisher etablierte Methoden und Tools an ihre Grenzen, da in Folge der Unsicherheit und Unbekanntheit von Parametern nur wenig belastbare Ergebnisse generiert werden können. Die hieraus resultierende unzureichende Belastbarkeit in Entscheidungssituationen ist ein weiterer kritischer Faktor. Eine adäquate Berücksichtigung aller Kosten insbesondere des initialen Mehraufwandes bei der Baukastenentwicklung in einer Bewertungssystematik sind dabei kaum (Deckungsbeitragsrechnung), oder nur mit sehr hohem, nicht rentablem Aufwand (Prozesskostenrechnung) realisierbar. Als Ergebnis der analytischen Betrachtung steht daher der Bedarf an einer Bewertungssystematik, die den genannten Herausforderungen gerecht wird und dem Baukasten entsprechend eine Bewertung auf verschiedenen Systemebenen ermöglicht. Ein Ansatz wird im Folgenden vorgestellt.

4.3 Präskriptive Studie: Bewertungssystematik

Die erarbeitete Systematik zur Bewertung wird „Status Board x“ (SBx) genannt, wobei das „x“ für die jeweils im Fokus befindliche Fragestellung steht – so bedeutet z. B. SBR „Status Board Rentabilität“. Die Systematik unterliegt dabei dem Anspruch, den vorrangig genannten Anforderungen gerecht zu werden und diese bei einer Bewertung zu berücksichtigen. Ihre grundlegenden Daten bezieht die Systematik aus allen am Baukasten beteiligten Bereichen eines Unternehmens. Dabei lässt sie sich an die Strukturen eines Unternehmens anpassen und ermöglicht so, die individuellen Aspekte eines Baukastens zu bewerten. Begünstigt wird dies durch einen variablen Aufbau des

SBx entsprechend den gestellten Anforderungen und Fragestellungen. Die Systematik verfolgt dabei den Ansatz, auf aussagekräftigen Daten, Informationen und Kennzahlen aufzubauen, die bereits zu einem überwiegenden Teil im Unternehmen vorhanden und etabliert sind. Dies soll die Akzeptanz der Systematik beim Anwender fördern, gleichzeitig aber auch das Erfahrungswissen, das bezüglich der erhobenen Kennzahlen besteht, nutzbar machen. Die aus den beteiligten Unternehmensbereichen ausgewählten repräsentativen Daten werden entsprechend ihrer Herkunft auf dem SBx angeordnet. Die einzelnen Daten und die jeweiligen Bereiche werden mit einer entsprechenden Bewertungssystematik (z.B. Farbampel) versehen, um bei der Interpretation etwaige Risikobereiche gezielt analysieren zu können. Ein möglicher Aufbau eines SBx ist in Bild 1 dargestellt.

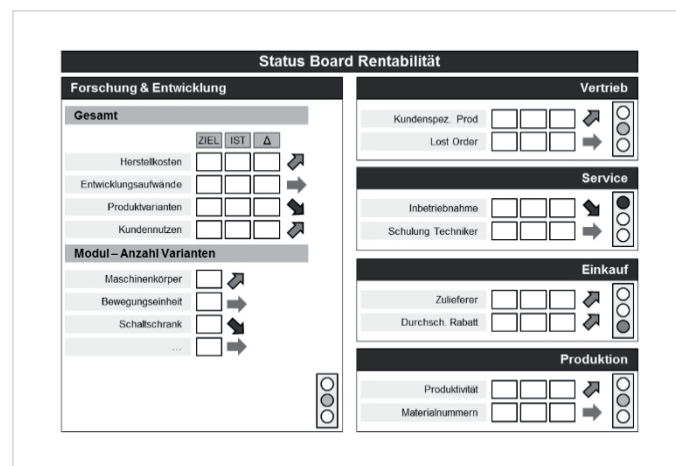


Bild 1: Systematik des SBx als "Status Board Rentabilität"

Mit Hilfe der Systematik des SBx ist es möglich, alle die beteiligten Bereiche, die bei einer Bewertung berücksichtigt werden müssen, auf einer Seite zusammenfassend darzustellen. Dabei lassen sich die Bereiche im Umfang der Datenbereitstellung entsprechend ihrer Bedeutung variieren. Diese Variabilität ermöglicht es, etablierte Darstellungsformen und Kennzahlen zu integrieren und entsprechend dem zuvor definierten Bedarf, beispielsweise einer Rentabilitätsbewertung, in der Systematik darzustellen. Die für die Bewertung notwendigen Daten müssen hierfür bereichsspezifisch durch Verantwortliche selektiert werden, um eine präzise Bewertung zu ermöglichen. Für den Bereich Forschung und Entwicklung können beispielsweise Herstellkosten und Entwicklungskosten aufgeführt werden. Darüber hinaus lassen sich die erhobenen Daten je nach Fragestellung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen - entsprechend der Systemtheorie - anpassen und

darstellen. Bereichsübergreifende Abhängigkeiten und Wechselwirkungen, auch über verschiedene Produktgenerationen hinweg, sowie Auswirkungen von Entscheidungen bezüglich der jeweiligen betrachteten Ebene können so übersichtlich dargestellt werden.

4.4 Deskriptive Studie II: Evaluation

Neben der praxisnahen Evaluierung des Ansatzes durch die Implementierung beim Werkzeugmaschinenhersteller TRUMPF wurde der Ansatz im Rahmen eines „Soundingboard“ mit Experten (n=11) der Baukastenentwicklung aus unterschiedlichen Firmen (m=6) evaluiert. Hierbei ergab die Evaluation, dass es aus Sicht der Experten nicht sinnvoll ist, ein gänzlich neues Bewertungstool einzuführen. Vielmehr ist es notwendig, auf vorhandenen Informationen und Datenerhebungsprozessen aufzubauen, um bereits existierendes Wissen bei der Interpretation der Daten nutzen zu können. Darüber hinaus müssen geeignete Stakeholder zur Bewertung des Baukastens definiert werden. Diese Einschätzung deckt sich mit den Erfahrungen beim Werkzeugmaschinenhersteller. Als Herausforderung wird angeführt, dass bei der Bewertung von Baukästen mit Hilfe des SBx die Datengrundlage teilweise auf Prognosen und Erfahrungswerten beruht und somit naturgemäß eine entsprechende Unsicherheit aufweist. Gerade an dieser Stelle ist daher das Erfahrungswissen bezüglich der erhobenen Daten von Bedeutung, um auf Subsystemebene Abschätzungen vorzunehmen, die auf Supersystemebene aggregiert werden können. Mit dem Bewusstsein einer gewissen Unsicherheit lassen sich so dennoch Informationen aus dem SBx ableiten und entsprechende Abschätzungen vornehmen. Auch hier entsteht im zeitlichen Verlauf Erfahrungswissen, das bei der Interpretation genutzt werden kann. Entscheidend für eine Bewertung mit Hilfe der Systematik des SBx ist nach Ansicht der Experten neben der Qualität der Datengrundlage auch die Kompetenz des Anwenders, um die bereitgestellten Daten korrekt interpretieren und gegebenenfalls entsprechende Maßnahmen ableiten zu können. Gerade die Datenherkunft, der Zeitpunkt der Datenerhebung, die Zusammenhänge und mögliche Wechselwirkungen der Daten, auch über Produktgenerationen hinweg, müssen dem Anwender bekannt und von ihm vor allem verstanden sein. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der einhergehenden Komplexität eines Baukastens, da hier die Systematik des SBx durch seine strukturierte Darstellung der Informationen den Anwender bei der Interpretation der Daten unterstützen und Hinweise auf bestimmte Fragestellungen geben kann.

5 Diskussion und Ausblick

Die Systematik des „Status Board x“ vereint aus allen an der Umsetzung der Baukastensystematik beteiligten Unternehmensbereichen Daten und Kennzahlen, die hinsichtlich des Baukastens und des jeweiligen Bereichs aussagekräftig sind. Dabei werden diese zu definierten Zeitpunkten erhoben und in entscheidungsgebenden Gremien als Grundlage genutzt, wobei sich die erhobenen Daten je nach Fragestellung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen entsprechend der Systemtheorie darstellen lassen. Bereichsübergreifende Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sowie Auswirkungen von Entscheidungen bezüglich der jeweiligen betrachteten Ebene können so übersichtlich dargestellt werden. Nach Einführung der Systematik bei TRUMPF stößt diese auf positive Resonanz durch die Anwender bei gleichzeitigen Hinweisen auf weiteres Optimierungspotential. Die ersten Arbeiten haben bestätigt, dass hier ein hoher Forschungs- und Handlungsbedarf besteht, weshalb in einem umfangreichen dreijährigen Forschungsvorhaben an einem ganzheitlichen methodischen Ansatz für die Einführung einer Baukastensystematik geforscht wird, der dessen Entwicklung als kontinuierliche Aktivität im Produktentstehungsprozess versteht und gleichzeitig die Einzigartigkeit von Entwicklungsprozessen im Allgemeinen berücksichtigt.

Literatur

- [1] Albers et al.: Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies. CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation, 2015
- [2] Bonvoisin et al.: *A systematic literature review on modular product design*. Journal of Engineering Design, 2016. - DOI: 10.1080/09544828.2016.1166482
- [3] Bursac: Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. Karlsruhe: IPEK, Institut für Produktentwicklung, 2016. – DOI 10.5445/IR/1000054484
- [4] Horváth, *Controlling*; 12. Aufl. München: Vahlen, 2011. – ISBN: 978-3-800-63878-9
- [5] Jiao et al.: Product family design and platform-based product development. A state-of-the-art review. Journal of Intelligent Manufacturing, 2007. – DOI 10.1007/s10845-007-0003-2
- [6] Ropohl: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik; Univ.-Verl.. Karlsruhe, 2009.
- [7] Albers et al.: Uniqueness and the multiple Fractal Character of Product Engineering Processes. In: Modelling and Management of Engineering Processes. Springer-Verlag London, 2010
- [8] Albers et al.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderung aus seiner entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015

- [9] Ehrlenspiel: Kostengünstig entwickeln und konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung; 7. Aufl. Berlin, 2014. – ISBN: 978-3-642-41958-4
- [10] Brecht: Controlling für Führungskräfte. Wiesbaden: Springer, 2012. – ISBN 978-3-8349-3429-1
- [11] Blessing, Chakrabarti: *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London, 2009

Datenbankbasierte Kompatibilitätsbewertung technologieintegrierender Werkzeugmaschinen

**Alexander Schmid, Georg Jacobs, Manuel Löwer, Tim Katzwinkel, Walter Schmidt,
Justus Siebrecht**

Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, RWTH Aachen

Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen

Email: schmid@ikt.rwth-aachen.de; Internet: <http://ikt.rwth-aachen.de/>

Inhalt: Die Entwicklung technologieintegrierender Werkzeugmaschinen erfordert eine Strukturierung und Systematisierung des Produktentstehungsprozesses, um neuartige synergetische Fertigungsverfahrenskombinationen in einem Maschinensystem zu erschließen. Ein Lösungsansatz, der kombinatorischen Vielfalt zu begegnen, liegt in der Anwendung einer relationalen Datenbank, die Experten- bzw. Produktwissen komprimiert bereitstellt. Eine Bewertung bzw. eine für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete Auswahl erfolgt auf Basis der technologischen Verträglichkeit und in weiteren Evaluationsschritten durch die Einbeziehung zusätzlicher ökonomischer und technischer Parameter. Eine Validierung des relationalen Datenbanksystems erfolgt basierend auf einer retrospektiven Analyse eines Multi-Technologie-Metallbearbeitungszentrums sowie eines Inkrementellen Blechbearbeitungszentrums.

Abstract: A systematic development and design process for Multi-Technology-Machine-Tools forms the basis to open up novel synergetic process combinations. One possible approach to meet the combinatorial diversity is to apply a relational database including current expertise and product know-how. The evaluation is currently depending on technological compatibility and should in further steps be extended by economic aspects to guarantee a holistic approach. In a retrospective analysis the developed database is validated by a Multi-Technology-Machining-Centre and an Integrative-Sheet-Metal-Processing-Centre.

Stichwörter: Relationale Datenbank, technologieintegrierende Werkzeugmaschinen, technologische Kompatibilitätsbetrachtung

Keywords: Relational database, technology integrating machine tools, technological compatibility evaluation

1 Einleitung und Motivation

Die Produktionswirtschaft unterliegt stark dem Wandel der Marktsituation und verlangt immer mehr nach kundenindividueller Fertigung sowie variantenreicher und flexibler Produktion über den gesamten Lebenszyklus [1], [2]. Die Ursachen sind vielfältig, unter anderem sind die Heterogenität derzeitiger Kundenbedürfnisse, das Verlangen nach weiteren Funktionalitäten, unterschiedliche Marktsegmente sowie regionale

Abhängigkeiten und gesetzliche Vorschriften dafür verantwortlich [3]. Flexibilität und Veränderbarkeit stellen wesentliche Charakteristika dar, um Änderungen im Betriebsumfeld zu adressieren [4], [5].

Technologieintegrierende Werkzeugmaschinen, sogenannte Multi-Technologie-Plattformen (MTP), vereinen komplementäre Fertigungstechnologien in einem Maschinensystem. MTPs bergen in Bezug auf die Flexibilität, und durch die Erzielung höherer Fertigungsgenauigkeiten aufgrund der Mehrfachbearbeitung in einer Aufspannung, erhebliche Potentiale gegenüber konventionellen Produktionssystemen [6]. Eine wirtschaftliche Nutzung beschränkt sich jedoch auf Kleinserien bis hin zu Losgröße eins [7]. Dennoch bleiben Synergie- bzw. Substitutionspotentiale bisher aus Gründen der fehlenden ganzheitlichen Betrachtung des Lösungsfeldes existierender Fertigungsverfahren unerschlossen. Die frühzeitige Systematisierung des Entwicklungsprozesses unter Nutzung konstruktionsmethodischer Ansätze ermöglicht die Identifizierung weiterer Potentiale [8]. Ein Ansatz umfasst die Analyse, Kategorisierung und Gegenüberstellung der Technologie- und Maschinenmerkmale sowie der beabsichtigten Produktanforderungen. Ein bereits bestehender Ansatzpunkt die technologische Verträglichkeit unterschiedlicher Fertigungsverfahren systematisch und frühzeitig im Produktentstehungsprozess zu bewerten, wurde bereits in [9] dargestellt. Diese Parameter werden in eine Datenbank in Microsoft Access überführt und zur Sicherstellung der Bedienbarkeit bzw. Benutzerfreundlichkeit um ein graphical-user-interface erweitert. Darauf aufbauend werden neben technologischen Aspekten zukünftig auch ökonomische Rahmenbedingungen einbezogen, um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen.

1.1 Systematische Aufarbeitung

Zunächst werden essentielle Einflussfaktoren auf den Entwicklungsprozess von MTP abstrahiert und einer umfassenden Untersuchung unterzogen. Verträglichkeiten und Kombinationen der Fertigungsverfahren in parallelen und sequentiellen Prozessen werden analysiert und etwaige Inkompatibilitäten, die durch die Verknüpfung der Einzeltechnologien auftreten, prinzipiell dargestellt. Einschränkend ist zu erwähnen, dass die Anwendung lediglich einen Einstieg in die Thematik gewährt, bei potentiellen Kombinationen ist eine individuelle und allumfassende Analyse vorzunehmen.

1.2 Demonstratoren

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ wurden unterschiedliche Demonstratoren für den Bereich C2 „Integrative Technologies“ zu Forschungs- und Validierungszwecken entwickelt und entworfen. In Bild 1 werden zwei der hybriden Werkzeugmaschinenkonzepte dargestellt, die später zur Verifikation des Datenbank-Demonstrators herangezogen werden.

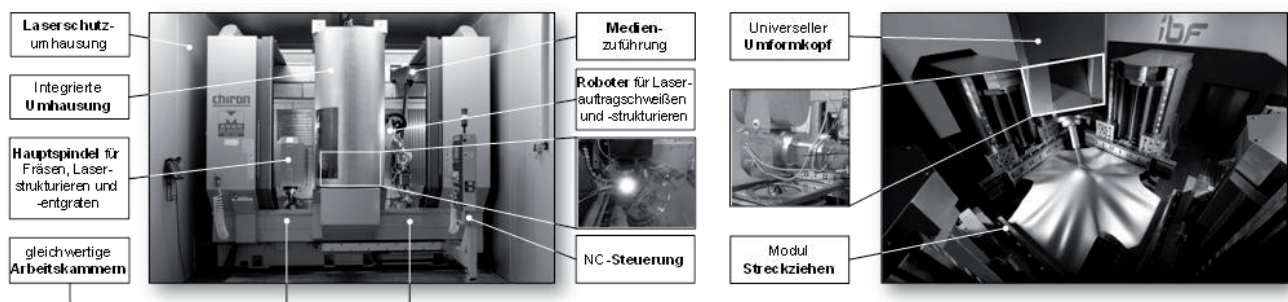


Bild 1: Multi-Technologie-Metallbearbeitungszentrum (links) und Inkrementelles Blechbearbeitungszentrum (rechts) [6]

Das Multi-Technologie-Metallbearbeitungszentrum (Bild 1 links) verfügt über zwei gleichwertige Arbeitskammern, die von den Einheiten *Hauptspindel* und *Roboter* in gleicher Weise erreicht werden können. Die Hauptspindel verfügt neben der Möglichkeit der spanenden Bearbeitung über eine Laserprozesseinheit mit den Technologien Laserstrukturieren sowie –entgraten. Zusätzlich zum Fräszentrum in Fahrständerbauweise wurde ein Industrieroboter implementiert, der die Fertigungsverfahren drahtbasiertes Laserauftragschweißen und Laserstrukturieren ermöglicht [6]. Das Inkrementelle Blechbearbeitungszentrum (Bild rechts) kombiniert Streckziehen mit inkrementeller Blechumformung. Ein universeller Umformkopf mit halbkugelförmiger Spitze ist für die Formgebung verantwortlich. Neben der genannten Kombination verbessert eine Erwärmung der Umformzone mittels Lasereintrag die Umformbarkeit [6].

2 Kompatibilität

Die Entwicklung von Multi-Technologie-Plattformen mit einer oder mehreren Arbeitskammern bedarf einer systematischen und dezidierten Aufbereitung der möglichen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen, um Entwicklungszyklen zu verringern und

Entwicklungskosten einzusparen [10]. Bestehende Entwicklungsmethoden erfordern folgerichtig eine Adaption an die neuartigen Maschinenkonzepte. Nachfolgend werden relevante Einflussfaktoren auf den Entwicklungsprozess von MTPs aus technologischer Sicht, die die Kompatibilität und somit die Komplexität beeinflussen, näher beleuchtet und diskutiert. Der Fokus liegt auf den Wechselwirkungen der Einzeltechnologien und der kombinatorischen Vielfalt. Die Gesamtkomplexität im Entwicklungsprozess ergibt sich aus der Kombination der nachfolgend aufgeführten Einzelkomplexitäten. Für einen näheren Einblick, im Hinblick auf die kombinatorische Anwendung, sei an dieser Stelle auf [11] verwiesen.

2.1 Einflussfaktor Technologische Verträglichkeit

Technologische Verträglich- bzw. Unverträglichkeiten spielen eine entscheidende Rolle bei der funktionalen Analyse und Konzipierung von MTPs und haben direkte Auswirkungen auf den Entwicklungsaufwand und deren Kosten [12]. Die Herangehensweise ist ähnlich zum Unabhängigkeitsaxiom in *Axiomatic Design*, das die Unabhängigkeit der funktionalen Anforderungen nach Zuordnung von Designparametern als Ideal verfolgt bzw. eine Reduzierung der Interaktionsbeziehungen fordert [13]. Bild 2 unterscheidet prinzipiell zwischen komplementären sowie konträren fertigungsspezifischen Charakteristika.

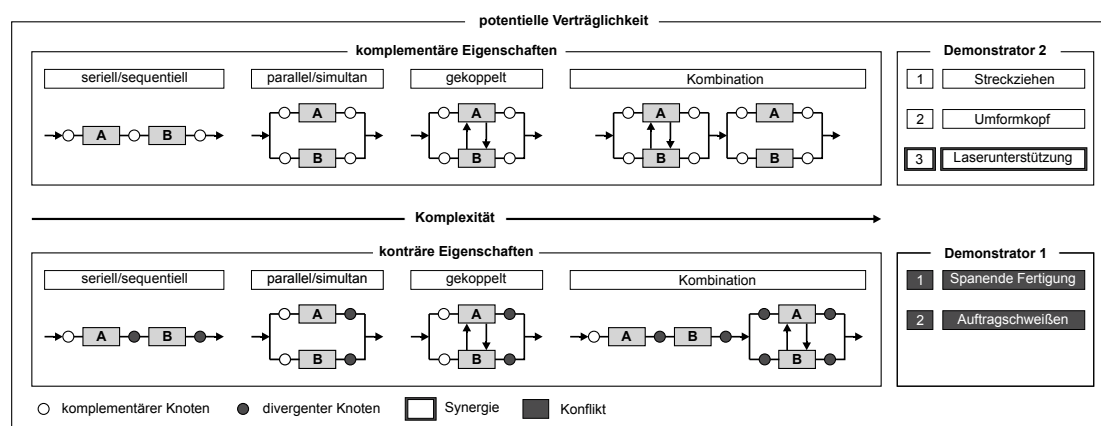


Bild 2: Verträglichkeitsbetrachtung zweier Fertigungsverfahren A und B

Komplementäre Eigenschaften sind Eigenschaften, die sich gegenseitig bei der Ausübung aus Fertigungssicht begünstigen (komplementäre Knoten). Als Beispiel kann die lokale Erwärmung der Umformzone des hybriden Blechbearbeitungszentrums aus Bild angeführt werden. Demgegenüber stehen konträre Eigenschaften (divergente Knoten), die die

Entwicklung bzw. den Produktionsprozess hemmen oder im äußersten Fall vor dem Hintergrund des Entwicklungsaufwandes auszuschließen sind. Beispielhaft werden an dieser Stelle die Wechselwirkungen des Multi-Technologie-Metallbearbeitungszentrums erwähnt, die sich unter anderem durch die thermischen Störgrößen, den Späne- und Kühlschmierstoffeintrag im Arbeitsraum und auf dem Werkstück sowie die Kollisionsgefahr bei Simultanbearbeitung bemerkbar machen. Infolgedessen werden zusätzliche Funktionalitäten zur Prozessvorbereitung bzw. Sicherstellung der Funktionserfüllung erforderlich, die den Grad der Komplexität weiter ansteigen lassen.

2.2 Einflussfaktor Bearbeitungsreihenfolge

Die potentielle Bearbeitungssequenz bedarf nicht minder einer genaueren Untersuchung. Die Sichtweise variiert hierbei zwischen maschinen- und produktseitigen Eigenschaften, ähnlich zu Abschnitt 2.1. Bild 3 stellt die Sachverhalte schematisch gegenüber. Ein theoretisches Maximum in puncto Produktivität ist von Produkt- sowie Maschinenseite sowohl bei einer simultanen als auch gekoppelten Bearbeitung erreicht, ohne das Auftreten gegenseitiger Wechselwirkungen. In Realität treten jedoch Korrelationen zwischen den involvierten Einzelprozessen auf. Produktseitig entspricht eine serielle Bearbeitung der klassischen Fertigungsweise in unterschiedlichen Stationen. Eine simultane Bearbeitung produktseitig ist vor dem Hintergrund auftretender Beeinflussungen nur bedingt realisierbar. Als mögliches Beispiel sei ein spanender Prozess mit anschließendem Entgraten zu nennen. In Abhängigkeit der zu kombinierenden Verfahren ist die technologische Wechselwirkung unterstützend oder aber hemmend (hybrider Knoten). Mehrstellige konjunktive Verknüpfungen lassen sich eindeutig auf zweistellige konjunktive Verknüpfungen zurückführen [14]. Folglich wurden lediglich zwei Verfahren A und B einer fundierten Untersuchung unterzogen. Ferner wurde zwischen der Verwendung von einer bzw. zwei Arbeitskammern unterschieden.

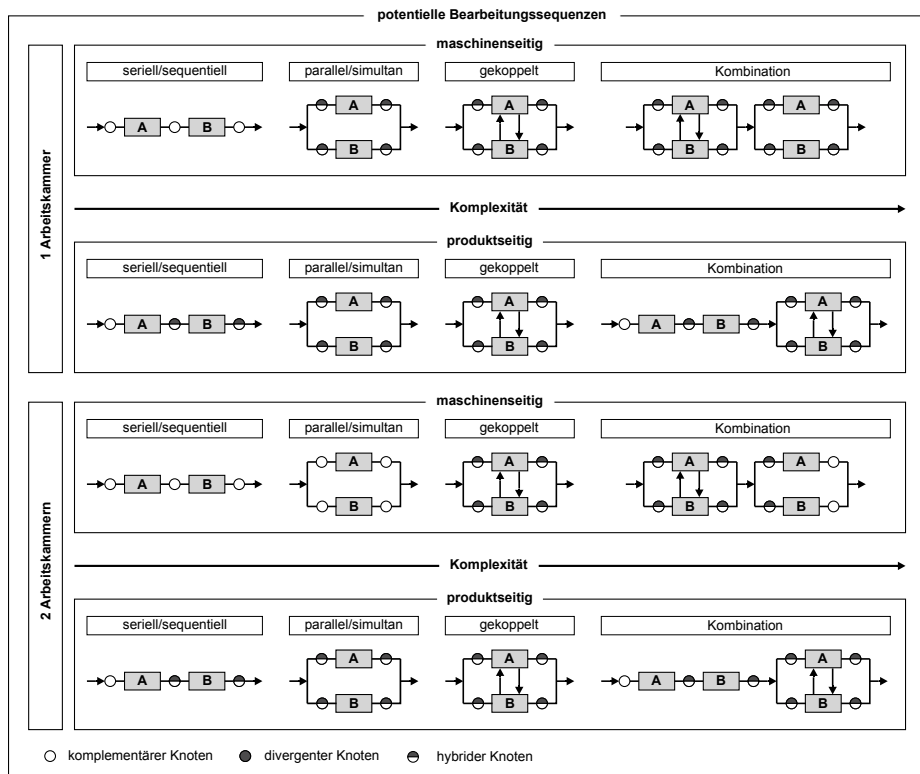


Bild 3: Betrachtung der Bearbeitungssequenz zweier Fertigungsverfahren A und B

2.3 Einflussfaktor Verfahrenszahl respektive Bearbeitungsschritte

Neben der spannenden Bearbeitung sowie der Möglichkeit des Roboters Handlings-Operationen auszuführen, weist das Multi-Technologie-Metallbearbeitungszentrum zwei Laserprozesseinheiten mit den Technologien Laserauftragschweißen, Laserstrukturieren, Laserhärten und Laserentgraten auf. In Bild 4 werden folglich bis zu sechs beteiligte Fertigungstechnologien A-F berücksichtigt.

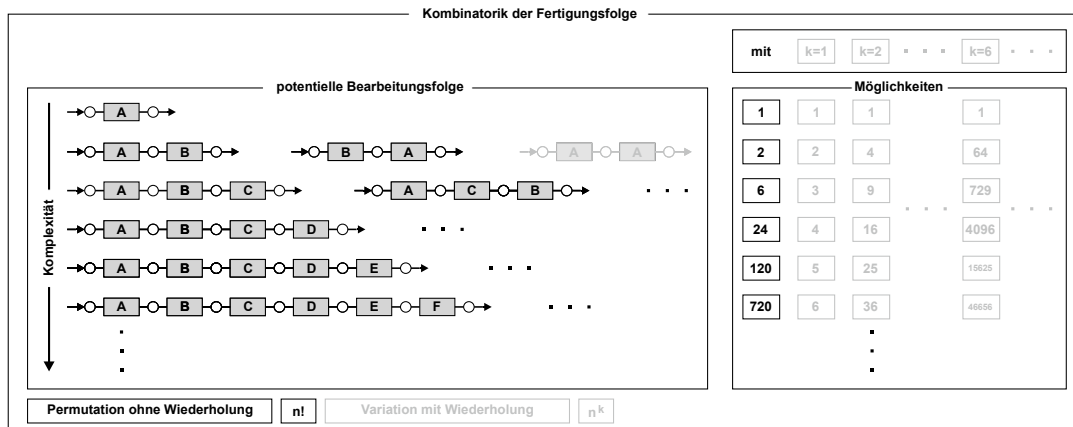


Bild 4: Reihenfolgeabhängiger Einfluss unterschiedlicher Verfahrensschritte auf die Komplexität

Weiterhin wird zwischen der Möglichkeit einer wiederholten Anwendung derselben Technologie differenziert. Die Variable n stellt die Anzahl der unterschiedlichen Technologien, k die wiederholte Anwendung derselben Technologie dar. In Abhängigkeit der Bearbeitungsschritte, die für die Fertigstellung des jeweiligen Produktes nötig sind, steigen die kombinatorischen Möglichkeiten exponentiell an. Die Störgrößen der jeweiligen Einzeltechnologien bedingen je nach Bearbeitungsreihenfolge zusätzliche Prozessvorbereitung wie in Abschnitt 2.1 bereits beschrieben, oder aber die Einhaltung entsprechender Rahmenbedingungen, beispielweise die Berücksichtigung ausreichender Abkühlzeiten.

2.4 Weitere Einflussfaktoren

Die Beschaffenheit (u.a. Geometrie, Material und potentieller Nachbearbeitungsbedarf) des zu realisierenden Werkstückes korreliert stark mit den dafür notwendigen Prozessschritten zur Fertigung aus Abschnitt 2.3. Die Anzahl der Arbeitskammern und die damit verbundenen kinematischen Voraussetzungen, beide Arbeitsbereiche gleichermaßen zu bedienen sowie die geometrische Anordnung der Fertigungstechnologien lässt die Komplexität weiter steigen. Ökonomische Aspekte wie etwa Investitions- und Entwicklungskosten, die stark von der Komplexität bzw. der Verträglichkeit der unterschiedlichen Kombinationen abhängen, Losgrößeneffekte, Produktivität und Prozesszeiten sollten fortan Berücksichtigung finden.

3 Relationale Datenbank

Der potentielle Lösungsraum, der durch die Verfahrenskombinationen aufgespannt wird, wie in Abschnitt 2 angesprochen, bedingt eine systematische Einschränkung. Erklärtes Ziel besteht darin, die Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten und demnach die Komplexität im Entwicklungsprozess beherrschbar zu machen. Die Aufgabenstellung wird durch die Zuweisung von Attributen, die sowohl die Werkstückeigenschaften als auch die verfahrensspezifischen Charakteristika widerspiegeln, weiter erschwert. Eine Unterscheidung wird hinsichtlich maschinen- sowie produktseitiger Perspektiven vorgenommen.

3.1 Aufbau des Datenbanksystems

Die Bestandteile und Relationen der Datenbankanwendung werden in Bild 5 schematisch dargestellt. Kernstück der Anwendung stellt die Merkmalmatrix dar, aufbauend auf DIN 8580 [15]. Die Quellen deren Inhalte als Eingang der Merkmalmatrix dienen, können [9] entnommen werden. Ein Formular wurde in die Anwendung implementiert, um die Bedienbarkeit sicherzustellen. Die technologische Kompatibilitätsprüfung erfolgt beziehungsweise auf Abschnitt 2.1 in Abhängigkeit der zu kombinierenden Verfahren. Liegt die gleiche Konfiguration an Merkmalswerten vor, geht dies in die Bewertung ein, andernfalls wird dies nicht in der Gesamtbewertung berücksichtigt. Ist bereits frühzeitig geklärt, dass sich bestimmte Technologien trotz der unterschiedlichen Charakteristika unterstützen sollen, kann dies in der Bewertung Berücksichtigung finden, wie etwa bei der Laserunterstützung. Die Skala reicht hierfür in fünf Schritten von *sehr gering* bis *sehr hoch*. Die Gesamtbewertung wird auf eins normiert, um die Vergleichbarkeit der Verfahrenskombinationen sicherzustellen.

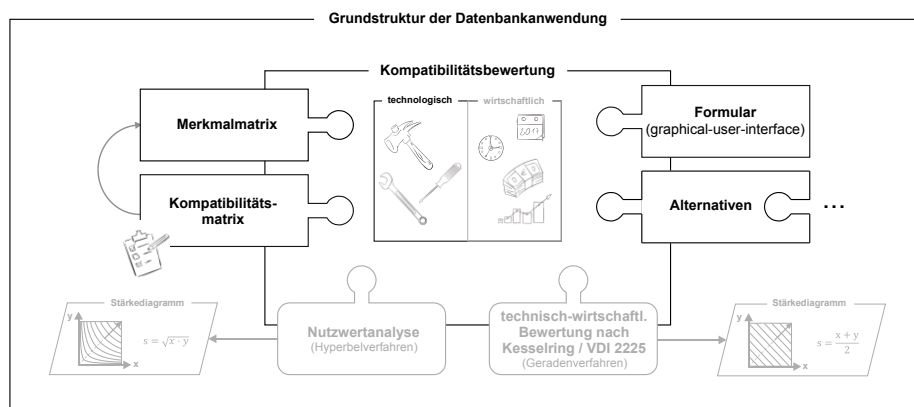


Bild 5: Modulbasierte Anwendung der Veträglichkeitsabfrage und –bewertung in Microsoft Access

Die technischen Parameter, die in der Merkmalmatrix hinterlegt sind, werden durch folgende Merkmale widerspiegelt:

- *Störgrößen* (statisch, dynamisch, thermisch und Werkzeugverschleiß), die während der Fertigung auftreten können und weitere Prozesse beeinträchtigen
- zu bearbeitende *Werkstoffe* (Metall, Kunststoff oder Keramik) und *IT-Genauigkeiten*
- benötigte *Hilfsmittel* (Kühlschmierstoff oder Schutzgas)
- *Energiearten* (elektrisch, hydraulisch oder pneumatisch)
- *kinematische Eigenschaften* (rotatorische oder translatorische Bewegung) sowie

- *Umweltkenngößen* wie Schallemission, Energieverbrauch und Materialausnutzung

Zwei unterschiedliche Sichtweisen werden dem Nutzer vorgeschlagen. Von Maschinenseite können zu kombinierende Verfahren auf Verträglichkeit geprüft oder aber geeignete Technologien für produktseitig bestehende Merkmale ermittelt werden. Bei konträren Charakteristika können tabellarisch alternative Technologien mit ähnlichen Eigenschaften ermittelt werden, die der Anwender in Betracht ziehen kann. Als Bewertung werden zukünftig sowohl ein Hyperbel- als auch ein Geradenverfahren angestrebt, um ebenfalls ökonomische Aspekte zu berücksichtigen, siehe Abschnitt 2.4. Abschließend werden beide Sichtweisen anhand der in Bild eingeführten Demonstratoren verifiziert.

3.2 Verifikation anhand ausgewählter Demonstratoren

Das Eingabeformular ist in die Auswahl, die Gewichtung der Bewertungskriterien, die tabellarische Auflistung der geeigneten Verfahren sowie die technologische Gesamtbewertung gegliedert. Das Multi-Technologie-Metallbearbeitungszentrum wird in Bild 6 aufgegriffen, um die Verträglichkeit zweier Technologien zu vergleichen.

Technologische Kompatibilitätsbewertung technologieintegrierender Werkzeugmaschinen

Wählen Sie bis zu vier Fertigungstechnologien aus, die in einer Multi-Technologie-Plattform kombiniert werden sollen.

Fertigungstechnologien (FT)

1 Fräsen

2 Schmelzverbindungsschweißen

3

4

Komplementäre FT

☐ 1 und 2 ☐ 2 und 3

☐ 1 und 3 ☐ 2 und 4

☐ 1 und 4 ☐ 3 und 4

Technologisch

Statische Störgrößen

Thermische Störgröße

Dynamische Störgröße

Werkzeugverschleiß

Form-/Maßgenauigkeit

Gewichtung

gering

mittel

mittel

gering

sehr hoch

Bewerten

Merkmalsmatrix

Gruppe	Fertigungsverfahren	statische SG	thermische SG	dynamische SG	Werkzeugverschleiß	Metall als WS
3.2.3	Fräsen	hoch	hoch	hoch	hoch	ja
4.6.2	Schmelzverbindungsschweißen	hoch	hoch	gering	hoch	ja
*						

Datensatz: 1 von 2 | Kein Filter | Suchen

Normierte Wertigkeit: 0,88

Legende: 1 sehr niedrig, 2 niedrig, 3 mittel, 4 hoch, 5 sehr hoch

Bild 6: Ausschnitt des Eingabeformulars am Beispiel des Multi-Technologie-Metallbearbeitungszentrums

Derzeit können bis zu vier Fertigungstechnologien einer genaueren Untersuchung auf Verträglichkeit unterzogen werden. Die betrachteten Verfahren begünstigen sich nicht, deshalb wird dies unter *komplementäre Fertigungstechnologien* nicht berücksichtigt. Weiterhin lassen sich Änderungen der Gewichtung unmittelbar an der normierten Wertigkeit nachvollziehen. Speziell die thermischen Wechselwirkungen der Lasereinheit

sowie die dynamischen Beeinflussungen im Bearbeitungsprozess wirken sich negativ auf die Gesamtbewertung aus.

In Bild 7 wird die produktseitige Perspektive näher beleuchtet. Als Eingang können Produkteigenschaften gewählt werden, als Ausgang werden mögliche Fertigungstechnologien zur Verfügung gestellt, um dem Entwickler Alternativen aufzuzeigen und das Innovationspotential zu forcieren.

Verfahrensselektion

statische Störgrößen: Werkzeugverschleiß: IT Genauigkeit von: bis:

thermische Störgrößen: Metall als Werkstoff: Gemittelte Rauhtiefe Rz von: bis:

dynamische Störgrößen: Kunststoff als Werkstoff:

Fertigungsverfahren	IT Genauigkeit	Oberfläche Rz (µm)	statische SG	thermische SG	dynamische SG	Werkzeugverschleiß	Metall als WS
Scherschneiden	12	10	hoch	gering	gering	hoch	ja
Messerschneiden	12	10	hoch	gering	gering	hoch	ja
Beißschneiden	12	10	hoch	gering	gering	hoch	ja
*							

Datensatz: 1 von 3 |

Legende: 1 sehr niedrig, 2 niedrig, 3 mittel, 4 hoch, 5 sehr hoch

Bild 7: Ausschnitt des Eingabeformulars zur Verfahrensselektion

4 Fazit und Ausblick

Die Komplexität in der Entwicklungsphase von Multi-Technologie-Plattformen wird durch unterschiedliche Einflussfaktoren bestimmt. Mithilfe eines relationalen Datenbanksystems können Maschinen- und Produktmerkmale frühzeitig bereitgestellt und eine robuste Konzeptphase ermöglicht werden. Beide Sichtweisen produkt- sowie maschinenseitig werden adressiert, um die Entwicklung von MTP systematisch aufzuarbeiten.

Zukünftig sollen neben technischen auch ökonomische Aspekte Berücksichtigung finden und weitere technologische Parameter auf Basis der Datenbankanwendung einfließen. Die Erweiterung erfolgt analog zu Bild . Weiterhin ist eine gezielte Untersuchung der Subjektivität der Bewertung vorzunehmen, um dieser entgegenzuwirken. Die Erschließung neuartiger Verfahrenskombinationen wird ferner als Ziel angestrebt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der vorgestellten Arbeit im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“.

Literatur

- [1] Piller, Frank Thomas: Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006. – ISBN 978-3-8350-0355-2
- [2] ElMaraghy, Hoda; Schuh, Günther; ElMaraghy, Waguih; Piller, Frank Thomas; Schönselben, Paul; Tseng, Mitchell; Bernard, Alain: Product variety management. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2013.
- [3] ElMaraghy, Hoda; AlGeddawy, Tarek: Product Variety Management in Design and Manufacturing; Challenges and Strategies. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. – ISBN 978-3-642-23859-8
- [4] Gupta, Yash; Goyal, Sameer: Flexibility of manufacturing systems; Concepts and measurements. In: European Journal of Operational Research 43, 1989. p. 119-135.
- [5] Gustavsson, Sten-Olof: Flexibility and productivity in complex production processes. In: International Journal of Production Reserach, 1984. p. 801-808.
- [6] Brecher, Christian (Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin: Springer, 2011. – ISBN 978-3-642-20692-4
- [7] Tönissen, Stefan: Economic Efficiency of Manufacturing Technology Integration. Aachen: Apprimus, 2014.
- [8] Moriwaki, Toshimichi.: Multi-functional machine tool. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2008
- [9] Schmid, Alexander; Katzwinkel, Tim; Siebrecht, Justus; Feldhusen, Jörg: Anforderungsgerechte Gestaltung von Multi-Technologie-Plattformen. In: 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2015. p. 221-230.
- [10] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: Konstruktionslehre; Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-29568-3
- [11] Borowski, Karl-Heinz: Das Baukastensystem in der Technik. Berlin: Springer, 1961.
- [12] Schmid, Alexander; Katzwinkel, Tim; Schmidt, Walter; Siebrecht, Justus; Löwer, Manuel; Feldhusen, Jörg: Reconfigurability and modularization for integrated machine tools based on functional analysis: a systematic approach. In: 14th International Design Conference, 2016. p. 1367-1376.
- [13] Suh, Nam-pyo: The principles of design. New York: Oxford University Press, 1990.
- [14] Birkhofer, Herbert: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1980. ISBN – 3-18-147001-5
- [15] Norm DIN 8580. Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 2003.

Smart Engineering im Kontext von Industrie 4.0: Baukastensysteme für die erlebbare Absicherung von Montageanlagen

Simon Kind*, Konrad Exner*, Rainer Stark*,¹ Sebastian Neumeyer¹

*Technische Universität Berlin, Fakultät V

Lehrstuhl Industrielle Informationstechnik

Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Email: simon.kind@tu-berlin.de; Internet: <http://www.iit.tu-berlin.de>

¹Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Geschäftsfeld Virtuelle

Produktentstehung, Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Internet: <http://www.ipk.fraunhofer.de/vpe>

Inhalt: Die Vision der Vernetzung von Produktionsressourcen untereinander und mit intelligenten Produkten, der sogenannten „Cyber-Physische Systeme“ (CPS), soll einen hohen Mehrwert für die Industrie bieten. Die heute häufig mechanisch zentriert arbeitenden Anlagenbauer müssen hierfür in die Steuerungen der Anlagen zusätzliche Funktionen und Schnittstellen integrieren. Die dadurch steigende Komplexität des Steuerungsentwurfes sowie der Verhaltensmodellierung fordert von den Anlagenbauern einen Paradigmenwechsel im Entwicklungsvorgehen und bei den Absicherungsmethoden. Im Rahmen des Projektes VIB-SHP wurde die Methode der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) für die Absicherung einer Anlagensteuerung im Kontext Industrie 4.0 untersucht. Als Ergebnis wurde ein Baukasten entwickelt, der die Partialmodelle der unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen (M-CAD, E-CAD, SPS-Funktionsbausteine) sowie die steuerungstechnischen Verhaltensmodelle umfasst. Durch einen Abgleich der disziplinspezifischen Partialmodelle in einer PLM-Lösung wird die Konsistenz der Partialmodelle sichergestellt. Neben der Verkürzung des Entwicklungsprozesses wird auch die disziplinübergreifende Abstimmung der Entwicklungen erleichtert. Darüber hinaus können die Entwickler am funktionalen, virtuellen Prototypen die disziplinspezifischen Entwürfe erlebbar prüfen, frühzeitig die Anlage mit Kunden und zukünftigen Bedienern abstimmen und vor der Herstellung und dem Aufbau der Anlage Kundenwünsche berücksichtigen.

Abstract: The vision of interlinked, intelligent manufacturing systems is explored in research and industry. German mid-sized manufacturing system designers still follow a mechanic centered design. Due to increasing communication processes and additional interfaces of the manufacturing systems, the complexity in PLC-design and behavior modeling are raising and demand a change of existing design approaches and validation methods. Within the project VIB-SHP, virtual commissioning is explored for the usage of assembly system design. Therefore, a construction kit with discipline-specific models (M-CAD, E-CAD, PLC-modules) as well as behavior models covering the discipline specific designs is provided. With the help of a PLM-

Solution, the consistency of the discipline specific models is ensured. Besides an early PLC-test the design process can be shortened. Additionally, designers are enabled to validate their discipline specific designs, at the virtual manufacturing system prototype with all future functions, align the manufacturing system with the customer and future operators and consider changes of the customer before installation and commissioning.

Stichwörter: Smartes Engineering, CPPS, Industrie 4.0, Baukasten, Verhaltenssimulation,

Keywords: SMART Engineering, CPPS, Industrie 4.0, construction kit, behavior simulation

1 Einleitung

Der in Deutschland meist mittelständisch geprägte Anlagenbau steht vor der Herausforderung den durch Industrie 4.0 induzierten Wandel von Produktionsanlagen zu vernetzten, Cyber-physischen Systemen (CPS), die flexibel und autonom die Herstellung kleiner Losgrößen bis hin zu kundenindividueller Produkte ermöglichen sollen, zu gestalten.

Nach CyProS-Konsortium [1] werden CPS in der Produktion Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) benannt. Die in den Anlagen verbauten Komponenten werden durch eigene Steuerungen „intelligent“, vernetzten sich untereinander und werden somit zu „SMART Components“. Dabei wird die heute hierarchische Automatisierungspyramide sukzessive aufgelöst und Funktionen dezentralisiert [2]. Bedingt durch die Wandlung der Produktionsanlagen zu CPPS steigt jedoch die Komplexität in der Steuerungsentwicklung, die Kommunikation der Anlagen nimmt zu und bedarf neuer Technologien und Methoden für Entwicklung und Absicherung. Die heute meist mechanisch zentrierten Anlagenbauer arbeiten noch nach einem Entwicklungsprozess, welcher sequentiell die disziplinspezifischen Entwürfe von Mechanik, Elektrik und Software durchläuft und somit erst spät die Involvierung der Anlagenprogrammierer vorsieht [3]. Durch das sequentielle Vorgehen erfolgt eine Vereinigung der disziplinspezifischen Entwürfe erst beim Aufbau der Anlagen. Die Entwürfe können somit erst spät durch die Entwickler „erlebbar“ synchronisiert werden, wodurch identifizierte Änderungsbedarfe kostspielig integriert werden müssen. Bedingt durch die steigende Komplexität des Steuerungsentwurfs und der zunehmenden Funktionsumfänge steigt der Bedarf, die disziplinspezifische Entwicklung vorab an einem virtuellen Prototyp zu evaluieren und abzustimmen. Die bereits etablierten Methoden der mechatronischen Produktentwicklung [4] [5] wurden daher im BMBF geförderten Verbundvorhaben VIB-SHP (Virtuelle Inbetriebnahme mit Smart Hybrid Prototyping) auf

Ihre Eignung für den Anlagenbau untersucht und um virtuelle Techniken für die disziplinspezifische Abstimmung und Absicherung der Anlagensteuerungen ergänzt.

2 Lösungsansatz VIB-SHP

Im Projekt VIB-SHP wurde das Potential hinsichtlich des Einsatzes virtueller Techniken im Anlagenentstehungsprozess untersucht. Mittels Virtual Reality (VR) und Virtueller Inbetriebnahme (VIBN) sowie der Unterstützung eines Softwareframeworks [6] [7] können die disziplinspezifischen Entwürfe in einer immersiven Umgebung erprobt und diskutiert werden [8]. Da die mechanisch zentriert arbeitenden Anlagenbauer (noch) nicht über das notwendige Wissen für die Verhaltensmodellierung der Komponenten verfügen, wurde die Bereitstellung eines disziplinübergreifenden Baukastens mit Ergänzung um steuerungstechnische Verhaltensmodelle vorgeschlagen. Der Einsatz der genannten virtuellen Techniken und des Baukastens im Anlagenentstehungsprozess ist in Bild 1 dargestellt.

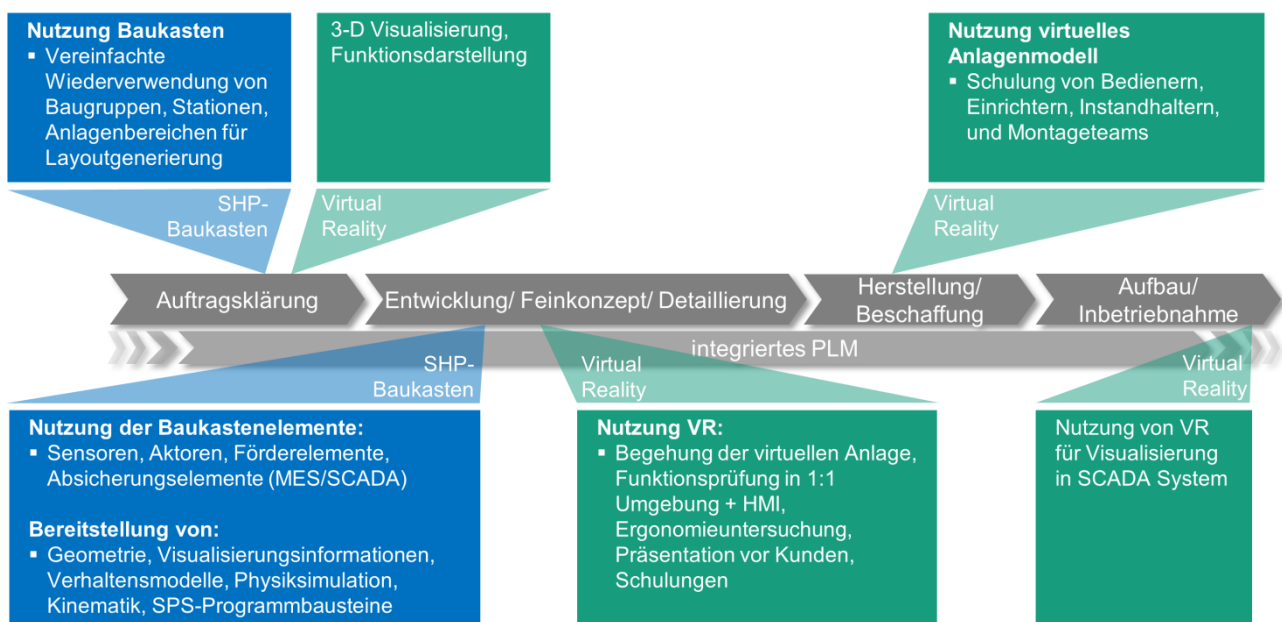


Bild 1: Einsatz virtueller Techniken im Anlagenentwicklungsprozess nach [7]

2.1 Lösungselement „SHP-Baukasten“

Für die Konzeptionierung des SHP-Baukastens dient die Untergliederung einzelner Komponenten (mit bzw. ohne eigene Steuerung) entsprechend der funktionalen Beschreibung in einzelne Funktionsgruppen. Diese stellen somit das kleinste Element innerhalb des entwickelten Baukastens dar. Jede Funktionsgruppe beinhaltet einen in sich

konsistent modellierten Satz an Partialmodellen, der sowohl die geometrische Darstellung einer Komponente, elektrisch projektierte Anschlüsse, Antriebe und Sensoren, ein Verhaltensmodell der Funktionsgruppe sowie die zugehörige Signalliste der Komponente beinhaltet. Ergänzend werden auch weitere Metadaten, wie beispielsweise Informationen über die vorliegende Kinematik oder eingesetzte Materialien, Shader und Texturen zur fotorealistischen Visualisierung in einer VR-Anwendung berücksichtigt. In einem zentralen Artikeldatenblatt lassen sich anschließend die Vollständigkeit und der Entwicklungsstatus einer jeden Funktionsgruppe nachvollziehen und nachverfolgen, dazu gehören:

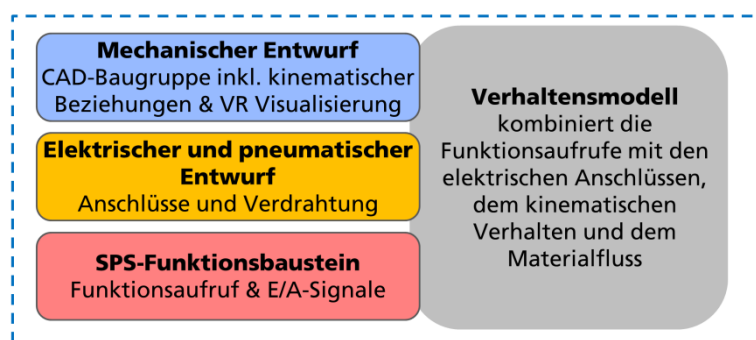


Bild 2: Disziplinübergreifende Bestandteile einer Funktionsgruppe im SHP-Baukasten

Zentrales Element jeder einzelnen modellierten Funktionsgruppe des Baukastens ist das Verhaltensmodell der Anlagenkomponente (Bild 2). Dieses stellt zusammen mit der Signalliste die Grundlage zur Verknüpfung der vorhandenen Partialmodelle dar. Zusätzlich zum steuerungstechnischen Verhalten wird auch das kinematische Verhalten einer virtualisierten Funktionsgruppe abgebildet und mit den relevanten Freiheitsgraden der CAD-Baugruppe bzw. der VR-Visualisierung verknüpft. Hierdurch lässt sich die virtuelle Komponente durch ein SPS-Projekt entsprechend der Schrittkette ansteuern und die resultierende zeitlich-räumliche Bewegung über die Verknüpfung der kinematischen Beziehungen und einer VR-Visualisierung immersiv und erlebbar darstellen. Eine Anlage bzw. „intelligente Komponente“ enthält mehrere Funktionsgruppen, zusätzlich einen Steuerungsentwurf mit einer Schrittkette, einen Schalt- und Stromlaufplan der verdrahteten Komponenten und alle CAD-Modelle und deren kinematischen Beziehungen. Für die Ablage der Partialmodelle der Entwicklungsdisziplinen in einer PLM-Lösung wurden zwei „Item-Typen“ definiert (Bild 3), um sowohl herkömmliche Funktionsgruppen als auch „intelligente“ Komponenten und Anlagen verwalten zu können. Die einzelnen Modelle der Funktionsgruppen werden dabei mittels der Signallisten auf Konsistenz

geprüft. Bei einer mechanischen Veränderung einer Komponente werden die verknüpften bzw. betroffenen Modelle identifiziert, um eine Prüfung bzw. Anpassung der Partialmodelle vornehmen zu können.

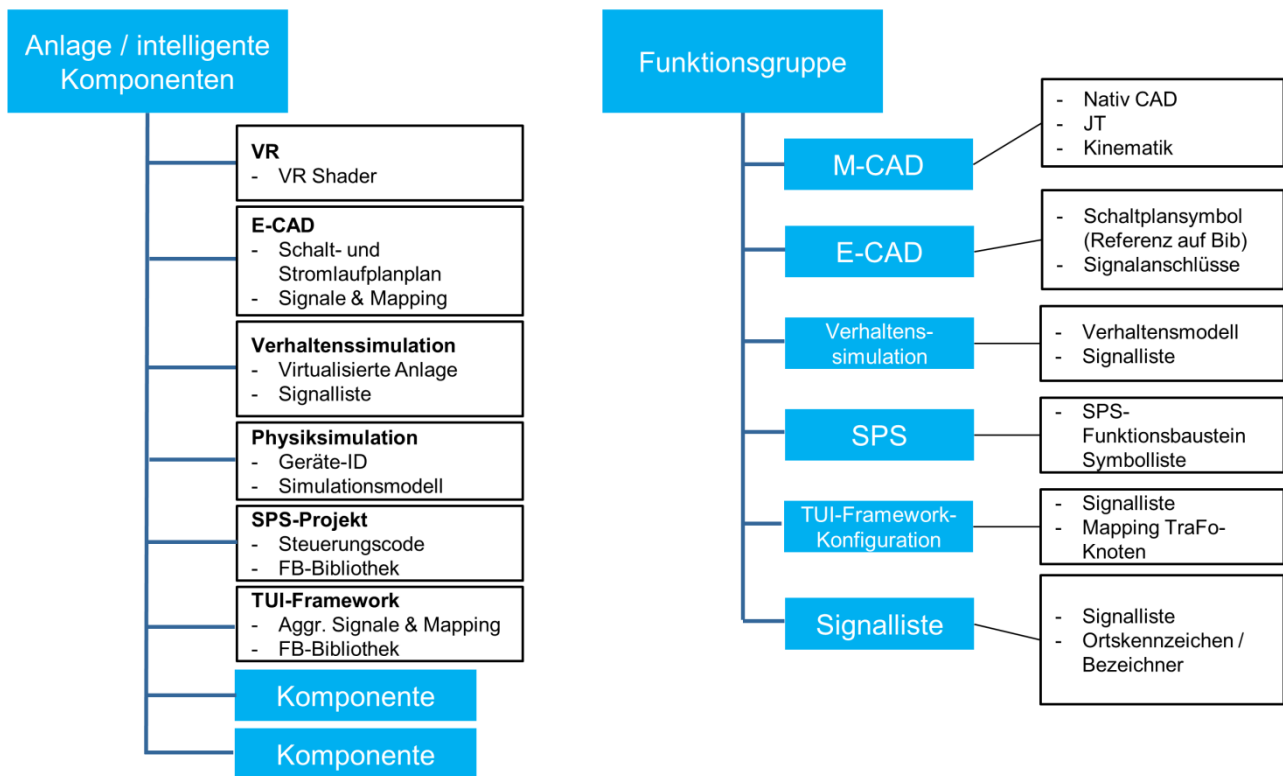


Bild 3: Definierte PLM-Items für die Verwaltung der Partialmodelle in einer PLM-Lösung [7]

2.2 Einsatz des Baukastens im Entwicklungsvorgehen

Durch den Einsatz des disziplinübergreifenden Baukastens soll für alle am Anlagenentwicklungsprozess beteiligten Disziplinen eine integrierte Datenhaltung und Modellbibliothek bereitgestellt werden. Modellierungsaufwände für die Auslegung der zu entwickelnden Anlage werden somit durch wieder- und weiterverwendbare Partialmodelle für den Konstrukteur (mechanische Auslegung), die Elektrokonstruktion (elektrische Projektierung) sowie die Anlagenprogrammierung (steuerungstechnische Absicherung und Inbetriebnahme) reduziert. Zum einen unterstützt die Umsetzung des vorgeschlagenen mechatronischen Produktdatenmodells den Anlagenentwicklungsprozess durch Verwaltung der Modelldaten in einer PLM-Lösung sowohl eine disziplinspezifische Sicht auf den Entwicklungsstatus der Anlage. Zum anderen lassen sich durch die Verknüpfung der geometrischen Modellierung unter Berücksichtigung vorhandener, räumlicher Freiheitsgrade mit der steuerungstechnischen Auslegung der Anlage auch interdisziplinäre

Abhängigkeiten abbilden und nachverfolgen. Einflüsse und Auswirkungen eines Änderungsprozesses beispielsweise an einem vorgesehen Antrieb innerhalb der Anlage (Erhöhung der Leistungsklasse bzw. der Anpassung des Steuerungskonzepts) lassen sich hierdurch sowohl in den Abhängigkeiten zur steuerungstechnischen Auslegung (z.B. Änderung des Verhaltensmodells des Antriebs sowie signaltechnische Ansteuerung) für die virtuelle Inbetriebnahme abbilden als auch die Notwendigkeit einer Anpassung des Bauraums im CAD-Modell des Konstrukteurs realisieren. Der bereits in der Funktionsgruppe definierte Freiheitsgrad, den der Antrieb bedient, ändert sich hierbei nicht von den geometrischen Randbedingungen, jedoch im Zeitverhalten im Rahmen der Virtuellen Inbetriebnahme. Im fortschreitenden Entwicklungsprozess der Anlage kommt es zu einer zunehmenden Ausdetaillierung der Komponenten bis hin zu deren abschließenden, digitalen Abbild. Mithilfe des Baukastens wird ermöglicht, insbesondere in der frühen Phase des Anlagenentwicklungsprozesses auf abstrahierte, Funktionsgruppen zurückzugreifen, die im Verlauf des weiteren Entwicklungsprozesses durch detailliertere Funktionsgruppen ersetzt oder ergänzt werden können. Somit lassen sich in Hinsicht auf die Aspekte des Vertriebs und der Schulung der späteren, realen Anlage einerseits bereits frühzeitig eine geometrische Abbildung der Anlage zur Beauftragung gegenüber dem Kunden sowie andererseits der Absicherung eines virtuellen, „erlebbaren“ Bedienkonzepts der beauftragten Anlage in Zusammenarbeit mit dem späteren Anlagenbediener oder Maschinenverantwortlichen adressieren.

3 Evaluation des Einsatzes des Baukastens

Im Rahmen der exemplarischen Umsetzung des entwickelten Baukastens wurde das auf Bild 4 dargestellte Anwendungsszenario bestehend aus den einzelnen, erstellten Funktionsgruppen zusammengesetzt. Hierbei wurden sowohl die geometrische Repräsentation, als auch die Verhaltensmodellierung der einzelnen Komponenten und auch die disziplinübergreifend, verknüpfenden Signale, Sensoren und Antriebe ausgestaltet und im Kontext der zu entwickelnden Anlage modelliert und eingesetzt. Das Anwendungsszenario stellt einen Teil der Vormontage dar, die sich aus einem vollautomatisierten Fügeprozess und einem teilautomatisierten Pick- and Place-Vorgang zusammensetzen. Beide Stationen der Anlage sind über ein intelligentes Fördersystem mit zwischengelagerten Hubtischen verbunden. Es werden vorwiegend intelligente Komponenten eingesetzt, eine dezentrale Steuerung der Anlage ist somit erforderlich. Um

die aktuellen Einflüssen durch Industrie 4.0 zu berücksichtigen, verfügen die einzelnen Stationen und das Fördersystem über eigene, dezentrale Steuerungen und werden im Rahmen der Erprobung als „intelligente“ Komponenten modelliert.

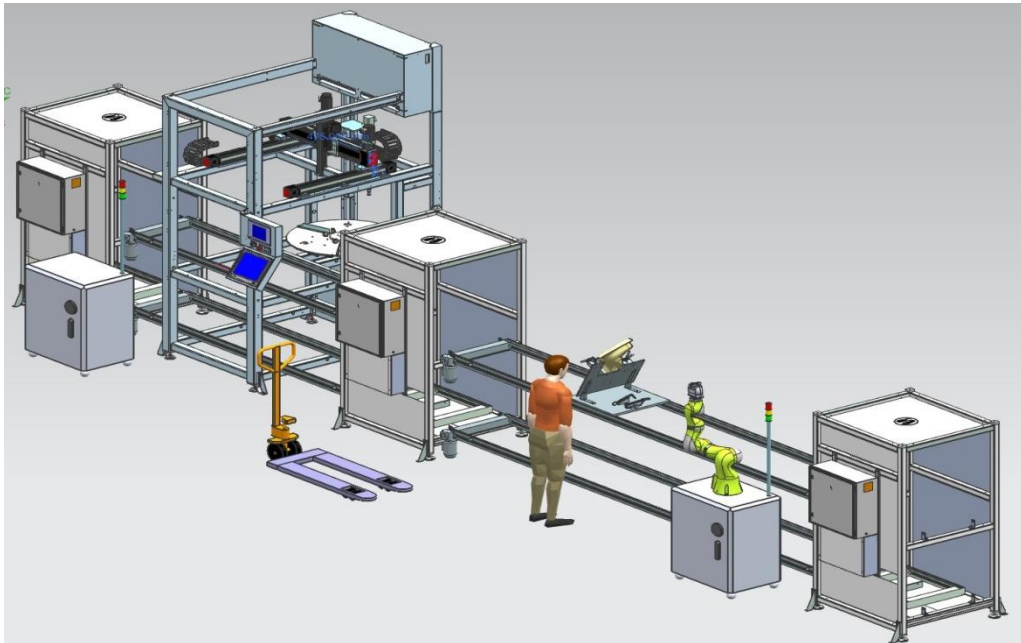


Bild 4: Aufbau eines Anwendungsszenarios aus Funktionsgruppen des SHP-Baukastens

Für die Erprobung wurde eine Untergliederung des Anwendungsszenarios in Komponenten bzw. Funktionsgruppen in Absprache mit den Anwenderunternehmen vorgenommen. Der beschleunigte Aufbau des Szenarios und die vereinfachte Visualisierung des Anwendungsszenarios in einer VR-Umgebung konnten bereits bestätigt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz virtueller Techniken im Anlagenentwicklungsvorgehen wird mittels des disziplinübergreifenden Baukastens für Anlagenkomponenten vereinfacht und bietet mittels der Definition notwendiger Datenablagestrukturen in einer PLM-Lösung darüber hinaus die Möglichkeit, auch „SMART Components“ zu modellieren und mittels Virtueller Inbetriebnahme abzusichern. Durch die Bereitstellung konsistent modellierter Funktionsgruppen lässt sich insbesondere bereits in der frühen Phase des Anlagenentwicklungsprozesses eine disziplinübergreifende Sicht auf die geplante Anlage herstellen und durch Berücksichtigung der steuerungstechnischen Verhaltensmodelle auch im Rahmen einer Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) absichern. Durch eine

konsistente, disziplinübergreifende Datenhaltung soll es dem Anlagenbauer ermöglicht werden, anhand einer immersiv erlebbaren und mithilfe Virtueller Realität (VR) begehbaren Anlage Anpassungs- und Änderungsbedarfe früher und besser erkennen zu können. Durch den Einsatz des vorgestellten Baukastens wird somit eine Grundlage für den schnellen Aufbau digitaler bzw. hybrider Prototypen [9] einer virtualisierten Anlage zur Absicherung von CPPS geschaffen. Ergänzend lassen sich auch weitergehende Untersuchungen für Werkzeuge zur intuitiven Interaktion [10] mit der virtuellen Anlage für die unterschiedlichen Stakeholder der Anlagenentwicklung erproben.

Literatur

- [1] CyProS-Konsortium, CyProS - Cyber-Physische Produktionssysteme: Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. Definition Cyber-Physische Produktionssysteme. Available: <http://www.projekt-cypros.de/definition-cps.html> (2016, Jun. 06).
- [2] VDI, Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation: Thesen und Handlungsfelder. Available: http://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf (2015, Mar. 03).
- [3] V. Voss, "Wiederverwendbare Simulationsmodelle für die domänen- und disziplinübergreifende Produktentwicklung," Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2012.
- [4] VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004.
- [5] L. Hundt, Durchgängiger Austausch von Daten zur Verhaltensbeschreibung von Automatisierungssystemen: Logos Verlag Berlin, 2012.
- [6] A. Geiger, I. Rehfeld, U. Rothenburg, and R. Stark, "Erlebbarkeit von Anlagenkomponenten im Kontext Virtuelle Inbetriebnahme in virtuellen Umgebungen," in Entwerfen, Entwickeln, Erleben, Dresden, 2016.
- [7] S. Neumeyer, K. Exner, S. Kind, H. Hayka, and R. Stark, "Virtual prototyping and validation of CPPS within a new software framework," in 7th International Conference from "Scientific Computing to Computational Engineering, Athens, 2016.
- [8] Dr. Christoph Runde, VDC Fellbach, "VDC-Whitepaper Virtual Reality im Anlagenbau: Anwendungen, Nutzen, Technologien," Fellbach.
- [9] B. Beckmann-Dobrev, R. Stark, and M. Auricht, "An interdisciplinary approach to validate mechatronic systems in early product development stages," DS 71: Proceedings of NordDesign 2012, the 9th NordDesign conference, Aalborg University, Denmark. 22-24.08.2012, 2012.
- [10] K. Exner, A. Sternitzke, S. Kind, and B. Beckmann-Dobrev, "Hybrid Prototyping," in Rethink! prototyping: Transdisciplinary concepts of prototyping, C. Gengnagel, E. Nagy, and R. Stark, Eds, Cham: Springer, 2016, pp. 89–127.

Zeitlose Algorithmen und ihre Adaption in modernen Simulationsverfahren

Roland Wegmann, Stefan Zorn, Klaus Brökel

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD

Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Email: kontakt@rolandwegmann.de; Internet: <http://www.rolandwegmann.de>

Email: stefan.zorn@uni-rostock.de; klaus.broekel@uni-rostock.de; Internet: <http://www.kt.uni-rostock.de>

Inhalt: Gegenstand der Arbeit ist die Anwendung und Anpassung zeitloser mathematischer Algorithmen am Beispiel des hydrodynamischen Gleitlagers. Zunächst wird auf die Notwendigkeit einer ballastfreien mathematischen Formulierung des Problems als Voraussetzung einer effektiven Lösung hingewiesen. Im zweiten Teil werden die Konzepte der numerischen Lösungsverfahren und ihre Anpassung beschrieben. Es werden das Differenzen-Verfahren, das Gauß'sche Eliminationsverfahren, das GMRES-Verfahren und das Newton'sche Näherungsverfahren betrachtet.

Abstract: Subject of this paper is how to use and to adapt timeless mathematical algorithms using the example of the hydrodynamic journal bearing. First, attention is drawn to the need for a ballast-free mathematical formulation of the problem as a prerequisite of an effective solution. In the second part, the concepts of numerical methods and their adaptation are described. The difference method, the Gaussian elimination method, the GMRES method and Newton's method of approximation are considered.

Stichwörter: Hydrodynamik, Reynolds'sche Differentialgleichung, Linearisierung, Differenzenverfahren, Gauß'sches Eliminationsverfahren, GMRES-Verfahren, Newtons-Verfahren.

Keywords: hydrodynamic, Reynolds equation, linearization, Gaussian elimination algorithm, GMRES algorithm, Newton's method.

1 Motivation

Die numerische Mathematik stellt eine reiche Auswahl zeitloser Lösungsalgorithmen und -strategien bereit, mit denen ingenieur-technische Probleme gelöst werden können. Dem Anwender fertig programmierter Simulationsverfahren bleiben diese meist verborgen unter der Benutzeroberfläche des jeweiligen Programms.

Durch Anpassen der Algorithmen an die spezielle Problematik kann die numerische Lösung des Problems oft beschleunigt werden. Manchmal wird die Lösung dadurch auch erst möglich.

Ihre effektive Implementierung, insbesondere ihre Anpassung an die speziellen Bedingungen des jeweils zu lösenden Problems, erfordern eine vergleichbare Kreativität und Sachkenntnis, wie die Lösung des eigentlichen ingenieur-technischen Problems. Deshalb dürften Erkenntnisse über die Lösungsmethoden für die wissenschaftliche Öffentlichkeit von gleichem Interesse sein, wie die eigentlichen Ergebnisse zum untersuchten Problem. Für das Gleitlagerberechnungsprogramm SIRIUS wurde eine umfangreiche Dokumentation erstellt, die weit über den Umfang einer Bedienanleitung hinausgeht, indem sie auch die mathematische Beschreibung des simulierten Objekts, die numerischen Lösungsverfahren und ihre rechentechnische Umsetzung ausführlich dokumentiert. Diese Dokumentation ist Grundlage der Veröffentlichung. An einigen Beispielen werden die Implementierung und Adaption von Lösungsalgorithmen dargestellt. Es werden einige prinzipielle Vorgehensweisen beschrieben.

2 Mathematische Beschreibung des technischen Objekts

Das abzubildende technische Objekt ist ein hydrodynamisch oder hydrostatisch geschmiertes Radialgleitlager.

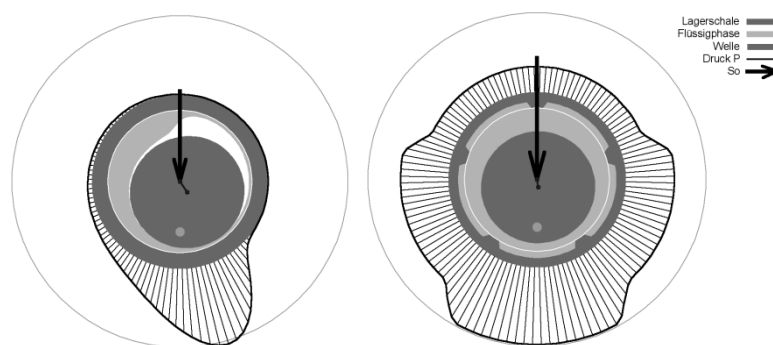


Bild 1: Druckverlauf und Schmiermittelverteilung in einem hydrodynamischen und einem hydrostatischen Radialgleitlager

2.1 Die Reynolds'sche Gleichung, ein Spezialfall der Navier-Stokes-Gleichung für die Strömung im Schmierpalt

Die Vorbereitung einer effektiven numerischen Lösung eines Problems beginnt bereits bei der mathematischen Formulierung, indem eine sinnvolle Abstraktion vorgenommen wird, so dass nur die wesentlichen Merkmale des physikalischen Prozesses abgebildet werden und unwesentliche Erscheinungen später nicht mit einem erheblichen Rechenaufwand durch die Berechnung geschleppt werden müssen.

Die Strömung im Schmierspalt weist durch den engen Schmierspalt einige spezielle Gegebenheiten auf, die einige für die Berechnung wesentliche Vereinfachungen zulassen. Die Kräfte der Flüssigkeitsreibung übersteigen bei Weitem die Beschleunigungskräfte in der Schmierflüssigkeit. Deshalb kann eine trägheitsfreie Strömung angenommen werden (kriechende Strömung). Außerdem können Strömungsgeschwindigkeiten senkrecht zu den Gleitflächen vernachlässigt werden. Das führt zur Reynolds'schen Differentialgleichung für die Strömung im Schmierspalt, wie sie bereits von Reynolds [2] und Sommerfeld [3] um 1900 hergeleitet wurde.

$$0 = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{3}{h} \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial z} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{12 \cdot \eta}{h^3} \cdot \left(\frac{v_{we}}{2} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (1)$$

Die Reynolds'sche Gleichung der hydrodynamischen Schmierung ist ein Sonderfall der Navier-Stokes-Gleichung. Bereits über die Spalthöhe integriert reduziert sie die Strömung im 3-dimensionalen Schmierspalt auf ein zweidimensionales Problem. Sie ist eine partielle lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung. Räumlich ist sie ein Randwertproblem und über die Zeit ein Anfangswertproblem. Das Differenzenverfahren ist dafür ein bewährtes Lösungsverfahren.

Bei dieser klassischen Reynolds'schen Gleichung gibt es aber noch ein Problem: Es wird nur die Strömung im Druckberg richtig beschrieben. Das Kavitationsgebiet im Lager wird hier aus der Berechnung ausgeschlossen. Dadurch ist eine korrekte Berechnung der erforderlichen Ölmengen und der Energiebilanz im Lager sowie des Einflusses der Anordnung der Schmiertaschen nur eingeschränkt möglich.

2.2 Die um Kavitation erweiterte Reynolds'sche Gleichung

In einer Erweiterung der Reynolds'schen Gleichung [4] wird die Schmierflüssigkeit als ein Zwei-Phasen-Kontinuum dargestellt, bestehend aus einer inkompressiblen, zähen, flüssigen Phase und einer kompressiblen, reibungslosen, gasförmigen Phase. Damit kann die Strömung im gesamten Schmierspalt abgebildet werden und so das Problem der Randbedingungen gelöst werden.

$$0 = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{3}{h} \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial z} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{12 \cdot \eta}{h^3} \cdot \frac{p}{p+c} \cdot \left(\frac{v_{we}}{2} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \right) - \frac{12 \cdot \eta}{h^2} \cdot \frac{c}{(p+c)^2} \cdot \left(\frac{v_{we}}{2} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (2)$$

Sie ist ebenfalls eine partielle, aber nicht lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung. Räumlich ist sie ebenfalls ein Randwertproblem und über die Zeit ein Anfangswertproblem. Als Randbedingungen brauchen hier nur noch die Bedingungen am Schmierpaltrand und an den Rändern von Schmiertaschen angegeben werden, die leicht zu formulieren sind. Die Randbedingungen für den Anfang und das Ende des Druckberges entfallen.

Als nicht lineare Differentialgleichung ist sie mit dem Differenzenverfahren nicht mehr direkt lösbar. Außerdem weist die Funktion des Druckes $p(x,z,t)$ eine Schranke auf, nämlich die Bedingung $p > 0$. Das ist der Anwendung des Differenzenverfahrens eher hinderlich. Mit entsprechenden Vorkehrungen ist seine Anwendung trotzdem möglich, wie nachfolgend gezeigt werden soll.

3 Numerische Lösungsverfahren

3.1 Die Linearisierung der erweiterten Reynolds'schen Differentialgleichung

Voraussetzung zur Lösung einer nicht linearen Differentialgleichung mit dem Differenzenverfahren ist ihre Linearisierung. Eine nicht lineare Funktion $f(x)$ kann durch eine linearisierte Näherung in folgender Weise ersetzt werden.

$$0 = f(y) \approx f(y_0) + f'(y_0) \cdot (y - y_0) \quad (3)$$

y_0 ist dabei eine Anfangsnäherung der gesuchten Lösung y . Die erweiterte Reynolds'sche Differentialgleichung (2) enthält folgende nicht linearen Glieder.

$$\frac{p}{p+c} \quad \text{und} \quad \frac{1}{(p+c)^2} \cdot \left(\frac{v_{we}}{2} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right)$$

Das erste der beiden Glieder wird gemäß Gleichung (3) in folgender Weise linearisiert.

$$\frac{p}{p+c} \approx \frac{c}{(p_0+c)^2} \cdot p + \frac{p_0^2}{(p_0+c)^2} \quad (4)$$

Auf die Angabe der weiteren Formeln wird hier verzichtet, da diese recht umfangreich und unübersichtlich werden und den Umfang des Artikels sprengen würden. Sie sind voll-

ständig in dimensionsloser Form angegeben in [1, Abs. 3.4.1.3] oder [2, Abs. 7.3]. Damit erhält die erweiterte Reynolds'sche Differentialgleichung die lineare Form.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + A_1 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + A_2 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + A_3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + A_4 \cdot p = R \quad (5)$$

3.2 Das Differenzenverfahren, ein universelles Lösungsverfahren für lineare Probleme und seine Adaption an ein nicht lineares Problem

Das Differenzenverfahren ist kein Lösungsalgorithmus im engeren Sinne sondern eher ein Lösungsprinzip. Es beruht darauf, dass ein Kontinuum durch Punkte auf einem Gitternetz diskretisiert wird. Nur für diese Gitterpunkte wird eine Näherungslösung der Differentialgleichung berechnet.

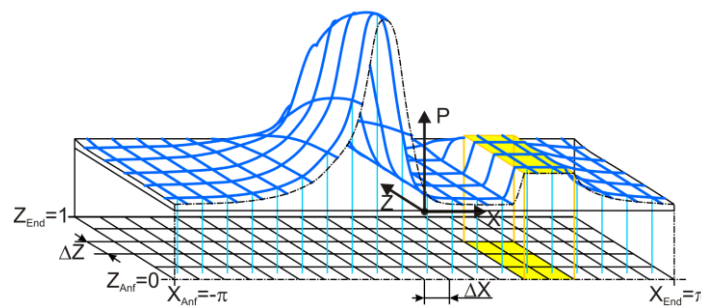
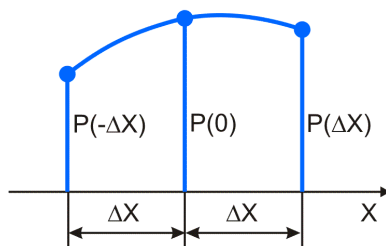


Bild 2: Diskretisierung der Schmierspaltfläche in $N_x \cdot N_z$ Flächenelemente

Um diese Aufgabe zu lösen werden die partiellen Ableitungen (Differentialquotienten) durch Differenzenquotienten ersetzt [7]. Daher der Name Differenzenverfahren. Die 1. und 2. Ableitung der Funktion $p(x)$ an der Stelle x wird z.B. bei äquidistanter Schrittweite des Gitternetzes gemäß Bild 3 durch die Differenzenformeln (6) und (7) ersetzt.



$$\frac{\partial P(0)}{\partial X} \approx \frac{-P(-\Delta X) + P(\Delta X)}{2 \cdot \Delta X} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 P(0)}{\partial X^2} \approx \frac{P(-\Delta X) - 2 \cdot P(0) + P(\Delta X)}{\Delta X^2} \quad (7)$$

Bild 3: Approximation des Teilstücks der Funktion $P(X)$

Damit wird die lineare Differentialgleichung zu einer linearen Differenzengleichung.

3.3 Aufstellen des Gleichungssystems

Nun kann für jeden Punkt des Gitternetzes eine Gleichung aufgestellt werden und es entsteht ein lineares Gleichungssystem zur Berechnung der Druckverteilung über die Schmierspaltfläche. Für die klassische Reynolds'sche Differentialgleichung liefert das einmalige Lösen des Gleichungssystems die endgültige Lösung. Für die erweiterte Reynolds-Gleichung muss zur iterativen Berechnung die Lösung des Gleichungssystems mehrfach durchlaufen werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass dazu in der Regel zwei Iterationszyklen reichen.

Bild 4 zeigt für ein sehr grobes Gitternetz mit nur 23 Stützstellen im Schmierspalt die Koeffizientenmatrix und in der rechten Spalte die rechten Seiten eines solchen Gleichungssystems. Nach den ersten 23 Gleichungen für die Berechnung des Schmierfilmdruckes, die das Differenzenverfahren repräsentieren, sind noch weitere Gleichungen hinzugefügt. Diese resultieren aus der mathematischen Abbildung eines peripheren Schmier Systems, das insbesondere für hydrostatische Lager erforderlich ist.

	A																															R	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
1	140.5	33.3	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-18.7	
2	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.4	
3	0.0	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.4	
4	0.0	0.0	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.4	
5	0.0	0.0	0.0	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-18.7	
6	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	120.3	33.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-13.3	
7	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	25.0	-70.3	25.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	33.3	120.3	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-13.3	
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	120.3	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-20.0	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	120.3	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-20.0	
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	120.3	33.3	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-13.3	
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
16	N _{Glei}	Gleichungen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	25.0	-70.3	25.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	33.3	120.3	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-13.3	
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-18.7	
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	-90.5	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.4	
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.4	
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.4	
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	33.3	120.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-18.7	
24	N _{Ta}	Gleichungen	0.0	-0.4	0.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	0.0	0.0	-0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	-1.0	0.0	0.0	0.0		
26	N _{Ve}	Gleichungen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7	0.0	1.0	0.0	0.2	
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7	0.0	-7.7	0.2	
28	N _{Pu}	Gleichungen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.9	
31	N _{Pu}	Gleichungen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-7.7	-1.8

Bild 4: Koeffizientenmatrix und rechte Seiten eines Gleichungssystems

Bild 5 skizziert z.B. ein peripheres Schmier System, welches alle Elemente enthält, die mit dem Programm SIRIUS abgebildet werden können. Für jede Schmiertasche im Lager ist eine weitere Gleichung erforderlich, die die Volumenbilanz der Schmiertasche abbildet. Für jede Verbindungsleitung ist eine weitere Gleichung erforderlich, die den Zusammenhang zwischen dem Druckgefälle in der Leitung und dem Volumenstrom durch die Leitung abbildet. Falls die entsprechende Gleichung, z.B. bei einer Spaltdrossel nicht linear ist, ist diese ebenfalls zu linearisieren und wird parallel zur iterativen Schmierfilmdruckberechnung

nung gelöst. Für jede Schmiermittelpumpe sind noch zwei weitere Gleichungen erforderlich.

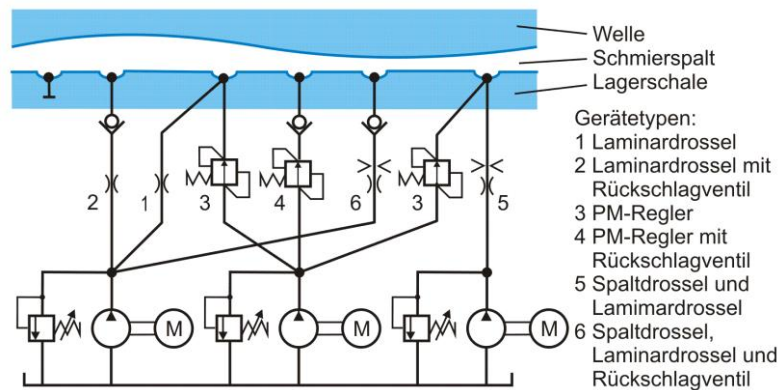


Bild 5: Prinzipskizze einer möglichen Variante des peripheren Universal-Schmiersystems

3.4 Das Gauß'sche Eliminationsverfahren ein Klassiker der numerischen Mathematik

Das Gauß'sche Eliminationsverfahren oder auch Gauß-Verfahren genannt ist ein klassisches Beispiel der zeitlosen Algorithmen. Es hat eine Schlüsselposition in der Lösung von linearen Gleichungssystemen, denn es stellt keine weiteren Anforderungen an das zu lösende Gleichungssystem, als die Forderung einer regulären Koeffizientenmatrix. Damit ist gewährleistet, dass es nur eine eindeutige Lösung gibt. Es stammt aus einer Zeit, als an elektronische Rechentechnik noch nicht zu denken war. Mit kleinen Verbesserungen, nämlich der Einführung der Pivotisierung, hat es in der modernen Rechentechnik weiterhin eine zentrale Bedeutung.

Es ist ein direkter Gleichungslöser. Das Lösungsprinzip beruht auf der Umwandlung der quadratischen Koeffizientenmatrix A des ursprünglichen Gleichungssystems in eine Dreiecksmatrix A' , ohne dass sich der Lösungsvektor X verändert. Das modifizierte Gleichungssystem kann dann einfach rekursiv gelöst werden, beginnend mit der letzten Gleichung. Bild 6 skizziert ein ursprüngliches und ein modifiziertes Gleichungssystem in Matrizenschreibweise.

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} a'_{1,1} & a'_{1,2} & a'_{1,3} & a'_{1,4} \\ 0 & a'_{2,2} & a'_{2,3} & a'_{2,4} \\ 0 & 0 & a'_{3,3} & a'_{3,4} \\ 0 & 0 & 0 & a'_{4,4} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r'_1 \\ r'_2 \\ r'_3 \\ r'_4 \end{pmatrix}$$

Bild 6: Modifizierung eines linearen Gleichungssystems mit dem Gaußschen Eliminationsverfahren

3.5 Vom Gauß-Algorithmus zum modernen GMRES-Verfahren

In älteren Versionen des Programms SIRIUS wurde das Gauß-Verfahren erfolgreich eingesetzt. Dieses Verfahren hat aber die Eigenschaft, dass sich bei jeder Verdopplung der Anzahl der Unbekannten die Anzahl der erforderlichen Lösungsoperationen mit dem Faktor $2^3=8$ erhöht. Damit wird bei größeren Gitternetzen das Warten auf ein Ergebnis recht langweilig, weil dieser exponentielle Anstieg der Rechenzeit auf Dauer auch nicht durch schnellere Computer aufgefangen werden kann.

Mit der flächendeckenden Verbreitung der Rechentechnik wurde verstärkt in den 1960-iger und 1970-iger Jahren nach schnelleren Lösungsverfahren gesucht, so dass heute eine Palette von wesentlich schnelleren Gleichungslösern zur Verfügung steht.

Bei der Lösung ingenieur-technischer Probleme sind die Koeffizientenmatrizen oft nur dünn besetzt, d.h. die meisten Koeffizienten sind Null, wie bereits die Matrix im Bild 4 zeigt. Das machen sich eine Reihe von Verfahren zu nutze. Es werden aber auch andere Merkmale zur Reduktion der Anzahl erforderlicher Lösungsoperationen ausgenutzt. Es ist deshalb erforderlich zur Aufgabe das passende Lösungsverfahren auszuwählen. Die meisten dieser Verfahren sind Iterationsverfahren, die mehrfach durchlaufen werden müssen, aber bei großen Koeffizientenmatrizen trotzdem wesentlich schneller rechnen. Einen guten Überblick über die gängigen Verfahren gibt Meister [6] oder die Internet-Plattform "Wikipedia".

Für das Gleichungssystem zur Lösung der Reynolds'schen Gleichung mit dem Differenzenverfahren einschließlich der Gleichungen des peripheren Schmiersystems erschien das GMRES-Verfahren (Generalized minimal residual method) geeignet und wurde in das Programm SIRIUS implementiert. Es wird als Näherungsverfahren verwendet und arbeitet erst richtig schnell in Kombination mit einem Vorkonditionierer. Als Vorkonditionierung wird die ILU-Zerlegung (incomplete Lower-Upper-Decomposition) verwendet. Bei einer Anzahl von ca. 10 000 Unbekannten wurde damit gegenüber dem Gauß-Verfahren eine Beschleunigung um den Faktor 1000 erreicht. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens

besteht darin, dass die Rechenzeit nur etwa proportional mit der Anzahl der Unbekannten steigt.

Ein weiterer Vorteil ist, dass das Verfahren mit einer "gepackten Matrix" arbeitet, in der nur die Nicht-Null-Koeffizienten abgespeichert sind. Wenn man das Programm so schreibt, dass die "gepackte Matrix" direkt erzeugt wird, was allerdings ziemlich anspruchsvolle Programmierung ist, wird erheblich Speicherplatz gespart. Bild 7 zeigt die Koeffizientenmatrix aus Bild 4 in gepackter Form.

Kontrolldruck der kompletten gepackten Koeffizientenmatrix
 NGlei= 23 NTa= 2 NVe= 2 NPu= 2 NGlei1= 31

M	Kv(M)	Kc(M)	JGlei	Kp(JGlei)	R(JGlei)
1	-140.5285	1	1	0	-18.7371
2	33.3333	2	2	3	-5.4038
3	13.5095	6	3	7	-5.4038
4	25.0000	1	4	11	-5.4038

...

116	7.7280	24
117	-7.7280	30
118	7.7280	25
119	-7.7280	31

Bild 7: "Gepackte Koeffizientenmatrix" und rechte Seiten eines Gleichungssystems

Die Koeffizientenmatrix wird hier ersetzt durch 4 Vektoren, die nur die Werte der Nicht-Null-Koeffizienten und ihre Stellung in der ursprünglichen Matrix angeben.

3.6 Die Berechnung der Wellenverlagerung durch ein 2*2- dimensionales Newton'sches Näherungsverfahren und seine Lösung mit einem geometrischen Lösungsansatz

Mit Hilfe der Reynolds'schen Differentialgleichung kann aus einer vorgegebenen Spaltgeometrie der Druckverlauf im Schmierpalt berechnet werden und durch Integration der Schmierpalt drücke der resultierende Vektor der Lagerbelastung $[F_1, F_2]$. In der Praxis ist die Problemstellung aber umgekehrt. Infolge des Vektors der Lagerbelastung $[F_1, F_2]$ verlagert sich die Welle innerhalb des Lagerspielraums, bis der dadurch entstehende Schmierfilmdruck mit der Lagerbelastung im Gleichgewicht steht. Es ist also der Vektor der Wellenverlagerung $[E_1, E_2]$ zu ermitteln.

Formal kann man den Zusammenhang zwischen den Komponenten der Lagerbelastung F_1 und F_2 und der Spaltgeometrie E_1 und E_2 als die Funktionen func1 und func2 formulieren.

$$F_1 = \text{func1}(E_1, E_2) \quad (8)$$

$$F_2 = \text{func2}(E_1, E_2) \quad (9)$$

Damit ist ein nicht lineares Gleichungssystem mit 2 Gleichungen und den 2 Unbekannten E_1 und E_2 zu lösen. Jeder Punkt der 2 Funktionen bedeutet die komplette Berechnung einer Druckverteilung im Schmier-spalt. In der Umgebung um eine vorhandene Näherungslösung kann man die beiden Funktionen durch zwei tangentielle Ebenen 1 und 2 approximieren (Bild 8, linke Skizze).

Gemäß Bild 8, rechte Skizze lässt sich ein Iterationsschritt der Lösung des Gleichungssystems grafisch darstellen. Es ist der Schnittpunkt der Projektionen der Schnittlinien S_1 und S_2 auf die Koordinatenebenen E_1 - E_2 . Daraus lassen sich dann leicht die Berechnungsformeln herleiten. Sie sind vollständig angegeben in [5, Abs. 4.1.3] und [1, Abs. 3.4.7.3].

Wird diese Berechnung mehrfach wiederholt, indem der berechnete Schnittpunkt als Basispunkt der nächsten Iteration verwendet wird, konvergiert die Iteration zur Lösung des nicht linearen Gleichungssystems.

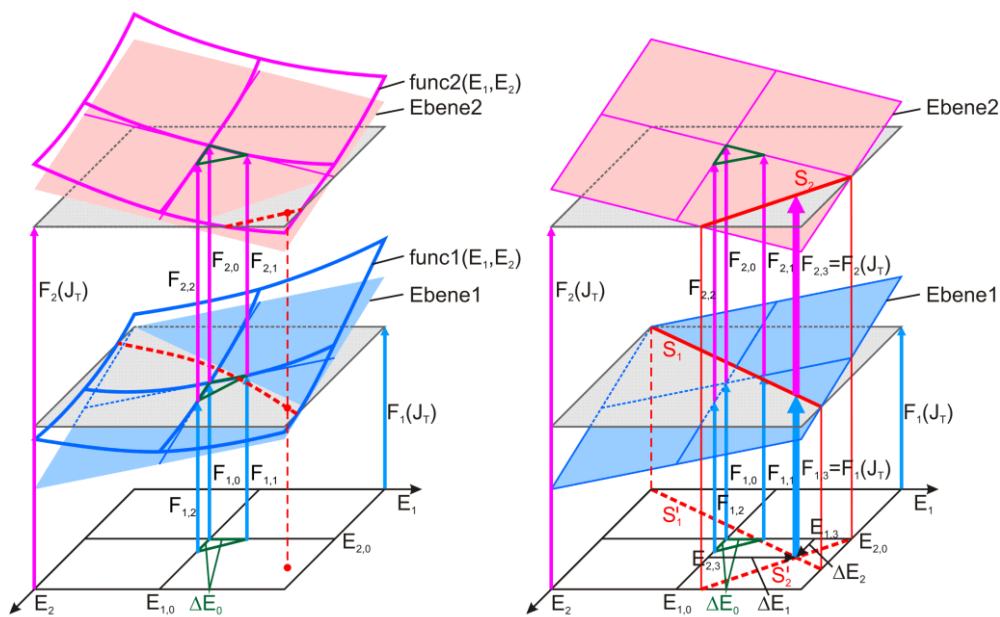


Bild 8: Grafische Darstellung der Ermittlung eines Wellenverlagerungspunktes $[E_1, E_2]$

Dieses Verfahren stellt ein erweitertes Newton'sches Näherungsverfahren dar, wie es in Bild 9 vereinfacht als eindimensionales Problem skizziert ist [7]. Es ist ein Standardverfahren, welches lange Zeit vor der elektronischen Rechentechnik entwickelt wurde.

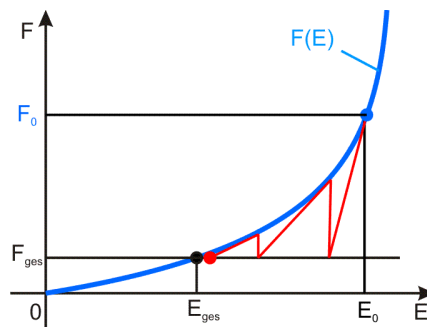


Bild 9: Newton'sches Näherungsverfahren

4 Schlussbemerkungen

Maschinenbau-Ingenieure sind nicht nur Nutzer von Berechnungsprogrammen, sondern notwendiger Weise beteiligt an ihrer Erzeugung. Sie müssen bzw. können:

1. die technischen Probleme mathematisch formulieren,
2. kompetente Gesprächspartner der Mathematiker und Informatiker sein,
3. aus ihrer Kenntnis des technischen Objekts zu kreativen Lösungsansätzen beitragen,
4. evtl. die numerischen Probleme eigenständig lösen und programmieren.

Deshalb ist es notwendig, dass auch sie grundlegende Kenntnisse über diese zeitlosen mathematischen Lösungsverfahren besitzen, zumal diese universell anwendbar sind. Im Rahmen des Vortrags konnten nur das prinzipielle Vorgehen beschrieben werden. Wesentlich ausführlicher und mit Angabe aller erforderlichen Formeln wird das in der Dokumentation zum Programm SIRIUS [1] dargestellt.

Literatur

- [1] Wegmann, Roland: Dokumentation zum Gleitlager-Berechnungsprogramm SIRIUS Version:2.0, Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD, Rostock, 31.10.2015. <http://www.rolandwegmann.de/sirius2-0/>.
- [2] Reynolds, O.: Über die Theorie der Schmierung und ihre Anwendung auf Herrn Beauchamp Towers Versuche, (Urschrift englisch, 1886) Ostwald's Klassiker Nr.218, Akad. Verl. Gesellsch. Leipzig, 1927, S.39-107.
- [3] Sommerfeld, A.: Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung, Zeitschr. f. Math. u. Phys. Bd.50, 1904, S.97-155 oder Ostwald's Klassiker Nr.218, Akad. Verl. Gesellsch. Leipzig, 1927, S.108-180.

- [4] Wegmann, Roland: Erweiterung der hydrodynamischen Schmiertheorie durch Einbeziehung des Unterdruckgebietes in die Berechnung instationär belasteter Gleitlager. Dissertation Universität Rostock 1978. http://www.rolandwegmann.de/dissertation_rw/
- [5] Brökel, Klaus: Das schwellend belastete Radialgleitlager unter Berücksichtigung der Verformung und eines Schmierstoff-Gas-Gemischs bei beliebiger Spaltgeometrie. Dissertation Universität Rostock 1980.
- [6] Meister, Andreas: Numerik linearer Gleichungssysteme / Eine Einführung in moderne Verfahren/ Mit MATLAB-Implementierungen von C. Vömel. 3.Auflage; Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [7] Zurmühl, Rudolf: Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker. 5.Auflage; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1965. S.18ff, S.468 ff.
- [8] Wegmann, R.; Brökel, K.: Numerische Simulation und experimentelle Verifikation von kombiniert hydrostatisch-hydrodynamisch wirkenden Radialgleitlagern großer Abmessungen. 10. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen, VDI-Bericht 2202, Schweinfurt 2013.
- [9] Jonuschies, I.; Zorn, St.: Methoden und Werkzeuge für die Simulation hydrodynamisch wirkender Radialgleitlager und ihrer Anwendung in Windenergieanlagen. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlager. Schweinfurt 2015.

Optimierungsmethoden im Konstruktionsprozess

Eine kritische Betrachtung

Hans-Peter Prüfer

Ruhr-Universität Bochum; im Ruhestand

Email: hp@itm.rub.de

Inhalt: Die Produktoptimierung ist ein wesentlicher Bestandteil der Produktentstehung. Nach der subjektiven heuristischen Vorgehensweise geht man immer mehr zu systematischen Optimierungsalgorithmen über. Wir geben hier eine Übersicht über die verfügbaren Verfahren und betrachten dabei ihre Möglichkeiten ebenso wie ihre Grenzen. Für typische Aufgabenstellungen werden Empfehlungen gegeben, gleichzeitig wird erklärt, warum es in der Technik keine mathematisch exakte Optimierung geben kann.

Abstract: Optimization processes are a well known tool of product design. Optimal products can be achieved in a heuristic way or by means of algorithms. A survey of methods is complemented by a critical evaluation, including their capabilities and limitations as well as recommendations for their usage. Finally it is shown that the exact mathematical solution of the general optimization problem does not exist.

Stichwörter: Optimierungsalgorithmen, Bewertungskriterien, technische Optimallösungen

Keywords: algorithmic optimization, evaluation criteria, optimized technical solutions

1 Motivation

Der Zwang, wachsender Konkurrenz standhalten zu müssen, verbunden mit der Notwendigkeit von Kostenminimierung, Ressourcenschonung und Energieeffizienz, führt dazu, dass Produkte ständig verbessert werden müssen. Gelingt es, eine Lösung zu finden, die nicht mehr weiter verbessert werden kann, so hat man gewiss einen wenigstens zeitweisen Marktvorteil. Um diesen zu gewinnen, ist die Produktoptimierung zu einem Muss geworden, an dem keine Konstruktionsabteilung mehr vorbeikommt.

2 Dimensionierung, Nachweise, Optimierung

Spätestens, wenn ein (materielles) Produkt über das Entwurfsstadium hinausgekommen ist, muss es verbindlich so beschrieben werden, dass es produzierbar wird. Im Falle der klassischen Hardwareprodukte bezeichnet man diesen Vorgang, der dabei im Wesentlichen eine geometrische Gestaltung ist, als Dimensionierung. Damit ist untrennbar der so genannte Nachweis verbunden, der absichert, dass das Produkt nicht nur die gewünsch-

ten Funktionseigenschaften hat, sondern darüber hinaus allen zusätzlichen Forderungen aus Normen und Sicherheitsansprüchen genügt. Ein einfaches Beispiel ist ein Zahnradgetriebe. Es muss in den verfügbaren Bauraum passen, die gewünschte Übersetzung liefern, und die verschiedenen Sicherheitsfaktoren müssen mindestens eingehalten werden.

Das ist allerdings nur die halbe Wahrheit. Bekanntlich kann auch ein drastisch überdimensioniertes Produkt die Anforderungen erfüllen. Meistens besteht der Wunsch, optimale Lösungen zu finden, die „es nicht nur tun“, sondern bei denen ein Bewertungskriterium einen Extremwert annimmt, wie beispielsweise die Maximierung des Wirkungsgrades oder die Minimierung des Gewichts im Sinne des Leichtbaus. Dazu ist es erforderlich, konstruktive Einflussgrößen im Sinne der Zielerreichung verändern zu können. Dieser Vorgang ist die Optimierung. Wurde sie zunächst rein heuristisch, erfahrungsbasiert angegangen, so stellte sich bald heraus, dass hier ein systematisches, algorithmisches Vorgehen zielführender ist, zumal „die letzten Prozente“ besonders schwer zu erreichen sind.

3 Die Charakterisierung von Aufgabenstellungen

Die Aufgaben mit den spektakulärsten Lösungen findet man heute im Bereich der Strukturoptimierung [1,2]. In der Regel geht es darum, die Form bzw. die Gestalt eines Bauteils so zu verändern, dass bei minimalem Materialeinsatz Funktionsfähigkeit und mechanische Festigkeitsanforderungen erhalten bleiben. Dazu kann die Außenkontur, auch mit Ausschnitten, verändert werden, ebenso die Materialverteilung oder die Anordnung und Dimensionierung von Sicken. Diesen Aufgaben ist gemeinsam, dass die Beschreibung der zugelassenen Veränderungen nicht unmittelbar durch eine geringe Anzahl von Dimensionierungsgrößen, sondern indirekt, nichtparametrisch beschrieben wird.

Demgegenüber ist die optimale Auslegung von Verzahnungen oder die Maßsynthese von Mechanismen ein Aufgabentyp, bei dem eine wohldefinierte eher geringe Anzahl beschreibender Größen verändert wird. Damit vergleichbar ist die Bestimmung von Reglerkonstanten, um eine gewünschte Charakteristik zu erreichen. In der Konstruktionstechnik eher selten anzutreffen, aber zur internen Lösungsfindung häufig notwendig, sind nichtlineare Approximationen, bei denen die freien Koeffizienten nicht mehr linear in der Näherungsfunktion enthalten sind.

Einen Sonderfall stellen schließlich diskrete Aufgabenstellungen dar, bei denen die gesuchten Größen aus einem endlichen Wertespektrum zu wählen sind. In ihrer Grund-

form sind es kombinatorische Probleme, die eine *Inspektion* des Lösungsraums erfordern. In günstigen Fällen lassen sie sich auf kontinuierliche Aufgaben fortsetzen, für die dann die üblichen Lösungstechniken zur Verfügung stehen.

An dieser Stelle sei ein kurzer Ausflug in die Mathematik erlaubt. Die meisten parametrischen ingenieurmäßigen Optimierungsaufgaben sind nichtlinear! Angesichts der Tatsache, dass die Mechanik ein lineares Verhalten vermuten lässt – Superposition und Proportionalität sind dafür Kronzeugen – klingt diese Aussage zunächst seltsam. Sie wird aber verständlich, wenn man bedenkt, dass die Auslegungsgrößen nicht die physikalischen Größen der Theorie sein müssen. Mögen beispielsweise Kreisquerschnitte linear in eine Volumenberechnung eingehen, so gilt dies für die Durchmesser schon nicht mehr. Wir haben eine starke Abhängigkeit von der Formulierung unserer Modellfunktionen.

Als Konsequenz verlieren wir die einfachen Aussagen zu Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen, ebenso steht uns das gesamte, gut nutzbare Spektrum der linear-algebraischen Methoden nicht mehr zur Verfügung. Im Fall der nichtparametrischen Optimierungsaufgaben haben wir typischerweise noch nicht einmal explizit formulierbare funktionale Zusammenhänge.

4 Verfahren, Methoden, Strategien

Welche Hilfsmittel stehen für die Bearbeitung von Optimierungsaufgaben zur Verfügung? Hinsichtlich der einzelnen Verfahren kann man ähnlich wie bei den Aufgaben nach parametrischen und nichtparametrischen unterscheiden. Dabei ist die überwiegende Mehrzahl der parametrischen Verfahren [3] deterministisch, es gibt also keine stochastischen Teilprozesse. Die bekanntesten Vertreter dieser Gattung nutzen Informationen aus den Gradienten der Modellfunktionen, aus denen eine Erfolgsrichtung bestimmt wird. Einige der so genannten *gradientenfreien* Verfahren verwenden stattdessen Informationen, die man im weitesten Sinne als diskretisierte Gradienten verstehen kann. Sie folgen damit zwangsläufig einem Weg, den man als Abstiegsrichtung bezeichnet. Daraus ergibt sich die strikte Lokalität aller dieser Verfahren, die eine Optimallösung nur dann finden können, wenn der Startpunkt bereits in ihrer Nähe liegt.

Können mehrere Optimallösungen existieren – ein triviales mathematisches Beispiel sind Polynome mit einem Grad größer als drei – so benötigt man ein globales Verhalten. Es kann dadurch erreicht werden, dass man wiederum deterministisch ein festes Raster von Stichproben aus der Menge der Lösungskandidaten untersucht oder aber die Stichproben

ganz oder teilweise mit stochastischen Mitteln erzeugt. Der extremste Fall eines solchen Verfahrens dürfte in den Monte-Carlo-Verfahren zu finden sein. Als gemäßigte Variante ist die Evolutionsstrategie nach Rechenberg bekannt geworden. Allen diesen Verfahren ist jedoch gemeinsam, dass für die stochastischen Anteile das notorische Gesetz der großen Zahl gilt.

Alle bisher betrachteten Verfahren sind weitestgehend unabhängig von der konkreten Aufgabenstellung und damit universell einsetzbar. Betrachtet man den Bereich der optimalen Gestaltung von Strukturen, so begegnet man einer Gruppe von Verfahren, die spezifische Eigenschaften der Aufgaben mit in Betracht zieht. Man kann sie im weitesten Sinne als *Topologieoptimierungsverfahren* bezeichnen. Sie arbeiten im Verbund mit der FEM, und die Veränderung der Bauteilgestalt erfolgt durch Weglassen von Elementen mit einer Spannung, die unterhalb eines Schwellwerts liegt, oder – bei Schalenstrukturen – durch Anpassung der Schalendicke. Sie sind damit an der *Bauteilphysik* orientiert. Infolge der engen Kopplung von mechanischen Eigenschaften und Bauteilgestalt können sie recht schnell sehr gute Ergebnisse finden. Ihre Vorgehensweise ist vollständig deterministisch.

Bis hierhin haben wir ausschließlich Einzelverfahren betrachtet. Die Erfahrung zeigt, dass es oft günstiger ist, mehrere Verfahren methodisch zu koppeln. So ist es beispielsweise sinnvoll, zunächst mittels eines eher langsamen globalen Verfahrens den gesamten Lösungsraum nach Bereichen möglicher Optima abzusuchen, um dann in einem zweiten Schritt mit einem schnellen lokalen Verfahren den gefundenen Bereich einzuengen. Ein aktuelles Beispiel für ein vergleichbares Vorgehen ist die Druckbehälteroptimierung, bei der zunächst eine optimale Dickenverteilung gesucht wird und anschließend die konstruktive Gestaltung der variablen Dicke weiter optimiert wird [5]. Derartige methodische Vorgehensweisen sind extrem aufgabenabhängig und müssen deshalb für den Einzelfall explizit entworfen werden.

Schließlich hängt der Erfolg einer Optimierung auch noch von der Aufgabenformulierung ab. Sie enthält stets eine Modellvorstellung, und in diesem Sinne sollte sie minimal sein: Keinesfalls mehr beschreiben als benötigt wird! Wird zuviel von einer Optimierung verlangt, so hat man gute Aussichten, nichts wirklich Verwertbares zu finden. So betrachtet können uns Optimierungsvorgänge auch ein Verständnis über die inneren Zusammenhänge eines (Berechnungs-)modells vermitteln.

5 Matchmaking: Was, wann, warum?

In den vorausgehenden Abschnitten haben wir Aufgabenstellungen und die algorithmischen Umsetzungen von Optimierungen getrennt betrachtet. Bei einer konkreten Optimierungsaufgabe muss man jedoch konkret entscheiden, welche Verfahren überhaupt geeignet sind. Dabei sollte sich die Entscheidung auch an den Zielen orientieren, die erreicht werden sollen.

Die zunächst einfachste Entscheidung kann getroffen werden, wenn eine nichtparametrische Gestaltoptimierung gefordert ist. Hier kommen ausschließlich die spezialisierten Verfahren in Frage, die mit der FEM verknüpft sind. Damit sie funktionieren, muss das Bauteil im Wesentlichen aus homogenem Material bestehen. Die Verfahren haben ihre Grenzen, sobald Forderungen einzuhalten sind, die nicht-physikalischer Natur sind. Ein typisches Beispiel ist die Anzahl und die Orientierung von textilen Lagen in Faserverbünden. Hier liegt ein diskretes Problem vor, für dessen algorithmische Lösung nur kombinatorische Methoden zur Verfügung stehen.

Wird ein Produkt in natürlicher Weise durch eine endliche, nicht allzu große Anzahl von veränderbaren Einflussgrößen beschrieben, so bleiben nur die parametrischen Verfahren als Kandidaten übrig. In der Regel sollte man gradientenorientierte Verfahren vermeiden, weil die Ableitungen der beteiligten Funktionen (Zielgröße und Restriktionen) nach den Entwurfparametern nur numerisch bestimmt werden kann. Das erfordert eine große Anzahl zusätzlicher Modellauswertungen, ohne dass hierdurch bessere Ergebnisse zu erwarten sind. Das oben erwähnte Beispiel der Verzahnungsauslegung ist parametrisch beschrieben, für die Berechnung der denkbaren Zielgrößen Gewicht oder Volumen sowie für die Restriktionen kann man Berechnungsverfahren angeben; so werden die Restriktionen über DIN 3990 vermittelt. Da aufgrund konstruktiver Erfahrungen fast immer sehr gute Startlösungen vorliegen, genügt es, eine so genannte Nachoptimierung vorzunehmen, für die ein lokales Verfahren bestens geeignet ist. Interessant wird diese Aufgabe, sobald die diskreten Größen Zähnezahl und Modul variiert werden sollen. Hier würde man üblicherweise kombinatorisch oder stochastisch vorgehen. Es ist allerdings auch eine alternative Modellbildung möglich, bei der die diskreten Größen *kontinuierlich fortgesetzt* werden, so dass wieder konventionelle Verfahren eingesetzt werden dürfen.

Die Wechselwirkung zwischen Aufgabe, Modellbildung und Lösungsverfahren kann man insbesondere bei Strömungsproblem erkennen. Man stelle sich ein Verteilsystem vor, bei dem n Eingänge mit m Ausgängen druckverlustminimal zu verbinden sind [4]. Zu bestim-

men sind Anzahl und Lage der Verzweigungen, außerdem die Führung der einzelnen Zweige. Hier ist ein mindestens zweistufiges Vorgehen erforderlich: Zunächst muss die Topologie, also die Verzweigungsstruktur gefunden werden, dann kann die Geometrie des Systems parametrisch beschrieben und optimiert werden. Angesichts der Vielfalt möglicher Lösungen wird ein globales Verfahren unumgänglich. Ähnlichen Problemen begegnet man bei der Maß- und Struktursynthese von Mechanismen.

6 Erwartungen und Erfolge

Die recht allgemeine Verfügbarkeit von Optimierungsmodulen, ob autonom oder in Kombination mit numerischer Simulationssoftware weckt die Erwartung, dass Optimierung eine quasi automatisch ablaufende Zusatzoption ist, die bei der Bauteilanalyse als sehr erwünschtes Nebenprodukt abfällt. Gerade im Fall der Strukturoptimierung wird dies durch das Marketing mit Unterstützung durch sehr anschauliche Beispiele suggeriert. So soll es oft genügen, ein FE-Modell zu erstellen, das dann nachgewiesen und sogar optimal gestaltet wird.

Was hier jedoch verschwiegen wird: Eine Optimierung ist nur so gut wie die Modellfunktionen, die man als Zielgröße bzw. Restriktionen heranzieht. Gerade durch die Restriktionen wird der Lösungsraum entscheidend festgelegt. Ist man dabei zu großzügig, wird der Lösungsraum sehr groß, und es entstehen Lösungen, die zwar optimal, aber technisch nicht realisierbar sind. Umgekehrt kann eine zu starke Einschränkung dazu führen, dass die üblichen Verfahren keine Lösungen finden, sondern in der Nähe der Startlösung steckenbleiben. Die Schwierigkeit ist, dass es keine allgemeingültigen Kriterien gibt, mit deren Hilfe man entscheiden kann, wie ein Resultat zu interpretieren ist. Die einzige zuverlässige Aussage über das Resultat eines Optimierungsverfahrens ist, dass es sich um einen so genannten Randpunkt handelt, bei dem also mindestens eine Restriktion exakt ihren Grenzwert annimmt (beispielsweise wird eine geforderte Sicherheit genau erreicht). Bei restriktionsbehafteten Aufgaben ist das eine notwendige Optimalitätsbedingung. Hinreichend ist sie nicht.

Damit werden die Optimierungsverfahren – mit Ausnahme mathematischer Einzelfälle – in einem konstruktionstechnischen Umfeld zu *Verbesserungsverfahren*. Ihr großer Vorteil besteht darin, dass Verschlechterungen der Startlösung ausgeschlossen sind. Wann ein Optimierungsvorgang beendet werden soll, kann man mit numerischen Abbruchkriterien festlegen. Wegen der unvermeidlichen Rundungsfehler hat man damit eine näherungs-

weise Optimallösung. Alternativ kann man bei interaktiver Vorgehensweise die Fortschritte beobachten und als *erfahrener* Konstrukteur selbst verantwortlich entscheiden, ob ein gefundenes Zwischenresultat als *technisches Optimum* akzeptabel ist, weil angesichts möglicherweise sehr langsamer Fortschritte ein Weitersuchen viel zu zeitaufwendig und damit natürlich auch wieder kostentreibend wäre.

7 Cave canem: Was überhaupt nicht geht!

Die algorithmische Durchführung von Optimierungen erfordert ein beachtliches Maß an Optimismus. Aus mathematischer Sicht ist ein Beweis – also eine allgemeingültige Aussage – zu Existenz und Eindeutigkeit von Optimallösungen *unmöglich*. Die folgenden Bemerkungen sollen dies klarstellen.

- Ohne Beschränkungen des Lösungsraums gibt es ausschließlich lokale Optima.
- Ist der Lösungsraum (im Sinne der mathematischen Topologie) *kompakt*, so existiert genau ein Optimalwert. Dieser kann jedoch von mehreren Entwurfsgrößenkombinationen angenommen werden.
- Es gibt genau eine Optimallösung, wenn der Raum aus zulässigen Entwurfsgrößen und zugehörigen Werten der Zielgröße konvex ist.

Für technische Aufgabenstellungen sind diese mathematischen Aussagen wenig hilfreich. Die Konvexität von Entwurfsräumen ist im Allgemeinen nicht nachweisbar.

Da man außer aus Plausibilitätsbetrachtungen nicht weiß, wie viele lokale Optima für eine Aufgabe existieren, gibt es keinen Beweis über den Optimalitätscharakter einer gefundenen Lösung.

Bei technischen Aufgabenstellungen liegt die Optimallösung stets auf dem Rand des zulässigen Gebiets, anderenfalls würden die Restriktionen nicht benötigt. Schon bei kleinen Änderungen der Entwurfsgrößen kann die Lösung unzulässig werden. Nachträgliche Modifikationen des Optimums sind daher *nicht erlaubt*, es sei denn, man führt ausgehend von den Änderungen eine erneute Optimierung durch. Umgekehrt bedeutet dies, dass abgesehen von Sicherheitszuschlägen eine Optimallösung stets eine *Einzelfallbetrachtung* darstellt. Sobald die geringsten Änderungen am Modell vorgenommen werden, ist die Optimalität verloren. Auch hier ist ein erneuter Optimierungslauf erforderlich. In beiden Fällen ist man allerdings normalerweise in der glücklichen Situation, das „alte“ Optimum als gute Startlösung für ein schnelles lokales Verfahren ausnutzen zu können.

8 Zusammenfassung, ganz ohne Ausblick

Unsere Übersicht hat gezeigt, dass man technische Produkte grundsätzlich algorithmisch, also reproduzierbar, optimieren kann. Gleichzeitig haben wir die Grenzen dieser Vorgehensweise beschrieben. Die Anwendung mathematisch orientierter Optimierungsverfahren auf technische Aufgabenstellungen führt eben keineswegs unmittelbar auf die Optimallösung, zumal über ihre Existenz keine Aussagen möglich sind, weil die notwendigen Bedingungen nur in seltenen Ausnahmefällen nachweisbar sind. In dieser Hinsicht stirbt die Hoffnung zuerst. Was man jedoch mit den behandelten Algorithmen immer finden kann, ist ein Optimum im Sinne *vernünftiger* technischer Erreichbarkeit, auch wenn dies nicht unbedingt ein globales mathematisches Optimum sein muss.

Literatur

- [1] Tosca Design Structure. URL: <http://www.fe-design.de> (abgerufen 25.07.2016)
- [2] dynardo OptiSlang. URL: <http://www.dynardo.de> (abgerufen 25.07.2026)
- [3] Prüfer, Hans-Peter: *Parameteroptimierung – Ein Werkzeug des rechnerunterstützten Konstruierens*. Dissertation Ruhr-Uni Bochum, Bochum 1982, ISBN 3-89194-019-X
- [4] Guthmann, Thomas; Engelman, Frank: *Optimierung von Druckbehältern unterschiedlicher Geometrien und Werkstoffe*, in: Stelzer, Ralph (Hrsg.): *Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016*. Dresden 2016, pp. 515-526, ISBN 978-3-95908-062-0
- [5] Grasemann, Karsten: *Druckverlustminimale Rohrleitungsführungen von Abdampfleitungen in Großkraftwerksanlagen*. URN: urn:nbn:de:hbz:294-39779

FE- Netzverformung an Scandaten ähnlicher Objekte

Dipl.-Ing. Matthias Klaus, Dr.-Ing. habil. Christine Schöne,
Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen

Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD

01062 Dresden

Email: matthias.klaus@tu-dresden.de; Internet: <https://tu-dresden.de>

Inhalt: Wir präsentieren eine Methode zur Verformung von FE- Netzen an Scandaten ähnlicher Objekte. Die Verformung verläuft unter Beibehaltung der Netztopologie, wodurch sich lediglich die Positionen der FE-Knoten ändern. FE- Elementtypen und Materialangaben bleiben unverändert, Last- und Lagerstellen passen sich der geänderten Geometrie automatisch an. Die Berücksichtigung relevanter Features in den Datensätzen sichert dabei die Verformung semantisch tatsächlich zueinander gehöriger Objektbereiche. Das Verfahren ersetzt aufwendige Prozesse zur FE- Modellerstellung realer Objekte, wenn Simulationsmodelle bereits für gleichartige Objekte vorhanden sind.

Abstract: We present a method for FE- mesh deformation on scanned data of similar objects. By merely re-computing the coordinates of the FE- mesh nodes, mesh topology isn't changed by the deformation algorithm. FE- element types and material properties stay unmodified, loads and constraints adapt to the new geometry automatically. Deforming essentially corresponding parts of the objects is ensured by considering matching mesh features. Extensive procedures of building FE- models of real world objects can be replaced by this method, if simulation models of similar objects are already in existence.

Stichwörter: 3D- Datenverarbeitung, 3D- Digitalisierung, FEM, Netzverformung

Keywords: 3d data processing, 3d digitalization, FEA, mesh deformation

1 Einleitung

1.1 Motivation

Simulationsmethoden mit Finite- Elemente- Modellen (FE) sind fester Bestandteil der virtuellen Produktentwicklung. Im Ingenieurbereich werden die FE- Berechnungsmodelle zumeist aus einem bereits existierenden Gestaltmodell des zu berechnenden Bauteiles erzeugt. Die Auswahl von Elementtypen und -größen, Materialkennwerten und Randbedingungen wie Lagerungen, Belastungen oder Symmetrien im Preprocessing können hohe Anforderungen an das Fachwissen des Anwenders und an den Aufwand zur manuellen Erzeugung stellen. Inwieweit ein Gestaltmodell direkt zur Diskretisierung

geeignet ist, wird u. a. auch durch die vorhandenen Datenformate und die Schnittstellen der Softwarewerkzeuge beeinflusst. Neben CAD- Daten (Computer Aided Design) existieren auch Geometriedarstellungen mit geringerem Informationsgehalt. Punktwolken, Oberflächennetze und Voxeldaten können als Ergebnis von Berechnungen und Digitalisierungsverfahren direkt an der Gestaltfindung und -validierung von Bauteilen beteiligt sein. Mit Direktschnittstellen oder Softwaretools zur Konvertierung existieren zwar Lösungen, mit denen alle genannten Geometriemodelle an das Preprocessing der FE-Simulation übergeben werden können, in der Praxis bestehen jedoch mitunter hohe Anforderungen an den Anwender und den Umfang von Softwarewerkzeugen. Im klassischen Weg werden aus den diskreten Geometriedaten Flächenmodelle erzeugt. Das als Flächenrückführung bezeichnete Vorgehen ist in guter Qualität nur mit manuellem Eingriff einsetzbar [1], Bild 1.

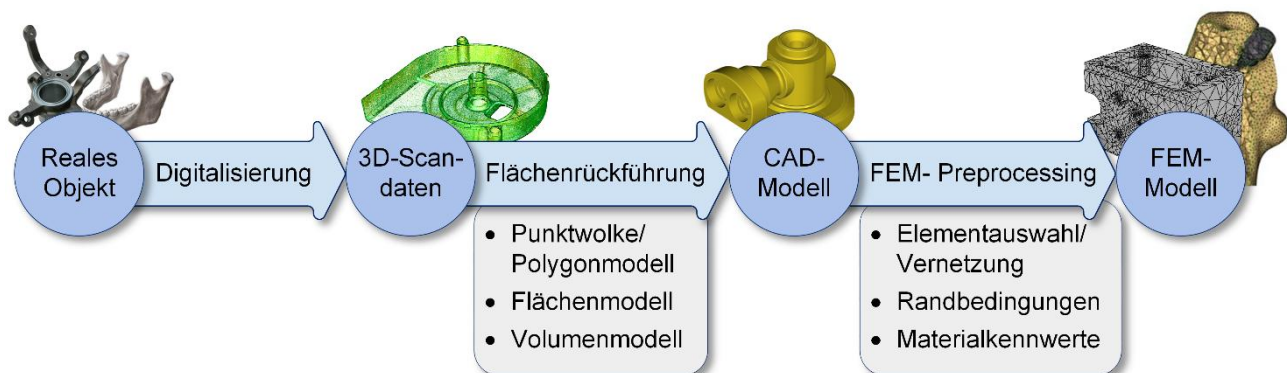


Bild 1: Prozesskette vom realen Bauteil zum FEM- Modell

Die Modellerstellung ist ein zeitintensiver Prozess, zudem laufen Produktentwicklungsprozesse häufig iterativ ab. Auch bei der Gestaltung neuer Bauteile handelt es sich oft nicht um vollständige Neuentwicklungen. Die Geometrie von Gestaltmodellen und die Randbedingungen der Berechnungsmodelle ändern sich dabei nicht vollständig im Vergleich zu bereits vorhandenen Modellen [2]. So werden Umformwerkzeuge in ihrer Einarbeitungsphase mehrfach händisch modifiziert. Zur Validierung werden die Werkzeuge digitalisiert und die Geometriedaten in einer Umformsimulation genutzt [3]. Inwieweit fertigungsbedingte Geometrieabweichungen Einfluss auf die Festigkeit von Bauteilen haben, ist vor allem bei formgebundener Fertigung von Interesse. Produzierte Teile werden digitalisiert und in Simulationen überprüft [4]. Im medizinischen Bereich

werden patientenspezifische Prothesen entwickelt und in Simulationen validiert. Dabei unterscheidet sich die Geometrie sowohl der biologischen Strukturen als auch der Prothesen von Patient zu Patient nur geringfügig [5].

1.2 Problemformulierung

Gegeben ist ein vollständig definiertes FE- Netz eines Objektes (*template*) mit einem einheitlichen oder verschiedenen Elementtypen und sowohl inneren als auch äußeren Knoten. Ferner ist ein Dreiecksnetz (*target*) als Ergebnis der Digitalisierung der Oberfläche eines realen Bauteils gegeben. Das *template* ist unter Beachtung folgender Punkte zu verformen, sodass es der Geometrie des *target* entspricht:

- semantisch korrekte Korrespondenz zwischen *template* und *target*
- gleichmäßige Verzerrung benachbarter FE- Elemente
- konstante Topologie des *template*

Die Vorgaben sichern die direkte Verwendbarkeit des verformten FE- Modells für Simulationsrechnungen ohne Last- und Lagerrandbedingungen sowie die FE- Netzstruktur aufwendig nachbereiten zu müssen.

2 Verfahrensablauf

Die vorgestellte Methode ist in Bild 2 aufgeführt.

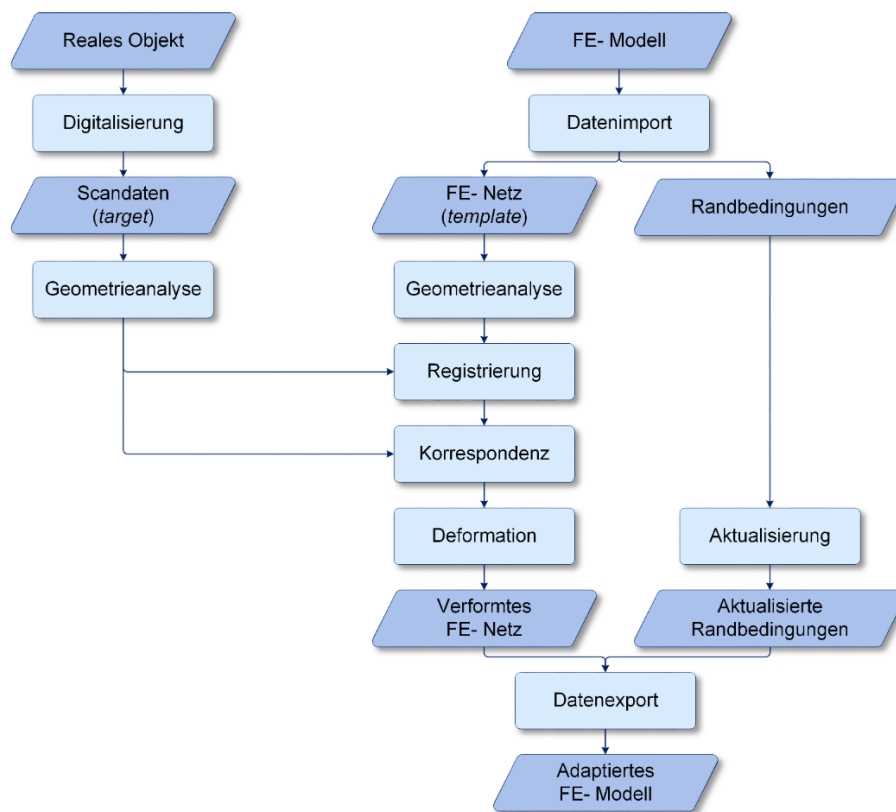


Bild 2: Verfahrensablauf FE- Modelladaption

Datenimport/ -export

Die für die vorgestellte Methode notwendigen Informationen sind die Geometrie des FE-Netzes und die Scandaten des realen Objektes. Zur Korrektur von Randbedingungen innerhalb des FE- Modells sind zudem die Angaben zur Belastung und Lagerung auszuleiten. Die in der Praxis verwendeten Dateiformate sind softwareabhängig, ein Standardaustauschformat existiert nicht. Dennoch sind die relevanten Informationen in der Regel exportierbar und damit für spezifische Untersuchungen zugänglich.

Geometrieanalyse

Die 3D- Datensätze sind im allgemeinen Fall lediglich durch die Koordinaten ihrer Punkte und deren Nachbarschaftsbeziehungen (Topologie) definiert. Weitergehende Objektbeschreibungen, wie Kante, Fläche oder geometrische Primitive (z. B. Ebene, Zylinder), existieren nicht, sind in der präsentierten Methode vor allem bei technischen Bauteilen jedoch vorteilhaft und werden daher algorithmisch erzeugt. Dazu wird für jeden Punkt der Oberfläche die Krümmung berechnet und als Kriterium für die Segmentierung des Datensatzes in Kantenzüge und Flächenabschnitte herangezogen [6]. Mit der erweiterten

Modellbeschreibung sind die nachfolgenden drei Arbeitspunkte variabler, performanter und qualitativ besser durchführbar.

Registrierung

Für die Korrespondenzfindung im nächsten Abschnitt ist es zwar nicht zwingend notwendig, jedoch günstig, beide Datensätze möglichst deckungsgleich in einem gemeinsamen Koordinatensystem auszurichten. Für einen der Datensätze ist dazu eine Transformation (Translation, Rotation, Skalierung) zu bestimmen. Bei sehr großen Geometrieunterschieden ist ein manuelles Eingreifen zur Vermeidung ungünstiger Ausrichtungen von Vorteil. Der Nutzer wählt dazu einzelne Punkte oder Objektbereiche in beiden Modellen aus, mit denen die (Grob-) Registrierung berechnet wird.

Korrespondenz

Die Festlegung korrespondierender Objektbereiche ist neben der Verformung selbst der Kernpunkt des vorgestellten Verfahrens. Üblicherweise wird bei Fragestellungen zur räumlichen Beziehung zweier Objekte (z. B. Soll- Ist- Vergleich der Geometrie in der Qualitätskontrolle, ICP- Verfahren zur Ausrichtung von Scandaten) lediglich die Distanz nah liegender Modelloberflächen berücksichtigt. Ob die ermittelten Eins- zu- Eins-Beziehungen der Oberflächenpunkte auch semantisch korrekt sind, bleibt dabei unberücksichtigt. Die Anordnung, Größe oder der Elementtyp der FE- Elemente werden u. a. durch die Geometrie des Bauteiles bestimmt. Es ist daher von Interesse, dass auch nach der Verschiebung von Knotenpunkten das FE- Netz an die (veränderte) Geometrie angepasst ist. Gleiches gilt auch für Knotenpunkte mit Randbedingungen. Im vorliegenden Ansatz sind daher gleichartige Objektbereiche algorithmisch und händisch miteinander zu verknüpfen. In der Regel besitzen die durch den Anwender bei der Registrierung festgelegten Korrespondenzen auch hier ihre Gültigkeit und können noch erweitert werden. Algorithmisch bestimmte Verbindungen basieren auf ähnlichen Eigenschaften von Punkten/ Kanten/ Flächen in *template* und *target* (Kreis, Zylinder, Ebene, Länge, Durchmesser, mittlere Flächenkrümmung u. a.). Verknüpfungen für Knotenpunkte, die noch nicht mit Punkten im *target* verbunden wurden, werden gleichmäßig zwischen den bestehenden Verknüpfungen iterativ erstellt. Die automatische Korrespondenzerstellung ist abhängig von den geometrischen Unterschieden zwischen *template* und *target* anfällig

für Falschzuordnungen (in Folge nicht eindeutiger Merkmale, Löcher in den Scandaten u. a.) und daher durch den Anwender zu begleiten.

Deformation

Die Eingangsgrößen für die Verformung sind die Koordinaten der FE- Knoten und deren Netztopologie sowie die definierten Korrespondenzen. Da nicht jedem Netzknoten eine Verknüpfung zugeordnet sein muss (z. B. keine sichere Korrespondenz ermittelt oder durch den Anwender gelöscht) bzw. Ungenauigkeiten in den Verbindungen vorhanden sein können, werden die Korrespondenzen nicht direkt zur Verschiebung der Knotenpunkte, sondern als Näherung für einen Verformungsalgorithmus mit folgenden Anforderungen verwendet:

- Beibehaltung der Netztopologie (Elementanordnung und -größen)
- Ausgleich von Ungenauigkeiten in den Korrespondenzen
- Verformung von Netzbereichen ohne Korrespondenzen
- gleichmäßige Verformung des FE- Netzes (Energiminimum)

Der in [7] vorgestellte Ansatz zur Netzverformung basiert auf der differentiellen Geometrie und erfüllt die gegebenen Bedingungen sehr gut. In einer Optimierungsrechnung werden neue Koordinaten für die Knotenpunkte bestimmt. Ein iteratives Vorgehen aus fortlaufender Korrespondenzbestimmung und Verformung mit kleinen Verschiebungsvektoren hat sich in Untersuchungen als stabil und qualitativ gut erwiesen.

3 Anwendungsbeispiel

Zur Veranschaulichung und Verifizierung der Methode dient ein Gussbauteil in vier Varianten, Bild 33. In der Werkzeugeinarbeitung ist die Gussform mehrfach händisch modifiziert worden. Aufgrund von Materialversagen im Einsatzfall sind die Probegussstücke in FE- Analysen näher zu untersuchen. Dazu werden die Bauteile digitalisiert und zu FE- Modellen aufbereitet. Beim ersten Bauteil wird die klassische Prozesskette (Vgl. Bild 1) durchgeführt, Bild 4. Die drei weiteren Bauteile werden mit der vorgestellten, neuen Prozesskette aufbereitet. Das initiale FE- Modell dient den weiteren Bauteilen dabei als *template* (Vgl. Bild 2).



Bild 3: Gussbauteil (4 Varianten)

Für die Aufarbeitung des ersten Modells (*template*) werden 3 Softwarewerkzeuge zur Digitalisierung, Flächenrückführung und FE- Modellerzeugung benötigt. Der Zeitaufwand beträgt ca. 4 Stunden (Digitalisieren, inkl. Registrierung der Einzelaufnahmen und Entfernen von Ausreißern ca. 1h, Flächenrückführung mit Export als Volumenmodell ca. 2,5h, FE- Modellerstellung mit automatischer Vernetzung und einheitlichem Elementtyp ca. 0,25h).

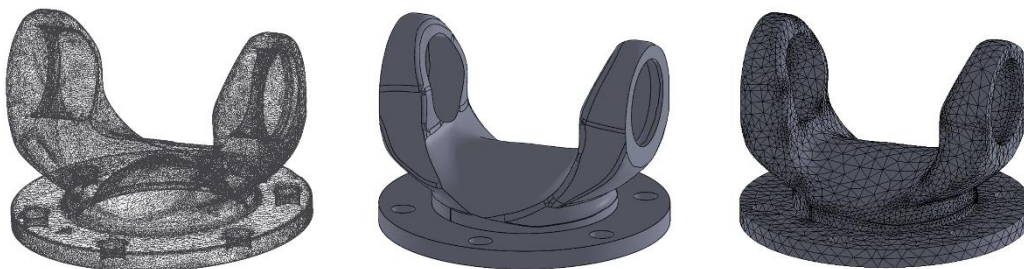


Bild 4: Bauteil 1 (links: Scandaten, Mitte: Flächenmodell, rechts: FE- Netz)

Sowohl das *template* (FE- Netz) als auch das *target* (Scandaten eines weiteren Gussbauteils) durchlaufen die Prozessschritte der FE- Modelladaption (Vgl. Bild 2), Bild 5 - 8. Das Digitalisieren nimmt unverändert ca. 1 Stunde in Anspruch. Die Flächenrückführung und FE- Modellerstellung entfallen und werden durch die neue Prozesskette ersetzt (Software: prototypische Eigenentwicklung). Die Prozessschritte verlaufen automatisch, der Anwender greift vor allem bei der Detektion von Features (Bild 5, 6 rechts) und der Korrespondenzerstellung (Bild 7) korrigierend ein. Die Geometrieanalyse ist dabei ein optionaler Prozessbaustein, der vor allem bei technischen Bauteilen (z. B. im Gegensatz zu biologischen Objekten) die semantisch korrekte Korrespondenz von *template* und *target* deutlich verbessert bzw. den Nutzer bei der manuellen Verknüpfung beider Datensätze unterstützt. Bild 8 zeigt den Scan- und FE- Datensatz sowohl im Ausgangszustand als auch nach der Deformation. Der Zeitaufwand für das abgebildete Beispiel betrug ca. 0,5 Stunden, der zum überwiegenden Teil durch Nutzerinteraktion entstand (z. B. Bild 6 rechts: nicht alle Bohrungskanten am Flansch wurden automatisch als Feature detektiert).

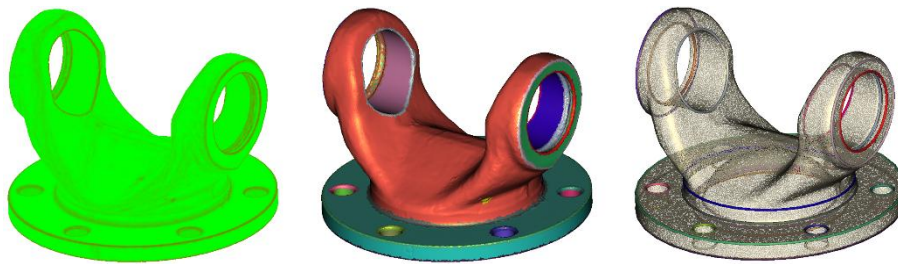


Bild 5: Scandaten Geometrieanalyse (links: Oberflächenkrümmung, Mitte: Segmentierung, rechts: Features)

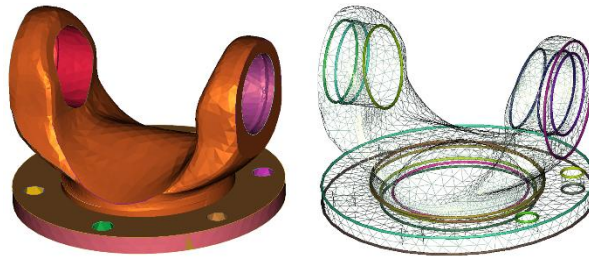


Bild 6: FE- Netz Geometrieanalyse (links: Segmentierung, rechts: Features)

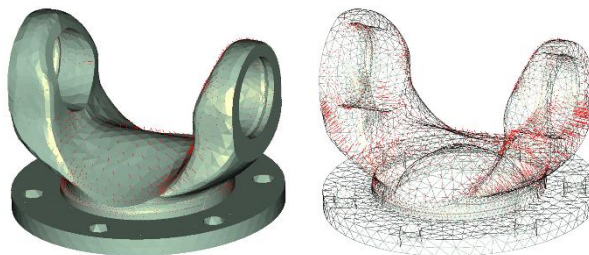


Bild 7: Ergebnis Korrespondenzerstellung (FE- Netz mit Verschiebevektoren)
(links: Oberflächendarstellung, rechts: Netzdarstellung)

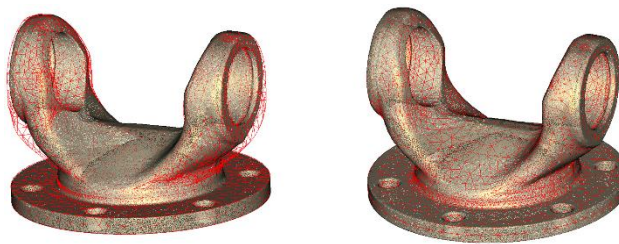


Bild 8: Vergleich Vorher - Nachher (Scandaten in Oberflächendarstellung, FE- Netz in Netzdarstellung)

4 Zusammenfassung

Die Adaption von vollständig erstellten FE- Netzen an Scandaten ähnlicher Objekte kann ein Werkzeug zur effektiven Integration realer Objekte in virtuelle Konstruktionsprozesse sein. Die Ergebnisqualität der präsentierten Methode ist stark von der vom Anwender begleiteten Verknüpfung des vorhandenen FE- Netzes mit den Scandaten abhängig. Die Nutzerinteraktion beschränkt sich im Wesentlichen auf das Verbinden korrespondierender Punkte/ Objektbereiche in beiden Datensätzen und ist damit gegenüber der klassischen

Prozesskette mit Flächenrückführung und Neuerstellung des FE- Modells in vielen Szenarien deutlich aufwandsärmer.

Die Untersuchungen sind Teil des von der DFG geförderten Projektes STE 1451/9-2.

Literatur

- [1] Schöne, C.: *Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik*, TU Dresden - Fak. Maschinenwesen, Habilitationsschrift, Verlag Dr. Hut, München, 2009
- [2] Sadowski, T.: *Automatisierte Modellerstellung für die Mehrkörpersystemsimulation*, Technische Universität Berlin - Fak. Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertationsschrift, 2014
- [3] Schöne, C.; Stelzer, R.; Süße, D.; Schmidt, U.: *Reverse Engineering in der Einarbeitungsphase der Blechumformung*, ZWF Jahrg. 105 (2010) 6, Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [4] Katona, S.; Kestel, P.; Koch, M.; Wartzack, S.: *Vom Ideal- zum Realmodell: Bauteile mit Fertigungsabweichungen durch automatische FE-Netzadaption simulieren*, In: Stelzer, R.: Entwerfen, Entwickeln, Erleben - Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Dresden, 2014
- [5] Schöne, C.; Stelzer, R.; Sembdner, P.: *Individual contour adapted functional implant structures in Titanium*, In: Barto, P.: Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping, London, 2012
- [6] Wilke, W.: *Segmentierung und Approximation großer Punktwolken*, Technische Universität Darmstadt - Fak. Mathematik, Dissertationsschrift, 2002
- [7] Sorkine, O.; Alexa, M.: *As-Rigid-As-Possible Surface Modeling*, In: SGP '07 Proceedings of the fifth Eurographics symposium on Geometry processing, Eurographics Association, Aire-la-Ville, 2007

Untersuchung des Leistungspotentials GPU und HPC beschleunigter Gleichungslöser für den Einsatz in der Finiten-Elemente-Analyse mit Z88

Markus Zimmermann, Daniel Billenstein, Daniel Goller,
Johannes Glamsch, Frank Rieg

Universität Bayreuth, Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth
Email: markus.zimmermann@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de>

Inhalt: In verschiedensten Ingenieurwissenschaften ist die Finite-Elemente-Analyse (FEA) ein unverzichtbares Werkzeug geworden. Diese stützt sich auf eine definierte Abfolge von Schritten, wobei eine der mathematischen Hauptaufgaben die Lösung eines linearen Gleichungssystems ist, was, abhängig vom vorliegenden Netz, sehr viel Zeit und Rechenleistung beanspruchen kann. Daher liegt in diesem Schritt ein großes Optimierungspotential den Produktentstehungsprozess zu beschleunigen und die dadurch entstehenden Kosten zu reduzieren. In den letzten Jahren wurde es möglich mit Hilfe von Grafikprozessoren allgemeine Berechnungen durchzuführen (GPGPU: General Purpose Computation on Graphics Processing Unit). Eine andere Möglichkeit der massiven Parallelisierung zur Beschleunigung ist die Verwendung von Computer-Cluster.

Abstract: In almost any engineering science, finite element analysis (FEA) has become an indispensable tool. It is based on a defined sequence of steps, whereas one of the main mathematical tasks is the solution of a linear system, which, depending on the mesh, can take a significant amount of time and processing power. Hence, this step offers a great potential for optimization, to speed up the product development process and reduce the associated costs. In recent years this speedup has become possible with graphics processors being able to perform general calculations (GPGPU: General Purpose Computation on Graphics Processing Unit). Another possibility of massive parallelization for acceleration are computer clusters.

Stichwörter: FEA, FEM, Parallelisierung, Solver, GPU, GPGPU, High Performance Computing, HPC.

Keywords: FEA, FEM, parallelization, solver, GPU, GPGPU, high performance computing, HPC.

1 Einleitung

In den Ingenieurwissenschaften beschränkt sich die Auslegung von Bauteilen und die Beurteilung der Ergebnisse häufig auf die entsprechenden DIN-Normen. Doch die Berechnung von Bauteilen und Baugruppen mittels komplexer numerischer Simulationen steigt in den letzten Jahren erheblich an. Hier ist besonders die Finite-Elemente-Methode (FEM), oder auch Finite-Elemente-Analyse (FEA), zu nennen, die ein matrixbasiertes

Berechnungsverfahren ist. Dabei muss das lineare Gleichungssystem $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$ gelöst werden. \mathbf{A} ist die Gesamtsteifigkeitsmatrix. Eine FEA gliedert sich in die drei Hauptschritte: Modellaufbereitung, Lösen des Gleichungssystems und Ergebnisauswertung. Mathematisch gesehen gibt es zwei grundverschiedene Herangehensweisen zum Lösen eines linearen Gleichungssystems, direkte und iterative Verfahren. Die iterativen Gleichungslöser nähern sich mit jeder Iteration der Lösung an, wobei der Nutzer entscheiden muss, welcher maximale Fehler noch tolerierbar ist. Weiterhin zeichnen sie sich in der Regel durch einen geringeren Speicherverbrauch im Vergleich zu direkten Verfahren aus. Für die FEA hat sich das Verfahren der konjugierten Gradienten (CG) durchgesetzt. Im Kern beruht das Verfahren auf mehrfachen Matrix-Vektor Rechenoperationen zur Ermittlung des Lösungsvektors, der dann für die nächste Iteration herangezogen wird.

2 Parallelisierung von Lösungsalgorithmen der FEA

Ob und wie das Lösen des LGS parallelisierbar ist, hängt zunächst davon ab, ob der Vorgang an sich mathematisch parallel bearbeitbar ist. Dies ist bei den für das CG-Verfahren notwendigen Matrix-Vektor Operationen der Fall. Jeder Eintrag im Ergebnisvektor ergibt sich als Summe der jeweiligen Zeile der Matrix und dem Vektor der darauf angewendet wird. Diese Berechnung ist für jede Zeile unabhängig von allen anderen.

2.1 Architekturen (CPU / GPU)

Der Hauptprozessor (CPU) eines Rechners ist auf die Bearbeitung beliebiger Befehlssätze mit unterschiedlichen Daten optimiert, da dies den „Normalbetrieb“ eines Rechners darstellt. Sie sind daher extrem flexibel einsetzbar. Ein Grafikprozessor (GPU) hingegen kann immer nur einen Befehl mit unterschiedlichen Daten gleichzeitig ausführen. Diese Unterschiede zwischen CPU und GPU beruhen auf dem eigentlichen Verwendungszweck von Grafikkarten, dem Rendern von Videospielen oder anderen grafikintensiven Anwendungen. Bei Grafikprozessoren wird viel mehr Chipfläche für die arithmetischen Recheneinheiten verwendet. Dies geht allerdings zu Lasten der Steuerlogik. Somit hat eine CPU, auch wenn diese mehrere Rechenkerne besitzt, bei weitem nicht so viele wie eine GPU. Die Anzahl kann, je nach Grafikkarte, um den Faktor 100 bis 1000 höher sein. So hat beispielsweise die Tesla K40 von NVIDIA 2880 Rechenkerne. Nach der Flynscen

Klassifizierung [1] von Parallelrechnern werden vier grundlegende Architekturen unterschieden:

- SISD: Single Instruction, Single Data
- MISD: Multiple Instruction, Single Data
- SIMD: Single Instruction, Multiple Data (GPU)
- MIMD: Multiple Instruction, Multiple Data (CPU)

Die Varianten MIMD und SIMD entsprechen den klassischen CPUs und GPUs. Das bedeutet, dass die Prozessorkerne einer CPU unterschiedliche Instruktionen mit unterschiedlichen Daten ausführen können, was bei einer GPU nicht der Fall ist.

2.2 Grafikkarte (GPU) gegen Rechencluster

Eine GPU bezieht ihre Rechengeschwindigkeit aus der Anzahl der Rechenkerne, allerdings zu Lasten der Flexibilität der Instruktionen. Ein Rechenverbund (Computercluster) hingegen besteht meist aus einer großen Anzahl von Rechnern mit normalen CPU's. Diese CPUs können zwar auch 16 oder 24 Rechenkerne besitzen, dennoch werden viele Rechner benötigt um die Anzahl einer Grafikkarte zu erreichen. Ein Computercluster erreicht die Flexibilität in Hinblick auf die Möglichkeit der unterschiedlichen Instruktionen je Kern und dennoch einer hohen Anzahl an Kernen über die Vernetzung der Rechner. Die Daten liegen damit nicht in einem einzelnen Speicher zugriffsfähig, sondern sind über verschiedene Rechner verteilt. Ob diese Art der Parallelisierung für ein Programm möglich ist, hängt vom verwendeten mathematischen Verfahren ab. Aufgrund leistungsfähiger Netzwerksysteme ist jedoch ein Vergleich beider Möglichkeiten einer massiven Parallelisierung zur Beschleunigung des Lösungsprozesses im Falle von FEA lohnenswert.

3 Leistungspotential GPU beschleunigter Gleichungslöser

Das Standardverfahren in Z88 zur Lösung von Gleichungssystemen für die FEA ist der als Methode der konjugierten Gradienten bekannte Algorithmus, welcher 1952 von Hestenes und Stiefel [3] entwickelt wurde. Dieses Verfahren basiert darauf, das Minimum einer quadratischen Funktion zu finden [2, 3]. Es wird eine symmetrische und positiv definite Matrix vorausgesetzt. Da die Matrizen, welche bei der FEA auftreten, jedoch nach Rieg [4]

oft eine große Konditionszahl besitzen, kann es dazu führen, dass der CG-Algorithmus sehr langsam konvergiert (vgl. [2]). Um die Anzahl der notwendigen Iterationen zu reduzieren, wird daher eine Modifikation des CG-Algorithmus verwendet, welcher durch eine Vorkonditionierung die Konditionszahl der Matrix verbessert, womit eine schnellere Konvergenz erreicht werden kann. Hierfür ist jedoch die Speicherung zweier zusätzlicher Vektoren und der Vorkonditionierungsmatrix M notwendig. Weiterhin muss in jedem Iterationsschritt ein zusätzliches Gleichungssystem gelöst werden. In der CPU-Variante der Z88-Implementierung des Gleichungslösers wird die Gesamtsteifigkeitsmatrix zur Speicherreduzierung symmetrisch abgelegt, d.h. dass nur die untere Hälfte im Speicher verfügbar ist.

3.1 Speicherart der Matrix

Zur Untersuchung der Speicherarten wird eine Matrix-Vektor Multiplikation mit einer symmetrischen und einer vollständig gespeicherten Matrix verglichen. Bild 1 zeigt die Unterschiede in der Auslastung der einzelnen Einheiten der GPU. Hier wird ersichtlich, dass die *Load/Store* Einheiten, welche dafür zuständig sind, Daten aus dem Grafikspeicher zu laden und zu schreiben, sehr stark ausgelastet sind, wohingegen die Auslastung der anderen Einheiten, beispielsweise den *Arithmetic* Einheiten, welche die mathematischen Operationen durchführen, eher gering ist. Jeder Thread ist zu fast 90% seiner Rechenzeit inaktiv. Dies lässt auf eine Bandbreitenlimitierung schließen. Für die Matrix-Vektor Multiplikation mit vollständig gespeicherter Matrix ergibt sich eine wesentlich homogenere Auslastung.

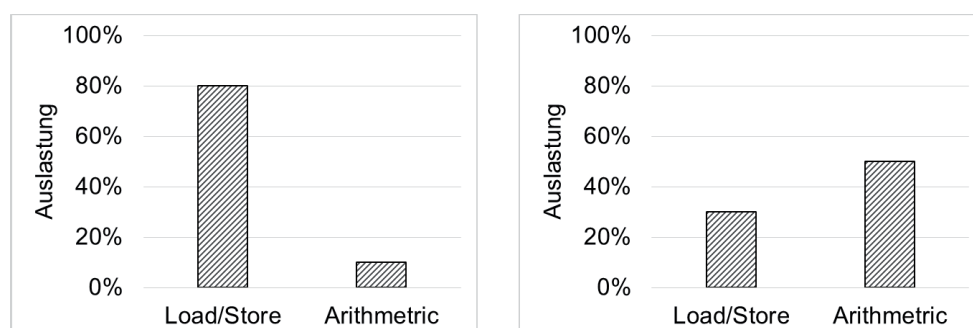


Bild 1: Auslastung der GPU bei der Multiplikation einer symmetrisch (links) und einer vollständig (rechts) gespeicherten Matrix [6]

3.2 Vergleich der Vorkonditionierer

Damit sich der Mehraufwand durch die Vorkonditionierung lohnt, muss die Vorkonditionierungsmatrix einfach zu generieren sein und eine möglichst kleine Konditionszahl besitzen. Es wurden der Jacobi-Vorkonditionierer sowie die unvollständige LU-Zerlegung (ILU) verwendet und ihre Leistungsfähigkeit untersucht. Wird als Vorkonditionierungsmatrix $\mathbf{M} = \mathbf{D}$ gewählt, entspricht dies der Jacobi-Vorkonditionierung (vgl. [5]), wobei \mathbf{D} die Diagonalmatrix der Gesamtsteifigkeitsmatrix \mathbf{A} ist. Das als ILU-Zerlegung bezeichnete Verfahren, beruht auf der Zerlegung einer Matrix \mathbf{A} in eine untere Dreiecksmatrix \mathbf{L} mit den Diagonalelementen 1 und einer oberen Dreiecksmatrix \mathbf{U} . Die entstehende Matrix \mathbf{L} weist jedoch in der Regel eine größere Anzahl an Nicht-Null-Elementen als die Matrix \mathbf{A} auf, was als „fill-in“ bezeichnet wird.

Tabelle 1: Modellparameter zur Untersuchung der Vorkonditionierung [6]

Beispiel	Anzahl an Freiheitsgraden	Nicht-Null-Elemente
1	9633	333.259
2	18.498	624.242
3	171.552	6.810.000
4	223.074	8.562.846

Daher ist die Vorkonditionierungsmatrix nur eine Näherung, denn die Besetzungsstruktur von \mathbf{A} wird beibehalten. Zur Beurteilung des Einflusses der Vorkonditionierung auf die Rechenzeit wurden vier Modelle mit steigender Anzahl an Freiheitsgraden untersucht. Die Modellparameter sind in Tabelle 1 gelistet. In Bild 2 ist die Anzahl der notwendigen Iterationen für die verschiedenen Vorkonditionierer aufbereitet.

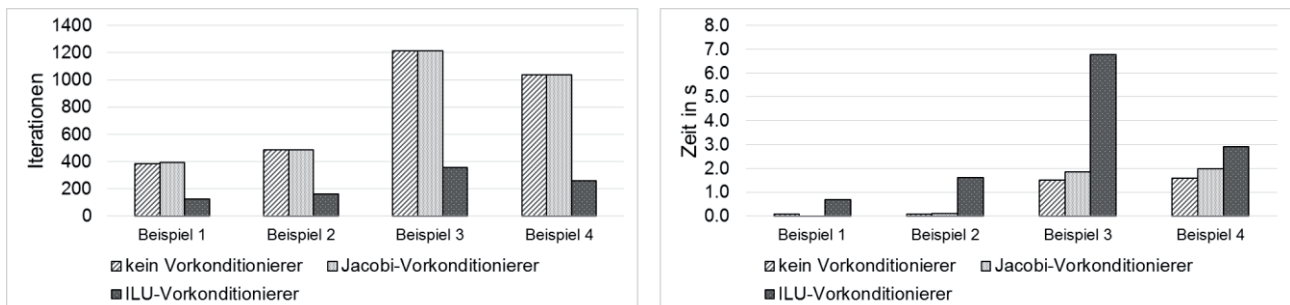


Bild 2: Vergleich der Iterationen (links) und der Rechenzeit (rechts) mit verschiedenen Vorkonditionierern [6]

Die Verwendung des ILU-Vorkonditionierers verringert die Anzahl der Iterationen, die bis zur Konvergenz nötig sind, für die hier betrachteten Gleichungssysteme etwa um den Faktor drei bis vier gegenüber der Verwendung ohne Vorkonditionierung.

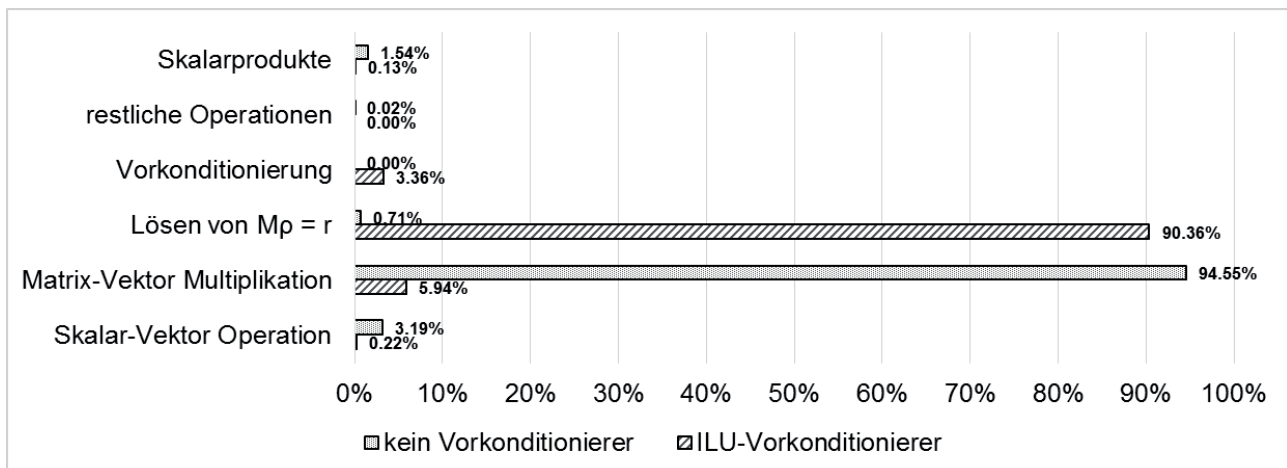


Bild 3: Gegenüberstellung der Rechenzeit für die einzelnen Schritte des CG-Algorithmus [6]

Es ist zu sehen, dass der ILU-Vorkonditionierer zwar eine Verringerung der Iterationen mit sich bringt, sich dieser Mehraufwand jedoch nicht lohnt und mehr Rechenzeit benötigt wird. Um genauer zu analysieren, wieso der Mehraufwand, der durch die Vorkonditionierung entsteht, sich bei den hier untersuchten Gleichungssystemen nicht lohnt,

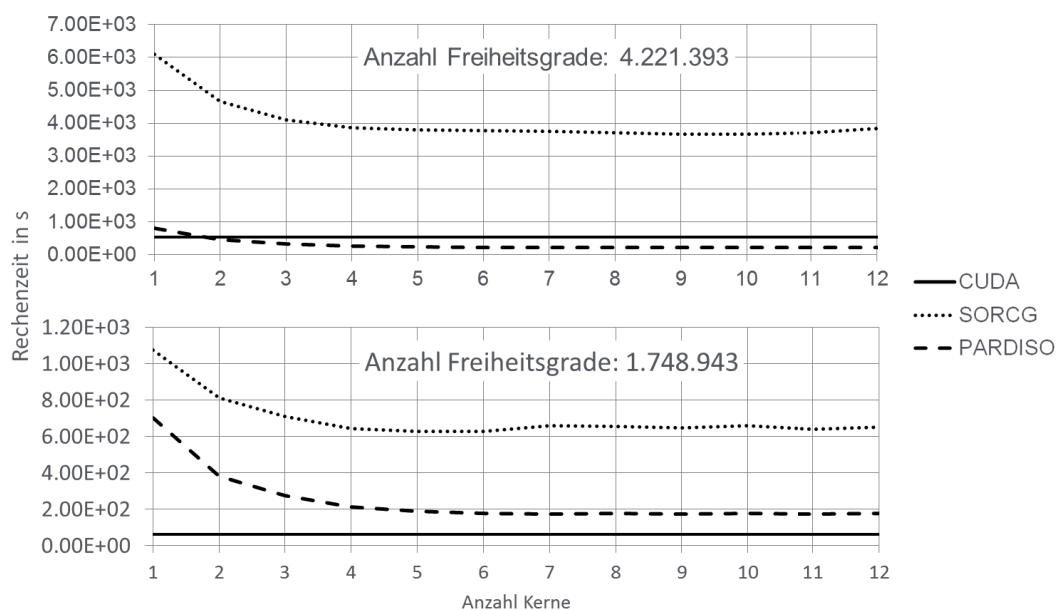


Bild 4: Rechenzeit bei Variation der Kernanzahl

wurde untersucht, wie groß der Anteil der einzelnen Schritte des CG-Algorithmus an der Gesamtrechenzeit ist. Wie Bild 3 zeigt, lässt sich daraus erkennen, dass ohne Vorkonditionierung der Großteil der Rechenzeit auf die Matrix-Vektor Multiplikation entfällt. Wird die ILU-Vorkonditionierung verwendet so, entfallen 90% der benötigten Zeit auf das Lösen des Gleichungssystems für die Vorkonditionierung ($M\rho=r$). Folglich wird auf der GPU das CG-Verfahren ohne Vorkonditionierung eingesetzt. Anschließend noch eine Betrachtung mit zwei größeren Beispielen. Bild 4 zeigt die Gegenüberstellung der Rechenzeit bezogen auf die Anzahl der verwendeten Kerne auf einem Computer. Betrachtet wird die vorkonditionierte CPU-Variante des CG-Verfahrens (SORCG), die GPU-Implementierung (CUDA) und der direkte, parallelisierte Gleichungslöser der Intel-Bibliothek (PARDISO). Deutlich zu erkennen ist, dass mit der Anzahl der Kerne die Berechnungszeit sinkt bis ein Plateau erreicht wird. Je nach Beispiel kann es vorkommen, dass das iterative Verfahren auf der GPU den direkten Gleichungslöser schlägt, unabhängig von der Anzahl der Kerne.

4 Leistungspotential Cluster-beschleunigter Gleichungslöser

Wie schon im Abschnitt 2.2 angedeutet, ist ebenfalls die Beschleunigung durch einen Computer-Cluster interessant. Dazu wurde das CG-Verfahren ohne Vorkonditionierung implementiert.

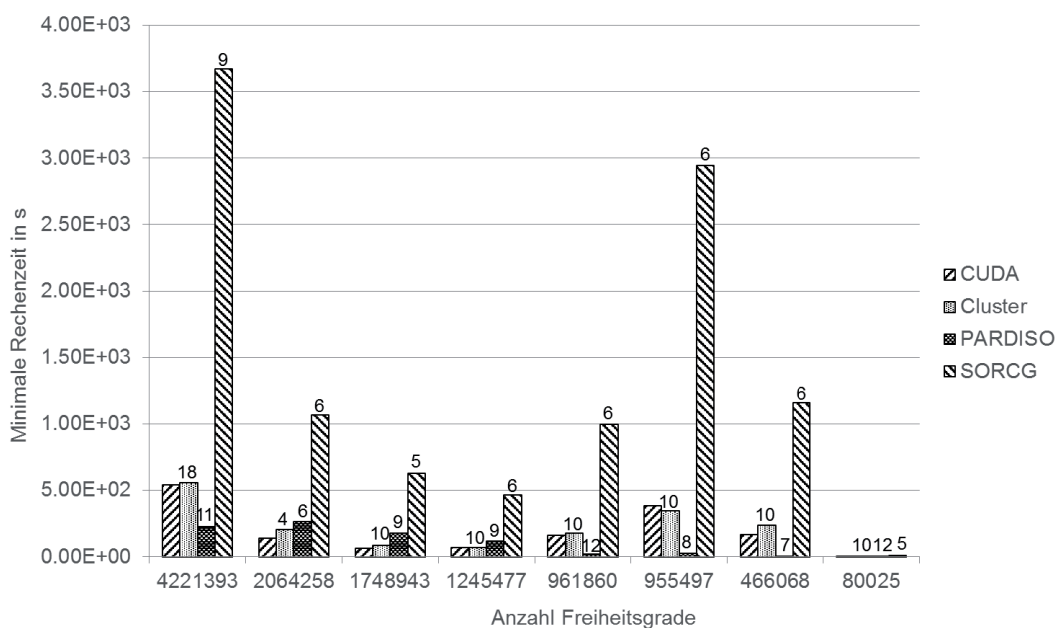


Bild 5: Minimale Rechenzeit der unterschiedlichen Lösungsverfahren bei acht Beispielen mit der jeweils optimalen Anzahl an Rechenkernen.

Hier wird jedoch die Matrix auf die beteiligten Rechner aufgeteilt. In der aktuellen Variante erfolgt die Zerlegung zeilenweise. Eine Zeitmessung ist auf einem Computer-Cluster grundsätzlich sehr viel schwerer, da die Netzwerkstruktur und die Auslastung der beteiligten Rechner die Rechenzeit stark beeinflussen. Jede Rechnung wurde daher fünfmal durchgeführt, wobei Abweichungen zur geringsten Rechenzeit (Bild 5) von bis zu 200% auftreten können. Bild zeigt, dass bei allen Beispielen die GPU- und die Cluster-Variante des Gleichungslösers in etwa die gleiche Berechnungszeit benötigen. Dabei wurde für die Cluster-Rechenzeit die geringste Zeit der fünf Messungen angesetzt. Die Zahlen über den Balken geben dabei die Anzahl der Kerne an. Auf der GPU wird immer die maximale Anzahl (hier 2880) an Kernen verwendet.

5 Fazit

Wie sich zeigt, ist durch die Auslagerung des Gleichungslösers auf die GPU eine deutliche Beschleunigung möglich, welche mit wachsender Größe des Gleichungssystems immer weiter zunimmt. In Bezug auf eine Vorkonditionierung ist bei den hier getesteten Modellen deutlich geworden, dass diese nicht sinnvoll erscheint. Bezüglich der Rechenzeit liegen GPU und Computer-Cluster (in den hier verwendeten Konfigurationen) praktisch gleich auf. Der Einsatz eines Computer-Cluster ist ratsam bei extremen Arbeitsspeicherbedarf, der durch einen Einzelplatzrechner nicht abzudecken ist. Wenn möglich sollte jedoch ein direkter parallelisierter Gleichungslöser verwendet werden.

Literatur

- [1] Rauber, Thomas; Rünger, Gudula: *Parallele Programmierung*. Berlin (u.a.): Springer, 2007.
- [2] Alefeld, Götz; Lenhardt, Ingrid; Obermaier, Holger: *Parallele numerische Verfahren*. Berlin (u.a.): Springer, 2002.
- [3] Schwarz, Hans Rudolf; Köckler, Norbert: *Numerische Mathematik*. 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009
- [4] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard; Alber-Laukant, Bettina: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure*. 5. Aufl. München (u.a.): Carl Hanser Verlag, 2014
- [5] Kanzow, Christian: *Numerik linearer Gleichungssysteme: Direkte und iterative Verfahren*. Berlin (u.a.): Springer, 2005.
- [6] Glamsch, Johannes: Bachelor-Thesis: Untersuchung des Leistungspotentials GPU beschleunigter Gleichungslöser für den Einsatz in der Finiten Elemente Analyse. Juni 2014

Informationsübertragung zwischen Knoten in der Finite-Elemente-Analyse am Beispiel der Wärmeübertragung

Christian Dinkel, Daniel Goller, Christian Glenk, Frank Rieg

Universität Bayreuth, Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth

Email: christian.dinkel@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de>

Inhalt: Verschiedene mathematische Verfahren dienen dazu, Kontaktprobleme in der Finiten-Elemente-Analyse lösen zu können. Diese Verfahren ermöglichen es, zwei oder mehrere Knoten verschiedener Bauteile mathematisch miteinander zu verbinden, um die Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Bauteilen zu berücksichtigen. Dazu müssen Informationen zwischen bestimmten Knoten des Finite-Elemente Netzes übertragen werden. Dies kann nahezu beliebig ausgebaut werden, indem nicht nur die Information, welche Knoten miteinander interagieren, in das mathematische Gleichungssystem eingebaut wird, sondern auch weitere Zusammenhänge. Im vorliegenden Beitrag geschieht dies am Beispiel der Wärmeübertragung. Es wird gezeigt, wie die analytischen Zusammenhänge der Wärmeleitung zwischen Finite-Elemente Knoten in die Kontaktdefinition integriert werden, um einen unvernnetzten Bereich zwischen zwei Bauteilen zu überbrücken. Auf diese Weise kann die Berechnungsdauer erheblich reduziert, die thermischen Effekte im betrachteten Bereich aber dennoch berücksichtigt werden.

Abstract: There are various mathematical methods to solve contact problems within Finite-Element-Analyses. These methods allow it to connect two or more nodes of different parts in a mathematical way to consider the interactions of the contacts between the involved parts. Information transmission between the nodes of the finite-element mesh takes place. This transmission can be expanded almost indefinitely by not only transmitting which nodes are involved but also by including further correlations. In this paper this happens in case of heat transmission. It is shown how the analytical relations of heat conduction between finite-element nodes can be integrated in the contact definition to bridge over a non-meshed area between two parts. This way, the computation duration can be reduced significantly, whereas the thermal effects are still considered.

Stichwörter: Finite-Elemente-Analyse, thermische Simulation, Lagrange-Multiplikator-Verfahren.

Keywords: Finite-Element-Analysis, thermal simulation, method of Lagrange multiplier.

1 Einleitung

Kontaktberechnungen in der Finite-Elemente-Analyse (FE-Analyse, FEA) sind immer dann wichtig, wenn Bauteile miteinander interagieren. Dabei existieren mehrere Verfahren, die es ermöglichen, Kontaktprobleme in das Gesamtgleichungssystem zu integrieren und dieses anschließend zu lösen. Die am häufigsten verwendeten Ansätze sind das Lagrange-Multiplikator-Verfahren und das Penalty-Verfahren. Diese Verfahren ermöglichen es, eine Beziehung zwischen denjenigen Knoten zweier oder mehrerer Bauteile zu definieren, die miteinander in Kontakt stehen.

2 Stand der Technik

Stehen zwei oder mehrere Bauteile in Kontakt, müssen Informationen zwischen den Knoten der beteiligten Bauteile übertragen werden. Dazu gehören Informationen, die die wechselwirkende Kontaktkraft, die Reibung oder das Abheben bzw. das Durchdringen der Bauteile betreffen. Zur Lösung von Kontaktproblemen sind aus der Literatur mehrere Berechnungsverfahren bekannt [1]:

- Lagrange-Multiplikator- oder Lagrange-Verfahren
- Gestörtes Lagrange-Verfahren
- Penalty-Verfahren u. a.

Daneben existieren zahlreiche weitere Verfahren, die allerdings weniger weit verbreitet sind. Hierfür sei auf [1,2] verwiesen. In diesem Beitrag wird sich nachfolgend auf das Lagrange-Verfahren konzentriert. Bei diesem Verfahren wird die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Finite-Elemente-Gleichungssystems um die sogenannten Lagrange-Multiplikatoren erweitert. In der linearen Finite-Elemente-Analyse wird der Verschiebungsvektor u aus der Gesamtsteifigkeitsmatrix K und dem Kraftvektor F berechnet, s. Formel (1) [3].

$$Ku = F \tag{1}$$

Bezogen auf die thermische FE-Simulation ergibt sich ein analoger Zusammenhang. Die zu bestimmende Größe an jedem Knoten ist – anstelle der Verschiebung – nun die Temperatur T . Diese bestimmt sich für stationäre Thermoanalysen mithilfe der Wärmeleitfähigkeitsmatrix K und dem Vektor der Wärmeströme Q . Somit ergibt sich Formel (2) [3].

$$KT = Q \quad (2)$$

Sind mehrere Komponenten an der FE-Simulation beteiligt, interagieren die Steifigkeits- bzw. Wärmeleitfähigkeitsmatrizen gemäß dem Lagrange-Verfahren. Dies ist schematisch in Bild 1 gezeigt.

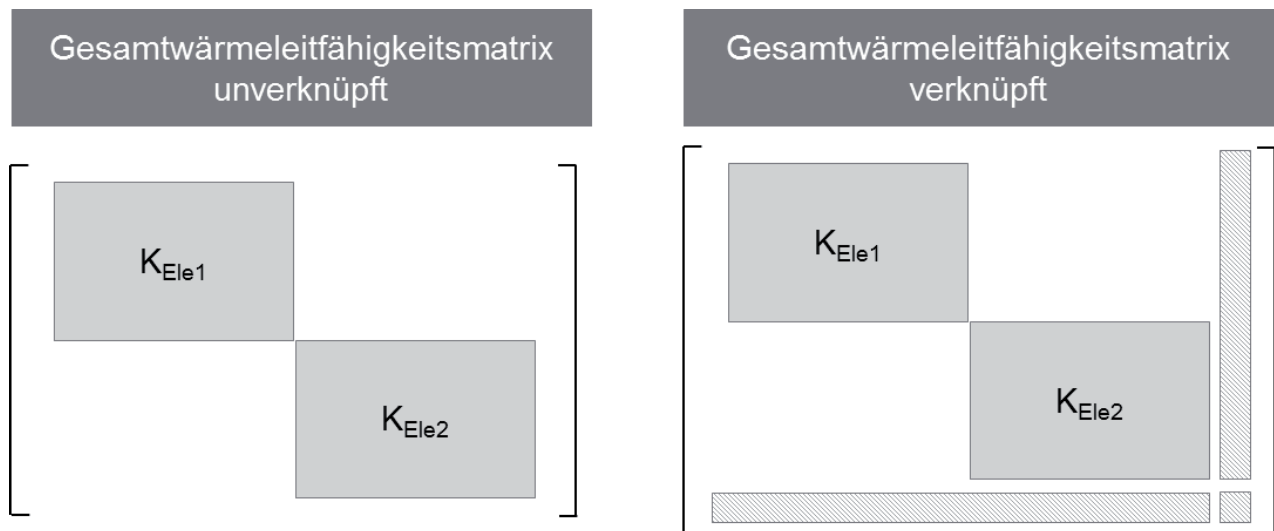


Bild 1: Schematische Darstellung gekoppelter Gesamtwärmeleitfähigkeitsmatrizen; links: unverknüpft; rechts: mittels Lagrange-Verfahren verknüpft.

Sind zwei Bauteile nicht über einen Kontaktalgorithmus verknüpft, existiert keine Verbindung der beiden Elementsteifigkeitsmatrizen K_{Ele1} und K_{Ele2} , s. Bild 1 links. Das Lagrange-Verfahren ermöglicht eine solche Verknüpfung durch das Einführen zusätzlicher Zeilen und Spalten in das Gleichungssystem. Ist, wie in Bild 1 rechts beispielhaft gezeigt, nur ein einzelner Knoten betroffen, muss die Gesamtwärmeleitfähigkeitsmatrix um je eine Zeile und Spalte erweitert werden. Analog folgt die Erweiterung des Temperatur- und Wärmestromvektors.

3 Informationsübertragung in der thermischen Finite-Elemente-Analyse

Oben beschriebenes Lagrange-Verfahren kann im Kontaktfall zweier Bauteile Informationen zwischen diesen Bauteilen übertragen. Stehen diese Bauteile jedoch nicht in Kontakt, kann mittels des Lagrange-Verfahrens dennoch ein Informationsaustausch stattfinden. Dies ist schematisch in Bild 2 dargestellt.

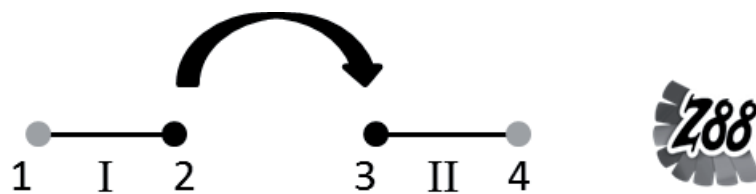


Bild 2: Verknüpfung zweier Stabelemente im FE-System Z88

Dabei wird zwischen zwei Stabelementen (Elementnummern: römische Ziffern I und II) ein unvernetztes Zwischenstück zwischen Knoten 2 von Element I und Knoten 3 von Element II überbrückt, wie Bild 2 zeigt. Dieses Modul wurde auf Basis des bestehenden und am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth entwickelten Finite-Elemente-Rechenkerns Z88 konzipiert und in der Programmiersprache C umgesetzt. In einem ersten Schritt wird über dieses Verfahren eine Übertragungsfunktion vorgegeben, die besagt, dass die Temperatur an Knoten 3 dem Temperaturwert an Knoten 2 entsprechen soll. Als Randbedingungen werden an Knoten 1 eine Temperatur $T_1 = 30\text{ °C}$ und an Knoten 4 eine Temperatur $T_4 = 10\text{ °C}$ definiert. Bild 3 zeigt die errechneten Temperaturen an Knoten 2 und 4 nach einer FE-Simulation.

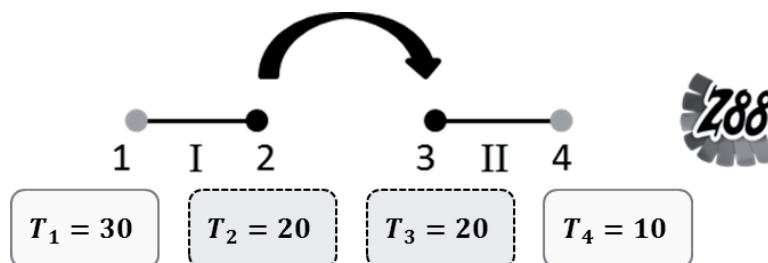


Bild 3: Ergebnis an Knoten 2 und 3 der Simulation bei Verknüpfung zweier Stabelemente im FE-System Z88

Wie erwartet, ergibt sich für Knoten 2 und 3 die gleiche Temperatur. Gleichzeitig errechnet sich eine – ebenfalls erwartete – Temperatur von $T_{2,3} = 20\text{ °C}$.

In Bild 4 wird dieses Verfahren auf ein zweidimensionales, quadratisches Scheibenelement ausgeweitet, wobei folgende Übertragungsfunktion gewählt wird: $T_{3,4,5} = 2 \cdot T_{9,15,16}$. Als Randbedingung sei beispielhaft, wie Bild 4 zeigt, die Temperatur an Knoten 1, 7 und 8 mit $T_{1,7,8} = 100\text{ °C}$ und an Knoten $T_{11,12,13} = 0\text{ °C}$ gewählt.

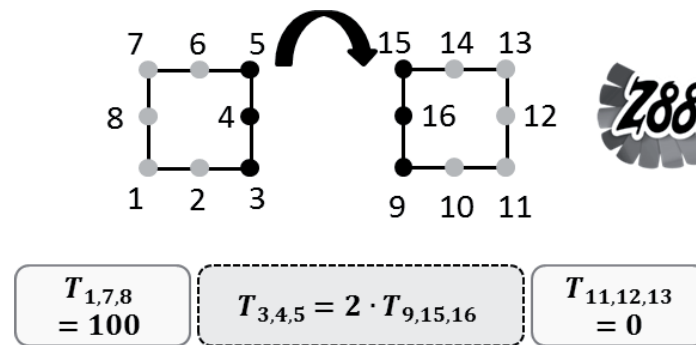


Bild 4: Verknüpfung zweier Scheibenelemente im FE-System Z88

Auch in diesem Beispiel funktioniert die vorgegebene Informationsübertragung. Im berechneten Ergebnis ergibt sich für die Knoten 3, 4 und 5 eine Temperatur $T_{3,4,5} = 80^\circ\text{C}$ und für die Knoten 9, 15 und 16 eine Temperatur von $T_{9,15,16} = 40^\circ\text{C}$. Anhand dieser sehr einfachen Beispiele kann gezeigt werden, dass das grundsätzliche Verfahren funktioniert. Im nächsten Schritt wird es auf einen komplexeren Anwendungsfall übertragen.

4 Anwendungsbeispiel Ringspalt

Das in Kapitel 3 gezeigte Verfahren kann immer dann auf komplexere Simulationen angewendet werden, wenn die thermischen Vorgänge analytisch bestimmt oder angenähert werden können. Ist dies zutreffend, können diese analytischen Gleichungen als Grundlage für die Übertragungsfunktion verwendet werden. Dies ist beispielsweise für einen Kreisring der Fall, wie in Bild 5 dargestellt. Als Übertragungsfunktion ist die analytische Wärmeleitungsgleichung für kreisringförmige Strukturen vorgegeben, die in Formel 3 aufgeführt ist [4]:

$$T_{k+1} = T_k - \frac{\dot{Q}}{2\pi l \lambda_k} \ln \frac{r_{k+1}}{r_k} \quad (3)$$

Das hier vorgestellte Beispiel besitzt zwei Kreisringe, die durch einen ebenfalls kreisringförmigen Spalt getrennt sind. Dieser Spalt besitzt sehr viel kleinere Abmaße als die übrige Geometrie. Durch seine speziellen Eigenschaften, beispielsweise eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit muss er in der Simulation berücksichtigt werden.

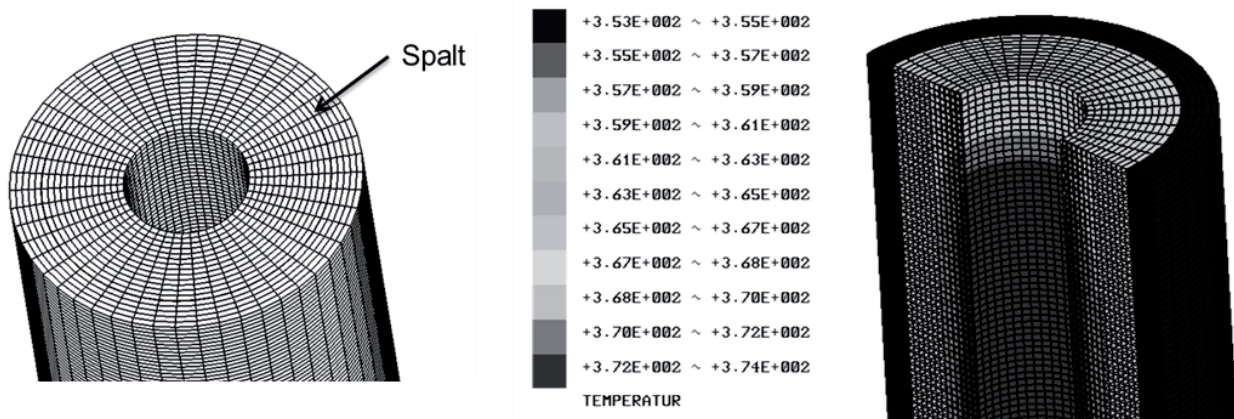


Bild 5: Komplexes Beispiel für die Informationsübertragung zwischen zwei Kreisringen; rechts: FE-Modell, links: beispielhaftes Ergebnis in [K]

Da die Übertragungsfunktion bekannt ist, kann das Lagrange-Verfahren Anwendung finden. Als Randbedingung wird eine Wärmeleistung im inneren Kreisring von 25 kW gewählt, wohingegen auf der Außenseite eine Temperaturrandbedingung von $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ gewählt wird. Der entscheidende Vorteil hierbei ist, dass die thermischen Eigenschaften des Ringspalt es beachtet werden können, ohne diesen Bereich in der Simulation zu vernetzen. Dies ermöglicht einen massiven Performance-Gewinn in Bezug auf die Berechnungsdauer, obwohl die Anzahl der zu lösenden Gleichungen ansteigt. Als nachteilig erweisen sich die fehlenden Informationen im unvernetzten Ringspalt. Da der Bereich nicht vernetzt ist, liegen dort keinerlei Temperaturergebnisse vor, die ausgewertet werden könnten.

Literatur

- [1] Wriggers, Peter: Computational Contact Mechanics. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006.
- [2] Laursen, Tod A.: Computational Contact and Impact Mechanics. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2003.
- [3] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard; Alber-Laukant, Bettina: Finite Elemente Analyse für Ingenieure, Grundlagen und praktische Anwendung mit Z88Aurora. 5. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. 11. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.

Numerische Betrachtung von Zwangsbedingungen in der Finite Elemente Analyse

Daniel Billenstein, Pascal Diwisch, Christian Dinkel, Frank Rieg

Universität Bayreuth, Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth

Email: daniel.billenstein@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de>

Inhalt: Die Existenz von finiten Elementen mit stark unterschiedlichen Steifigkeiten führt innerhalb der Finite Elemente Analyse (FEA) zu numerischen Problemen, die bis zum Abbruch des Gleichungslösers führen können. Eine Lösung zur Substitution steifer Strukturelemente bieten Koppelbedingungen, welche über geometrische Beziehungen mithilfe analytischer Zwangsbedingungen ein ideal steifes Elementverhalten abbilden. Das Einbringen solcher Zusatzgleichungen in das zu lösende Gleichungssystem beeinflusst jedoch ebenfalls die Konditionszahl. Die drei in der FEA etablierten Verfahren (Transformations-, Penalty- und Lagrange-Verfahren) zum Einbau von Zwangsbedingungen wurden an einem Praxisbeispiel hinsichtlich der Kondition untersucht und gegeneinander verglichen.

Abstract: In Finite Element Analysis (FEA) the existence of finite elements with very different rigidities leads to numerical problems, which can result in solver abort. Coupling constraints provide a solution for the substitution of rigid structural elements. They represent ideal rigid element behavior using geometric relationships. However, adding these additional equations to the equation system affects the condition number. In this paper, the three most common methods of implementing these constraints (Transformation-, Penalty- and Lagrangian-Method) are examined and compared based on a practical example. The studies are conducted with regard to the condition number.

Stichwörter: Finite Elemente Analyse, Zwangsbedingung, Kondition, Koppelbedingung

Keywords: Finite Element Analysis, Constraint, Condition number, Coupling

1 Abbildungsfehler innerhalb der Finite Elemente Analyse

Die Finite Elemente Analyse (FEA) ist aus heutiger Sicht ein Standardwerkzeug bei der Berechnung von Aufgabenstellungen, die mit analytischen Lösungsverfahren nicht oder nur näherungsweise gelöst werden können. Die Herausforderung für den Anwender ist dabei das notwendige, umfangreiche Methodenwissen, um das Simulationsziel richtig zu definieren, es zu erreichen und die Ergebnisse schlüssig zu interpretieren.

Innerhalb einer FEA-Rechnung werden in den drei Phasen Präprozessor, Prozessor und Postprozessor sukzessive mehrere Einzelschritte abgearbeitet. Aufgrund der

Mehrstufigkeit des Simulationsprozesses ergibt sich stets auch eine Kumulation der unvermeidlichen numerischen Fehler (siehe Bild 1). Diese hängen in hohem Maße von der Diskretisierung des Ausgangsmodells und der darauf aufbauenden Modellbildung ab, wobei zusätzlich durch die numerischen Algorithmen die Kondition der Problemstellung und somit die Ergebnislösung beeinflusst wird.

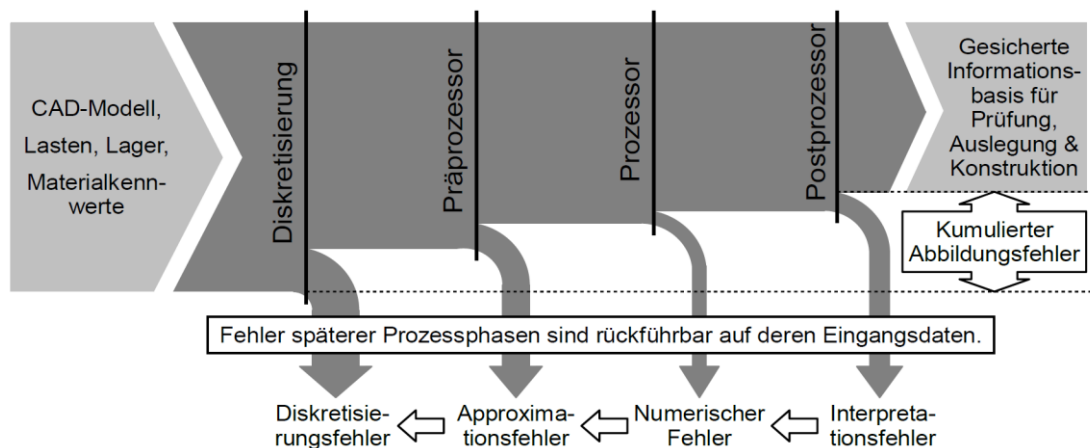


Bild 1: Fehler-Kumulationsprinzip im FEA-Prozess [1]

Die Einbringung von Zwangsbedingungen in das FE-Modell in Form von z. B. Verschiebungsrandbedingungen oder Koppelbedingungen und deren Einbindung in das zu lösende Gleichungssystem kann abhängig von der Art der Umsetzung bis hin zur Divergenz des Rechenlaufs führen. Die Güte der numerischen Implementierung dieser Zwangsbedingungen kann anhand der Konditionszahl der Steifigkeitsmatrix bewertet werden. Dabei beschreibt die Kondition, mit welchem Faktor der Eingangsfehler im ungünstigsten Fall verstärkt wird und ist für symmetrisch, positiv definite Matrizen nach der Spektralnorm wie folgt zu berechnen [2]:

$$\text{cond}_2(A) = \|A\|_2 \cdot \|A^{-1}\|_2 = \frac{\lambda_{\max}(A)}{\lambda_{\min}(A)} \quad (1)$$

Enthält ein FE-Modell große Steifigkeitsunterschiede zwischen einzelnen Elementen, kann dies bei ungünstiger Wahl der Randbedingungen trotz vorgeschalteter Matrixskalierung zu einer sehr schlechten Kondition führen. Exemplarisch ist dies qualitativ für zwei 1D-Stäbe in Bild 2 und deren Steifigkeitsmatrix in Formel 2 dargestellt, wobei Stab I festgehalten und an Stab II mit der Kraft F_3 gezogen wird [3].

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & K_I + K_{II} & -K_{II} \\ 0 & -K_{II} & K_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

In Abhängigkeit davon, welches Element das deutlich steifere Verhalten repräsentiert, ist im Falle von $K_I \gg K_{II}$ eine gute Matrixkondition – erkennbar an dem eindeutigen Schnittpunkt der Gleichungen von Zeile 2 und 3 der Steifigkeitsmatrix – und bei umgedrehtem Steifigkeitsverhalten nahezu eine lineare Abhängigkeit gegeben und somit auch eine schlechtere Konditionszahl.

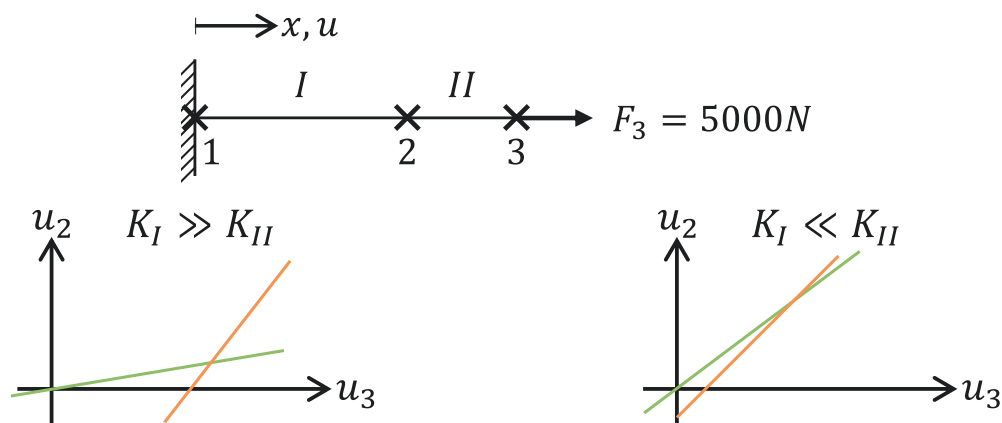


Bild 2: Matrixkondition bei Verwendung steifer Strukturelemente (links: gute Matrixkondition; rechts: schlechte Matrixkondition)

Quantitativ wird bei Auftragen der Konditionszahl über die beiden Steifigkeitswerte K_I und K_{II} (siehe Bild 3) ebenfalls ersichtlich, dass die Konditionszahl nur im Falle von $K_I \ll K_{II}$ hohe Werte annimmt und somit eine kleine Störung der Eingangsdaten bereits die berechnete Lösung unbrauchbar macht.

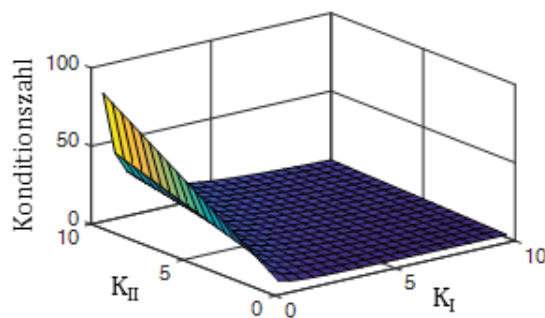


Bild 3: Konditionszahl bei verschiedenen Steifigkeitswerten der beiden Strukturelemente

Zur Vermeidung solcher numerischen Probleme werden steife Strukturelemente häufig durch analytische Gleichungen nach Formel 3 ersetzt, welche ein ideal steifes Verhalten zwischen zwei FE-Knoten (Master- und Slaveknoten) über geometrische Beziehungen darstellen [4].

$$U^s = U^M + \theta^M \times d \quad \text{und} \quad \theta^s = \theta^M \quad (3)$$

Die Gleichungen für die gekoppelten Freiheitsgrade der beiden Knoten fallen in dem Beispiel aus Bild 2 aufgrund der Eindimensionalität zusammen in:

$$u_2 = u_3 \quad \text{oder} \quad u_2 - u_3 = 0 \quad (4)$$

Das Einbringen solcher Koppelbedingungen in das Gleichungssystem kann auf verschiedenen Verfahren basieren, welche allerdings selbst wiederum starken Einfluss auf die Matrixkondition nehmen können.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Daher soll die Modellbildung sowie die numerische Implementierung dieser Zwangsbedingungen untersucht und im Hinblick auf die Ergebnisinterpretation bewertet werden.

2.1 Betrachtete FE-Modelle

Diese Untersuchung soll am Beispiel eines Zahnrades erfolgen, welches 2 Belastungsszenarien ausgesetzt wurde: im ersten Fall (siehe Bild 4; links) wird über die steifen Balkenelemente in der Bohrung das Drehmoment aufgegeben und der Kopf eines Zahnes festgehalten. Im zweiten Szenario wird das wirkende Moment auf den Zahn aufgegeben, während die Bohrung mittig festgehalten ist (siehe Bild 4; rechts). Zudem wird ein modifiziertes Finite Elemente Modell untersucht, bei dem die Balkenelemente durch ideal steife Koppelbedingungen substituiert wurden.

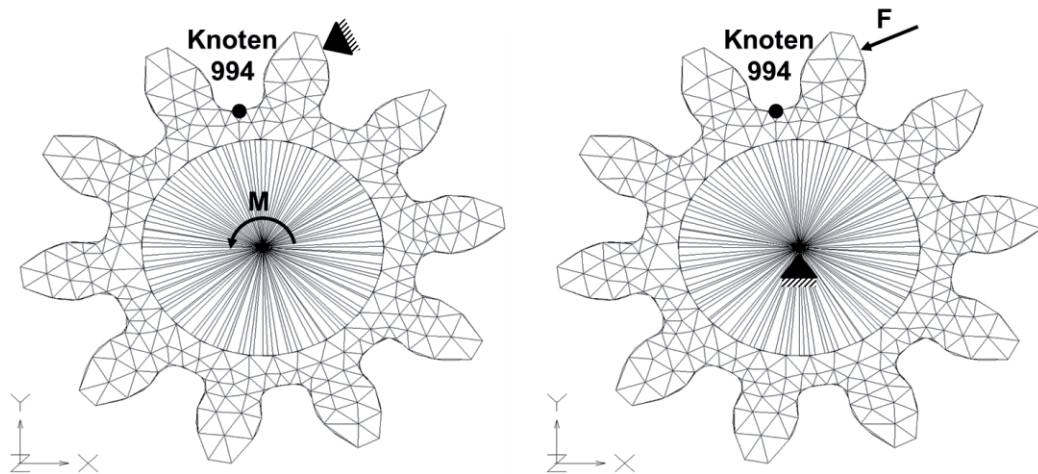


Bild 4: Zahnrad mit steifen Balkenelementen zum Mittelpunkt gekoppelt (links: Belastungsszenario 1; rechts: Belastungsszenario 2)

2.2 Methoden zur Einbringung von Zwangsbedingungen

Zur Substitution der Balkenelemente ist es notwendig, die zusätzlich entstehenden Koppelbedingungen in das Gleichungssystem einzubauen. Die folgenden drei Verfahren haben sich dafür innerhalb der Finite Elemente Analyse etabliert und werden im Folgenden vergleichend gegenübergestellt [5]:

- Transformations-Verfahren (Master-Slave-Methode)
Die Freiheitsgrade werden eingeteilt in Master- und Slave-Freiheitsgrade, wobei die Slave-Freiheitsgrade aus dem Gleichungssystem entfernt werden.
- Lagrange-Verfahren
Für jede Zwangsbedingung wird eine weitere Unbekannte in die ursprüngliche Gleichung aufgenommen. Die dadurch erhaltenen zusätzlichen Kräfte würden genau die gewünschten Zwangsbedingungen herbeiführen.
- Penalty-Verfahren
Jede Zwangsbedingung wird als fiktives, elastisches Strukturelement betrachtet, welches die Bedingung näherungsweise erfüllt. Ein Gewicht β wird eingeführt, welches, wenn es gegen unendlich steigen würde, die exakte Lösung liefert.

3 Betrachtung von steifen Balkenelementen

Die beiden Belastungsszenarien aus Bild 4 stellen komplexere Praxisbeispiele der Situation aus Bild 2 dar, um die Problematik der steifen Balkenelemente zu verdeutlichen.

Zur Steuerung der Steifigkeiten von den eingebrachten Balkenelementen wurde der Durchmesser von 100 mm stetig auf bis zu 10000 mm erhöht. Die Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 1 aufgeführt. Im Belastungsszenario 1, bei dem an sehr steifen finiten Elementen das Moment wirkt, zeigt sich eine extrem hohe Konditionszahl der Steifigkeitsmatrix, welche die resultierenden willkürlichen Verschiebungsergebnisse in x-Richtung an Knoten 994 erklären. Die lokalen Ergebniswerte weisen keinerlei Muster, geschweige denn Konvergenz gegen ein Endergebnis auf. Bei zu großem Durchmesser kommt es sogar zum Abbruch des Rechenlaufs, weshalb kein Ergebnis (NaN: Not a Number) resultiert. Im Gegensatz dazu liefert Belastungsszenario 2 bereits bei der ersten Berechnung ein konvergentes Resultat. Die dazugehörige Konditionszahl ist etwa um den Faktor 10^{13} niedriger als im umgekehrten Belastungsszenario. Ebenfalls für die restlichen, untersuchten Modelle ist zum einen die berechnete Konditionszahl der Steifigkeitsmatrix stets niedriger und zum anderen ist das Verschiebungsergebnis konstant.

Tabelle 1: Vergleich der Kondition und des Verschiebungswertes in x an Knoten 994 unter Verwendung von steifen Balkenelementen

Durchmesser d in mm	Belastungsszenario 1		Belastungsszenario 2	
	$cond_2(K)$	$u_{994,x}$ in mm	$cond_2(K)$	$u_{994,x}$
100	4.14E+016	-6.8154E+004	1.27E+003	1.0155E-005
500	3.70E+016	-1.0703E+000	3.16E+004	1.0155E-005
1000	8.54E+016	-1.7606E+001	1.26E+005	1.0155E-005
2000	1.06E+017	2.4150E-002	5.06E+005	1.0155E-005
5000	4.04E+017	3.2809E-001	3.16E+006	1.0155E-005
10000	3.92E+018	NaN	1.26E+007	1.0155E-005

Es zeigt sich allerdings auch, dass die Erhöhung der Steifigkeit der Strukturelemente in beiden Fällen die Konditionszahl ansteigen lässt – jedoch innerhalb verschiedener Größenordnungen.

4 Betrachtung von ideal steifen Koppelbedingungen

Zur Reduktion der hohen Konditionszahlen in Belastungsszenario 1 wurden die steifen Balken im Inneren des Zahnrads ersetzt durch 348 homogene Koppelbedingungen nach Formel 3, welche ein ideal steifes Verhalten nachbilden. Das Transformations-Verfahren stellt zwar ein schwer zu implementierendes, jedoch ein exakt arbeitendes Verfahren dar

und kann demnach als Referenz ($cond_2(K) = 8.7255E + 005$; $u_{994,x} = 2.071E - 003mm$) herangezogen werden. Bei der Betrachtung der anderen beiden Verfahren wurden verschiedene Werte für die Strafparameter α und β gewählt, welche sich an Empfehlungen von Wriggers [6] mit $STmin/\sqrt{nfg * Mach}$ ($STmin$: minimaler Diagonalwert der Steifigkeitsmatrix; nfg : Anzahl an Freiheitsgraden; $Mach$: Maschinengenauigkeit) und an Erfahrungswerten [7] mit $1000 \dots 10000 * STmax$ ($STmax$: maximaler Diagonalwert der Steifigkeitsmatrix) orientieren. Die Berechnungsergebnisse aus Tabelle 2 zeigen, dass beide Verfahren für die verschiedenen Strafparameter sowohl gute Verschiebungs- als auch Konditionsergebnisse liefern. Zu beachten ist jedoch, dass bei steigendem Strafparameter die Konditionszahl beim Lagrange-Verfahren nahezu konstant bleibt, wohingegen sich beim Penalty-Verfahren ein kontinuierlicher Anstieg zeigt.

Tabelle 2: Vergleich der Kondition und des Verschiebungswertes in x-Richtung an Knoten 994 bei Belastungsszenario 1 unter Verwendung von ideal steifen Koppelbedingungen mit zwei verschiedenen Einbauverfahren (Penalty- und gestörtes Lagrange-Verfahren)

Berechnungsformel für β bzw. $1/\alpha$	Wert von β bzw. $1/\alpha$	Penalty-Verfahren		Lagrange-Verfahren	
		$cond_2(K)$	$u_{994,x}$ in mm	$cond_2(K)$	$u_{994,x}$
$\frac{STmin}{\sqrt{nfg * Mach}}$	1.0905E+006	1.57E+006	2.0721E-003	3.33E+007	2.0709E-003
$1000 * STmax$	7.5249E+008	4.59E+008	2.0717E-003	1.71E+007	2.0717E-003
$6000 * STmax$	4.5149E+009	2.75E+009	2.0717E-003	1.71E+007	2.0717E-003
$10000 * STmax$	7.5249E+009	4.58E+009	2.0717E-003	1.71E+007	2.0717E-003

5 Fazit

Die hohen Konditionszahlen und falschen Rechenergebnisse bei der Verwendung von großen Steifigkeitsunterschieden innerhalb eines FE-Modells können durch die Substitution mit ideal steifen Koppelbedingungen behoben werden. Die dabei beim Einbau ebenfalls ermittelbare Verschlechterung der Konditionszahl ist um Größenordnungen geringer und in einem akzeptablen Rahmen, welches durch die korrekten Verschiebungsergebnisse bestätigt wird. Diese Substitution garantiert somit einen korrekten Rechenlauf, auch bei sehr großen Steifigkeitsunterschieden und beliebiger Wahl der Randbedingungen.

Literatur

- [1] Neidnicht, Martin: Numerisches Abbildungsvermögen als Maßgabe zuverlässiger Finite Elemente Netzgenerierung. Dissertation. Universität Bayreuth. 2013
- [2] Schwarz, Hans Rudolf; Köckler, Norbert: *Numerische Mathematik*. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – ISBN 978-3834815514
- [3] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard; Alber-Laukant, Bettina: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure: Grundlagen und praktische Anwendungen mit Z88Aurora*. 5. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2014. – ISBN 978-3446442832
- [4] Perlemuter, Anatoly; Slivker, Vladimir: *Numerical Structural Analysis*. 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2003. – ISBN 978-3540006282
- [5] Bathe, Klaus-Jürgen; Zimmermann, Peter: *Finite-Elemente-Methoden*. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2002. – ISBN 978-3540668060
- [6] Wriggers, Peter: *Computational Contact Mechanics*. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2010. – ISBN 978-3540326083
- [7] Nützel, Florian: Entwicklung und Anwendung eines Finite-Elemente-Systems auf Basis von Z88 zur Berechnung von Kontaktaufgaben aus der Antriebstechnik. Dissertation. Universität Bayreuth. 2015

FEM-Berechnung der Stützwirkung an Durchdringungskerben

Ali Daryusi

Hochschule Offenburg, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Professur für Maschinenelemente und CAD/CAE

Badstraße 24, 77652 Offenburg

E-Mail: ali.daryusi@hs-offenburg.de

Internet: <http://www.hs-offenburg.de/cax>

Inhalt: Der hier vorliegende Beitrag beschreibt die mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) gewonnenen Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung von Stützziffern und Kerbwirkungszahlen bei Getriebewellen. Es handelt sich dabei zum einen um die Kerbüberlagerung einer umlaufenden Halbkreisnut in Kombination mit überlagelter Querbohrung. Da zur Bestimmung der Stützwirkungszahlen die Berechnung der bezogenen Spannungsgradienten in Tiefenrichtung benötigt wird, wurden die Parameter der Kerbgeometrie (der Umlaufnutradius sowie der Querbohrungsdurchmesser) variiert. Als Ergebnis dieser Arbeit wurde festgehalten, dass sich die Formzahl infolge der Durchdringungskerbe im Vergleich zur Formzahl einer Einzelkerbe (z. B. Umlaufnut oder Querbohrung) erhöht und dementsprechend erhöht sich die Kerbwirkungszahl deutlich im Vergleich zu einer Einzelkerbe. Die numerisch erfassten Kerbwirkungszahlen an den erforschten Durchdringungskerben wurden mit analytischen Ansätzen aus der Fachliteratur verglichen. Entsprechende Diagramme und Zahlenwerte werden zur Abschätzung der Kerbwirkungs- und Stützzahlen je nach Belastungsart Torsion, Biegung und Zug/Druck angegeben.

Abstract: The article describes the study results with the finite element method (FEM) for the determination of supporting effect and notch factors in drive shafts with 3D- multiple notches. It involves a circumferential groove in combination with a vertical hole. The parameters of the notch geometries were varied in order to determine the related stress gradient. As a result of this work was held that the notch effect factors of the multiple-notch are greater than those of a single notch. The numerically detected notch factors of the researched multiple notches were compared with analytical approaches from technical literature. Corresponding diagrams and numerical values are specified and it were developed new approximations for estimation of the notch factors depending on the type of load torsion, bending and tensile.

Stichwörter: FEM, Mehrfachkerben, Stützwirkung, Kerbwirkungszahlen, bezogenes Spannungsgefälle.

Keywords: FEM, multiple notches, notch support factors, notch effect factors, relative stress gradient.

1 Einleitung und Zielsetzung

Der heutige Kenntnisstand über die Thematik der Durchdringungskerbwirkung von Maschinenbauteilen ist für eine treffsichere Festigkeitsberechnung noch recht lückenhaft. Deshalb sind Erkenntnisse über Stützzahlen bzw. Kerbwirkungszahlen bei Mehrfach- und Durchdringungskerben dringend erforderlich. In zwei vorausgehenden Artikeln [1, 2] wurden über erste Untersuchungsergebnisse mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Analyse von maximalen Kerbspannungen und deren Entlastung an Durchdringungskerben bei Getriebewellen berichtet. Es handelt sich um Wellen mit einer umlaufenden Halbkreisnut in Kombination mit überlagerter Querbohrung (WmUQ) (Bild 1), sowie um Absatzwellen mit im Kerbgrund überlagerter Querbohrung (WmAQ) (Bild 2). Es wurden die Beanspruchungen erfasst und neue Näherungsgleichungen zur Berechnung der Spannungsformzahlen α bei Torsion, Biegung und Zug/Druck [1] aufgestellt. Zudem wurden Entlastungsmöglichkeiten zur Milderung der Spannungskonzentrationen untersucht und Empfehlungen und Gestaltungshinweise [2] gegeben. Die neu entwickelte Entlastungsnut (Bilder 1 und 2) ermöglicht bedeutende Spannungsreduktionen bis etwa 48% bei Biegung oder Zug/Druck bzw. etwa 18% bei Torsion.

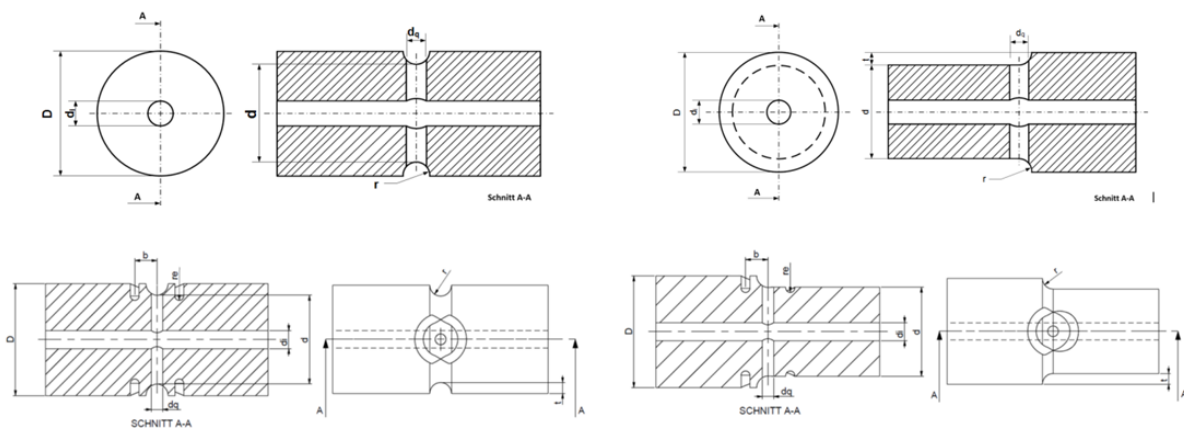


Bild 1: Kerbform WmUQ (Umlaufnut/Querbohrung)
(oben) und ihre Entlastungsmöglichkeit (unten)

Bild 2: Kerbform WmAQ (Absatz/Querbohrung)
(oben), und ihre Entlastungsmöglichkeit (unten)

Die Darstellung der Durchdringungskerbwirkung durch eine Formzahl kann nur eine erste Annäherung für die Ermittlung der Spannungsüberhöhung an der Kerbstelle sein. Dauerfestigkeitsversuche zeigen, dass nicht nur die Spannungsmaxima, sondern auch die Kenntnis des bez. Spannungsgefälles zur Bewertung der Stützwirkungseffekte bzw. der Kerbwirkungszahlen an der kritischen Stelle des Bauteils von großer Bedeutung ist. Diese

sollten bei verschiedenen Einzelbelastungsarten und bei zusammengesetzter Belastung erfolgen und sind in Tiefenrichtung nach verschiedenen Raumrichtungen insbesondere senkrecht zur höchstbeanspruchten Kerboberfläche zu erfassen. Weiterhin werden Angaben über das Herauswandern des Ortes der Maximalspannung aus dem Kerbgrund und über die Größe und die örtliche Veränderung der Vergleichsspannungen und ihr Abklingverhalten in der Umgebung einer ausgebildeten Spannungsspitze benötigt. Hieraus ergibt sich ein erheblicher Aufwand bei der Bildung des FE-Berechnungsmodells und der Ergebnisauswertung. Erst, wenn die Beschreibung der Durchdringungskerbstelle und ihrer Umgebung festgelegt werden kann, ist es möglich, den Einfluss der Mehrfachkerbe auf die Dauerfestigkeit für eine vorgegebene Bauteilgestalt anzugeben.

2 Untersuchungsspektrum

In der vorliegenden Arbeit wurden die bez. Spannungsgradienten in der Querbohrung und auch in der Umlaufnut an einer Welle mit dieser Kerbkombination (Bild 3) für Zug/Druck, Biegung und Torsion in Tiefenrichtung räumlich erfasst. Dies erfolgte mit Hilfe der Finiten-Element-Methode (FEM) mit der Software Creo Simulate. Die Hinweise für die Nennspannungsberechnung und die Ergebnisauswertung richten sich nach [1, 2].

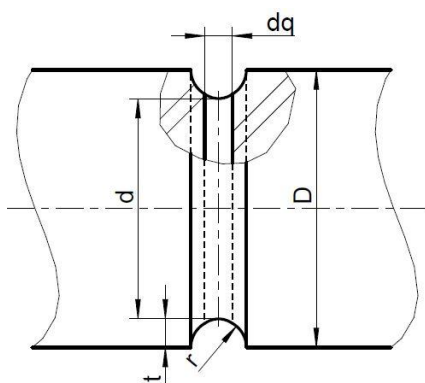


Bild 3: Bezeichnungen der Welle mit Umlaufnut und Querbohrung

Untersucht wurden die Einflüsse mehrerer Geometriekombinationen auf die Stützzahlen. Das Verhältnis der Kerbschärfe $r/t = 1$ und der Wellenaußendurchmesser ($D = 25 \text{ mm}$) blieben bei der Untersuchung konstant. Die Nutradien-Verhältnisse r/d_q wurden im Bereich von 0,5; 0,67; 0,8; 1,0; 1,33; 2,0 und Verhältnisse vom Bohrungsdurchmesser d_q/D im Bereich von 0,05 bis 0,1 variiert. Zusätzlich wird der Einfluss von der Entlastungskerbe nach [2] auf die Stützwirkung und damit auf die Kerbwirkungszahl untersucht.

Die Ermittlung der Spannungsgradienten stützt sich auf die Erfahrungen in [3]. Die Stütz- und die Kerbwirkungszahlen werden für den Werkstoff 34CrMo4 nach dem Verfahren von Siebel und Stieler wie in DIN 743-2 [4] berechnet. Die Kerbwirkungszahlen werden mit den in der Fachliteratur vorhandenen Ansätzen verglichen. Dabei wurde die Gültigkeit der Näherungsformel von Moszynski [5] für die betrachteten Untersuchungsgegenstände

überprüft. Danach kann die rechnerische Berücksichtigung der gesamten Kerbwirkungszahl β_{ges} einer Mehrfachkerbe, bestehend aus zwei überlagerten Einzelkerben, durch die Beziehung $\beta_{K,\text{res}} = 1 + (\beta_{K1} - 1) + (\beta_{K2} - 1)$ abgeschätzt werden.

3 Numerische Untersuchungsergebnisse

Hier soll darauf hingewiesen werden, dass die hiermit ermittelten Werte je Belastungsart für die GE-Hypothese gültig sind, da eine Mehrzahl der Maschinenbauteile aus duktilen Werkstoffen hergestellt werden und die GE-Hypothese bei dynamischer Beanspruchung besser zutrifft. Es gelten folgende Beziehungen zwischen GEH und NSH der Welle mit Querbohrung und Umlaufnut (entlastet oder nichtentlastet) bei Zug, Biegung und Torsion:

$$\alpha_{\sigma,\text{zd},\text{b-GEH}} \text{ bzw. } (\beta_{\sigma,\text{zd},\text{b-GEH}}) = 1,00 \cdot \alpha_{\sigma,\text{zd},\text{b-NSH}} \text{ bzw. } (\beta_{\sigma,\text{zd},\text{b-NSH}})$$

$$\alpha_{\tau,\text{t-GEH-B}} \text{ bzw. } (\beta_{\tau,\text{t-GEH-B}}) = 0,56 \cdot \alpha_{\tau,\text{t-NSH-B}} \text{ bzw. } (\beta_{\tau,\text{t-NSH-B}})$$

$$\alpha_{\tau,\text{t-GEH-U}} \text{ bzw. } (\beta_{\tau,\text{t-GEH-U}}) = 1,00 \cdot \alpha_{\tau,\text{t-NSH-U}} \text{ bzw. } (\beta_{\tau,\text{t-NSH-U}})$$

3.1 Ergebnisse bei Zug und Biegung

Im Bild 4 ist ersichtlich, dass die Kerbspannung in der Bohrungskante im Bereich des Nutgrunds liegt. Zusätzlich ist die Lage der Pfade 1 bis 5 dargestellt, sowie beispielhaft die Kegelwinkel von 0° bis 75° . An dieser Stelle sei angemerkt, dass das größte Spannungsgefälle nahe der Umlaufnutoberfläche, Pfad 3 mit ca. 75° bis 80° , zu finden ist.

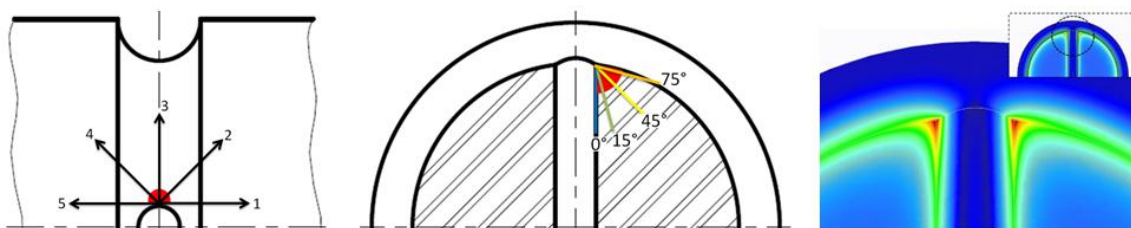


Bild 4: Darstellung der Position der Pfade 1 bis 5 (links) und der Winkel $\gamma=0^\circ$ bis $\gamma=75^\circ$ der Kegel (rechts) der WmUQ bei Zug oder Biegung, Spannungsverteilung der WmUQ bei Zug- oder Biegebelastung (GEH)

Im Bild 5 werden die Ergebnisse der FEM-Analyse mit den rechnerischen Ergebnissen nach der Moszynski-Formel verglichen und über dem Verhältnis r/d_q aufgetragen. Bei einem Bohrungsdurchmesser von $d_q/D = 0,1$ (mildere Kerbe) ist auffällig, dass sich im betrachteten Wertebereich ein Schnittpunkt zwischen der Kurven (für FEM und Moszynski) befindet. Das Kurven-Verhalten zwischen Zug- und Biegebelastung ist vergleichbar und unterscheidet sich lediglich in der Lage des Schnittpunkts bei ca. $r/d_q=1$ für Zug und ca.

$r/d_q=1,33$ für Biegung. Es wurde kein Schnittpunkt der Kurven für die Bohrung mit $d_q/D = 0,05$ festgestellt. Demnach ist eine Abschätzung der Kerbwirkungszahl nach Moszynski sowohl bei Zug als auch bei Biegung kaum geeignet.

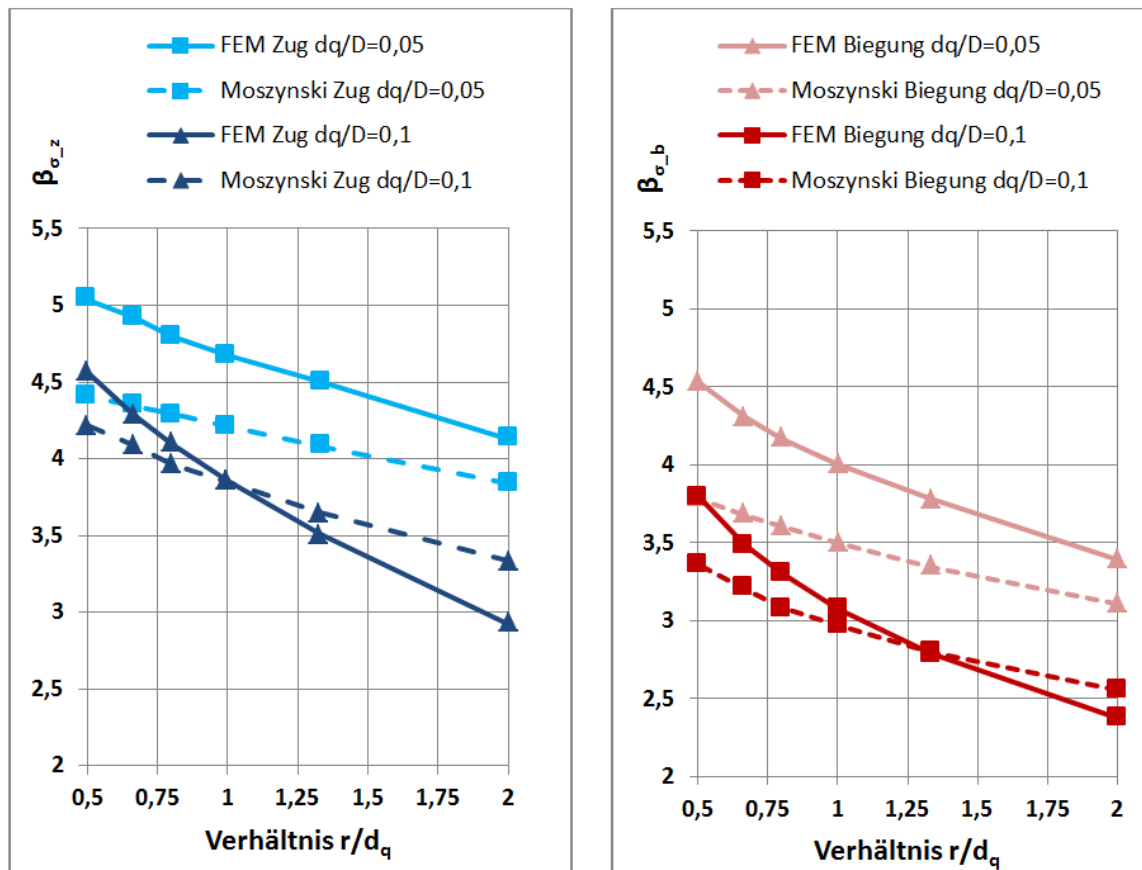


Bild 5: Vergleich der Kerbwirkungszahlen β nach Moszynski mit den Ergebnissen der Analyse mittels FEM unter Zug- und Biegebelastung nach der GEH über dem Verhältnis r/d_q

3.2 Ergebnisse Torsion

Im Bild 6 ist ersichtlich, dass die maximale Spannung im oberen bzw. unteren Bereich, nicht exakt in der Bohrungskante zu finden ist. Der Winkel δ zur Beschreibung der Lage der Maximalspannung ist von der Geometrie abhängig. Mit steigendem r/d_q -Verhältnis wird der Winkel δ größer. Der Pfad 3 mit dem größten Spannungsgefälle der Bohrung befindet sich senkrecht zur Bohrungsoberfläche bei 90° . Im Bild 6 ist neben der typischen sternförmigen Spannungsverteilung in der Bohrung eine starke SpannungsKonzentration im Nutgrund nahe der Bohrung zu finden. Die SpannungsKonzentration außerhalb der Bohrungsoberfläche ist deutlich stärker ausgeprägt, als bei der Querbohrung. Das maximale Spannungsgefälle in der Umlaufnut befindet sich senkrecht zum Nutgrund.

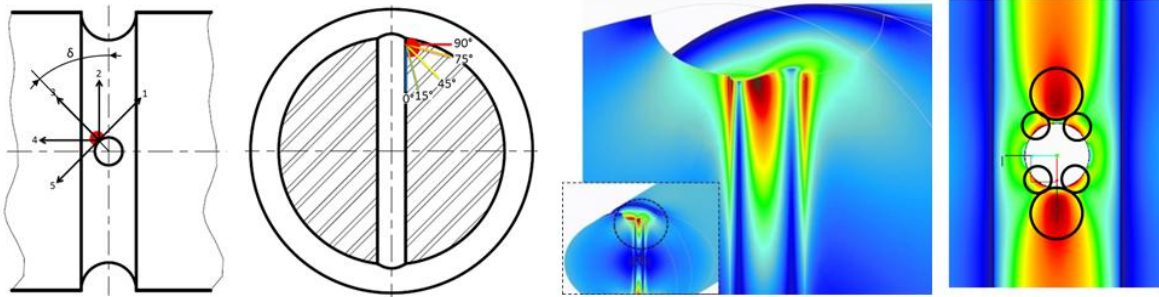


Bild 6: Darstellung der Position der Pfade 1 bis 5 (links-l) und der Winkel $\gamma=0^\circ$ bis $\gamma=90^\circ$ der Kegel (rechts-r) der WmUQ bei Torsionsbelastung, Spannungsverteilung im Einflussbereich der WmUQ bei Torsion (GEH)

Im Bild 7 sind die Kerbwirkungszahlen der gesondert betrachteten Einzelkerben über dem r/d_q -Verhältnis aufgetragen. Die in rot dargestellten Kurven zeigen die maximalen Kerbwirkungszahlen, welche relevant für den Festigkeitsnachweis sind. Der Ort der maximalen Kerbwirkungszahl wechselt im Verlauf des Wertebereichs von der Umlaufnut in die Querbohrung. Besonders markant ist die sichtbare Änderung des Verlaufs in den Kurven, sobald die Kerbwirkungszahl der Bohrung jene der Umlaufnut übersteigt.

Mit steigendem Bohrungsdurchmesser d_q/D wird das Verhältnis r/d_q , bei welchem die Kerbwirkungszahl der Bohrung jene der Umlaufnut übersteigt, größer ($r/d_q = 0,8$ bei $d_q/D = 0,05$ bzw. $r/d_q = 0,9$ bei $d_q/D = 0,1$). Insgesamt ist der Verlauf der Kerbwirkungszahlen bei dem größeren Querbohrungsdurchmesser $d_q/D = 0,1$ flacher und tendenziell sinkend, als bei dem Verlauf für die kleinere Bohrung $d_q/D = 0,05$.

Im Bild 8 sind deutliche Sprünge der Stützzahlen n bei Torsion zwischen $r/d_q = 0,8$ und $r/d_q = 1$ erkennbar. Dies ist damit zu begründen, dass die Maximalspannung der Bohrung zwischen diesen Verhältnissen jene der Umlaufnut übersteigt. Durch diesen Umstand ist das Verhalten der Durchdringungskerbe unter Torsion sehr komplex und macht eine exakte Abschätzung ohne umfassende Untersuchungen des Einzelfalls schwierig. Es ist ebenfalls festzustellen, dass die Stützzahlen der Bohrung größer sind, als jene der Umlaufnut. Ab einem Verhältnis von $r/d_q = 1$ ist die Stützzahl relativ konstant bei $n = 1,081$ für $d_q/D = 0,05$ und $n = 1,058$ für $d_q/D = 0,1$.

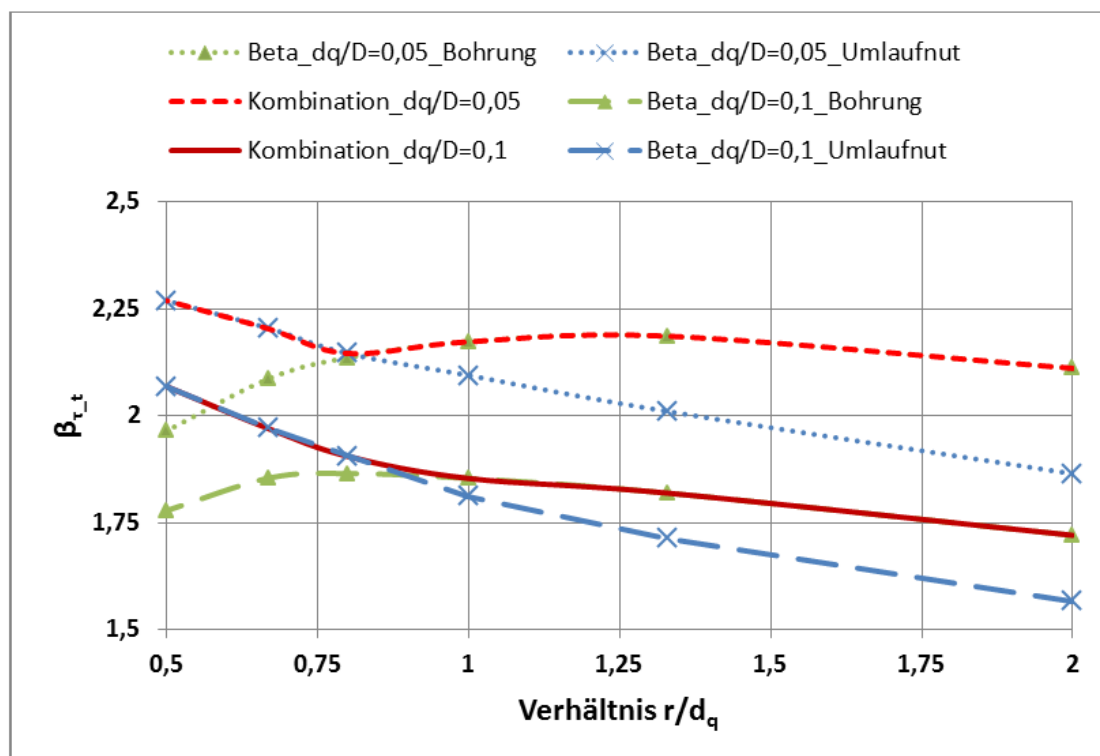


Bild 7: Darstellung der Kerbwirkungszahlen β der Kerbkombination in der Umlaufnut und in der Bohrung bei Torsionsbelastung in Abhängigkeit vom Querbohrungsdurchmesser

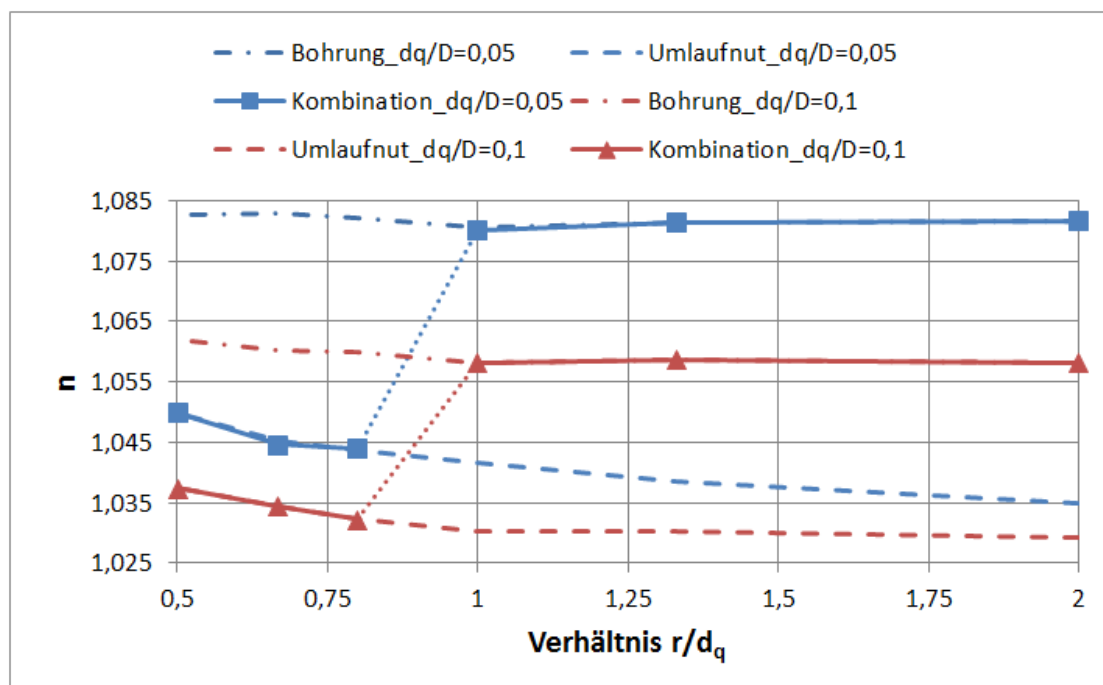


Bild 8: Darstellung der Stützzahlen n der Durchdringungskerbe über dem Verhältnis r/d_q bei Torsion (GEH)

Im Bild 9 werden die FEM-Ergebnisse mit den rechnerischen Ergebnissen nach Moszynski verglichen und über dem Verhältnis r/d_q aufgetragen. Die Werte nach Moszynski [5] bieten

unter Torsion die Möglichkeit einer konservativen Abschätzung der Kerbwirkungszahl. Tendenziell sind die Ergebnisse für größere Verhältnisse $r/d_q > 1$ zutreffender.

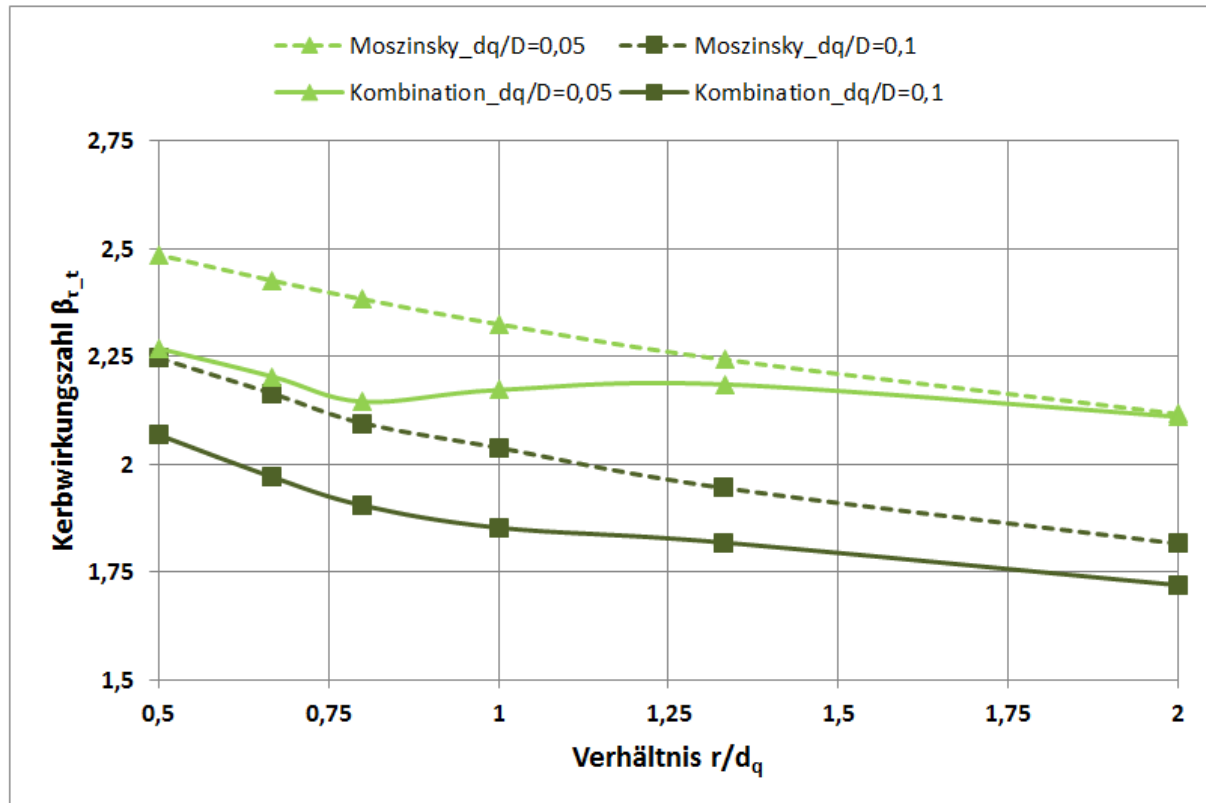


Bild 9: Vergleich der Kerbwirkungszahlen β nach Moszynski mit den Ergebnissen der Analyse mittels FEM unter Torsionsbelastung nach der GEH über dem Verhältnis r/d_q

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zusammenhänge zwischen der Kerbwirkungszahl β_U für die Umlaufnut als Einzelkerbe nach DIN 743 [4] und der Kerbwirkungszahl β_K für die mit FEM erforschte Durchdringungs-kerbe sind durch den Wechsel der Lage der Maximalspannung aus der Umlaufnut in die Bohrung bei Torsion komplexer als diejenigen bei Zug oder Biegung, bei denen solch ein Wechsel nicht stattfindet. Zwischen den Werten für β_U und β_K gelten im betrachteten Wertebereich für die Bohrung mit $d_q/D = 0,05$ bzw. $0,1$ die in der Tabelle 1 aufgelisteten Werte. Mit zunehmendem Umlaufnutradius wird das β_K/β_U -Verhältnis größer, für $1 < r/d_q < 2$ gelten die größeren und für $0,5 \leq r/d_q \leq 1$ die kleineren β_K/β_U -Werte.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Zahlenwerte der β_K/β_U -Verhältnisse je Belastungsart

Bohrungsdurchmesser	$d_q/D = 0,05$	$d_q/D = 0,1$
Belastungsart	$\beta_{\sigma, \text{zd}_t, \text{t}_K} \text{Kerbkombination_FEM} / \beta_{\sigma, \text{zd}_t, \text{t}_U} \text{Umlaufnut_DIN 743}$	
Zug/Druck	1,90 bis 2,00	1,86
Biegung	1,80 bis 1,86	1,70
Torsion	1,26 bis 1,48	1,26 bis 1,43

In der Tabelle 2 findet sich eine Übersicht über die einzelnen Werte in den drei Kerben (Bohrung, Umlaufnut und Entlastungsnut). Die höchste, für die Festigkeitsberechnung relevante Kerbwirkungszahl, liegt in der Bohrungskante bei Zug und Biegung bzw. in der Umlaufnut bei Torsion und ist deshalb hervorzuheben.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Werte der einzelnen Kerben für die entlastete Durchdringungskerbe unter Zug, Biegung und Torsion, sowie ein Vergleich der entlasteten mit der unentlasteten Durchdringungskerbe

	Bohrung			Umlaufnut			Entlastungskerbe		
	Zug	Biegung	Torsion	Zug	Biegung	Torsion	Zug	Biegung	Torsion
Pfad des maximalen Spannungsfalles	80 Grad, Pfad 3	75 Grad, Pfad 3	90 Grad, Pfad 3	Senkrecht zu Oberfläche			Senkrecht zu Oberfläche		
α	1,98	1,69	1,54	1,89	1,52	1,64	1,75	1,45	1,60
$G^* [\text{mm}^{-1}]$	2,29	2,49	2,85	1,08	1,07	0,46	2,24	0,95	1,84
n	1,053	1,056	1,059	1,037	1,036	1,024	1,053	1,034	1,048
β	1,88	1,60	1,45	1,83	1,47	1,60	1,66	1,40	1,52

	Durchdringungskerbe entlastet			Durchdringungskerbe unentlastet			Proz. Abweichung [%]		
	Zug	Biegung	Torsion	Zug	Biegung	Torsion	Zug	Biegung	Torsion
α	1,98	1,69	1,64	4,05	3,24	1,96	-51,07	-47,67	-16,43
$G^* [\text{mm}^{-1}]$	2,29	2,49	0,46	2,05	2,15	2,73	11,41	15,58	-83,32
n	1,053	1,056	1,024	1,050	1,052	1,058	0,27	0,37	-3,25
β	1,88	1,60	1,60	3,85	3,08	1,85	-51,21	-47,87	-13,61

Die Erwartung, dass sich die Stützwirkung durch die größere Spannungsüberhöhung der unentlasteten Durchdringungskerbe im Vergleich zur Einzelkerbe vergrößert, hat sich bestätigt. Entgegen der Vermutung wurde bei der Untersuchung der Durchdringungskerben mit Entlastungsnut festgestellt, dass sich die Stützwirkung nicht verringert, im Gegenteil, sie ist sogar leicht erhöht gegenüber der unentlasteten Durchdringungskerbe. Besonderer Dank gebührt Herrn Janosch Lacher, der sich in seiner Bachelorarbeit an der HS Offenburg [6] unter der Betreuung des Autors dieses Aufsatzes mit diesem Thema befasste. Diese Arbeit ist nur eine erste Untersuchung des hier dargestellten komplexen und wenig erforschten Themas, sie zeigt aber bereits mögliche Tendenzen. Es sind noch

weitere umfassendere Untersuchungen nötig, um möglichst genaue Vorhersagen zu erhalten, wie beispielsweise die weitere Variation des d_q/D -Verhältnisses bis hin zu Grenzwertbetrachtungen sowie die Variation der Kerbschärfe r/t . Weiterhin ist es sinnvoll, andere vergleichbare Kerbkombinationen zu betrachten, z.B. einen Wellenabsatz mit überlagerter Querbohrung.

Sowohl der Ansatz der bez. Spannungsgradienten nach Siebel und Stieler als auch das Verfahren nach Neuber haben in der praktischen Anwendung die größte Verbreitung gefunden. Da der Siebel/Stieler-Ansatz den Nachteil hat, dass der Grenzfall sehr scharfer Kerben nicht beschrieben werden kann, kann die Verwendung des Ansatzes des werkstoffspezifischen Strukturradius nach Neuber zur Abschätzung der Kerbwirkung in Abhängigkeit von der numerisch berechneten Formzahl sinnvoller sein. Aus der Literatur sind jedoch auch weitere Wege zur Berechnung der Kerbwirkungszahl bekannt, die ebenfalls nicht die Bestimmung eines Spannungsgefälles erfordern, z. B. das Verfahren nach Bollenrath/Troost oder das Verfahren nach Peterson (Kerbempfindlichkeitsfaktor) gemäß der alten Richtlinie TGL 19340. Diese Ansätze wären auf deren Eignung zu prüfen.

Literatur

- [1] Daryusi, Ali; Roller, Alexander; Jung, Sebastian: *FEM-Untersuchung zur Durchdringungskerbwirkung beim Zusammentreffen von Umlaufnut und Querbohrung in Wellen*. KT2014, Uni. Bayreuth, S. 385-396, ISBN 978-3-00-046544-4
- [2] Daryusi, Ali; Lacher, Janosch: *FEM-Untersuchung zur Entlastung von Durchdringungskerben an Getriebewellen*. KT2015, OvGU Magdeburg, S. 267-276, ISBN 978-3-944722-30-6
- [3] Daryusi, Ali: *Zur Bestimmung des bezogenen Spannungsgefälles bei Zahnwellen mit freiem Auslauf*. 5. VDI-Fachtagung für WNV, VDI-Berichte 2176, VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf 2012
- [4] Norm DIN 743, Teil 1 – 4: *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen, Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Beuth Verlag, 2012
- [5] FKM-Richtlinie. Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. Frankfurt, VDMA-Verlag, 6. Erweiterte Ausgabe, 2012, ISBN 3-8163-0605-4
- [6] Lacher, Janosch: *FEM-Untersuchung der Kerbwirkungszahlen an mehrfach gekerbten Wellen*. Bachelorarbeit an der Professur für Maschinenelemente der HS Offenburg, SS 2015

Entscheidende Veränderungen in der zukünftigen kollaborativen Produktentwicklung

Pascal Lünemann¹, Carina Freseman², Sebastian Neumeyer¹, Wei Min Wang²,
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark¹²

¹ Fraunhofer IPK, Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik

Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Email: vorname.nachname@ipk.fraunhofer.de; Internet: <http://www.ipk.fraunhofer.de>

² TU Berlin, Fachgebiet Industrielle Informationstechnik

Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Email: vorname.nachname@tu-berlin.de; Internet: <http://www.iit.tu-berlin.de>

Inhalt:

Die gemeinschaftliche Produktentwicklung ist Alltag in der deutschen Industrielandschaft. Die Globalisierung, kürzere Entwicklungszyklen und zunehmende Produktkomplexität verlangen eine effiziente Einbindung der zahlreichen Partner in allen Phasen der Produktentwicklung. Im Rahmen einer Studie wurde die aktuelle Situation in der kollaborativen Produktentwicklung sowie das von Forschung und Industrie erwartete Zukunftsbild erhoben. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse dieser Studie vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den heute eingesetzten und zukünftig zu erwartenden Werkzeugen in ihrem Zusammenspiel mit den Prozessen der kollaborativen Produktentwicklung. Die Prozesse werden, so zeigt es die Studie, zukünftig das zentrale Koordinationsinstrument für die unternehmensübergreifende Entwicklung sein und sind entsprechend anerkannt, während sich bei den unterstützenden IT-Werkzeugen eher Mängel zeigen.

Abstract: *The collaborative product development is daily business in German industry. Globalization, shorter development cycles and increasing product complexity require an efficient involvement of numerous partners in all phases of product development. In a study of the current situation of collaborative product development an industrial vision was raised. Below selected results of this study will be presented. The focus is on the tools used today and anticipated in their interaction with the processes of collaborative product development. As proven by the study collaboration processes will remain the central coordination element for enterprise-wide engineering also in the future. The supporting IT-tools, however, still show deficiencies and limitations.*

Stichwörter: Kollaboration, IT-Systeme, Produktentwicklung, Prozesse

Keywords: Collaboration, IT-systems, product development, processes

1 Einleitung

Globalisierung, kürzere Entwicklungszyklen, steigende Produktfunktionalitäten und der Wunsch nach Fokussierung auf ein Kerngeschäft führen zur zunehmenden Einbindung von externen Partnern in die Produktentwicklung [1]. Diese Involvierung ist durch zwei Aspekte geprägt: den Transfer und die Teilung von Fachwissen einerseits und die notwendige, intensivere Koordination der gemeinschaftlichen Entwicklung andererseits [2]. Auf dieser Basis wurde am Fraunhofer IPK eine qualitative Studie durchgeführt, welche die derzeitige und künftige Situation in der kollaborativen Produktentwicklung untersucht. In diesem Beitrag werden die Auswirkungen auf die Entwicklungsumgebung diskutiert.

2 Studienkonzept

Die durchgeführte Studie folgt vier zentralen Fragestellungen um die heutige gemeinschaftliche Produktentwicklung und ihre zukünftige Veränderung zu ermitteln. Ausgehend von der Ermittlung der heutigen Praxis der kollaborativen Produktentwicklung wurden zu erwartende Trends ermittelt. Dabei wurden auch die unternehmerischen Motivationen zur ansteigenden Anzahl verteilter Produktentwicklungen erfragt. Als besondere Ausrichtung sind IT-Werkzeuge, welche die Kollaboration unterstützen und Best Practices in Methoden und Arbeitsweisen identifiziert worden. Abschließend wurden Ziele zur Veränderung der kollaborativen Entwicklung erhoben. In den Fragenkomplexen wurden dabei die wesentlichen Herausforderungen der unternehmensübergreifenden Produktentwicklung berücksichtigt: die Koordination der Entwicklungsarbeit, die Kommunikation und Informationslogistik zwischen den Entwicklungsbeteiligten, sowie die Wissensintegration und dabei unterstützende IT-Systeme. 40 Teilnehmer aus Industrie und Forschung wurden in etwa 1 ½ stündigen Interviews zu ihren Einschätzungen befragt. Um ein möglichst breites Bild zu erfassen wurden dabei Vertreter verschiedener Branchen, unterschiedlicher Unternehmensebenen (u.a. Manager, Teamleiter und technische Spezialisten) und Fachbereichen befragt, die in ihrer alltäglichen Arbeit mit kollaborativen Entwicklungsprojekten in Berührung kommen. Speziell mit Blick auf die Zukunft der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit wurden auch Vertreter von Forschungsinstituten, zumeist Professoren, in die Studie eingebunden. Die Fragen verlangten teils freie Antworten oder die Auswahl, bzw. Priorisierung von möglichen vorgegeben Antworten, sowie eine Begründung der Einschätzung. In der Auswertung

wurden die ermittelten Stellungnahmen inhaltlich zueinander in Beziehung gesetzt um Meinungscluster zu identifizieren.

3 Ausgewählte Studienergebnisse

Grundsätzlich erwarten die Studienteilnehmer, dass die kollaborative Produktentwicklung zukünftig an Intensität gewinnen wird. Dies resultiert aus der steigenden Übertragung der Entwicklungsverantwortung auf die Zuliefererunternehmen. Die Art der Beauftragung im Rahmen von Produktentwicklungen verlagert sich von hoch spezifischen Einzelaufgaben hin zu Entwicklungsaufträgen für ganze Subsysteme. Die Zahl zwingend abzustimmender Schnittstellen auf mechanischer (Verbindungspunkte, Kraftschlüsse, etc.), speziell aber auf elektrischer und informationstechnischer Ebene (Software- und Kommunikationsschnittstellen) wird in Folge weiter steigen.

Die Entwicklungsprozesse der Kollaborationspartner werden zumeist, aufgrund der notwendigen intensiven Abstimmung - und besonders in langfristigen Partnerschaften - gemeinsam durch die Partnern definiert. In Folge wandelt sich der firmeninterne Entwicklungsprozess zunehmend in einen kollaborativen Entwicklungsprozess. Zunehmend seltener wird der interne Entwicklungsprozess durch spezielle Kollaborationsprozesse ergänzt, welche die Abstimmung zwischen den Partnern regelt.

Neben dem allgemeinen Wandel der kollaborativen Produktentwicklung wurde auch die IT-Unterstützung als eine der zentralen Herausforderungen betrachtet. Über alle Systemkategorien hinweg fordern die Befragten eine stärkere Integration der Tools um die Anwendungsfreundlichkeit zu erhöhen.

Weiterhin zeigt sich die Informationslogistik als häufiger Reibungspunkt zwischen den Entwicklungsbeteiligten. Es scheint eine virtuelle Unternehmensgrenze als praktisch unüberwindbare Barriere zu bestehen. Die innerhalb der Unternehmen weitestgehend zufriedenstellende Durchgängigkeit einzelner IT-Systemen erreichen in Folge von harten Vorgaben in der IT-Sicherheit selten den Entwicklungspartner, sodass auf Schnittstellensysteme wie Web-Plattformen, FTP-Dienste, Clouds und E-Mails zum Datenaustausch zurückgegriffen wird.

4 Folgen für die Entwicklungsumgebung

In Folge des Wandels der gemeinschaftlichen Produktentwicklung verändert sich auch die Entwicklungsumgebung des Ingenieurs. Im industriellen Kontext werden dabei zu häufig,

wie oben dargestellt, Prozesse und IT-Werkzeuge getrennt voneinander betrachtet und entwickelt. Mit der steigenden Bedeutung der Prozesse für die Koordination der gemeinschaftlichen Entwicklung steigt gleichzeitig das Risiko, dass diese Vorgaben aufgrund unzureichender oder schlecht abgestimmter IT-Werkzeuge nicht umsetzbar sind. Um Unternehmen einen ganzheitlichen Lösungsansatz zu bieten, wird in einer Kollaboration vom Fraunhofer IPK und der TU Berlin ein Modell zur Beschreibung des Entwicklungsumfelds, das Engineering Operating System (EOS) entwickelt (vgl. Bild 1). Dessen Basis ist die notwendige Abstimmung von verfügbaren IT-Systemen, deren Artefakte (CAD Modelle, Anforderungslisten, etc.) und zugrundeliegender Prozesse um die Entwicklungsaktivitäten zu ermöglichen. Das Mengenmodell spiegelt die unterschiedlichen Randbedingungen in einem Entwicklungsumfeld wieder und stellt anschaulich die Schnittmengen dar, in welchen Planungs- und Abstimmungsbedarf besteht. Dabei werden durch die Unterscheidung spezifische Sichten auf Prozesse, IT-Bebauung und Informationsflüsse unterstützt um die beteiligten Fachleute bestmöglich zu unterstützen und gleichzeitig die Wechselwirkungen aufzuzeigen.

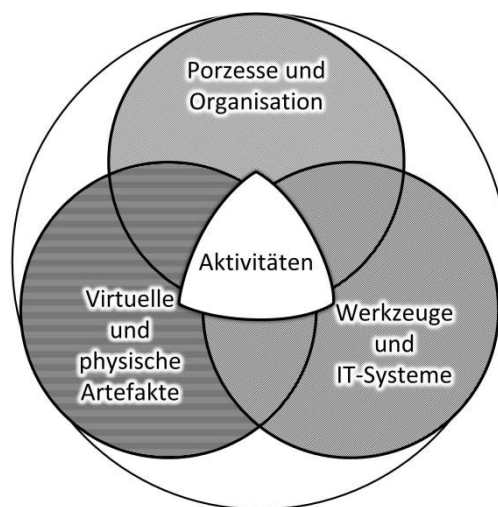


Bild 1: Beschreibungsmodell der Entwicklungsumgebung

Im Rahmen einer Kollaboration werden die prozessualen Vorgaben intensiver abgesprochen, dem müssen vor allem auch die verwendeten IT-Systeme und Artefakte der Entwicklungsumgebungen der beteiligten Unternehmen folgen. Die Erfahrung aus Industrieprojekten zeigt jedoch, dass dieser Notwendigkeit häufig durch intensiveren Personaleinsatz, oder durch die bewusste Nichtverfolgung der Prozessvorgaben begegnet wird. Letzteres bedingt, bei zunehmender Bedeutung der Prozessabsprachen jedoch

zwangsläufig Unstimmigkeiten oder weitere Mehraufwände in den Entwicklungsprojekten aller beteiligten Partner.

Folgt man den Trends der agilen Produktentwicklung und der Open Source Produktentwicklung, verändert sich die Vorgehensweise in kollaborativen Entwicklungen deutlich. Im Falle der agilen Produktentwicklung wird das statische, wasserfallartige Prozessmodell durch eine hochiterative Lösungsfindung mit starker Kundeneinbindung ersetzt [3]. In Folge müssen Koordination und Kommunikation deutlich intensiver erfolgen. Die einregulierte Einbindung von externen Entwicklern, im Sinne eines Open Source Ansatzes, löst die Prozessorientierung vollständig auf, da sich die freie Entwicklung sich beteiligender Personen nicht aus dem Unternehmen heraus steuern lässt [4]. Gleichzeitig bedarf es ausgereifter Schnittstellen um der hohen Heterogenität möglicher Softwarelösungen und verschiedenste Datenformate der freien Entwicklungsteilnehmer zu begegnen, da bei einem derart offenen Ansatz eine Vorgabe von zu verwendenden IT-Systemen nicht möglich sein wird.

Während die Vorgabe von Entwicklungsprozessen und zu verwendenden -werkzeugen (CAD, CAE etc.) in der Praxis der kollaborativen Entwicklung bereits erfolgt, fehlt es, wie die Studie zeigt, häufig an einer Integration der IT-Infrastruktur (PDM/PLM-Systeme, ERP-Systeme, Projektmanagement-Systeme etc.) in der Kollaboration. In Folge entstehen Mehraufwände in der Informationslogistik und Koordination. Alternative, stark anpassbare IT-Architekturen würden die Einbindung der Entwicklungspartner deutlich vereinfachen und gleichzeitig die Durchgängigkeit der Informationsflüsse fördern.

5 Folgen für die informationstechnische Unterstützung

Die informationstechnische Unterstützung der kollaborativen Entwicklung steht besonders vor zwei Herausforderungen: zum einen muss die Informationsdurchgängigkeit über die Unternehmensgrenzen hinaus gewährleistet, zum anderen die Anwendungsfreundlichkeit stabilisiert bzw. erhöht werden. Die Informationsdurchgängigkeit wird vor allem durch weitestgehend abgeschlossene IT-Systeme limitiert [5]. Der eigentlich wünschenswerte Zustand ad hoc verfügbarer Daten wird derzeit durch schlecht dokumentierte und mühsam anzuwendende Programmierschnittstellen (application programming interface, API) blockiert. Um dieses soweit möglich zu umgehen bieten Agenten-Architekturen (Bild 2) effektive Möglichkeiten, die derzeit durch das Fraunhofer IPK und die TU Berlin untersucht werden.

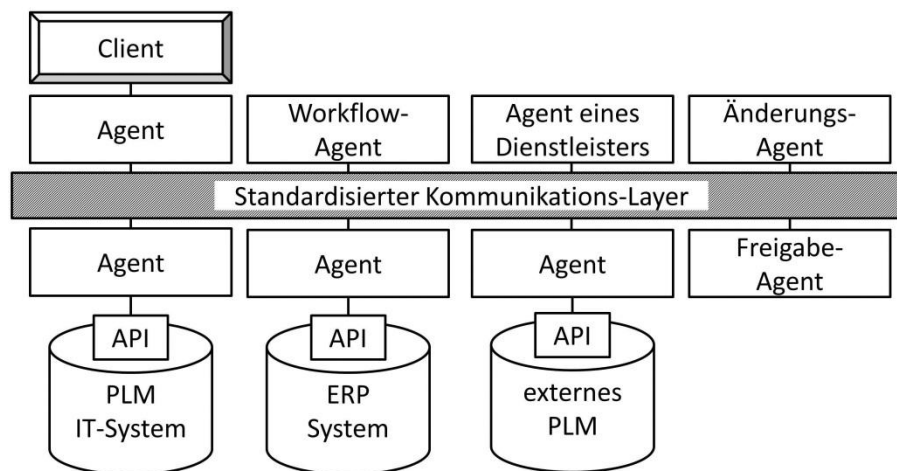


Bild 2: Einsatz von Agenten in der IT-Unterstützung

Agentensysteme lassen sich mit dem Aufbau von Bienenstaaten vergleichen. Verschiedene notwendige Aufgaben werden auf spezialisierte Individuen verteilt und sind gegenseitig aufeinander angewiesen um ihre Aufgaben zu erfüllen, die Individuen kommunizieren miteinander um die Aufgaben zu verteilen und das System zu bedienen. Im Fall von Agenten ermöglichen die hoch standardisierten Schnittstellen in Kombination mit der Verteilung von Funktionen auf mehrere Agenten eine wesentlich vereinfachte Anpassung auf bestehende IT-Systeme. So können beispielsweise verschiedene PLM-Systeme und ERP-Systeme (auch in unterschiedlichen Unternehmen) miteinander Daten austauschen, Änderungen melden oder Freigaben vermitteln. Perspektivisch können auf Basis der Agentenarchitektur auch weitere Funktionen bereitgestellt werden (bspw. Data-Mining Algorithmen [6], Zeichnungsableitungen, Workflow-Management [7]). Diese Funktionen können, aufgrund der standardisierten Kommunikation zwischen den Agenten auch durch dritte im Rahmen datenbasierter Services bereitgestellt werden [8] (bspw. FEM-Simulationen). Schließlich können auch Verwaltungsaktivitäten (Freigabeprozesse anstoßen, Einpflege in Produktstrukturen), die bislang durch die Ingenieure erfolgen, von den Agenten übernommen werden und Entscheidungsunterstützungen durch die Agenten gewährleistet werden (bspw. formale Prüfungen).

Die Besonderheit der Agenten ist ihre hohe Eigenständigkeit und Zielorientierung, die Lernfähigkeit und aufgrund der hoch standardisierten Frameworks (bspw. KQML, CORBA) gute Kommunikationsfähigkeit. Agenten können sich auch gegenseitig aufrufen, sodass auch komplexe Aufgaben in kaskadierten Ablauffolgen erfüllt werden können.

Für die Anwendungsfreundlichkeit bietet die Agentenarchitektur ebenfalls neue Möglichkeiten. So können gezielt notwendige Informationen, die bislang in verschiedenen Systemen zusammengesucht und manipuliert wurden, auf einem Interface integriert werden und hoch spezifische Benutzeroberflächen gestaltet werden [9]. Einen Ansatz für die intersystemische Kommunikation und Datenbereitstellung zeigt die eCenter Suite [9]. Diese serviceorientierte Architektur basierte Integrationsplattform vereinheitlicht die Datenbereitstellung und ermöglicht einen Datenaustausch über IT-Systemgrenzen hinweg. Grundlage für diese Agenten-Architektur sind jedoch unter anderem neue Sicherheits- und Rollen-/Rechtestrukturen zum Schutz des unternehmerischen und geistigen Eigentums, welche eine hoch dynamische Berechtigungsverwaltung ermöglichen. Ferner muss die notwendige Leistungsfähigkeit eines stark verteilten Systems durch die Netzinfrastruktur und die verwendeten Server sichergestellt werden.

6 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die unternehmensübergreifende Entwicklung intensiver werden wird und sich in Folge die Entwicklungsumgebungen anpassen müssen. Dies betrifft einerseits die integrierte Abstimmung der Prozesse mit den verwendeten IT-Werkzeugen und andererseits die bereits begonnene disruptive Veränderung der Ausrichtung auf eine intensivere Prozesssteuerung bei den Entwicklungspartnern. Der EOS- Ansatz stellt dabei die wesentlichen, abzustimmenden Teilmengen des Entwicklungsumfelds in Beziehung um die Entwicklungsaktivitäten ganzheitlich zu ermöglichen. Gleichzeitig zeigt die unzureichende Datendurchgängigkeit zwischen Entwicklungspartnern, dass die bestehenden IT-Systeme nicht auf die intensiv kollaborative Entwicklung vorbereitet sind. Die zunehmende Digitalisierung des Entwicklungsumfelds und der Produkte verlangt jedoch eine hohe Verfügbarkeit der Informationen für die eine Agenten-Architektur eine evolutionäre aber auch vielversprechende Lösung darstellt. Ferner stellt sie auch eine gute Grundlage für die voranschreitende Digitalisierung, die Integration von datenbasierten Services und die Applikation der Datenanalytik auf die Smart Data des Engineerings dar.

Literatur

- [1] Müller, Patrick; Pasch, Florian; Drewinski, Roland; Hayka, Haygazun: *Kollaborative Produktentwicklung und digitale Werkzeuge*. Bremen, Berlin, Düsseldorf: 2013. – ISBN 978-3-00-039111-8
- [2] Lünemann, Pascal; Müller, Patrick; Neumeyer, Sebastian; Wang, Wei-Min; Hayka, Haygazun; Kirsch, Lukas: *Zukunft der unternehmensübergreifenden Kollaboration*. Bremen, Berlin, Düsseldorf: 2016. – ISBN 978-3-945406-06-9
- [3] Wagner, Stefan: *Scrum for cyber-physical systems: a process proposal* in RCoSE 2014 Proceedings of the 1st International Workshop on Rapid Continuous Software Engineering, Seiten 51-56. ACM New York USA: 2014. ISBN 978-1-4503-2856-2
- [4] Hoyer, Wayne D.; Chandy, Rajesh; Dorotic, Matilda; Krafft, Manfred; Singh, Siddharth S.: *Consumer Cocreation in New Product Development* in Journal of Service Research August 2010 vol. 13 no. 3 283-296
- [5] Meier, Horst; Uhlmann, Eckart: *Integrierte Industrielle Sach- und Dienstleistungen*; Berlin Heidelberg: Springer 2012. ISBN 978-3-642-25268-6
- [6] Chemchem, Amine; Drias, Habiba: *From data mining to knowledge mining: Application to intelligent agents* in Expert Systems with Applications 42 (2015) 1436–1445
- [7] Hsieh, Fu-Shiung; Lin, Jim-Bon; *A self-adaptation scheme for workflow management in multi-agent systems* in Journal of Intelligent Manufacturing 27 (2016) 131-148
- [8] Kaufmann, Timothy: *Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge*; Springer Fachmedien Wiesbaden 2015. ISBN 978-3-658-10271-5
- [9] Ecs: *eCenter Suite* abgerufen von: http://www.ecs-gmbh.de/de/produkte.html?file=files/ecs/pdf/Produkte_Products/eCenter%20Suite/eCenter_Suite_Broschuere_DE.pdf am 19.07.2016